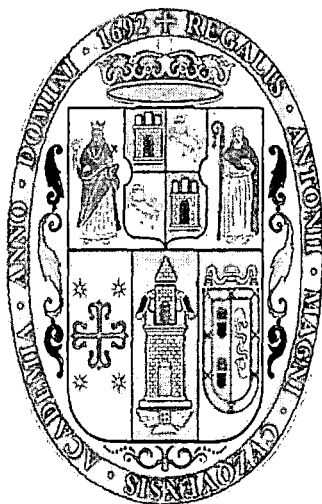


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS FINANCIADA POR LA UNSAAC

**“ESTUDIO DE LOS MORTEROS DE LA PORTADA PRINCIPAL
DE LA CATEDRAL DEL CUSCO”**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil.

PRESENTADO POR:

- Bach. JORGE LUIS AQUEHUA TARCO.
- Bach. JULIO CÉSAR SUCASACA RODRÍGUEZ.

ASESOR:

Mgt.Ing. IGNACIO FRUCTUOSO SOLIS QUISPE.

CUSCO-PERÚ

2015



INDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	1
1.1 TÍTULO.....	1
1.2 ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.3 AUTORES:.....	1
1.4 INSTITUCIÓN.....	1
1.5 LOCALIZACIÓN.....	1
CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN.....	3
2.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA.....	4
2.4 LIMITACIONES Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	6
3.1 RECOPIACIÓN HISTÓRICA.....	6
3.1.1 La mampostería y morteros en el Perú y el mundo.....	6
3.1.2 Los Aglomerantes en el Perú.....	13
3.1.3 Aglomerantes.....	14
3.1.4 La Catedral del Cusco.....	21
3.1.5 Descripción de la Portada.....	23
3.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	34
3.3 BASES TEÓRICAS Y DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	37
3.3.1 Conservación.....	37
3.3.2 Restauración.....	37
3.3.3 Reconstrucción.....	38
3.3.4 Aglomerante.....	38
3.3.5 Mortero original.....	38
3.3.6 Mortero de cemento en restauraciones.....	39
3.3.7 Mortero de restauración.....	39
3.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	40
3.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO.....	41
3.6 OBSERVACIONES.....	41
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	42



4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
4.3 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	42
4.3.1 Determinación estadística de la población y de la unidad muestral.....	42
4.3.2 Selección y tamaño de la muestra.....	43
4.3.3 Procedimiento técnico de muestreo.....	46
4.4 CANTERAS ESTUDIADAS.....	52
4.5 CALES ESTUDIADAS.....	57
4.5.1 Cal de Obra Hades.....	57
4.5.2 Cal Hidráulica "Comacsa".....	58
CAPÍTULO V ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	60
5.1 DISEÑO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	60
5.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO ORIGINAL.....	60
5.2.1 Difracción de Rayos X.....	61
5.2.2 Análisis Químico elemental.....	75
5.2.3 Granulometría del agregado.....	79
5.2.4 Otros ensayos.....	83
5.3 CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS PROPUESTOS DE RESTAURACIÓN.....	91
5.3.1 Compresión Axial no confinada.....	92
5.3.2 Adherencia.....	102
5.3.3 Permeabilidad.....	108
5.3.4 Durabilidad.....	112
5.3.5 Otros ensayos.....	118
5.4 COMPROBACIÓN DE VARIABLES.....	120
5.5 ELECCIÓN DEL MORTERO DE RESTAURACIÓN.....	120
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
6.1 CONCLUSIONES.....	122
6.2 RECOMENDACIONES.....	123
6.3 BIBLIOGRAFÍA.....	124
6.4 ANEXOS.....	126



DEDICATORIA

A la memoria de mi madrecita

Paulina, quien desde el cielo me ilumina

Permanentemente para lograr mis metas.

Con profundo cariño y reconocimiento para mi

Querido padre Jorge, mis hermanos Katya,

Leyshan y Dayana por el apoyo que me brindaron.

A mi familia por su inmenso cariño y

Constante apoyo para hacer realidad

Uno de mis grandes sueños.

A mi compañero de tesis Julio, a mis compañeros

Del código 2010-I y amigos de la Universidad,

Pues ellos siempre están presentes en los grandes

Momentos de mi vida.

Jorge Luis.



*A mi familia por su ejemplo, cariño y por
Estar siempre presente en los grandes
Momentos de mi vida.*

*A mis padres: Amparo y Angel por su inmenso
Cariño y valioso apoyo en mi vida de personal y
De estudiante.*

*A mi hermano: Cristian, por su amor,
Cariño y apoyo incondicional.*

*A mi compañero de tesis: Jorge, a mis compañeros
Y amigos por su apoyo emocional en el desarrollo
De este trabajo de investigación.*

Julio César.



AGRADECIMIENTO

A nuestro Dios a quien guía el camino de la vida que con su espíritu y misericordia nos conforta a seguir adelante.

Expresar nuestro sincero reconocimiento y gratitud a nuestro asesor Mgt. Ing. Ignacio Fructuoso Solis Quispe, al Ing. Jose Felipe Azpilcueta Carbonell y a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por la labor que desempeñan en la formación y aplicación de los conocimientos teórico-práctico, impartidos en las aulas universitarias.

Al Monseñor Juan Antonio Ugarte Perez. y al área de Arquitectura e Ingeniería del Arzobispado del Cusco, por el apoyo brindado durante el desarrollo de la tesis.



RESUMEN

La Catedral del Cusco estuvo expuesta a deterioro desde los inicios de su construcción. En primer lugar, los fenómenos naturales como los movimientos sísmicos que causaron daños¹ en su estructura y materiales; los abruptos cambios de temperatura propios de climas andinos, y las lluvias ácidas² producto de la contaminación de la ciudad del Cusco por su acelerado proceso de urbanización reciente, han generado deterioro y daño en su estructura y materiales. Los factores biológicos, que a lo largo del tiempo fueron entrando en escena como la presencia de arraigamientos de plantas, líquenes y musgos; así también como aves de la familia de las columbidas³ contribuyen al deterioro ya citado. Finalmente se tiene que mencionar el factor humano presente en todo momento, cuyo poco conocimiento sobre el campo de la conservación le impide actuar adecuadamente, maltratando el patrimonio histórico (clavando sobre el material lítico, rayando, ensuciando, etc)

A lo largo de este tiempo se realizaron Intervenciones⁴ a las esculturas, pinturas, retablos, bóvedas, pilares, pisos, drenajes, estructuras, etc, mediante restauraciones y reconstrucciones parciales de manera tanto técnica como empírica⁵, usando obreros especialistas en restauraciones, restauradores de obras de arte, así también como materiales, rocas, arenas, dosificaciones de mortero, relación agua/conglomerante, etc que se supusieron ser parecidas a las originales. Muchas de las cuales no fueron documentadas⁶ a detalle técnico.

Uno de los materiales constructivos de gran importancia usados en la Catedral del Cusco es el mortero de cal, dado que este material es el ligante principal entre los bloques de piedra de la Portada y fue usado tradicionalmente basada en la escuela Europea de la época.

La portada Principal de la Catedral del Cusco, al igual que toda la edificación, requiere de una cuidadosa y poco invasiva restauración, debiéndose tener un conocimiento adecuado de sus componentes y materiales originales, con la finalidad de que exista mínima diferencia entre la etapa previa y posterior al proceso de restauración. Sin embargo existen pocos

¹ El más sismo que causo mayor daño fue el de 1950. Afectando las bóvedas concluidas en 1654. Harvey V. Armando, Trilogía Divina (2014)

² Presencia de SO₂ y NO₂ en la atmósfera que se transmite a través de la lluvia. La lluvia ácida tiene un Ph menor de 5.65

³ Palomas que tienen sus nidos sobre las cornisas y pedestales en zonas altas de la Portada Principal.

⁴ La más reciente documentada es la restauración integral de la Basílica Catedral del Cusco con la participación de Telefónica del Perú y el Arzobispado del Cusco de, 1997 a 2002.

⁵ Sin fundamento científico.

⁶ En el libro Tesoros de la Catedral se menciona: "...se repuso por un mortero nuevo de similares características..."



documentos técnicos y estudios sobre los componentes y materiales originales por lo que un estudio de estos es necesario, principalmente de los morteros, ya que este material es más complejo que la roca ígnea usada (Andesita y Diorita)⁷ debido a sus diferentes características propias como son: el material aglomerante usado, los áridos, las proporciones en las que fueron dosificadas, etc. que influyen en el comportamiento de la mampostería de piedra en general.

Este proyecto de investigación es de tipo semiexperimental y cuantitativo, y consiste en hallar una dosificación óptima para uno o más morteros de restauración para la Portada Principal de la Catedral del Cusco, sustentados en la caracterización de las propiedades físicas, químicas mecánicas y estéticas⁸ de los morteros originales.

La metodología del proyecto de investigación consiste en obtener muestras de mortero en diferentes ubicaciones de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, con la debida autorización del Arzobispado del Cusco y la Dirección Desconcentrada de Cultura del Cusco. Someter estas muestras a ensayos de caracterización de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y estéticas como son: Difracción de Rayos X, Análisis Químico, medidas granulométricas para las dosificaciones, distribución de tamaños de los áridos, entre otros estudios.

Y desarrollar alternativas de morteros de restauración, los cuales serán evaluados en sus características más importantes⁹ que son la resistencia a la compresión, adherencia, permeabilidad, durabilidad, rapidez en su colocación, fácil trabajabilidad, color compatible, etc.

⁷ Tomada de informe final "Estudio de los efectos de los contaminantes atmosféricos en los monumentos líticos y patrimonio cultural pictórico de la ciudad del Cusco, Díaz V. Teresa de Jesus (2006) Cusco

⁸ Color y textura.

⁹ Características que debe cumplir un mortero de restauración. Cazalla V. Olga, Morteros de Restauración y Morteros Antiguos. Técnicas de estudio.



CAPÍTULO I

GENERALIDADES.

1.1 TÍTULO.

“Estudio de los morteros de la Portada Principal de la Catedral del Cusco”.

1.2 ÁREA DE INVESTIGACIÓN.

El trabajo de investigación se realizará en la línea de Construcciones.

1.3 AUTORES:

Aquehua Tarco, Jorge Luis

Sucasaca Rodríguez, Julio César

1.4 INSTITUCIÓN.

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

Facultad de Ingeniería Civil

Carrera profesional de Ingeniería Civil.

1.5 LOCALIZACIÓN.

REGION: CUSCO

PROVINCIA: CUSCO

DISTRITO: CUSCO

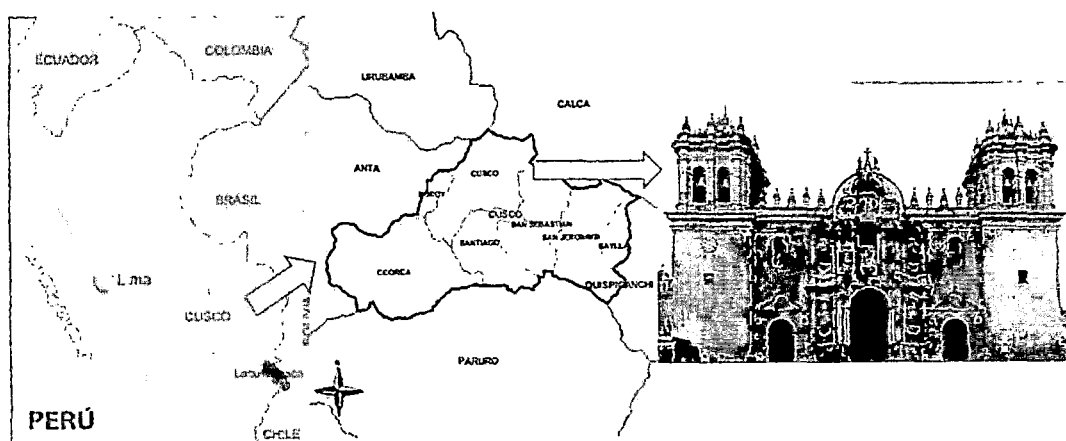


Figura 1. Localización del objeto de investigación.



CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

2.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

La Catedral del Cusco es una edificación histórica que se empezó a construir en el año 1559 d.c. en varias etapas; la estructura se encuentra encima de un galpón incaico perteneciente al Palacio del Inca Wiracocha, formada por tres templos unidos entre si, y estos a su vez formados por muros de mampostería, pilares, bóvedas edificadas con piedra Andesita y mortero de cal y arena. Este edificio sufrió daños moderados y severos durante los sismos de 1650, 1707, 1950, 1986 y 1991 por lo que se debieron realizar por lo menos cinco proceso de reconstrucción parcial o rehabilitación durante su vida útil.

Las restauraciones y reposiciones de los morteros en las estructuras de mampostería y pilares de la Catedral del Cusco se realizaron en base a suposiciones de la dosificación cal:arena 1:3+(%cemento)¹⁰. Sin embargo esta dosificación trae como consecuencia la incompatibilidad con otros materiales que en este caso son la piedra y los morteros originales existentes no restaurados.

La Portada Principal de la Catedral del Cusco es la estructura más sobresaliente a primera impresión cuando se ve la Catedral, por lo que su restauración debe ser cuidadosa y lo menos invasiva posible cumpliendo los principios internacionales existentes, además se debe realizar un estudio adecuado de sus componentes originales, con la finalidad de que exista mínima diferencia entre ambas etapas anterior y posterior al proceso de restauración.

En la actualidad no se conoce con exactitud la cantidad de restauraciones realizadas en la Catedral del Cusco, y específicamente en la Portada Principal ni los sectores precisos en los que estos se hicieron, además el acopio de la poca información disponible es dificultosa, por lo que se tiene la necesidad de un estudio nuevo y profundo de las características de estos materiales, y en especial de los morteros usados originalmente.

¹⁰ Evaluación de la vulnerabilidad de la Catedral del Cusco (2001)



Es entonces así como se ha detectado que los estudios de los morteros usados específicamente en las “restauraciones” pasadas de la Portada Principal de la Catedral del Cusco así como su documentación, son escasos. Por tal motivo estudios de este tipo son necesarios para una intervención futura.

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco se ha distinguido por su papel de ente desarrollador de investigación y formador de profesionales, es por esta razón por la cual se encuentra inmersa también en este rol y ha comprendido que ésta tarea implica un permanente contacto con el entorno nacional y un gran conocimiento de la naturaleza de los problemas que se dan en el sector de las intervenciones y restauraciones de edificios históricos, a fin de poder brindar soluciones que tiendan a mejorar la calidad de estas.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN.

Las intervenciones y reposiciones que en el pasado se realizaron en la Portada Principal de la Catedral del Cusco presentan escasos estudios sobre las características propias de los materiales usados, es decir, no se tienen datos sobre la composición y dosificación de los morteros originales, usándose así una dosificación aproximada 1:3 cal:arena más un porcentaje de cemento y arcilla, que no representa exactamente a los morteros originales y además con el posible riesgo de ser una mezcla agresiva y no compatible con estos.

Por tal razón, las características de la situación problemática son la falta de conocimiento de la composición del mortero original con fines de elaboración de un mortero de reparación óptimo y una futura reposición de este material en la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

Entonces la formulación del problema general es ¿Cuáles son las características de las propiedades físicas, químicas, mecánicas y estéticas del mortero original usado en la construcción de la portada Principal de la Catedral del Cusco con el fin de proponer un adecuado mortero de restauración?.



2.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA.

El deterioro de los morteros originales debido a fenómenos naturales (sismos, cambios de temperatura, lluvias ácidas, etc.), factores biológicos (arraigamientos de plantas, aves, etc.), el factor humano, el mismo hecho de su antigüedad y el uso de inadecuados morteros modernos, generó daño en la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

Por ello el estudio que se realizará al mortero original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco es muy importante ya que nos servirá para intervenir y ejecutar futuras reposiciones de zonas que se encuentren dañadas y esto a la vez se podrá aplicar a estructuras similares o de parecida composición en otros sectores de la Catedral.

2.4 LIMITACIONES Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.

Limitaciones:

Los resultados de la investigación estarán limitados al estudio de los morteros ubicados en la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

Viabilidad:

- Se conseguirán los permisos correspondientes para la obtención de muestras de los morteros de la Portada Principal de la Catedral del Cusco mediante aprobación del Arzobispado del Cusco y el Ministerio de Cultura Cusco.
- Se usarán los equipos disponibles en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco para realizar los ensayos correspondientes, así también como ensayos en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima.
- Además se dispone de recursos humanos necesarios para realizar esta investigación.



2.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Generales.

- Caracterizar los morteros originales usados en la construcción de la Portada Principal de la Catedral del Cusco para proponer un mortero de restauración y usarlo en intervenciones posteriores.

Específicos.

- Conocer la dosificación del mortero utilizado para la construcción de la portada principal de la Catedral del Cusco.
- Conocer los materiales que interactúan con el mortero en estudio.
- Desarrollar alternativas de morteros para el uso en futuras intervenciones en la portada principal de la Catedral del Cusco.



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.

3.1 RECOPIACIÓN HISTÓRICA.

Se hace una mención de los principales hechos históricos y la evolución de la mampostería y en especial de los morteros usados en ella, a lo largo de la historia.

3.1.1 La mampostería y morteros en el Perú y el mundo.

La historia de la humanidad va de la mano con su necesidad de tener lugar en donde protegerse de las inclemencias de la naturaleza. Desde épocas remotas el hombre ha buscado para ello, materiales accesibles que sean fáciles de utilizar y que proporcionen la mayor comodidad.

3.1.1.1 Prehistoria.

Es probable que la mampostería haya sido inventada por un nómada, hace unos 15,000 años. Cuando al no encontrar un refugio natural para protegerse de las adversidades de la naturaleza, decidió apilar piedras para formar un lugar dónde guarecerse; sin embargo, como la transmisión de técnicas o ideas era muy lenta o no ocurría, la “invención” seguramente tuvo que repetirse innumerables veces.

El proceso inmediato en el desarrollo de la mampostería debió ser la utilización del mortero de barro, el cual permitió no solo apilar, sino acomodar o asentar con más facilidad, y a mayor altura las piedras irregulares naturales. Este paso se dio, seguramente, cuando se comenzaron a integrar las primeras aldeas. Existen varios vestigios de poblados prehistóricos contruidos con piedras asentadas con barro, por ejemplo: las Islas Aran, en Irlanda, Catal Hüyük, en Anatolia e inclusive 10,000 años después por los incas en Ollantaytambo.

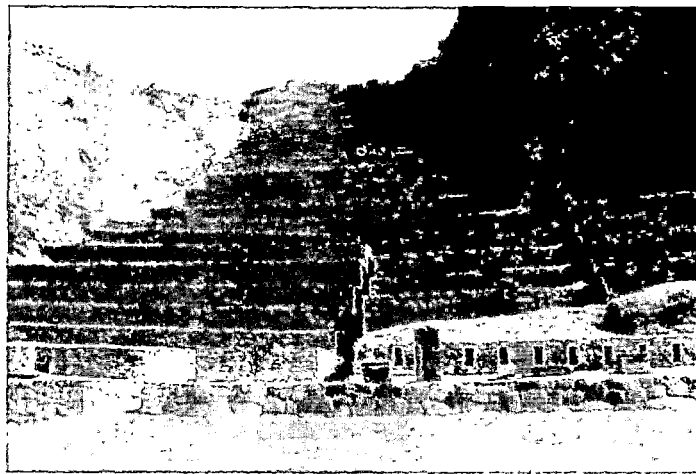


Figura 2. Ollantaytambo. Cusco-Perú (siglo XIV) Muros de piedra asentados y recubiertos con mortero de barro.

Se usaron unidades de mampostería fabricada por el hombre de masas de barro secadas al sol para sustituir a la piedra natural, debió ocurrir en lugares donde esta no estaba disponible. Algunos ejemplos de esto se dieron en muros construidos en Mesopotamia con una antigüedad de 7,000 años, y en la zona de la costa norte del Perú, en Huaca Prieta, con una antigüedad de 5,000 años.

3.1.1.2 Inicio de la Historia: Sumeria.

En el cuarto milenio a.c. los sumerios, considerados como iniciadores de la civilización y de la ingeniería, inventaron la ciudad, la irrigación, la escritura, los números, la rueda y el molde; siendo este último un avance sustantivo en la construcción de mampostería.

Para la construcción de la mampostería, el ladrillo era asentado con mortero de betún o alquitrán (sustancia abundante en el suelo del Medio Oriente) al cual se añadía arena. El primer templo de esta forma sumeria fue edificado en la ciudad de Uruk (2,900a.c.). Esta mampostería se convirtió entonces en el material fundamental de las construcciones más importantes y permitió alturas crecientes de los zigurats¹¹. Uno de estos zigurat conocido como la torre de Babel, fue construido en la ciudad de Ur (2,125 a.c.) con una base de 62x43m y una altura de 21m el cual tenía un núcleo de adobe y un forro de mampostería de 2.4m de espesor, hecho de ladrillos cerámicos asentados con mortero de betún al que se le incorporó refuerzos de tejidos de caña ya que estos estaban

¹¹ Torre escalonada indispensable en templos Sumerios.



sometidos a grandes esfuerzos, dotando a la mampostería una considerable resistencia a la tensión.

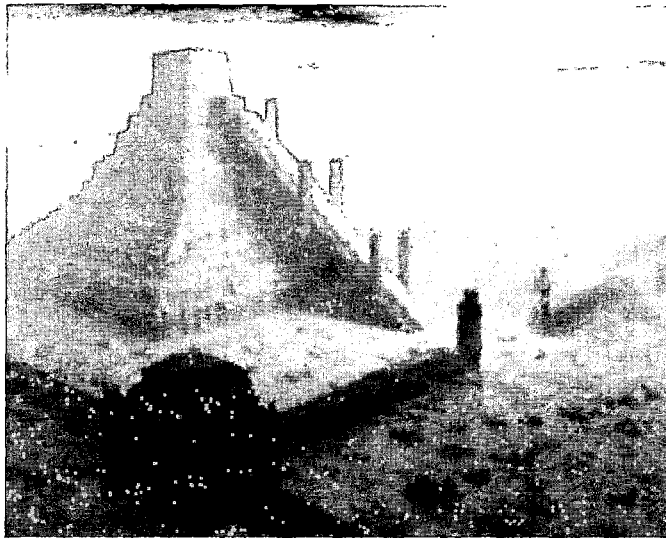


Figura 3. Zigurat o Torre escalonada.

3.1.1.3 Culturas antiguas de México.

Paralelamente a otras culturas en el mundo, las culturas antiguas de México erigieron estructuras imponentes usando mampostería. En general, la arquitectura mesoamericana es de piedra, con muy rara aparición del ladrillo y un frecuente uso del adobe.

En Los Olmecas (1,200a.c.) utilizaron para la construcción de La Venta muros hechos con bloques de barro rojo y amarillo unidos también con barro.

En Teotihuacán es común encontrar taludes escalonados y la construcción en barro revestido de piedra.

En el valle de México, durante el periodo preclásico (700a.c.) ya se utiliza la mampostería con 1diferentes fines, se construyeron muros de contención en laderas de cerros, formando terrazas escalonadas. Aparece el concepto de escaleras sencillas, rampas, corte de la piedra, recubrimiento de estuco, orientación de edificios, plomadas, pulidores de piso y muros, y en especial, el mortero de cal y arena.

3.1.1.4 Egipto y Grecia.

La materia prima para la fabricación de piezas de mampostería siempre ha estado determinada por las formaciones y condiciones geológicas de lugar donde va a ser utilizada.

En Egipto, por la época de Sumeria, se prefirió usar en las grandes obras la roca traída de las montañas a lo largo del Nilo, calizas, areniscas, granitos, basaltos y alabastros fueron explotados en las canteras locales. Estos grandes monolitos que pesaban cientos de toneladas, como los usados en las pirámides o incluso tallados directamente en la forma de columnas, vigas y losas, como en los templos de Luxor, eran asentadas con morteros de yeso y cal.

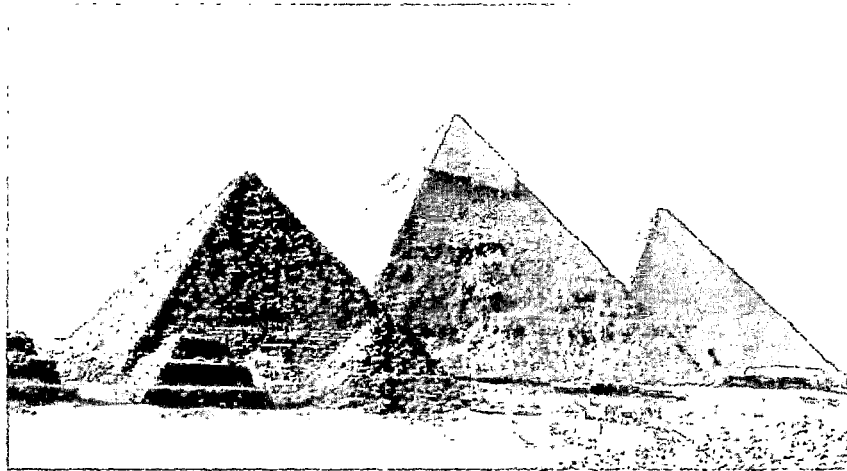


Figura 4. Pirámides de Egipto.

Grecia adoptó una arquitectura de lujo y de exteriores y, si bien carecía de las ricas canteras de Egipto, poseía los mejores mármoles para llevarla a cabo. Ellos sirvieron para revestir su gruesa mampostería de piedra caliza asentada con morteros de cal.

3.1.1.5 Roma.

En algunas obras los romanos utilizaron piedra importada de las mejores canteras egipcias y mármol griego; en la mayoría de los casos emplearon la piedra de sus depósitos de caliza, travertino, tufa volcánica, y la tecnología sumeria de la mampostería de ladrillos de arcilla. A esta tecnología aportaron una nueva racionalidad constructiva y la invención del mortero de cemento y del concreto.



La nueva racionalidad consistió principalmente en el desarrollo de diferentes sistemas para la construcción de muros, que eran más económicos y fáciles de levantar, particularmente empleando el nuevo mortero de cal al cual incorporaron de acuerdo al relato de Vitruvio (25a.c.) “una clase de polvo que por causas naturales produce resultados asombrosos”. Se le encuentra en la vecindad de la Baia y Putuoli y en los alrededores del monte Vesubio. Esta sustancia, cuando es mezclada con cal o piedras, no solamente provee resistencias a construcciones sino que cuando se construye pilares en el mar endurece bajo el agua.

El compuesto de las tres sustancias (aglomerante hidráulico, agregado grueso y agua) descrito por Vitruvio es lo que hoy llamamos concreto. El aglomerante hidráulico, pariente cercano de los cementos puzolánicos modernos, se elabora mezclando dos partes de la “arena” volcánica (muy fina, de color chocolate), con una parte de cal, es decir, es decir en una proporción de 1 a 2. Los óxidos de sílice finamente pulverizados, contenidos naturalmente en la puzolana, reaccionaban químicamente con el hidróxido de calcio (cal) en presencia del agua, para formar los componentes básicos de un aglomerante hidráulico

Si bien los romanos no sabían por qué la “arena” de Putuoli daba un resultado distinto y superior a la convencional, la aplicaron sabiamente en sus grandes construcciones portuarias, urbanas, viales e hidráulicas, tanto para asentar piedras o ladrillos formando mampostería, como para elaborar concreto añadiendo piedras.

El muro romano de las construcciones públicas era tradicionalmente de mampostería de piedra natural o de ladrillos cerámicos asentados con mortero de cal, y en los muros más gruesos, el espacio entre dos muros delgados de mampostería era rellenado con pedacería de ladrillos o piedras acomodadas con mortero de arena y cal. En ambos casos el proceso de endurecimiento de estos morteros se producía únicamente por medio de la carbonatación de la cal y la ganancia de resistencia era muy lenta. La invención del mortero de cemento permitió a los romanos un sustantivo incremento en la rapidez de construcción, lo que no se hubiera conseguido con morteros que solo tenían cal.

Una de las más notables obras romanas frutos de la revolución del mortero y del concreto es el Panteón (construido entre 27 a.c. y 118 d.c.) el cuál es un edificio circular



de mampostería y concreto con acabado de ladrillo en las paredes exteriores y mármoles en el interior, cubierto con un gran domo de concreto.

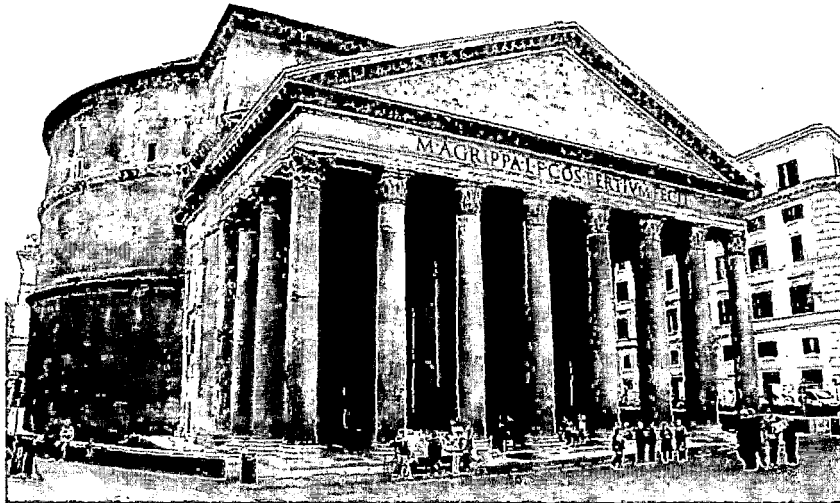


Figura 5. El panteón

3.1.1.6 Del siglo V al siglo XIX

Después de Roma, el avance de la tecnología de la mampostería en Europa se detiene por varios siglos, los morteros de cemento y el concreto desaparecen, perdiendo su tecnología, siendo rescatada trece siglos después por Smeaton, el fundador de la ingeniería civil, quién en 1756 reconoció la necesidad de usar en Inglaterra una mezcla de cal y puzolana italiana, después de una serie de experimentos descubrió que calcinando (en la forma que se usaba entonces) las margas del Támesis (calizas impuras) y añadiendo una pequeña proporción de arcilla, obtenía una cal viva que, apagada, endurecía bajo el agua, a la que denominó cemento romano.

En 1796, se patenta el “cemento romano” que era estrictamente hablando una cal hidráulica.

Por la misma época, Vicat realizó en Francia trabajos de investigación muy meritorios, sobre las calces hidráulicas, y en 1816 construyó el primer puente con el llamado cemento romano, sobre el río Dordoña.



Se alcanzó una arquitectura de equilibrio, empleando mampostería de arcilla o piedra con juntas gruesas de morteros de cal, reemplazando el arco sumerio y romano de medio punto por el arco apuntado gótico y la bóveda de crucería, dando mayor estabilidad de compresión en todas sus secciones y elementos.

En 1824 se patenta el cemento Portland.

3.1.1.7 La Mampostería en el Perú.

En cuanto al Perú, los primeros rasgos de albañilería se conocen en Huaca Prieta (5000 años de antigüedad) del tipo adobe, desarrollándose igualmente en las culturas posteriores. El ladrillo no se fabrica localmente, se trae como lastre en los barcos que en su viaje de vuelta trasladarán el botín a España. Por ello la construcción es principalmente de unidades y mortero de adobe y caña hasta bien entrado el siglo XX.

La construcción del primer horno de cal en Arequipa, en virtud de la escritura celebrada entre Luis de León y el cantero Toribio de Alcaraz fue el 23 de enero de 1543. En la época de producción de cal se levantaron las iglesias, casonas y monumentos coloniales de Arequipa y del sur del país, siendo la producción de cal la base de la economía yureña¹². Un horno de cal es aquel que permite crear óxido de calcio mediante la calcinación de la piedra caliza, la reacción tiene lugar a 900°C

En 1856 se instaló una fábrica donde se moldearon casi siete millones de ladrillos de cerámica, la mampostería se elaboró con mortero de cal.

En la década de los 70 y los escasos resultados alcanzados hasta el año de 1982 se usaron en la elaboración del primer reglamento de albañilería ININVI-82.

3.1.1.8 Aditivos en morteros históricos.

Algunos autores como Hennig y Bleck 1968¹³, consideran que no existe fundamento alguno para la creencia persistente de que se adicionaron proteínas animales a los morteros medievales. Otros autores como Sickels, 1981; sin embargo, han realizado

¹² http://www.mincetur.gob.pe/TURISMO/OTROS/inventario%20turistico/Ficha.asp?cod_Ficha=6659

¹³ Historia de los Morteros (1995).



estudios comparativos entre los aditivos usados por los antiguos constructores, sobre los que no hay duda acerca de su empleo. Sickels se apoya en trabajos previos que atestiguan el empleo ya desde la antigüedad de aditivos orgánicos, desde goma Arábica o tragacanto en Rodas, albúmina de huevo, queratina y caseína como aditivos comunes egipcios; y por la época de Vitruvio, de jugo de higo, sangre, clara de huevo.

Alrededor del año 1200 d.c. parece comprobado el uso de cerveza, cera de abejas, huevos y clara, jugos de frutas, gluten, malta, arroz, azúcar, orina. Alrededor del año 1500 se usaron cerveza, cera de abejas, sangre, huevos y claras, jugos de frutas, gluten, goma arábica, malta arroz, azúcar y orina.

3.1.2 Los Aglomerantes en el Perú.

Se hace una breve mención de los aglomerantes usados en el Perú en orden cronológico, desde el más antiguo, el Yeso, hasta el cemento.

El yeso es uno de los aglomerantes más antiguos conocidos por la humanidad. Se le empleo en Egipto, para la construcción de las Pirámides, fue usado por los griegos, los romanos y los árabes. Los antiguos peruanos lo llamaban "pachach"¹⁴. Lo obtenían pulverizando groseramente las piedras yeseras cocidas, y cerniéndolo en trozos de género. No lo empleaban en empastados de muros o techos; sino mezclando con grava formaban una especie de concreto que les servía para rellenar muros formados por dos paredés de adobe.

En cuanto a la cal apagada, esta fue conocida en el periodo histórico que se denomina corrientemente "la antigüedad"; pero la cal hidráulica solo fue descubierta a principios del siglo XIX. En el Perú, a la piedra de cal se le llamaba "iscu"¹⁵, y los antiguos peruanos la obtenían quemando las calizas por el método de montón o huayronas, también para obtener cal quemada conchas moluscos, con leña y paja. En Quechua, "chancara" quiere decir "montaña de caliza"

¹⁴ Regal, A. Materiales de Construcción.

¹⁵ Regal, A. Materiales de Construcción.



Los antiguos peruanos mezclaban la cal con arena o con arcilla para obtener morteros que empleaban para revestimientos o tarrajeos y para construir muros rústicos de piedra no labrada.

Los hornos de cal se comenzaron a usar en Lima muy poco después de fundada la ciudad en 1535; y ya en 1549 se encontraba en pleno funcionamiento uno de estos hornos establecido en las vecindades del Cerro que años después, se llamó San Cristobal.

En los primeros años de la Republica la cal que se consumía en Arequipa procedía de una cantera llamada "Calera", en la quebrada del Yura. Es una piedra porosa con aspecto formada por tubitos pequeños y delgados; es de color blanquecino.

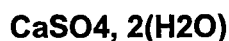
En 1860¹⁶, se inicia la introducción del cemento en el Perú. En 1869 se efectuaron las obras de canalización de Lima, utilizando este tipo de cemento. En 1902 la importación de cemento fue de 4,500 T.M. Posteriormente, en 1904 el Ingeniero Michel Fort publicó sus estudios sobre los yacimientos calizos de Atocongo, ponderando las proyecciones de su utilización industrial para la fabricación de cemento. En 1916 se constituyó Compañía Nacional de Cemento Portland para la explotación de las mencionadas canteras.

3.1.3 Aglomerantes.

3.1.3.1 Yeso

El yeso vivo, o simplemente yeso, es el producto resultante de la deshidratación parcial o total del mineral llamado piedra de yeso, piedra yesera o algez (La anhidrita CaSO_4 , selenita, alabastro). El yeso vivo reducido a polvo y amasado con agua recupera su agua de cristalización, o sea se cristaliza endureciéndose o fraguando.

La piedra de yeso es una roca sedimentaria formada por sulfato de calcio, cristalizada con dos moléculas de agua, su fórmula química es:



¹⁶ http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivos/curzoz/industria_peru_mgc12.pdf



3.1.3.2 Cemento Portland

Es un aglomerante hidráulico por excelencia el producto resultante de la pulverización muy fina de clinkers obtenidos calcinando a fusión incipiente una mezcla rigurosamente homogénea de materiales calcáreos y arcillosos. Después de calcinado, al Clinker no se le agrega más que agua y yeso. Fue patentado en 1824 por José Apsdin quién por el parecido de color que adquiere con la piedra de la localidad inglesa Portland, lo nombró así.

3.1.3.3 Cal

El producto resultante de la descomposición por el calor de las rocas calizas.

Se entiende por cal, aquellos productos que, sea cual fuere su composición y aspecto físico, proceden de la calcinación de piedras calizas y, en menor medida, de dolomías. EL origen de estos materiales es comúnmente sedimentario, pudiendo haber sufrido procesos más o menos intensos de metamorfismo.

3.1.3.3.1 Ciclo de la Cal.

Para entender la elaboración de los morteros de cal es necesario entender antes el ciclo de la cal. La producción de la cal se logra a partir de la calcinación de piedras caliza a altas temperaturas (por encima de 900°C), lo que produce la siguiente reacción:



Las técnicas de producción artesanal sitúan los bloques de piedra caliza molida en grandes hornos hechos de muros de ladrillos de arcilla para someterlos dentro de ellos a un proceso de calcinación constante por períodos de 8 a 12 días, usando como combustible trozos de madera. El resultado de la calcinación de la piedra caliza produce mayoritariamente óxido de calcio [CaO], también llamada cal viva.

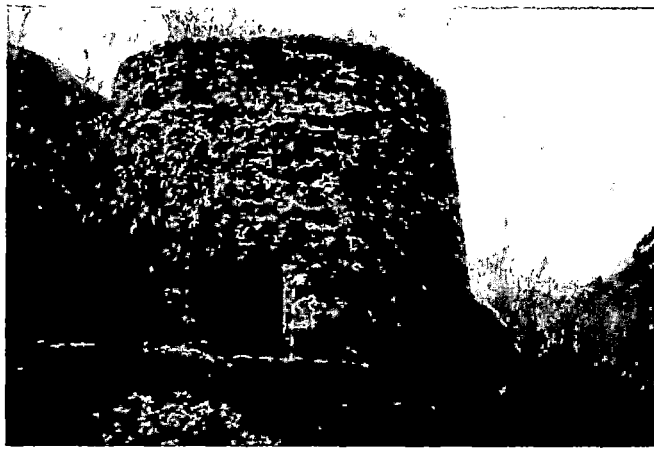
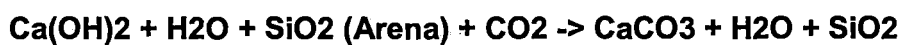


Figura 6. Horno de Cal.

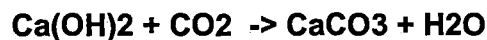
Cuando el proceso termina, la cal viva resultante es molida nuevamente y vaciada en pozos de piedra en donde se apaga con agua. Se produce entonces una segunda reacción química que convierte la cal viva en hidróxido cálcico o cal apagada (Bores, 1998):



Posteriormente para obtener el mortero de cal, la cal hidratada se mezcla con arena y agua en diferentes proporciones de tal manera que el hidróxido de cal después de dispuesto en la construcción reacciona con el CO₂ de la atmósfera, se carbonata y adquiere endurecimiento. En este proceso la reacción se indica de la siguiente manera:



Con esta última mezcla de hidróxido de cal con arena y agua se obtiene el mortero de cal. El mortero fragua cuando el exceso de agua se seca, y se endurece debido a la acción del dióxido de carbono de la atmósfera, proceso conocido como carbonización (Brostow, 1981), que se muestra en la siguiente reacción:



De esta forma se completa el ciclo de la cal el cual inicia y termina con el carbonato de calcio [CaCO₃].

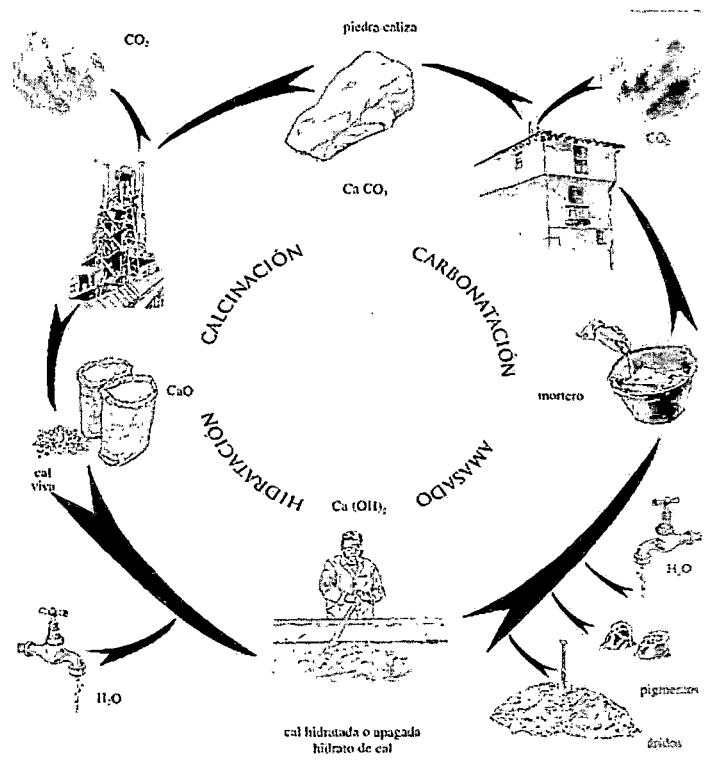


Figura 7. Ciclo de la cal.

La reacción de carbonatación es muy lenta, pues empieza a las veinticuatro horas de amasar la pasta y termina al cabo de los seis meses, por lo que las obras en que se emplean los morteros de cal tardan mucho en secarse y adquirir la solidez definitiva.

3.1.3.3.2 Composición genérica de los tipos de cal.

La cal común utilizada en construcción es la cal apagada pero existen diversas variantes de cal en función del grado de pureza de la roca caliza utilizada en su fabricación. Estas rocas no solo contienen calcita, en su composición también intervienen otro tipo de materiales (arcilla, óxido de magnesio, óxido de hierro y materias orgánicas) que hacen que la cal resultante tenga propiedades diferentes. Entre los principales tipos de cal se encuentran: La cal aérea y la cal hidráulica.

A Cal aérea (L): son aquellas que tienen la propiedad de endurecer mediante el contacto con el aire. Se obtienen a partir de rocas calizas con un máximo de 5% de arcillas y hasta un 5% como máximo del total de otras materias. El otro 90% se compone de calcita. La cal aérea es más fina y fácil de trabajar pero también menos resistente a la acción del agua; por eso casi siempre se usa para acabados. La cal aérea en sitios



húmedos permanece indefinidamente blanda y en el agua termina por disolverse. A esta categoría pertenecen la cal cálcica y la cal dolomítica.

Dentro de las cales aéreas se distingue entre cales grasas, con, como máximo 5% de MgO, y cales magras o dolomíticas, con, MgO > 5%.

B. Cal hidráulica: La cal hidráulica se obtiene por calcinación de calizas con contenidos de arcillas aproximadamente entre el 5% y el 25%, resultando un compuesto aglomerante que, además de cal viva, contiene silicatos y aluminatos. Debido a esas "impurezas", sólo una temperatura mayor a la de la calcinación tradicional de los hornos de leña (1200°C), la podría convertir en cal viva. La cal hidráulica aparte de buena trabajabilidad adquiere mayor resistencia a la compresión y una mayor resistencia inicial gracias a su endurecimiento rápido. Las cales hidráulicas se diferencian entre sí, si éstas deben su hidraulicidad a la composición natural de su materia prima (NHL) o si se han obtenido mediante la adición de componentes artificiales (HL).

1.- Cal hidráulica natural (NHL): provienen de la calcinación de calizas que contienen de un 5 a un 25% de arcilla que al cocerse le confieren su carácter hidráulico. Son esencialmente destinadas a la construcción y poseen mucha más resistencia que una cal aérea. Al calentar los minerales de arcilla presentes en la caliza, sufren modificaciones químicas y estructurales (deshidratación, descomposición y la formación de nuevas fases) transformando profundamente el material arcilloso original, dando lugar a la aparición de minerales de alta temperatura.

El impacto al tratar térmicamente una arcilla consiste en eliminar el contenido de agua absorbida ubicada entre las capas permitiendo que la estructura cristalina colapse y se forme una estructura de silicato de alúmina amorfo desarrollando mejores propiedades mecánicas en el mortero.

La primera transformación durante la cocción es la desaparición de la goethita a 300°C. La goethita se descompone en forma de hematita de acuerdo con la reacción $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Aunque la hematita bien cristalizada se encuentra a 900°C. Caolinita se descompone en metacaolinita amorfa a 500°C por la eliminación de los grupos hidroxilo de la red de silicato, de acuerdo con la reacción $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow$



$Al_2Si_2O_7 + 2H_2O$. Anatasa desaparece después de $700^\circ C$. A $700^\circ C$, $CaCO_3$ se empieza a descomponer produciendo CaO , con liberación de CO_2 .

La descomposición y la desaparición de todas las fases contribuyen a la formación de una fase vítrea. En esta etapa la arcilla es esencialmente un material amorfo con algunos granos residuales de calcita y cuarzo, de hematita y de neoformados. A $900^\circ C$ nuclean nuevas fases cristalinas y crecen a partir del material vitrificado produciendo la gehlenita, wollastonita, larnite, que se mantienen entre $900^\circ C$ y $1100^\circ C$. Después de $700^\circ C$ el CaO libre reacciona con sílice y alúmina derivados de la descomposición de la Illita, formando **Gehlenita** de acuerdo con la siguiente reacción: **$3SiO_2 \cdot Al_2O_3$ (mezcla amorfa) + $6CaO \rightarrow 3Ca_2Al_2SiO_7$ (Gehlenita)**. Wollastonita ($CaSiO_3$) es otra fase abundante, formado por la reacción siguiente: **$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + CO_2$** . Por lo general, wollastonita y gehlenita se consideran compuestos intermedios, que se vuelven inestables en presencia de SiO_2 y reaccionan para dar **Anortita** ($CaAl_2Si_2O_8$). Larnite (Ca_2SiO_4) también se formó como una fase de menor importancia de la reacción entre la cal y cuarzo: **$2CaO + SiO_2$ amorfa $\rightarrow Ca_2SiO_4$** .

2.- Cales hidráulicas artificiales (HL): tienen hidraulicidad algo superiores a la de las cales hidráulicas naturales, contienen sustancias añadidas antes o después de la cocción, como: polvo de roca volcánica, cenizas volantes de la combustión de petróleo, escorias siderúrgicas, fragmentos de ladrillos o de cerámica que reaccionan con el hidróxido a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes. Los materiales hidráulicos producen un incremento de las resistencias mecánicas de los morteros y una reducción de su permeabilidad, gracias a la mayor cohesión entre el aglomerante y el árido (Cañon B., Juan, 2012).

3.1.3.3.3 Fabricación de cal tradicional para morteros¹⁷.

Los tres pasos básicos en la producción de la cal son:

1. Extracción del mineral.

La piedra caliza se extrae de bancos subterráneos y minas superficiales. La piedra caliza de calidad se debe identificar y extraer cuidadosamente para mantener su pureza, ya que si no se eligen las piedras adecuadas éstas no trabajarán de

¹⁷ Suarez T. Wendy G. Fabricación de cal tradicional para morteros, argamasas y pintura.

manera uniforme ni siquiera en la primera fase. La piedra caliza tiene ciertas características fácilmente identificables por su color gris azulado, cierta ligereza y un peculiar sonido semejante a cristal cuando se chocan unas con otras. Este paso incluye el machacamiento y la selección, y en muchos casos, lavándose para quitar impurezas.

2. Quemado o calcinación.

La piedra caliza, que se compone sobre todo de carbonato del calcio, se calienta para convertir el carbonato del calcio en óxido de calcio (CaO). Este proceso se ha realizado en sencillos hornos tradicionales. Debido a las altas temperaturas requeridas (excediendo 900 grados centígrados.), la calcinación es un proceso de energía intensiva. El producto del proceso de calcinación es la cal viva, que se puede machacar o pulverizar, dependiendo de su uso previsto.



Figura 8 Horno de cal colonial Inkiltambo - Cusco.

3. Hidratación o apagado.

La cal hidratada es producida reaccionando la cal viva con agua en distintos contenedores, siempre y cuando no sean de material corrosivo. Al añadir agua (H_2O) obtenemos (CaOH_2), osea cal hidratada. El producto final es una pasta fina, o lechada de cal. En esta fase procede un nuevo cernido de la pasta que sin perder la humedad permite la filtración del material para mejorar su calidad. El tiempo mínimo de apagado para que la cal alcance su madurez es de 3 meses.



3.1.4 La Catedral del Cusco.

La iglesia mayor cusqueña, nacida tras la conquista y fundación española de la ciudad, tuvo dos emplazamientos antes de levantarse sobre su ubicación actual.

1. En octubre de 1534, el primer cabildo le asignó el sitio que ocupa hoy la iglesia del Triunfo, sobre el antiguo Sunturhuasi.
2. Debido a su pequeñez, en 1541 se decidió otorgarle un sitio más amplio en la zona de Cusipata o plaza del Cabildo (plaza Regocijo), frente al mercado y al convento de los mercedarios. Sin embargo, esta “cercanía” resultó inconveniente y en 1552 fueron adquiridos los terrenos del Quishuarcancha o palacio de Huiracocha, junto al primitivo templo.

En 1559 se colocó la primera piedra y fue llamado el arquitecto Juan Miguel Veramendi, residente en Chuquisaca, para dirigir las obras. Poco después, Juan Correa continuó los trabajos hasta 1564 en que se interrumpieron por escasez de fondos.

Hacia 1585, el maestro extremeño Francisco Becerra -constructor de la Catedral de Lima- probablemente ejecutó la traza definitiva. Luego intervinieron como maestros mayores Bartolomé Carrión y Miguel Gutiérrez Sencio. La edificación avanzaba muy lentamente hasta 1644, cuando el obispo Juan Alonso de Ocón le otorgó un gran impulso.

Aunque no estaba concluida en 1650, el terremoto de ese año no afectó demasiado la solidez de su estructura, causando únicamente daños menores, pudiendo concluirse totalmente y ser inaugurada en 1668¹⁸, después de 110 años de colocada la primera piedra.

¹⁸ Tesoros de la Catedral del Cusco. Telefónica.

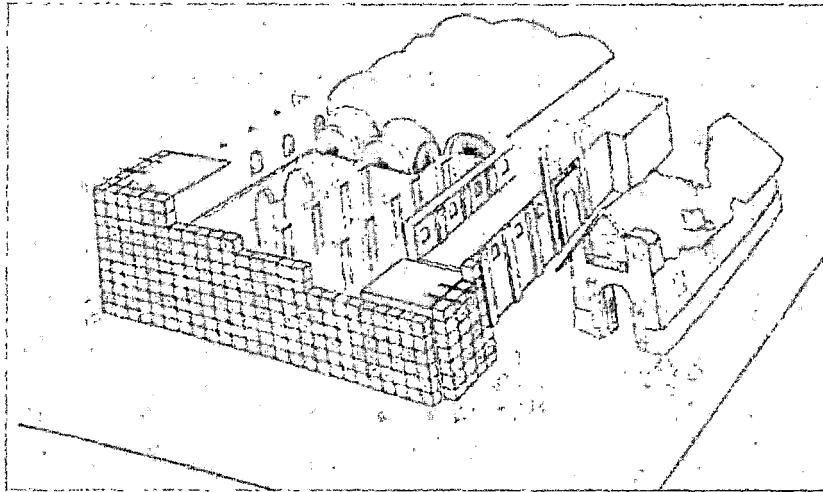


Figura 9. La catedral en 1650, después del sismo. Fuente: Tesoros de la Catedral del Cusco. Telefónica

La catedral del Cusco, debido al periodo crucial en que fue construida, hereda la hibridez gótico-renacentista de las grandes Catedrales españolas del siglo XVI, sumando a ello el estilo barroco patente en su gran portada-retablo y en sus torres. Es de planta rectangular de 3956m² del tipo basilical con tres naves (De la Epístola, del Evangelio y Central) coincidentes con las tres puertas de la fachada. Tiene 14 pilares cruciformes que definen la distribución de las 24 bóvedas de nervadura, siendo las más grandes la bóveda de ingreso y la del crucero. Las 24 bóvedas son soportadas por unas estructuras básicas formadas por 21 arcos de piedra y 32 arcos de medio punto. Todas estas estructuras son de piedra andesita y diorita, muchas de las cuales tienen origen incaico, acarreados desde la fortaleza de Sacsayhuaman.



Figura 10. Actividad religiosa en la Plaza de Armas del Cusco a mediados del siglo XX. Fuente: Fotografía proporcionada por Ing. José S. Díaz Farfán.



3.1.5 Descripción de la Portada.

La portada principal es la pieza central del estudio y también la primera impresión que se tiene en una visita cercana a la fachada de la Catedral del Cusco. Se ubica en la plaza mayor del departamento del Cusco. Fue construida con mampostería de piedra y cal, es una portada-retablo de 3 calles con una altura aproximada de 23m desde el piso terminado de la fachada hasta la parte superior del ático, tiene un ancho de 14.5m. En elevación consta de 2 cuerpos y el ático, separados por la parte superior de las cornisas de los cuerpos externos.

En la Figura 10 se muestra las partes generales de la portada principal de la Catedral del Cusco.

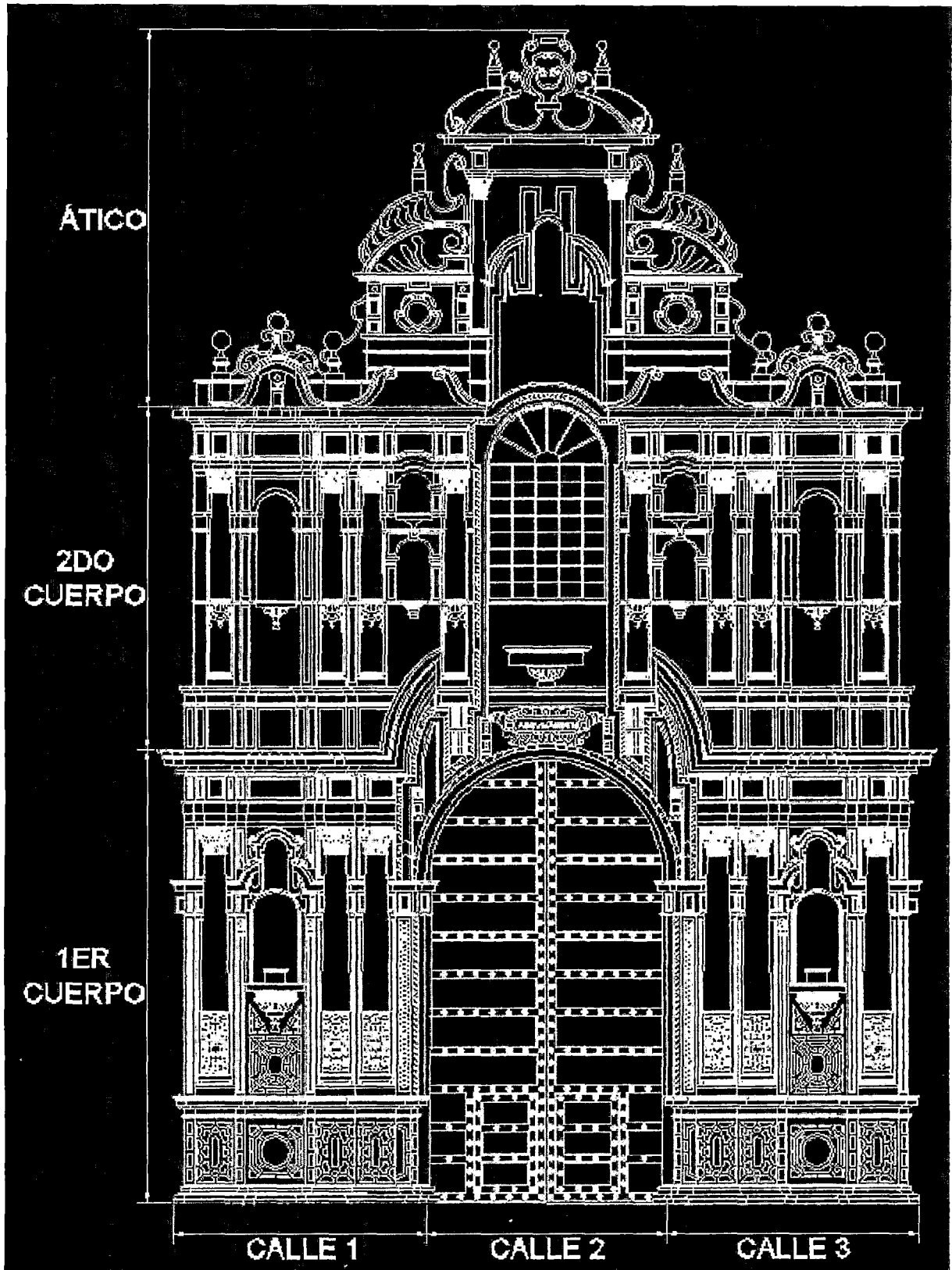


Figura 11. Partes generales de la Portada Principal. Fuente: Arzobispado del Cusco

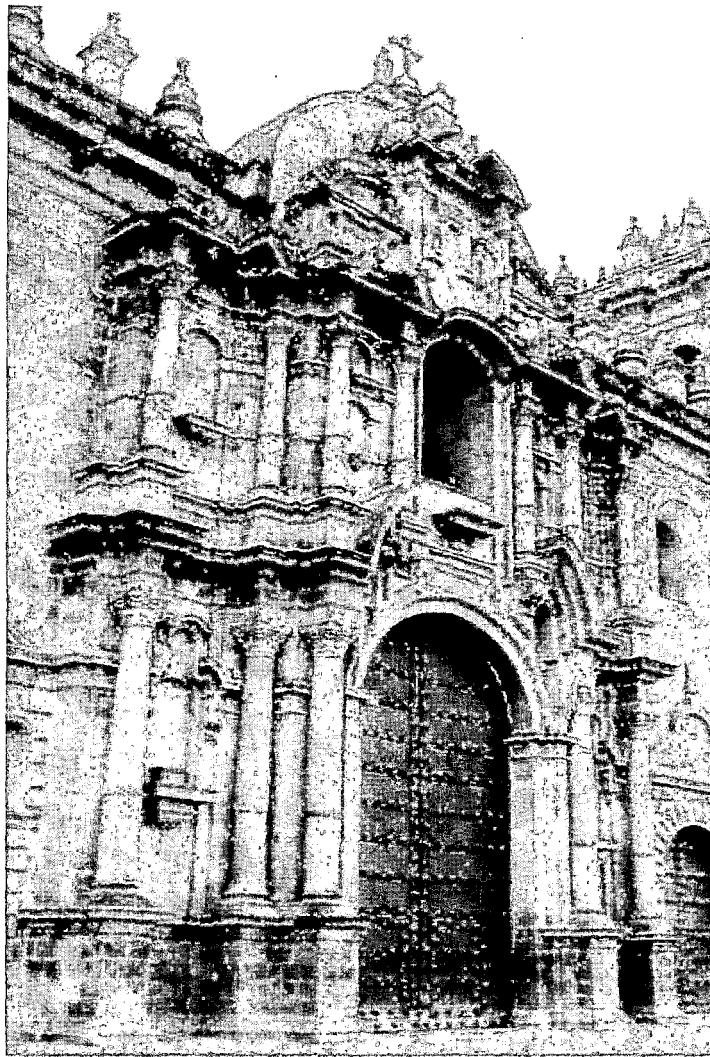


Figura 12. Vista de la Portada Principal.

Se clasificaron los elementos estructurales de la portada principal de la Catedral del Cusco de acuerdo a los fines de la investigación usando los términos arquitectónicos correspondientes. Se agrupó de acuerdo a semejanzas constructivas, estructurales y elementos característicos importantes, que facilitarán en cuanto a las semejanzas para el análisis de morteros (muestreo y ensayos) así también como en los morteros propuestos de restauración.

1. Columnas: En general consta de 16 columnas adosadas, ubicados simétricamente en cada uno de los cuerpos externos, todas tienen capiteles de estilo corintio, con alturas entre 35-45cm tallados con los relieves de hojas de acanto¹⁹. Las

¹⁹ Acanthus Mollis, única especie de la familia Acanthaceae, fueron inspiración para decorar columnas en la antigua Grecia.



columnas poseen fustes lisos con el primer tercio tallado, a excepción de los ubicados en el ático que son lisos en su totalidad. Todas están formados por 3 ó 4 bloques de piedra cilíndrica tallada, y basas de 30cm como parte inferior de la columna.

El tamaño total de estas columnas es variable por lo que se presenta una tabla con el resumen de las dimensiones y cantidad de columnas de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

NÚMERO DE COLUMNAS, DIÁMETRO EN LA BASE Y ALTURA DE COLUMNAS DE LA PORTADA PRINCIPAL DE LA CATEDRAL DEL CUSCO									
CUERPOS	CALLE 1			CALLE 2			CALLE 3		
	Nº	D (m)	h (m)	Nº	D (m)	h (m)	Nº	D (m)	h (m)
Ático	-	-	-	2	0.26	3	-	-	-
2do cuerpo	3	0.44	4.07	2	0.44	4.07	3	0.44	4.07
1er cuerpo	3	0.52	5.06	-	-	-	3	0.52	5.06

Tabla 1. Descripción geométrica columnas de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

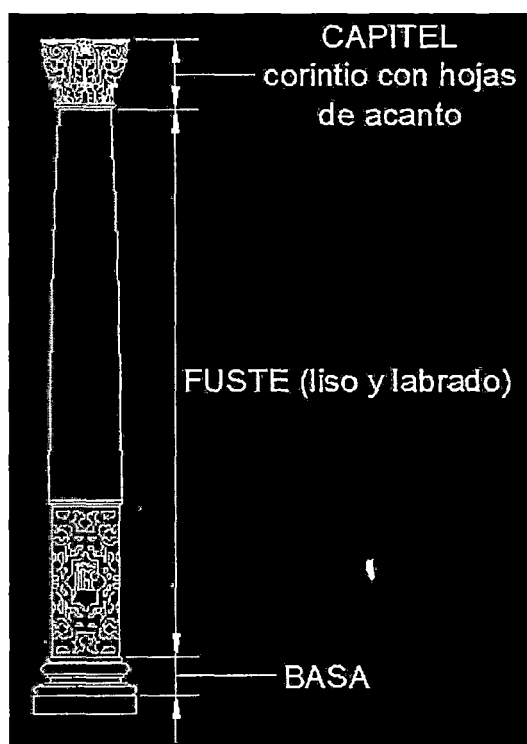


Figura 13. Partes de una columna adosada.

Las columnas en general presentan regular estado de conservación. Algunas presentan cierto grado de desgaste y desprendimiento de roca, así también como la erosión externa de las juntas de mortero de 5mm aproximadamente de espesor, las que prácticamente se adentraron algunos centímetros. También se observó que algunas columnas cercanas a la calle central, presentan manchas blancas (cal removida de las juntas por acción del agua de lluvia) y oscuras (probablemente úrea debida a las palomas). Otras tienen la presencia de abundante desecho biológico de aves en sus basas. No presentan sellado de juntas con material actual (mortero de cemento) y tampoco tiene plantas que arraigan en sus juntas.

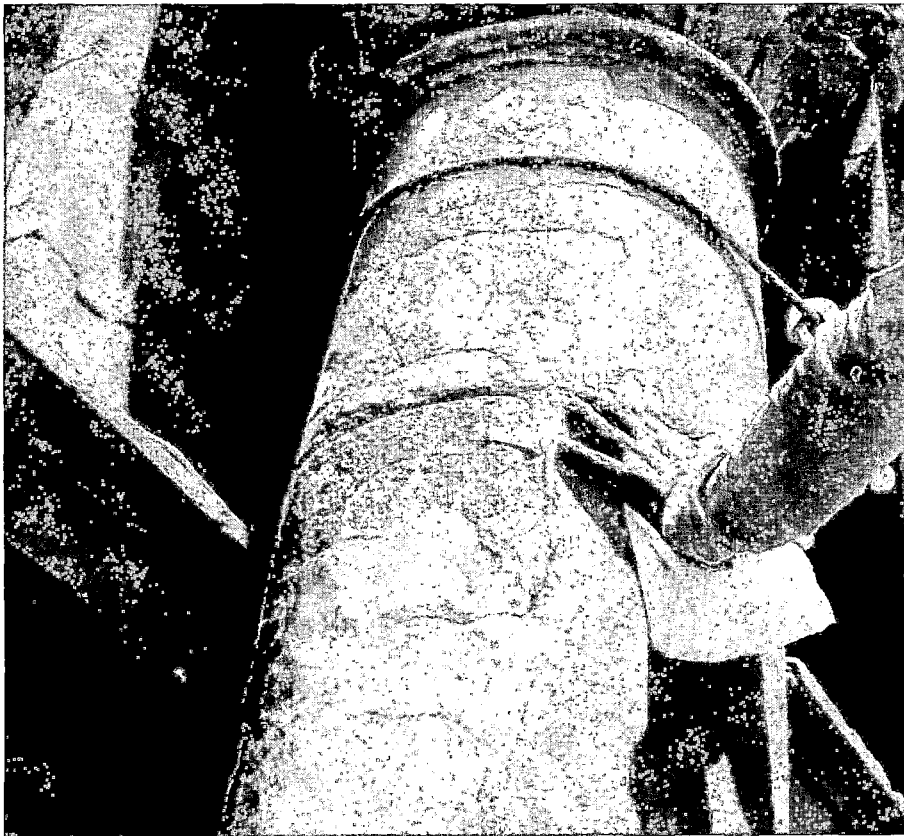


Figura 14. Desgaste en la piedra en columna del 1er cuerpo de la Portada Principal.

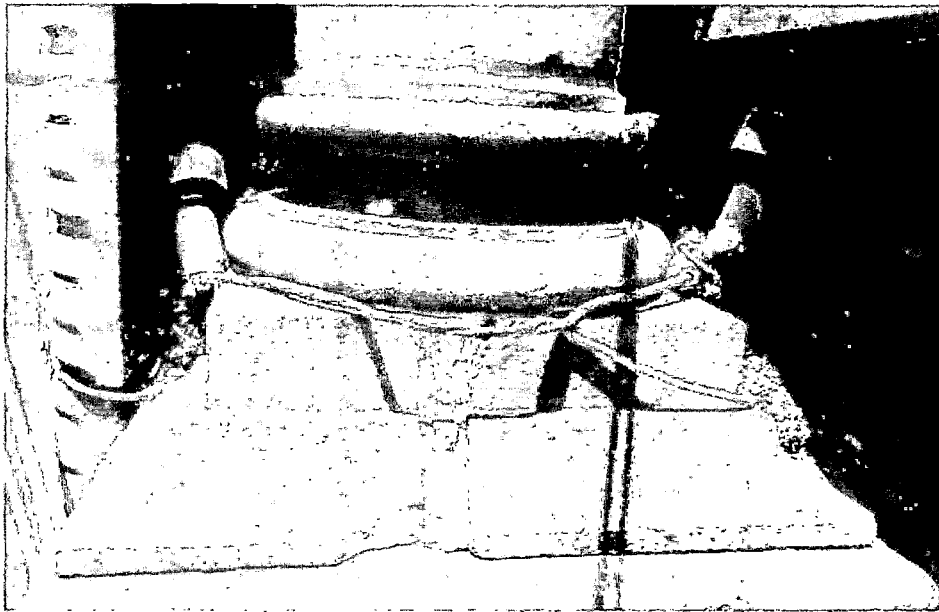


Figura 15. Desgaste en roca y presencia de desecho y nidos de aves en columna del 2er cuerpo de la Portada Principal.

2. Arcos: La Portada Principal consta de dos arcos a medio punto²⁰ ubicados en el 1er y 2do cuerpo, en la calle central. Estos están hechos de mampostería de piedra-cal con piedras talladas para la parte circunferencial del arco, cada una de estas es llamada una dovela, la dovela central superior es llamada clave. Existen dos distancias características en arcos, que son la flecha y la luz, en el caso de arcos de medio punto, la luz es dos veces la flecha. La línea de imposta es aquella que une la parte baja del arco (el diámetro horizontal). Finalmente, la jamba es cada una de las dos piezas de un vano que dispuestas verticalmente, sostienen al arco, tienen la función de transmitir la carga axial del arco al resto de la estructura.

Se muestran las distancias características de los arcos, así también como el espesor de cada uno de estos.

LUZ, FLECHA Y ESPESOR DEL ARCO			
CUERPO	Luz (m)	Flecha (m)	Espesor (m)
Ático	-	-	-
2do Cuerpo	4.5	2.32	0.32
1er Cuerpo	2.3	1.15	0.25

Tabla 2. Descripción geometría de los arcos de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

²⁰ Arco circular con forma de media circunferencia.

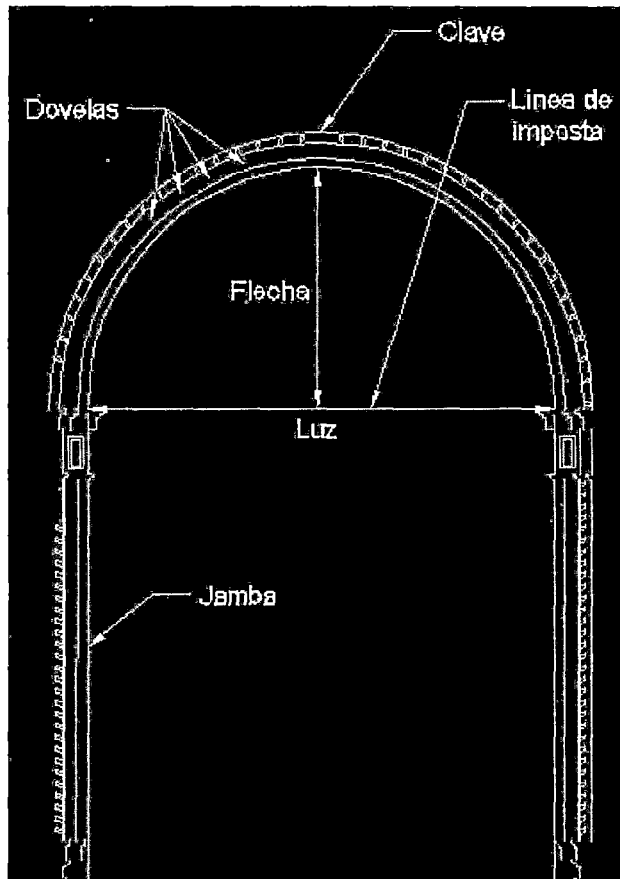
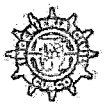


Figura 16. Partes del Arco a medio punto. Fuente: Arzobispado del Cusco.

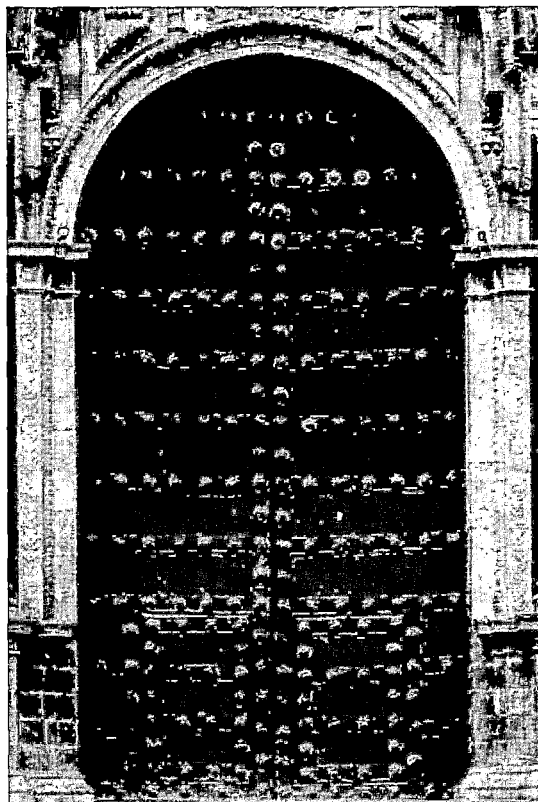


Figura 17. Arco del primer cuerpo de la Portada.

El arco del 2do cuerpo presenta buen estado de conservación debido al difícil acceso de agentes externos a la superficie interior del arco, tales como el agua de lluvia, aves, plantas, etc. Sin embargo, es el hombre quién ha causado daño.

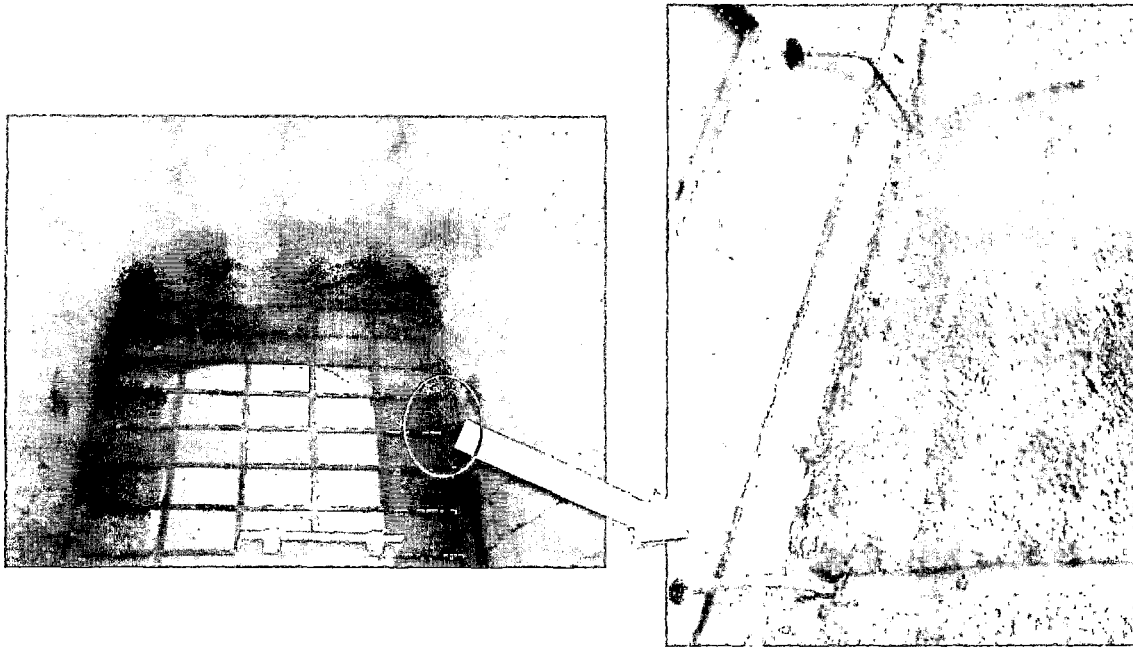


Figura 18. Daño en el mortero del arco ubicado en el 2do cuerpo.

El arco del 1er cuerpo, también se encuentra en buen estado, sin embargo, las jambas tienen desgaste de mortero en las juntas horizontales de las aristas verticales.

3. Muros: Dentro de este grupo, se consideró todos los elementos que no son columnas, arcos, pedestales ni entablamentos de mampostería de cal-piedra, que pertenecen a la Portada Principal y que tienen la función estructural general de transmitir cargas verticales y resistir el corte producto de eventos sísmicos. Existen bastantes elementos estéticos que forman parte del grupo muros, que son: cartela, peanas, volutas, pináculos, medallones, monogramas, modillones, espacios intercolumnios etc. que no son más que altos y bajos relieves y roca tallada que dan la majestuosidad a la Portada Principal.

Las juntas de mortero son del orden de 1cm, y es aquí donde se aprecia deterioro del mortero producto de sales, lo que hace que tome un color blanquesino



Figura 19. Partes principales de la agrupación "Muros"

4. Pedestales: Las columnas de las calles externas está apoyada en un pedestal de mampostería de piedra-cal, tienen forma rectangular en planta, y están unidos a la estructura resistente principal como un "ensanche" del espacio intercolumnio ya que constructivamente presenta el mismo tipo de material y asentado (4 hiladas de piedra). La parte superior está rematada por una cornisa continua en todo el ancho de la calle. El cuerpo del pedestal presenta bajos relieves tallados en toda su longitud, con fines estéticos solamente. La parte baja está apoyada sobre una plataforma de área mayor a la del pedestal.

Los pedestales de las columnas del primer y segundo cuerpo de la Portada Principal presentan características similares a excepción que estas últimas ya no tienen el tallado en bajo relieve, en cambio, las del ático, tienen pedestales bastante estrechos y esbeltos.

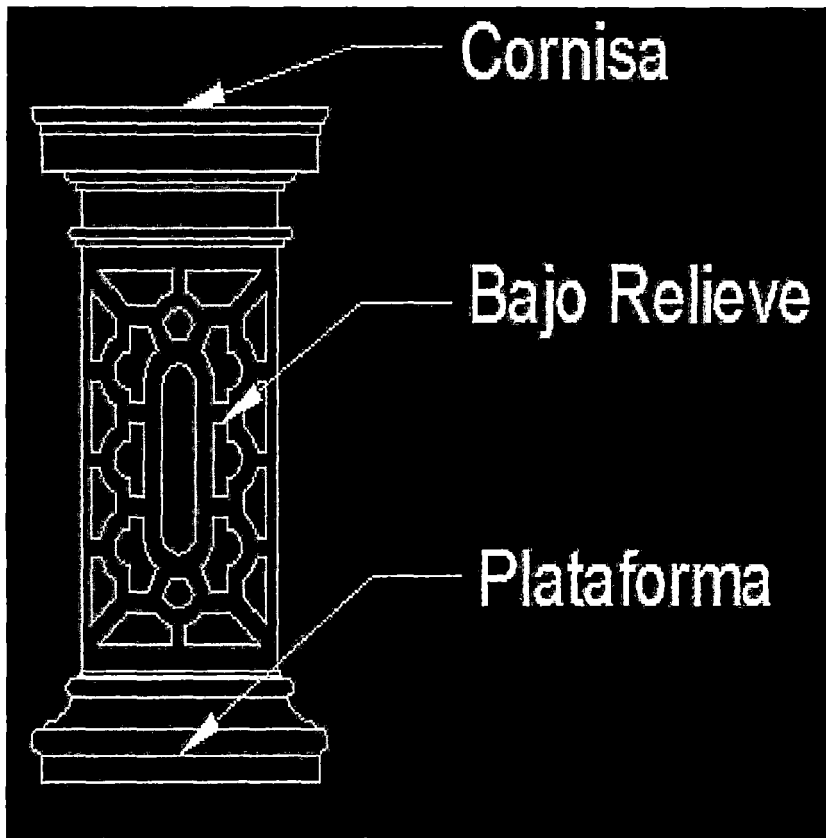


Figura 20. Partes del pedestal. Fuente: Arzobispado del Cusco.

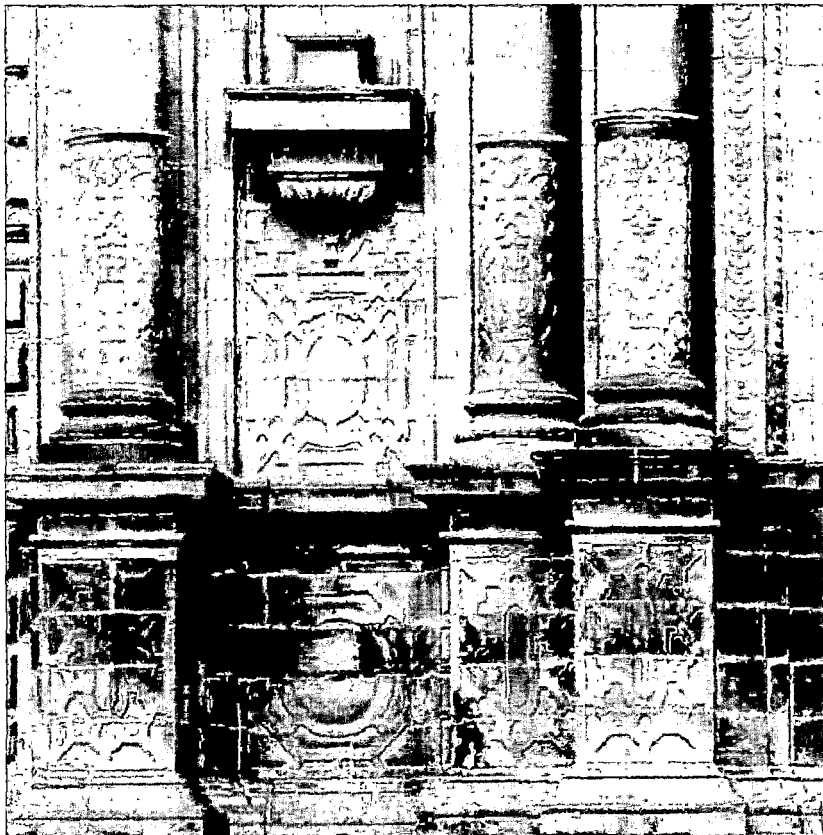


Figura 21. Pedestal del primer cuerpo, primera calle de la Portada.

Los pedestales del primer cuerpo presentan los siguientes problemas:

- Las juntas fueron “selladas” con mortero de cemento.
- En la parte baja al nivel del piso, presenta arraigamiento de plantas, con sus raíces en las juntas.
- La piedra y mortero está bastante expuesta a la intemperie, así también como a la acción indeseable de personas y animales cuadrúpedos.

5. Entablamento: O acornisamiento, es el elemento formado por la cornisa, el friso y el arquitrabe. Están situados sobre la parte superior de los capiteles de columnas y bajo la parte inferior de pedestales de columnas. Existen 2 a lo ancho de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, los cuales limitan superiormente o rematan los cuerpos de la Portada. La 2da calle (calle central) tiene en el primer cuerpo una cornisa curva quebrada y en el segundo cuerpo, una cornisa curva continua. El arquitrabe (parte inferior del entablamento) tiene la función estructural de servir de dintel para transmitir el peso de los elementos superiores a las columnas.

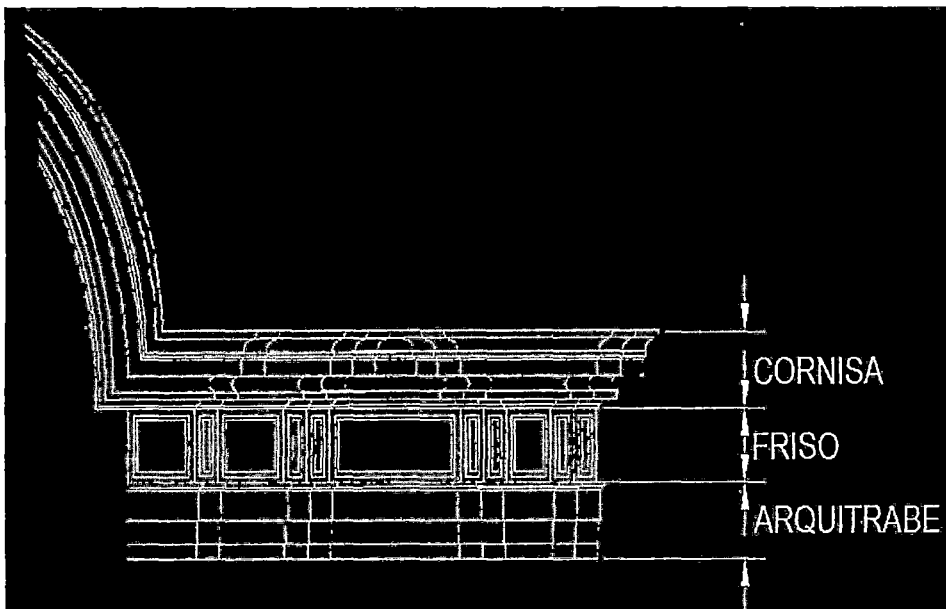


Figura 22. Partes del Entablamento. Fuente: Arzobispado del Cusco.

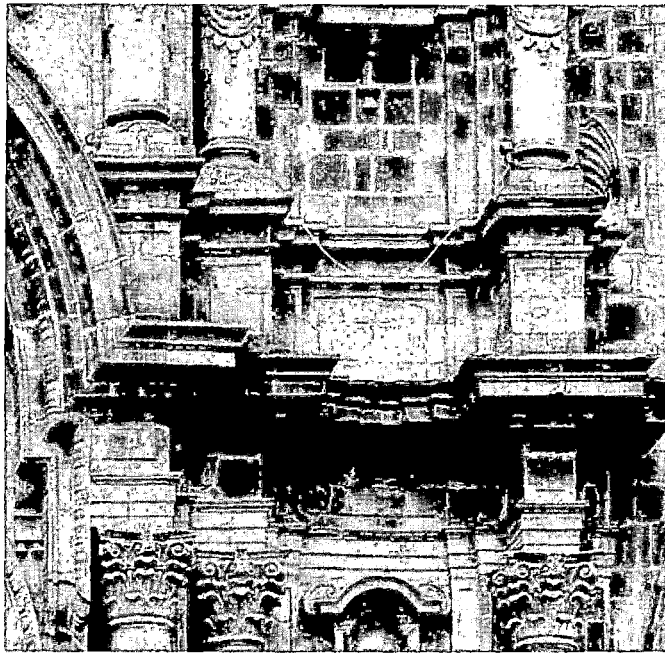


Figura 23. Entablamiento del 1er cuerpo, 3ra calle de la Portada.

Al igual que el resto de los elementos constructivos de la Portada Principal, está construida con mampostería de piedra-cal. La superficie de los frisos presenta bajos relieves en ambos cuerpos con fines puramente estéticos.

Los entablamentos y cornisas presentan los siguientes problemas:

- La cornisa curva que remata el segundo cuerpo presenta arraigamientos de pequeñas plantas.
- El mortero de las juntas presenta desgaste en sitios localizados como son las aristas prominentes.

3.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.

Después del sismo de 1986, se realiza una restauración de la Catedral con el Arq. Américo Carrillo R. como encargado.

El 6 de Marzo de 1997, se firmó un convenio entre el Arzobispado del Cusco (el entonces arzobispo, monseñor Alcides Mendoza Castro) y Telefónica del Perú, siendo esta última la entidad que patrocinó por cinco años y medio la restauración integral de la



Basílica²¹ Catedral del Cusco, la iglesia de la Sagrada familia y el Triunfo. Se contrataron obreros especialistas en conservación de monumentos históricos, restauradores de obras de arte, etc. Se realizaron obras puntuales como: drenajes de la cripta de la iglesia del triunfo, construcción de baños, reforzamiento de muros en el perímetro de la catedral, refacción de pisos del coro, prospección arqueológica por humedad de manantes coloniales fracturados dentro de la catedral, conservación de pinturas murales, lienzos, retablos, marquetería, carpintería.

A finales de 1999, los trabajos se destinaron exclusivamente a la restauración completa de la Basílica Catedral. Se consolidaron y restauraron 15 bóvedas, se cambiaron 35 piezas de 2 pilares con roca andesita labrada, se sustituyó el mortero antiguo con mortero de similares características²². Se restauró piezas de arte por restauradores de la Escuela Superior Autónoma de Bellas Artes del Cusco, esculturas, retablos, iluminación, etc.

En Octubre del 2001 se firmó un convenio entre el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería, y el Arzobispado del Cusco para la realización del estudio denominada "Evaluación de la Vulnerabilidad de la Catedral del Cusco" con el apoyo de la fundación Telefónica del Perú. Comprendiendo estudios de mecánica de suelos y análisis dinámico e ingeniería del modelamiento entre otros.

Algunos datos relevantes de interés ingenieril de este estudio son los siguientes:

- La capacidad admisible del terreno fue estimada como mayor que 4kg/cm² a la profundidad de cimentación de los pilares (5.15m).
- La resistencia a la compresión de la piedra (luego de una regresión de resultados) es 450 kg/cm², Módulo de elasticidad de 194000 kg/cm² y la densidad es del orden de 2.2 g/cm³.

²¹ Del latín *basilica*, del griego *basiliké*, que significa "casa real"

²² Tesoros de la Catedral del Cusco. pag. 138

- Se realizó un modelo de elementos finitos de 149694 grados de libertad de la Catedral en 3D en el programa SAP2000, en la que se observa el efecto de acciones sísmicas para una comprensión cualitativa²³ de la estructura.

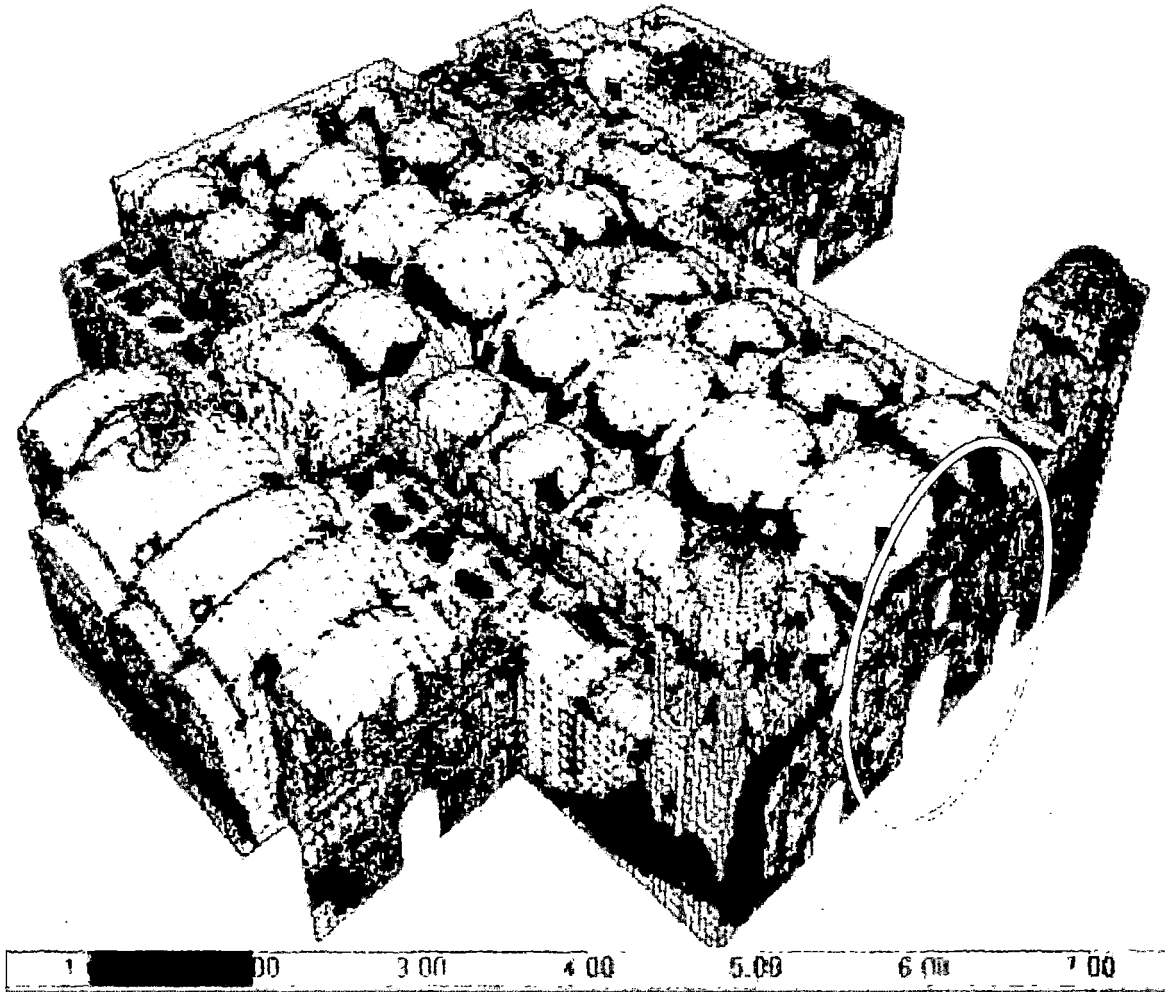


Figura 24. Esfuerzos principales máximos debidos a sismo en X. Fuente: "Vulnerabilidad de la Catedral de la Cusco" Centro Peruano de Investigación Sísmicas y Mitigación de Desastres de la UNI

Es de interés para nuestra investigación observar que el modelo matemático en 3D de la Catedral frente a acciones de sismo, no muestra concentración de esfuerzos principales máximos en la Portada Principal, y que más bien estos se concentran en las Torres de campanarios. Validando de esta forma, el poco efecto que tuvieron los sismos de 1650 y 1986 sobre la Portada Principal en comparación con otros componentes de la Catedral.

- El periodo fundamental de la estructura se estima en 0.22s.

²³ Debido a la imperfección de las propiedades de los materiales, la simplificación del modelo y los análisis únicamente lineales.



- Finalmente, en los trabajos de reparación se emplearon dos tipos de mezclas con un mortero de cal/arena 1/3²⁴, en las siguientes proporciones y que dieron resistencias a la compresión diferentes. Se muestran de mejor manera en el cuadro siguiente.
 - Cemento/mortero/arcilla 1/3/1, dando 81kg/cm²
 - Cemento/mortero 1/3, dando 65kg/cm².

CEMENTO	CAL	ARENA	ARCILLA
1.33	1	3	1.33
1.33	1	3	0

Tabla 3. Dosificación de morteros usados en reparaciones de la Catedral Año 1999. Fuente: Tesoros de la Catedral del Cusco – Telefónica.

En el estudio se recalca que un mortero de cemento únicamente (340kg/cm² de resistencia), no se recomienda puesto que pueden dar lugar a zonas más rígidas en las que se producirían concentraciones de esfuerzos, sin embargo, como se observa, se usaron morteros de cal con cemento.

3.3 BASES TEÓRICAS Y DEFINICIONES CONCEPTUALES.

3.3.1 Conservación.

El término de conservación recoge todas aquellas medidas o acciones que tengan como objetivo la salvaguarda del patrimonio cultural tangible, asegurando su accesibilidad a generaciones presentes y futuras. La conservación comprende la conservación preventiva, la conservación curativa y la restauración. Todas estas medidas y acciones deberán respetar el significado y las propiedades físicas del bien cultural en cuestión.

3.3.2 Restauración.

La restauración hace referencia a todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación,

²⁴ No se especifican si estas proporciones están dadas en volumen o peso, pero se puede deducir que están dadas en volumen.



comprensión y uso. Estas acciones sólo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasados. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien.

La restauración aplica algunas pautas éticas simples, tales como:

- Mínima intervención.
- Materiales apropiados y métodos que apunten a ser reversibles para reducir los posibles problemas a futuro durante un tratamiento, investigación, y uso.
- Documentación completa de todos los trabajos realizados, etc.

3.3.3 Reconstrucción.

El término reconstrucción es aquel que hace referencia a la acción de volver a construir algo que ya existía pero sin tener en consideración los lineamientos que se tiene para la conservación y restauración de monumentos históricos teniendo como consecuencia el mayor deterioro de estos.

3.3.4 Aglomerante.

Son aquellos materiales que se usan para unir otros, condición en que permanecen más o menos establemente en las circunstancias usuales de resistencia a las fuerzas exteriores y cambios de temperatura. Se les diferencia de los aglutinantes, en que los materiales unidos por estos, presentan alguna inestabilidad.²⁵

3.3.5 Mortero original.

Es el mortero que se usó en la construcción original del monumento, que tiene valor histórico, y cuyas características, la mayoría susceptibles de medición, son ejemplos de la tecnología de construcción de la época. La bibliografía menciona que es un problema hallar la relación agua/cal²⁶ ya que es casi imposible de establecerla con precisión.

²⁵ Materiales de Construcción. Ing. Alberto Regal.

²⁶ Sepulcre A. Alberto.



3.3.6 Mortero de cemento en restauraciones.

En numerosas restauraciones recientes se han reemplazado por morteros de cemento, lo que ha producido lamentables consecuencias en la conservación de muchos edificios históricos. Los morteros de cemento aunque tienen muy buenas propiedades físico-mecánicas, son incompatibles con el resto de elementos tradicionales por las siguientes razones:

- Posee una excesiva resistencia y diferente coeficiente de contracción volumétrica lo que produce micro tensiones intra materiales, que provoca fracturas que se propagan en los planos de falla y se pierde la cohesión del material, fragilizándolo.
- Posee un alto coeficiente de dilatación térmica.
- Tiene una elevada adherencia y alta densidad.
- Tiene gran contenido de sales en su composición lo que agrede drásticamente a la roca histórica.

Como consecuencia de las razones citadas, usar un mortero de cemento en restauraciones, conlleva al deterioro del patrimonio arquitectónico.

3.3.7 Mortero de restauración.

Para elaborar un buen mortero de restauración, es esencial conocer primero el material al cual va a sustituir, siendo necesaria una caracterización exhaustiva del mortero original. A partir de esos datos se puede formular un mortero de restauración lo más similar posible al mortero que va a sustituir y adecuado a su función en el edificio.²⁷ Las características que deben cumplir estos morteros, son:

- Lo más similar posible con el mortero al que va a sustituir en aspectos de color, textura, etc.
- Debe tener una porosidad como mínimo igual, y a ser posible, menor que la del mortero original.
- La resistencia a la compresión debe ser menor o como máximo igual a la del mortero original.

²⁷ Morteros de Restauración y morteros antiguos. Técnicas de estudio. Cazalla V. Olga.



- Fácil trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación y puesta en obra.
- Mínimo contenido en sales solubles e iones libres.
- Adherencia adecuada en función de la resistencia de los materiales disponibles.
- Impermeabilidad a los fluidos y permeabilidad al vapor de agua.
- Durabilidad y resistencia a la acción de agentes externos.

Mortero de Cemento.

- Posee una excesiva resistencia y diferente coeficiente de contracción volumétrica.
- Posee un alto coeficiente de dilatación térmica.
- Tiene una elevada adherencia.
- Alta densidad.
- Tiene gran contenido de sales.

Mortero de Restauración.

- Lo más similar posible con el mortero al que va sustituir en aspectos de color, textura, etc.
- Porosidad como mínimo igual o menor que la del mortero original.
- La resistencia a la compresión menor o igual a la del mortero original.
- Fácil trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación y puesta en obra.
- Mínimo contenido en sales solubles e iones libres.
- Adherencia adecuada.
- Impermeabilidad a los fluidos.
- Durabilidad y resistencia frente a de agentes externos.

Tabla 4. Cuadro comparativo Mortero de Cemento y de Restauración. Fuente: Morteros de Restauración y morteros antiguos. Técnicas de estudio. Cazalla V. Olga

3.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

De acuerdo a los antecedentes del estudio, el mortero de cal de restauración tiene una dosificación de 1:3 cal:arena²⁸, entonces, el mortero de restauración que se propondrá, tendrá características de sus propiedades físicas y estéticas parecidas al mortero original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

²⁸ Olarte J., Proaño R., Scaletti H., Torres M., & Zavala C. Vulnerabilidad Sísmica de la Catedral del Cusco



3.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO.

Se tendrá 2 tipos de variables:

Variables Dependientes:

- Resistencia a la Compresión.
- Permeabilidad.
- Permeabilidad.
- Durabilidad.
- Ph.
- Color.

Variables Independientes:

- ✓ Mortero de restauración.

3.6 OBSERVACIONES.

- ✓ Después de la recolección de datos y antecedentes del estudio, se observó que esta investigación es el primer intento formal de caracterización de morteros históricos en la Portada Principal de la Catedral del Cusco.
- ✓ Se observó que un mortero réplica del original (el cuál según la bibliografía es imposible reproducirlo exactamente) no es el más adecuado para ser usado como mortero de restauración.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.

La variable independiente y varias situaciones del estudio como son las relaciones aglomerante/cal, granulometrías eficientes, canteras locales, ensayos, etc., son susceptibles a control y medición de la calidad y cantidad; por ello, el diseño experimental de la investigación está basado en el tipo semi experimental y cuantitativo.

4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Para establecer el diseño de la investigación, se tomó en cuenta el tipo de investigación, es decir, **semi experimental y cuantitativa**. Este diseño está reflejado en el Contenido de la tesis compuesto por seis capítulos.

4.3 POBLACIÓN Y MUESTRA.

4.3.1 Determinación estadística de la población y de la unidad muestral.

La población puede considerarse como infinita ya que la cantidad de gramos de mortero en la Portada Principal de la Catedral del Cusco es bastante grande. Para establecer la cantidad de elementos a extraer se usaron: El muestreo intencional o de conveniencia para arcos y muros, que es un **método de muestreo estadístico no probabilístico**, debido a que un muestreo probabilístico por estratigrafía (que resultaría ideal) es extremadamente costoso (hablando en términos de impacto sobre el patrimonio histórico) y va en desacuerdo con el 6to principio para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico (2003)²⁹. Y el muestreo probabilístico aleatorio para columnas.

²⁹ 14° Asamblea general del ICOMOS, Zimbabwe, Octubre del 2013



Se siguieron cuidadosamente determinados criterios para determinar la ubicación de los elementos de la población, para que esta pueda ser representativa del lugar al que representa, como se describe en la siguiente sección.

4.3.2 Selección y tamaño de la muestra.

Las muestras se seleccionaron en función al comportamiento estructural y constructivo de los elementos de la Portada principal de la Catedral del Cusco. Se identificaron 5 elementos componentes principales que son:

- ☩ Columnas.
- ☩ Arcos.
- ☩ Muros.
- ☩ Pedestales.
- ☩ Entablamentos.

Sin embargo, recurriendo a la idea de mínimo impacto sobre el patrimonio histórico y a los permisos establecidos con la DDC-Cusco³⁰, se agruparon en únicamente tres grupos de elementos estructurales-constructivos principales que son: Columnas, arcos y muros. Los pedestales y entablamentos se pueden considerar como un “alto relieve” de los muros, es decir, elementos con función decorativa, por lo que se agruparon con los Muros.

Se realizó una diferenciación en altura de la Portada principal de la catedral, por lo que se extrajeron muestras de columnas, arcos y muros en el primer cuerpo, segundo cuerpo y el ático. Finalmente se tomó en cuenta lo siguiente:

Columnas: En base a una elección aleatoria o “sorteo” del total de columnas en cada cuerpo, se eligió una, procurando la aleatoriedad del muestreo.

Arcos y Muros: Fue totalmente intencional de acuerdo a la accesibilidad en altura de los muros y arcos, la idea de mínimo impacto, aleatoriedad y representatividad de las muestras. La ubicación de los lugares de extracción se detalla en la siguiente imagen.

³⁰ Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco.

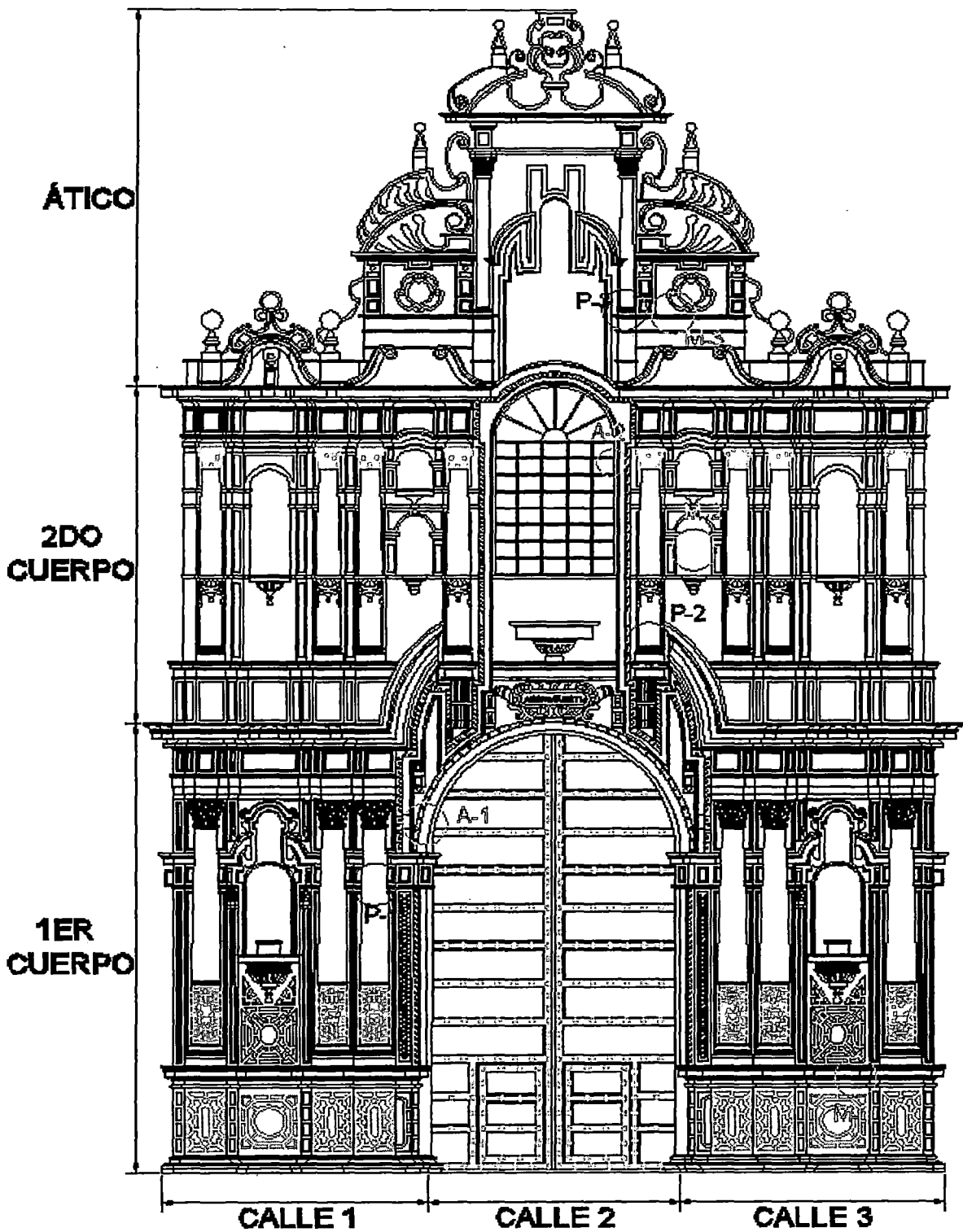


Figura 25. Ubicación de los lugares de extracción de muestras. Fuente del plano: Arzobispado del Cusco.

LEYENDA	
M1, M2, M3	Muestra extraída de Muro.
P1, P2, P3	Muestra extraída de Pilar.
A1, A2	Muestra extraída de Arco.

Tabla 5. Codificación de muestras.

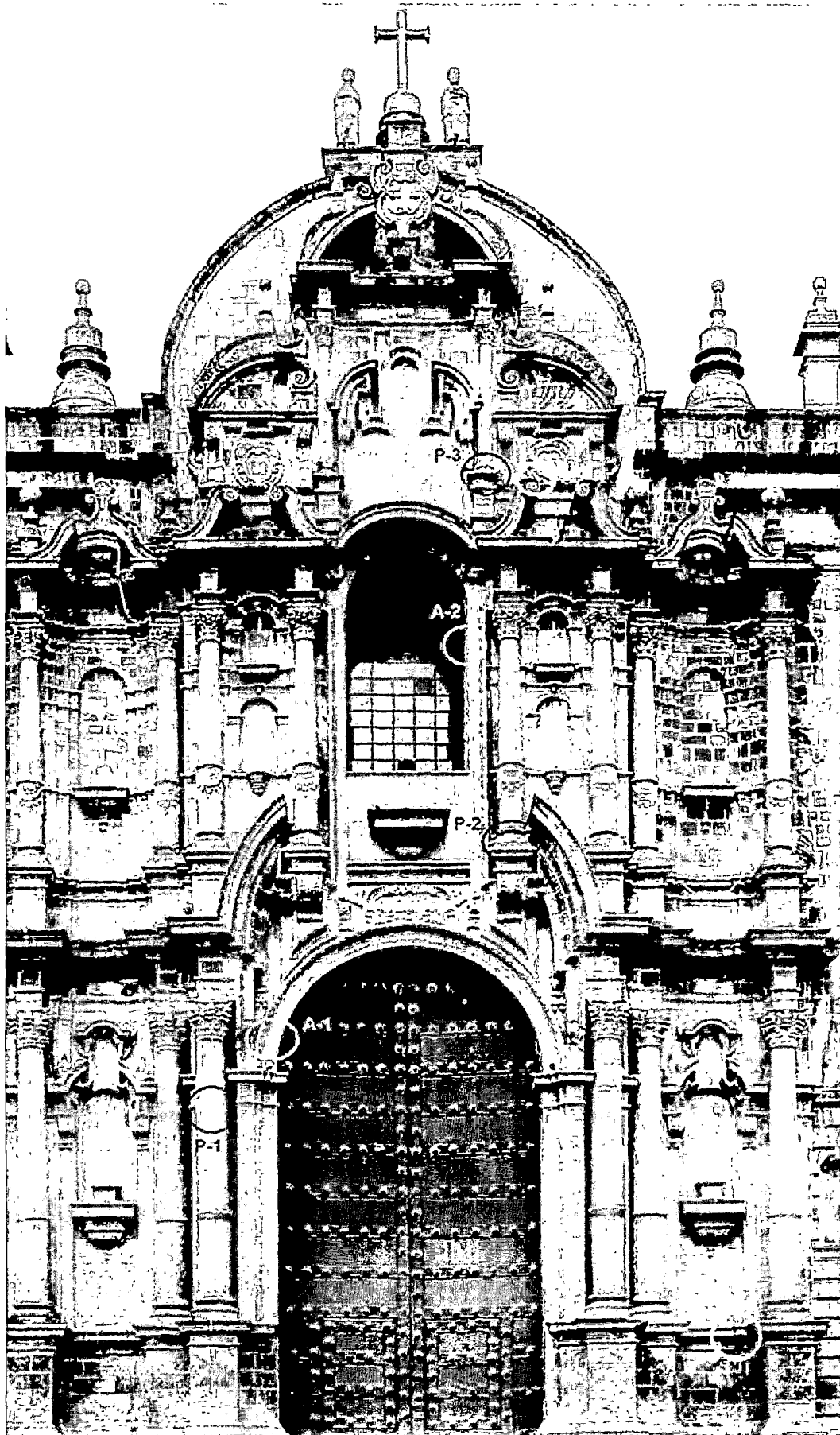


Figura 26 Ubicación de los lugares de extracción de muestras.

4.3.3 Procedimiento técnico de muestreo.

El proceso lo realizaron dos maestros canteros con experiencia en trabajos de restauración quienes estuvieron sujetos con arneses de seguridad y a su vez contaron con cinceles y combas de goma para la extracción de muestras. Estas se extrajeron a lo largo de 4cm en la junta de mortero y dentro de una profundidad aproximada no mayor de 2-3cm, procurando que sean los morteros originales (no morteros alterados ni de “restauraciones” con mortero de cemento). Se desechó aproximadamente los primeros 2-3cm de profundidad de los morteros debido a una posible alteración por diferentes agentes.

El detalle de la extracción se muestra en la siguiente figura.

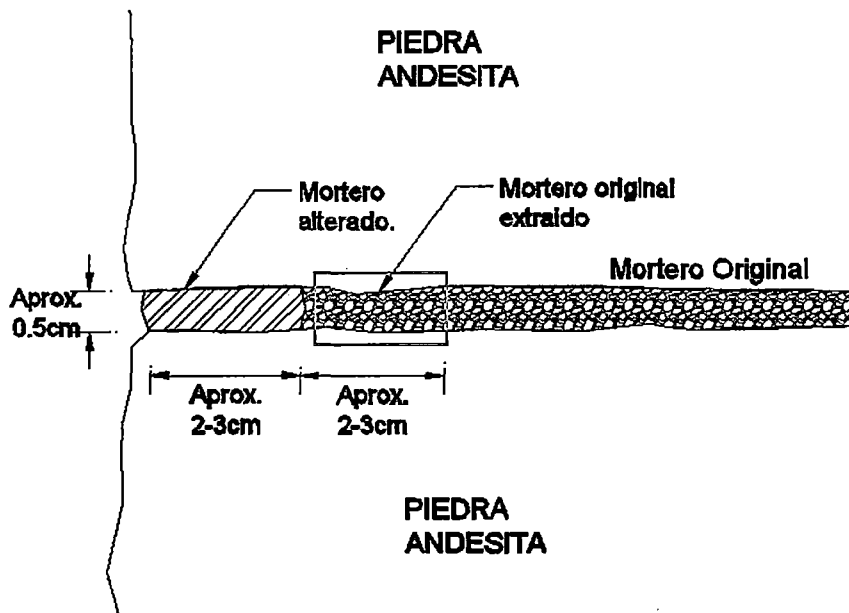


Figura 27 Esquema de extracción de muestras en la junta de mortero.

Cantidad.

La cantidad a extraer por cada muestra es aproximadamente de 2gr, ya que es la mínima cantidad necesaria para efectuar los ensayos de difracción de rayos X, ensayo químico elemental, análisis granulométrico del componente árido del mortero y otros ensayos menores. Cabe recalcar que en cada uno de los ocho puntos de extracción, se tendrá que tener 5 muestras las cuales serán necesarias para poder evaluarlos en los ensayos ya mencionados.



Herramientas.

Las herramientas a usarse para la extracción de muestra son los siguientes:

- Cincel.- el cincel tiene una dimensión de 2 a 4 mm en la punta la cual permitirá la extracción del mortero sin que afecte a las piedras.
- Comba de goma.- se usó comba de goma el cual permitió reducir el efecto del golpe y este a su vez no sea perjudicial al momento de extraer las muestras.
- Almacenamiento de muestras.- todas las muestras extraídas se cubrieron en papel aluminio, luego se colocaron en bolsas debidamente rotuladas para después ser almacenados en una caja térmica.

Materiales.

- Andamios.- se armaron andamios para poder llegar a los lugares ubicados en las partes altas.
- Arnese.- se contó con arneses de seguridad para cada trabajador quienes estuvieron amarrados a una línea de vida para mayor seguridad.

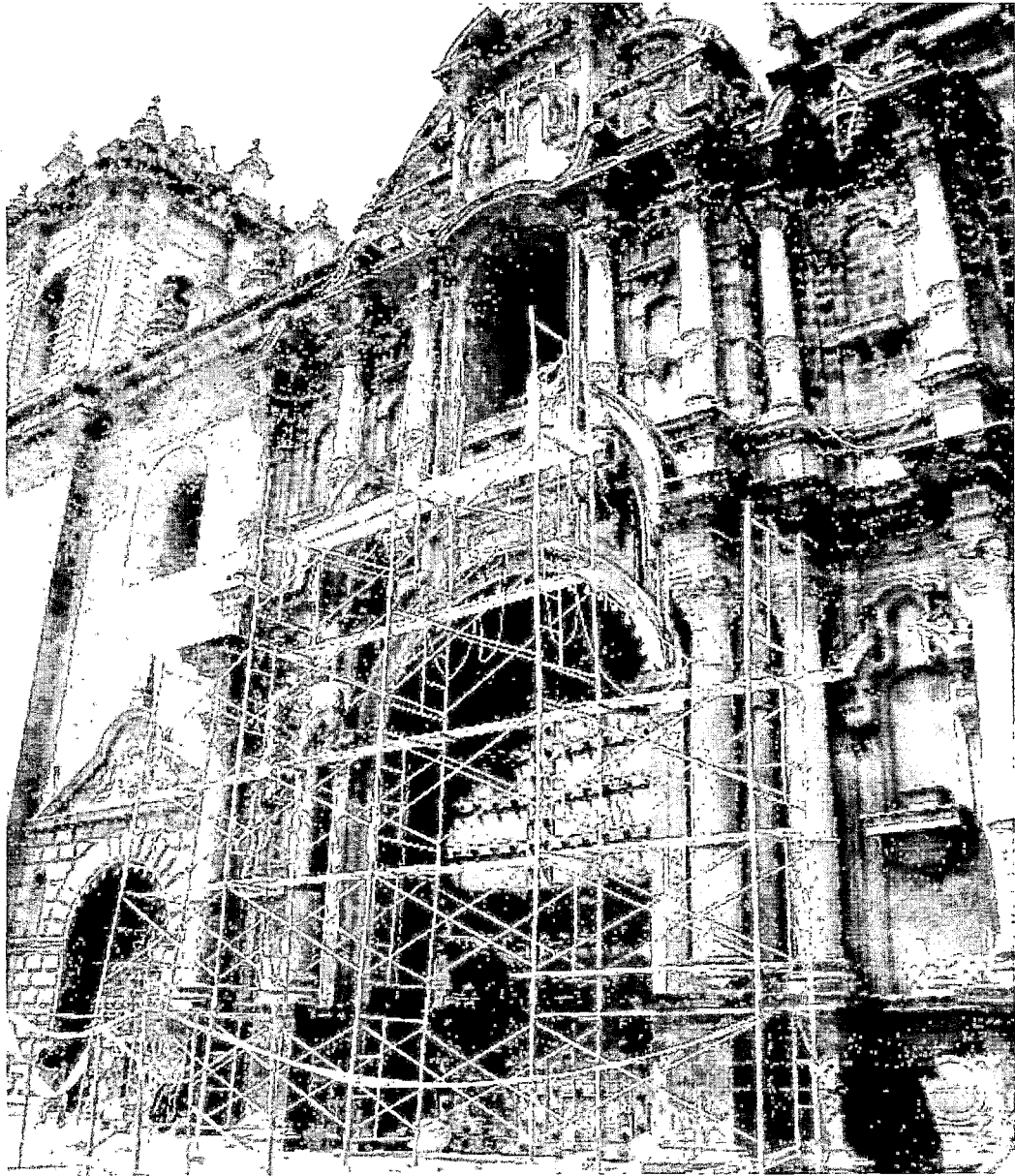


Figura 28. Armado de cuerpos de andamios para extracción de muestras de mortero en la Portada Principal de la Catedral del Cusco.



Figura 29. Uso de arneses de seguridad para extracción de muestras parte alta de la Portada Principal de la Catedral de Cusco.

El procedimiento de extracción de la muestra A2 (Arco del segundo cuerpo de la Portada Principal de la Catedral del Cusco) se muestra en las siguientes figuras.

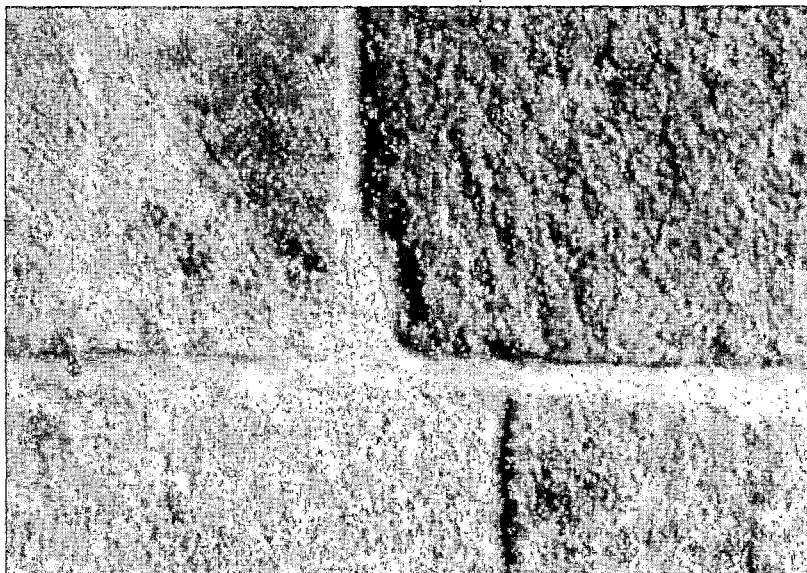


Figura 30. Proceso de extracción de muestra A2: 1) Junta de mortero,



Figura 31. Proceso de extracción de muestra A2: 2) Intervención con cincel y comba

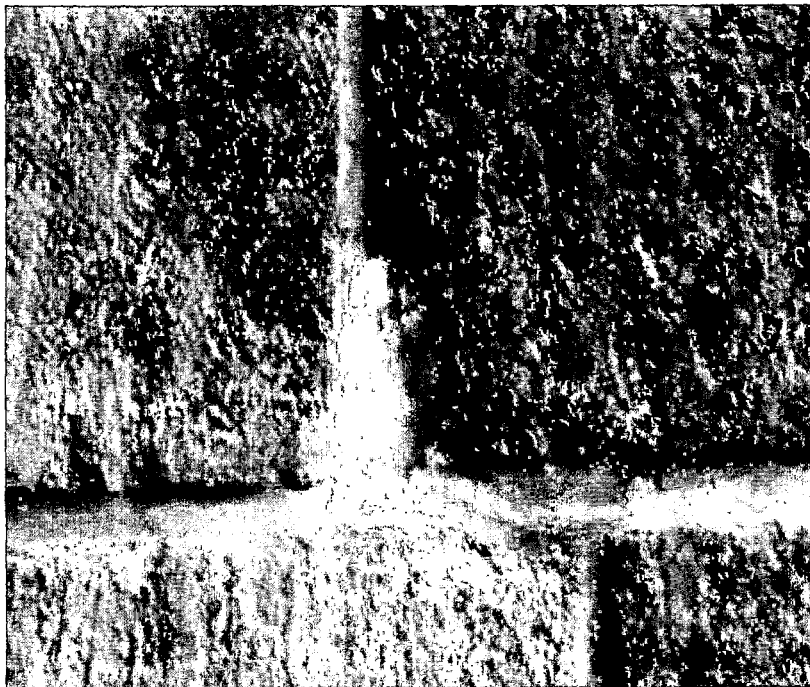


Figura 32. Proceso de extracción de muestra A2: 3) Limpiado del recubrimiento externo

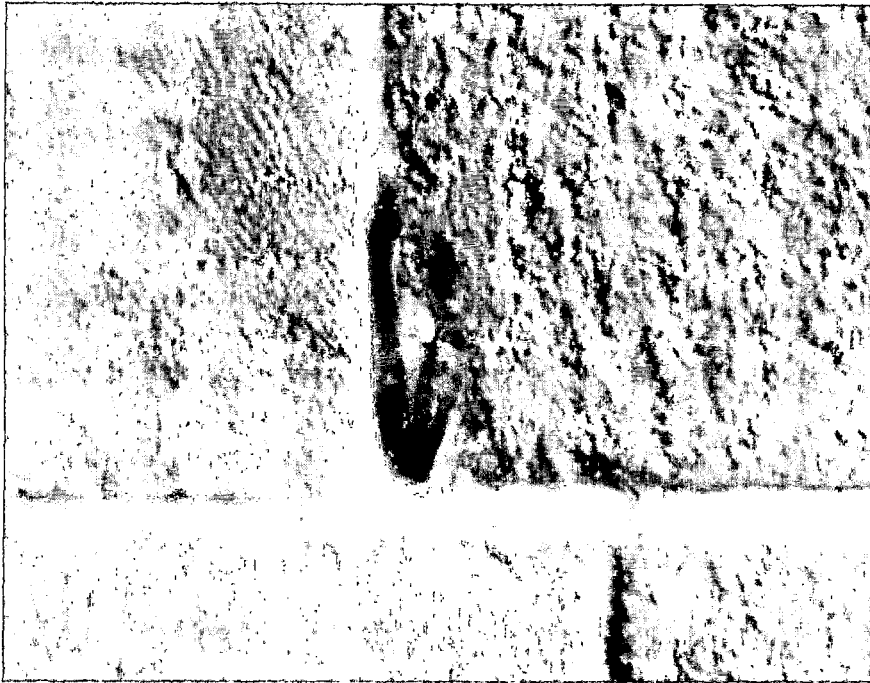


Figura 33. Proceso de extracción de muestra A2: 4) Muestra extraída.

Cronograma.

El cronograma para el proceso de extracción de muestras de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, realizada el día miércoles 29 de Octubre de 2014, fue el siguiente:

ACTIVIDAD	HORA
Armado de andamios.	08:00-11:00
Extracción de muestras parte alta y media	11:00-13:00
Extracción de muestras parte baja	13:00-14:00
Desarmado de andamios.	14:00-16:00

Tabla 6. Cronograma de Actividades.



Las muestras de morteros originales extraídos, se distribuyeron de la siguiente manera para la realización de los ensayos de caracterización.

Muestra	Numero	Peso (gr)	Ensayo de Caracterización	Muestra	Numero	Peso (gr)	Ensayo de Caracterización
P1	1	3.11	Difraccion de Rayos X	M1	1	2.02	Difraccion de Rayos X
	2	2.13	Microscopia de Barrido		2	3.80	Microscopia de Barrido
	3	2.63	Granulometria		3	5.26	Granulometria
	4	3.07	Analisis Quimico Elemental		4	5.80	Analisis Quimico Elemental
	5	4.20	Medicion de Ph		5	2.82	Medicion de Ph
	6	1.15	Textura, color, etc.		6	2.42	Textura, color, etc.
A1	1	2.44	Difraccion de Rayos X	P2	1	2.54	Difraccion de Rayos X
	2	2.13	Microscopia de Barrido		2	4.54	Microscopia de Barrido
	3	2.76	Granulometria		3	4.23	Granulometria
	4	2.05	Analisis Quimico Elemental		4	8.03	Analisis Quimico Elemental
	5	3.05	Medicion de Ph		5	10.81	Medicion de Ph
	6	2.58	Textura, color, etc.		6	13.38	Textura, color, etc.
M2	1	2.84	Difraccion de Rayos X	A2	1	3.42	Difraccion de Rayos X
	2	1.60	Microscopia de Barrido		2	3.28	Microscopia de Barrido
	3	6.64	Granulometria		3	5.18	Granulometria
	4	4.31	Analisis Quimico Elemental		4	8.97	Analisis Quimico Elemental
	5	4.34	Medicion de Ph		5	9.35	Medicion de Ph
	6	2.27	Textura, color, etc.		6	6.02	Textura, color, etc.
M3	1	2.47	Difraccion de Rayos X				
	2	3.82	Microscopia de Barrido				
	3	3.33	Ninguno				
	4	5.99	Analisis Quimico Elemental				
	5	3.08	Medicion de Ph				
	6	5.39	Textura, color, etc.				

Tabla 7. Cantidad de muestra extradias.

4.4 CANTERAS ESTUDIADAS.

En la presente investigación se estudiaron 5 agregados de diferentes canteras cercanas a la ciudad del cusco, para evaluarlas y definir cuál se comporta mejor para ser usada como componente árido en la propuesta de un mortero de restauración para la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

CANTERA ESTUDIADA	DISTANCIA (Km)
Arena de rio de Pisac.	35.0
Arena de obra Hades de PROMART ³¹ empaquetada industrialmente.	2.0
Arena de rio de Cunyac (seleccionada por su buena reputación en el mercado local).	95.0
Arena "roja" de Mina San Cristobal (Huambutio).	35.0
Arena de Huillque.	47.7

³¹ PROMART-Home Center, Cusco.

Tabla 8. Distancia de Canteras Estudiadas.

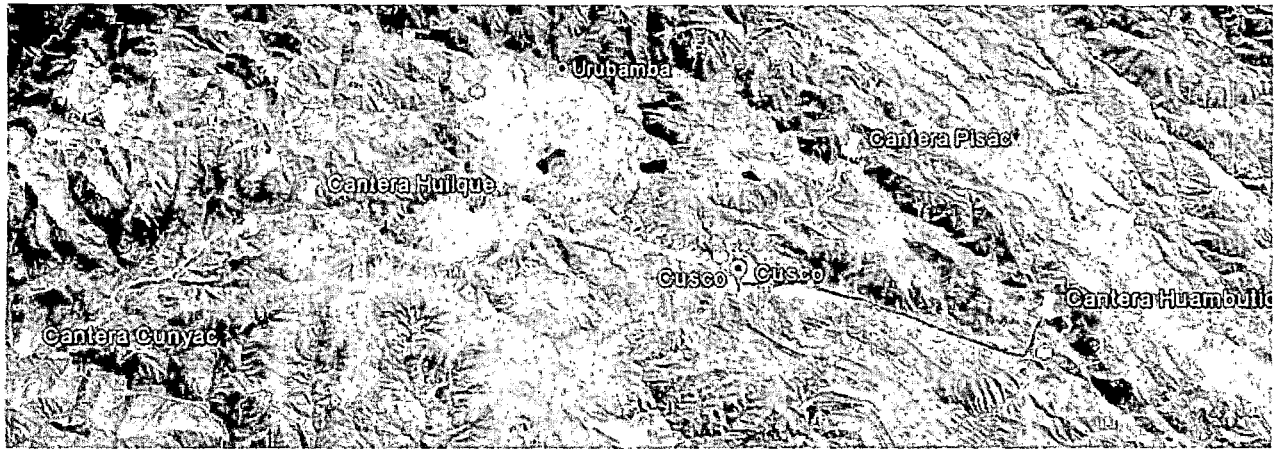


Figura 34. Ubicación de las canteras estudiadas.

Se tomaron muestras de cada una de estas para realizar ensayos granulométricos y se compararon con los límites de curvas granulométricas para agregado fino (arena gruesa) de mortero sugeridas por la Norma E-070 Albañilería³² de diciembre del 2004. Se continuó con el estudio únicamente con las arenas que estaban dentro o bastantes cerca de dichos límites, con módulos de fineza comprendidos entre 1.6 y 2.5 y libre de materia orgánica.

Cumplir con estos límites nos asegura una buena gradación de los agregados, no homogeneidad y buena compacidad de la mezcla.

³² RNE E-070 Capítulo 3.2, Tabla N°3 Granulometría de la arena gruesa

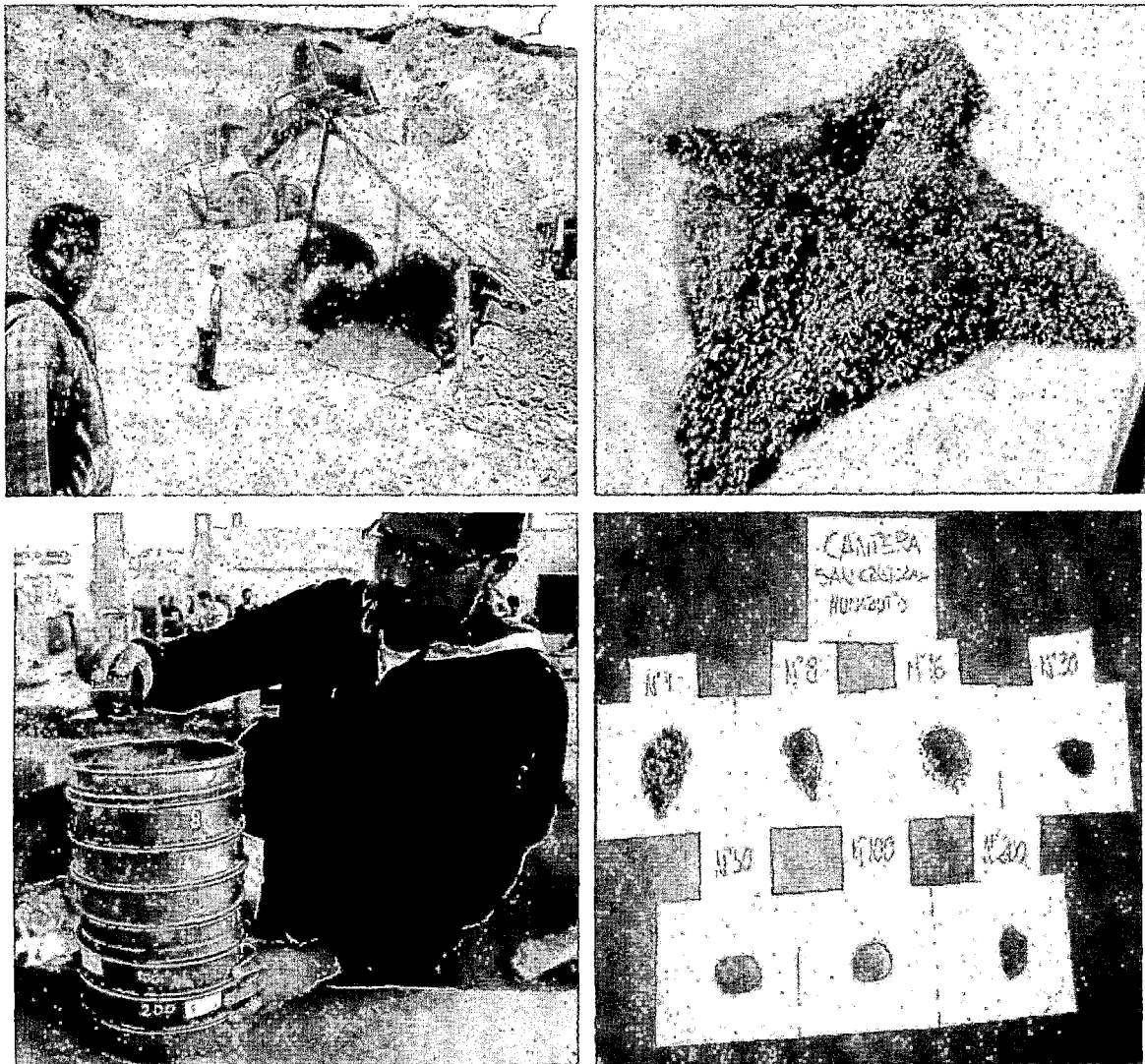


Figura 35. Proceso de estudio del agregado y prueba granulométrica.

GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS

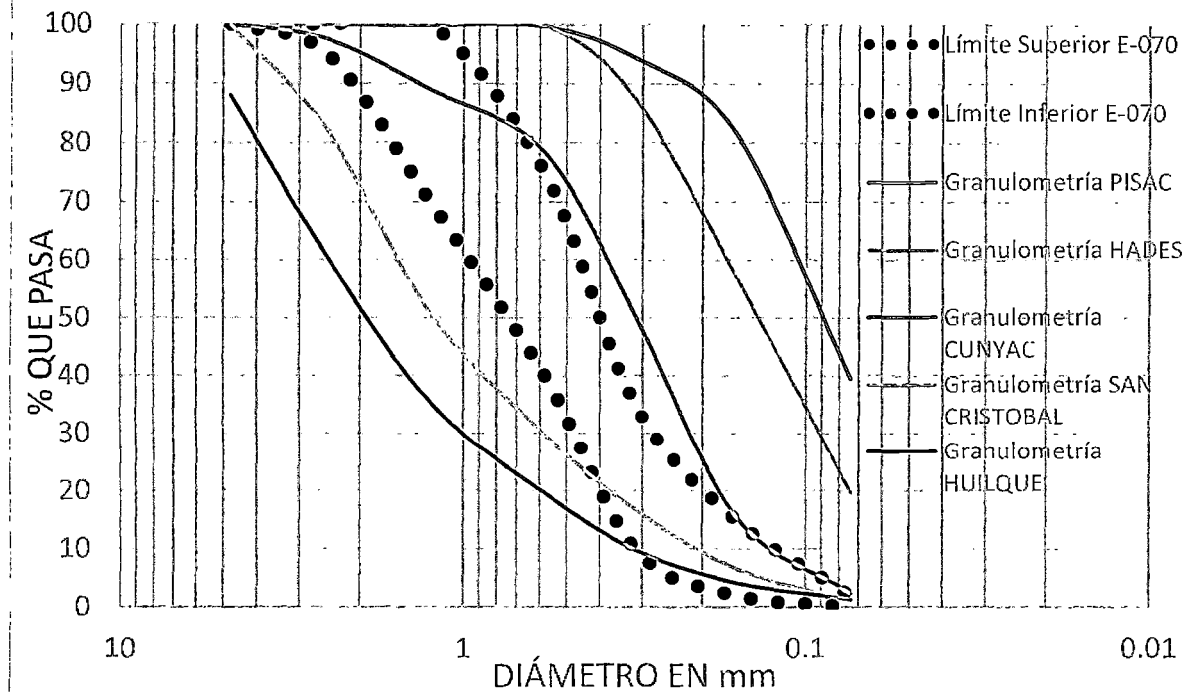


Grafico 1. Granulometría de canteras estudiadas.

Por tales razones, los ensayos posteriores se realizaron con agregado de Cunyac, San Cristobal (Mina) y Huilque, (Pisac y Hades no cumplen con la granulometría por ser muy finos) previa corrección en peso para que se sitúen dentro de los límites establecidos.

Otras características mecánicas y físicas de estos agregados, son:

AGREGADO FINO	PESO ESPECÍFICO RELATIVO	COEF. UNIFORMIDAD (CU)	COEF. CURVATURA (CC)	Ph
Cunyac	2.65	2.71	0.99	8.25
San Cristobal (mina)	2.55	8.00	1.05	8.50
Huilque	2.61	7.81	1.25	8.22

Tabla 9. Características físicas y químicas de los agregados.

En mecánica de suelos³³ se indica que Cu decrece cuando la uniformidad aumenta, Cu < 3 son muy uniformes. Cc tiene valores entre 1 y 3 en suelos bien graduados.

³³ Badillo, Juarez Mecánica de suelos Tomo 1, capítulo 5, pag, 101



Por lo que se puede decir que los agregados con los que trabajaremos son no uniformes y bien graduados.

Se realizó también la medición del grado de acidez o alcalinidad de los agregados en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, mostradas en la tabla anterior, identificándose que sus Ph están en el rango de 8.22-8.50 (muy cercanos al valor neutro de 7), lo que evidencia la neutralidad de los agregados con leves tendencias hacia el lado básico.

Los resultados del análisis químico completo, se resumen en la siguiente tabla y gráfico.

Porcentaje (%)	Mina - Huambutio	Cunyac	Huilque
SiO₂	92.9	95.3	96.4
CO₃	1.20	0.07	0.28
SO₄	0.28	0.00	0.08
Cl	0.09	0.00	0.16
Ca	0.82	0.04	0.06
Mg	0.04	0.01	0.02
Fe₂O₃	0.27	0.08	0.26
Al₂O₃	0.13	0.12	0.50

Tabla 10. Análisis Químico Elemental. Fuente: Laboratorio de Química - UNSAAC

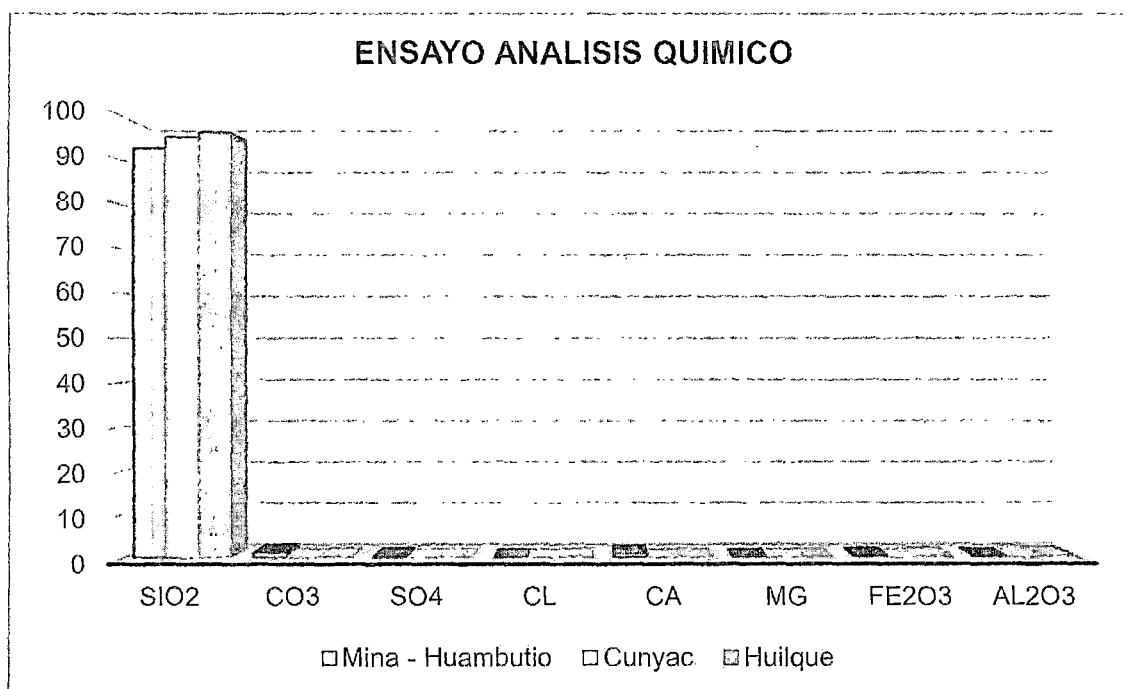


Grafico 2. Cuadro de barras por compuestos y elementos químicos. Canteras estudiadas.



Se observa que el agregado de Mina-Huambutio contiene mayor porcentaje de otros elementos diferentes al SiO_2 , probablemente debido al fácil acceso de contaminantes a la mina abierta, así también como del polvillo arrastrado por el viento que pudiera ser minerales de arcilla no identificados por este método químico; a diferencia del agregado de Cunyac que por su procedencia de río, es más limpio cuando se usa de forma natural (sin lavado de finos en laboratorio u obra).

4.5 CALES ESTUDIADAS.

En la investigación se propuso el estudio y aplicación de 2 tipos de cales industriales de uso común en el medio local para morteros de cal. Estas cales propuestas son:

4.5.1 Cal de Obra Hades.

Es la única cal del medio local para uso en construcción, esta cal viene en bolsas empaquetadas industrialmente por KRL SOLUTIONS / TRADING de aproximadamente 2kg de peso. Es usada en el tarrajeo y cimentaciones de estructuras.



Figura 36. Cal de Obra Hades.

4.5.2 Cal Hidráulica "Comacsa".

Es una cal hidráulica de agregados calcáreos empaquetada industrialmente por la empresa Comacsa³⁴, reconocida por sus buenas propiedades hidráulicas de fragua en condiciones saturadas, fácil trabajabilidad y rápida puesta en obra, el auto curado de grietas, el aporte significativo a la impermeabilidad de las construcciones, la desaparición de eflorescencias, eliminación de hongos en las superficies, entre otras. Viene en paquetes de 35kg. Su fragua inicial comienza a las 2-3h después de ser hidratada.

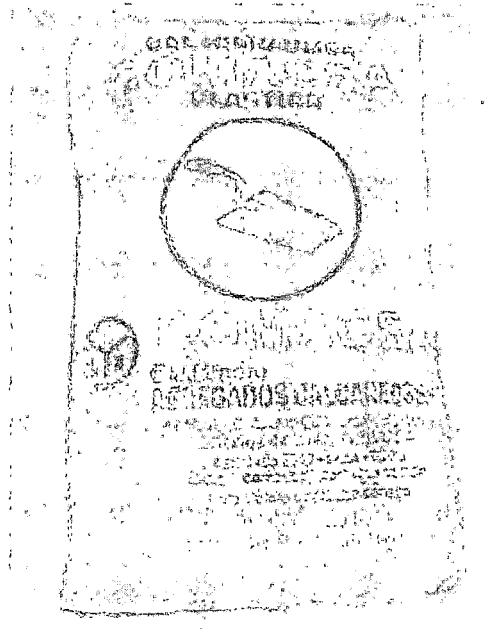


Figura 37. Cal Hidráulica Comacsa.

Se realizó el análisis químico en el laboratorio de la facultad de Química de la UNSAAC, obteniendo los siguientes resultados.

Compuesto	Cal Hidráulica (%)	Cal de Obra Hades (%)
Ph	11.6	11.2
Cao	68.70	63.20
CaCO ₃	4.40	7.90
SO ₄	0.11	0.06
MgO	5.20	8.70
SiO ₂	2.10	2.76
Fe ₂ O ₃	1.82	0.24
Al ₂ O ₃	0.39	0.44

Tabla 11. Análisis Químico Elemental y pH. Fuente: Laboratorio de Química - UNSAAC

³⁴ <http://www.comacsa.com.pe/index.php/cal-comacsa/item/61-cal-hidr%C3%A1ulica>

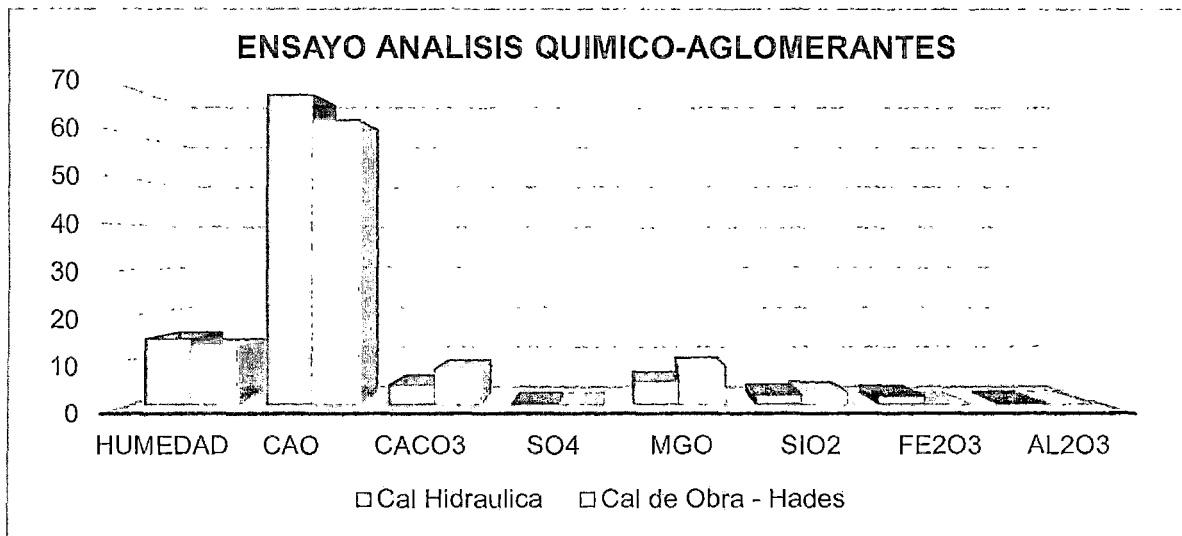


Grafico 3. Cuadro de barras por compuestos y elementos químicos. Cales estudiadas.

Se resalta la identificación de carbonato de calcio (piedra caliza) y oxido de calcio (cal viva) en grandes porcentajes, componentes que deben estar presentes en estas cales. También se observa que ambas cales presentan MgO en más de 5%, por lo que éstas, aparte de caliza, también tuvieron pequeños porcentajes de dolomía en su composición³⁵.

Se realizó también la medida de Ph. En la que se observa la gran alcalinidad (Ph mayor de 7) de los aglomerantes, con muy poca diferencia de valores entre sí.

³⁵ Fernandez (2010)



CAPÍTULO V

ENSAYOS EXPERIMENTALES.

5.1 DISEÑO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Se realizaron los siguientes ensayos de caracterización de las propiedades físicas, químicas, mecánicas y estéticas de los morteros originales de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, así también como para los morteros de restauración propuestos.

Para los morteros originales, se realizó:

- Difracción de Rayos X.
- Análisis Químico elemental.
- Granulometría del agregado.
- Otros ensayos (acidez o alcalinidad, textura y color.)

Para los morteros propuestos de restauración, se realizó:

- Compresión Axial no confinada.
- Adherencia.
- Permeabilidad.
- Durabilidad
- Otros ensayos (Acidez o alcalinidad)

La descripción del ensayo, objetivo, equipo, materiales, preparación de la muestra, el procedimiento del ensayo, los datos de entrada, el procesamiento de los datos y los resultados y discusión se detallan a continuación.

5.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO ORIGINAL.

El campo de la conservación de monumentos históricos busca obtener información del tipo de aglomerante y agregado, las proporciones de la mezcla, la distribución del tamaño de grano, la presencia de adiciones (que mejoren las propiedades mecánicas) y otras materias primas (orgánicos, fibras, pelo animal, clara de huevo, polvo cerámico, etc) y así identificar los componentes necesarios para producir un mortero compatible tanto en aspectos mecánicos, químicos, físicos y estéticos.

La caracterización de morteros históricos hasta 1970-1980 estaba principalmente basada en análisis químicos tradicionales hechos por vía húmeda. La interpretación de estos resultados era difícil y frecuentemente imposible sin un buen conocimiento de la naturaleza de los diferentes componentes del mortero; es por ello que la mayoría de caracterizaciones posteriores, se han respaldado en técnicas más avanzadas, como la Difracción de Rayos X, entre otras.

5.2.1 Difracción de Rayos X

Es una técnica de caracterización física³⁶ y destructiva usada para caracterizar materiales de grano muy fino inferior a unos pocos micrómetros, entre ellos materiales compuestos como los morteros. Está basada en la difracción de los Rayos X en los cristales o estructuras cristalinas presentes en la muestra y se utiliza para reconocer las fases cristalinas presentes en esta.

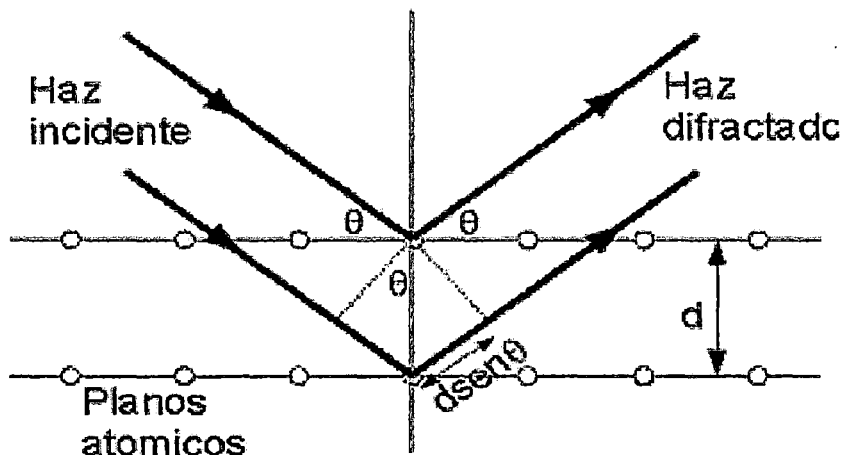


Figura 38. Fenómeno de dispersión de Bragg.

Esta técnica está fundamentada en el trabajo de W. H. Bragg y W. L. Bragg que en 1913 desarrollaron una descripción sencilla de un haz difractado por un cristal. Parte del espectro de longitudes de onda que comprenden los rayos X corresponde a valores de longitud de onda que son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de los retículos cristalinos de modo que la materia cristalina puede actuar como red de difracción de estos rayos. La geometría del fenómeno de difracción de rayos X se rige por la ley de Bragg, que establece la dirección en que se produce la difracción del haz en función de la orientación del cristal (θ : ángulo de reflexión igual al de incidencia) de los espaciados

³⁶ Más exactamente, es un método físico difractométrico.



interplanares existentes en su estructura (d) y de la longitud de onda de la radiación utilizada (λ) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Existen dos requerimientos geométricos al considerar la ley de Bragg:

- El haz incidente, la normal al plano reflectante y el haz difractado son siempre coplanares.
- El ángulo entre el haz difractado y el haz transmitido es siempre 2θ , y es el ángulo de interés desde el punto de vista experimental.

El resultado de esta prueba es el diagrama de difracción que representa la “Huella dactilar” de la fase cristalina que lo ha producido. Si la muestra está producida por una mezcla de diferentes especies cristalinas, el diagrama corresponderá a la suma de los efectos individuales de difracción de cada especie presente. La identificación de cada fase se hace mediante comparación con patrones de base de datos de información cristalográfica, minerales, materiales inorgánicos, etc. Cabe resaltar que este análisis es hecho por ordenador y es parte de los resultados brindados por el laboratorio usado.

La técnica permite resolver las incógnitas, tales como el tipo de aglomerante y agregado inerte usado en la elaboración del mortero analizado, siendo de esta manera uno de los primeros pasos en la identificación cualitativa y semi cuantitativa de los diferentes componentes presentes en las muestras analizadas.

A. OBJETIVO.

El objetivo del ensayo de Difracción de Rayos X sobre las muestras originales de mortero de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, es identificar cualitativa y semi cuantitativamente las fases cristalinas presentes, las proporciones cualitativas de cuarzo respecto a la calcita, determinar minerales de arcilla presentes y la temperatura aproximada en la que originalmente la cal se calcino.

B. EQUIPO.

- ✓ Difractómetro en polvo marca BRUNKER modelo D8-FOCUS de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima. (con radiación monocromática de 1.54Å de un tubo emisor de rayos X de Cu)



- ✓ Computadora con software especializado y base de datos ICDD-2007
- ✓ Porta Muestras.

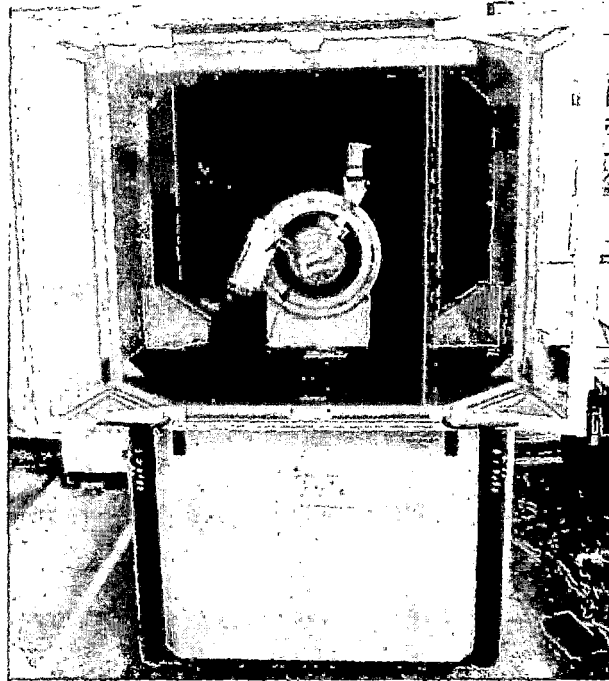


Figura 39. Difractómetro marca BRUKER modelo D8-FOCUS de la Facultad de Física de la UNMSM.

C. MATERIALES.

- ✓ 08 Morteros originales de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, debidamente rotulados (M1, M2, M3, A1, A2, P1, P2, P3).
- ✓ Papel aluminio.
- ✓ Cucharita de Plástico.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Guantes.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Para realizar el ensayo de Difracción de Rayos X, las muestras de mortero original de la Portada Principal de la Portada Principal de la Catedral del Cusco fueron trituradas hasta obtener una consistencia de "talco"³⁷ usando un mortero y pilón de porcelana, para luego ser almacenadas en frascos herméticos debidamente rotulados.

³⁷ Capaz de pasar el tamiz N°100

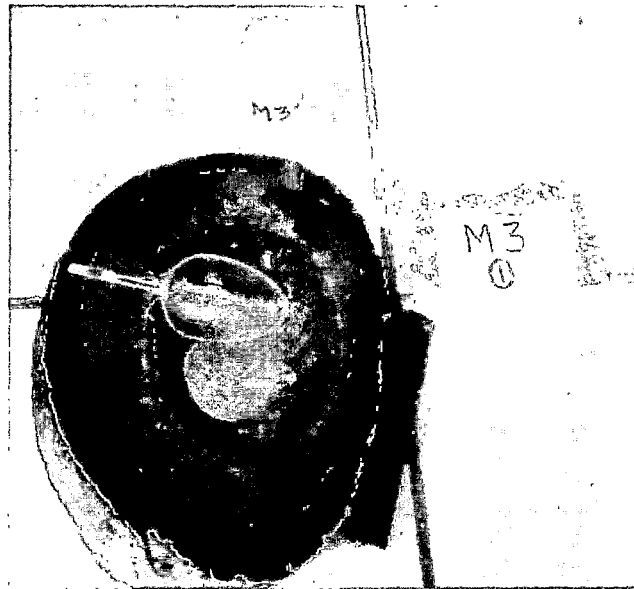


Figura 40. Triturado de la muestra M3-1 usando mortero y pilón de porcelana. UNMSM.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

1. Después de limpiar con agua destilada el mortero y pilón de porcelana, se coloca aproximadamente 2g de la muestra para triturlarla hasta que tenga la apariencia de "talco" y atraviese el tamiz estandarizado N°100.
2. Se coloca la muestra en un frasco hermético de plástico debidamente rotulado.
3. La muestra triturada se coloca cuidadosamente en los anillos concéntricos del porta muestras hasta que la superficie superior queda completamente horizontal, caso contrario se repite el proceso.
4. El porta muestra (con la muestra de mortero) se coloca en el compartimiento del equipo Difractor de Rayos X.
5. Se inicia el software y se realiza un primer ensayo exploratorio que dura aproximadamente 60s, con el objetivo de identificar el intervalo del ángulo 2θ que se usará en el difractograma.
6. Con la exploración anterior se especifican los siguientes datos en el software.
 - a. Tiempo de exposición de la muestra: 2 - 4s por paso.
 - b. Paso de 0.02° (grados sexagesimales)Estableciendo una duración aproximada de 3 a 4h por muestra.
7. Se comienza el ensayo, observando el difractograma de la muestra en tiempo real.
8. Posteriormente se realiza la comparación del difractograma con la base de datos ICDD-2007, para identificar las fases minerales presentes, sin embargo, está es una tarea especializada que fue realizada por el técnico del Laboratorio.

9. Los datos procesados se muestran en gráficos 2Theta (grados) VS Intensidad (u.a.)

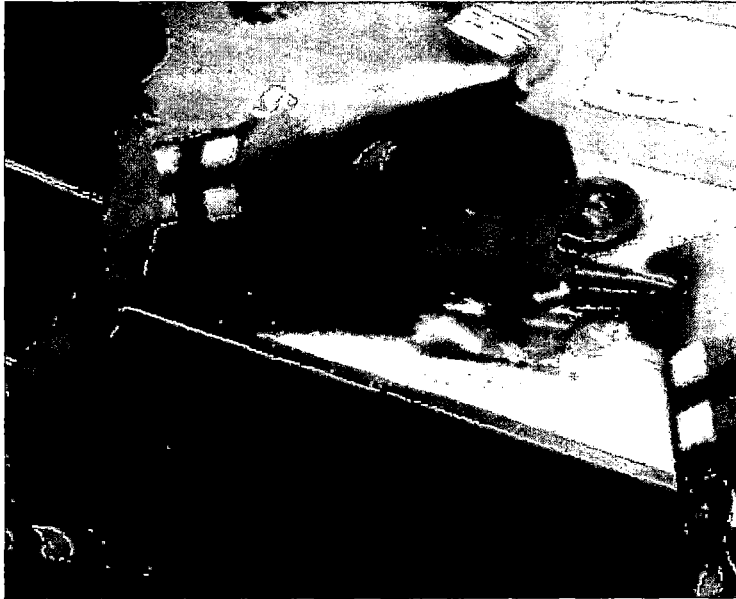


Figura 41. Procedimiento de ensayo de Difracción de Rayos X: 1) Pulverizado de muestra.

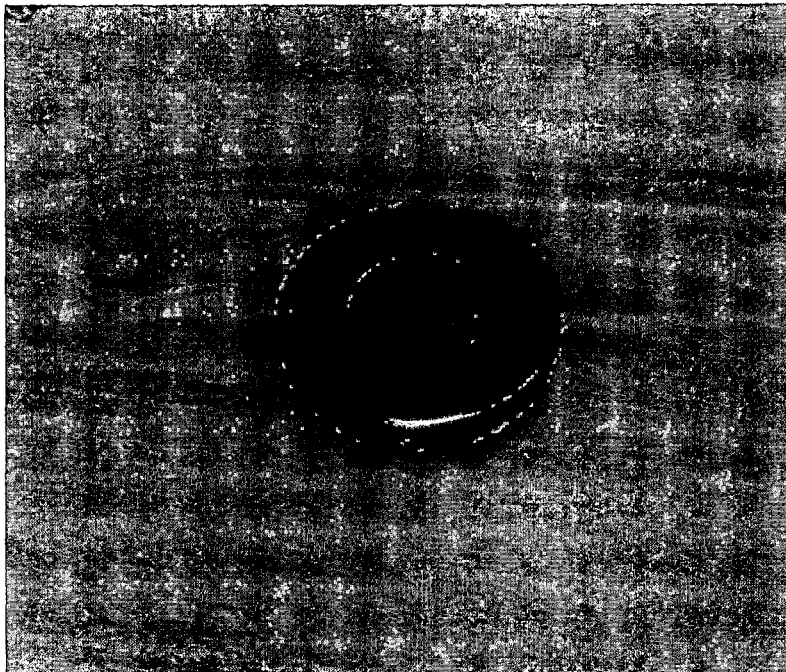


Figura 42. Procedimiento de ensayo de Difracción de Rayos X: 2) Colocado de la muestra en el porta muestras.

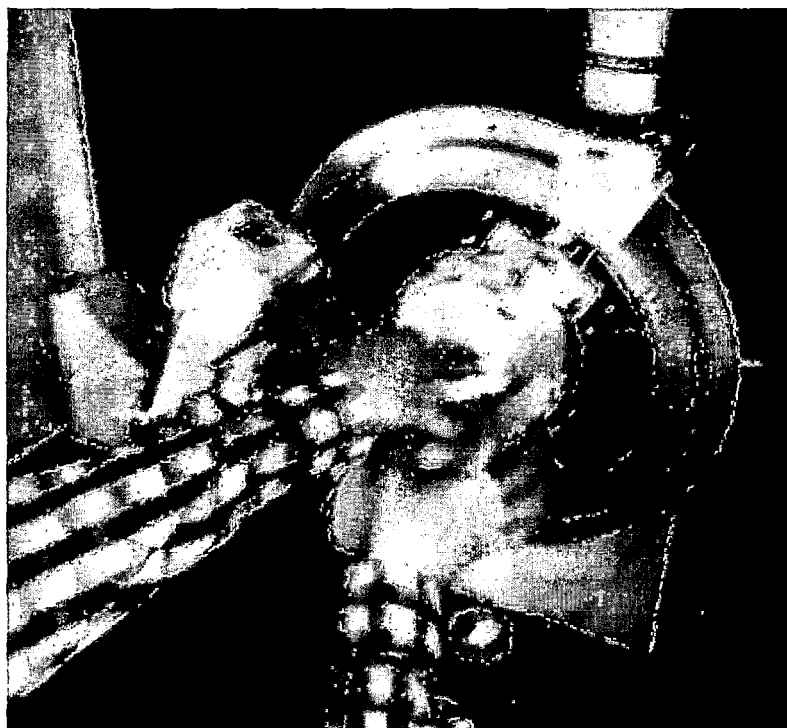


Figura 43. Procedimiento de ensayo de Difracción de Rayos X: 3) Colocado del porta muestras en el equipo de difracción de rayos X.

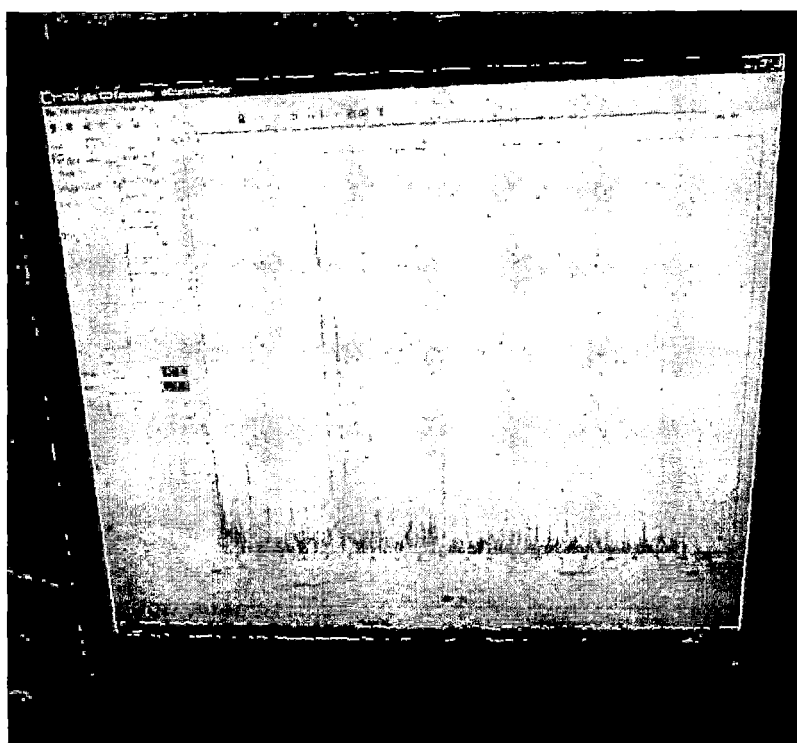


Figura 44. Procedimiento de ensayo de Difracción de Rayos X. 4) Procesamiento de Datos.

F. REGISTRO DE DATOS.

En este ensayo no fue necesario recolectar datos previos al análisis de las muestras.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Los datos se procesaron internamente en el Laboratorio de Ciencias Físicas de la UNMSM, los resultados se muestran a continuación.

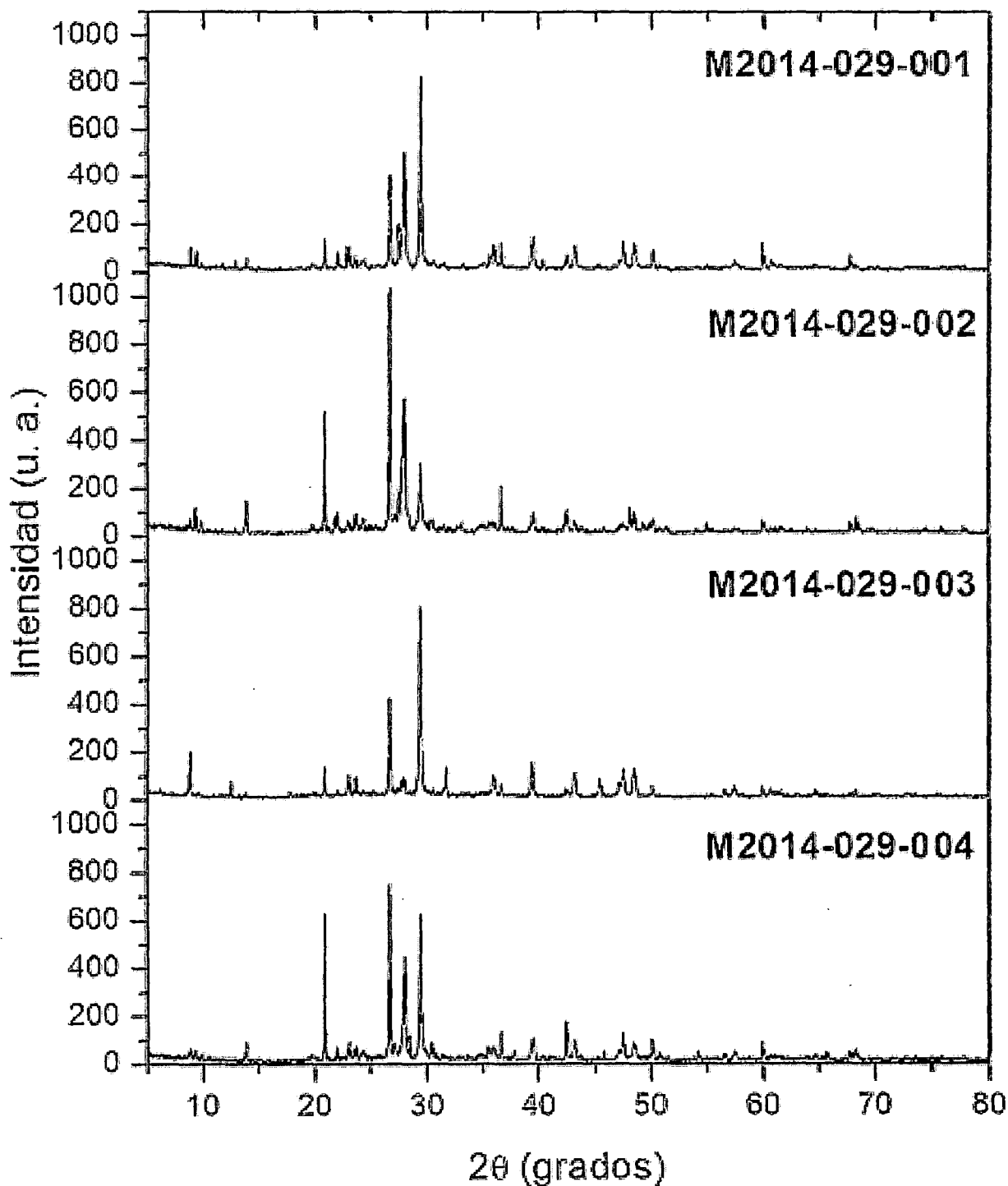


Figura 45. Procesamiento de datos de las muestras A1-1, A2-1, M1-1, M2-1.

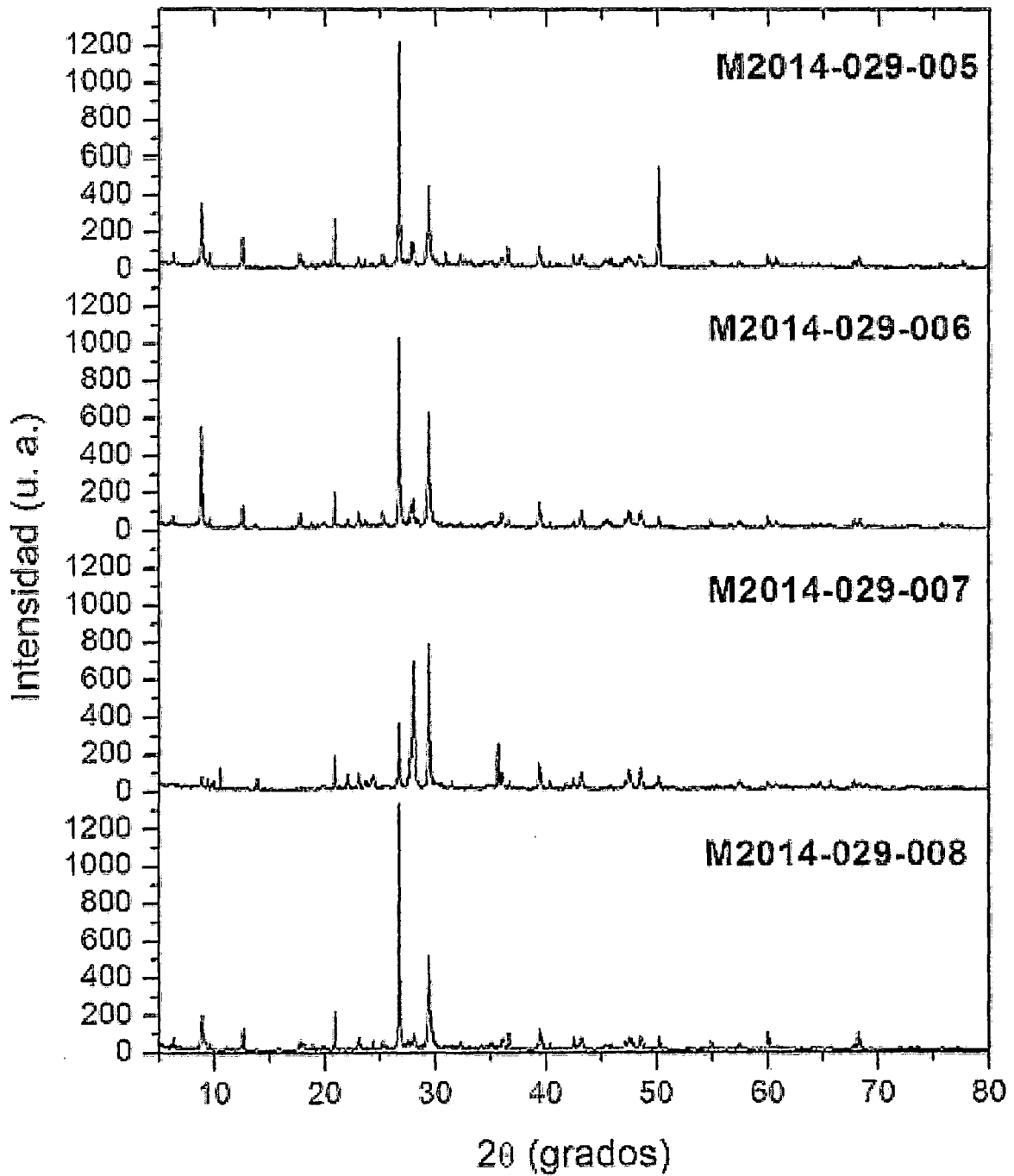


Figura 46. Procesamiento de datos de las muestras M3-1, P1-1, P2-1 y P3-1



H. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

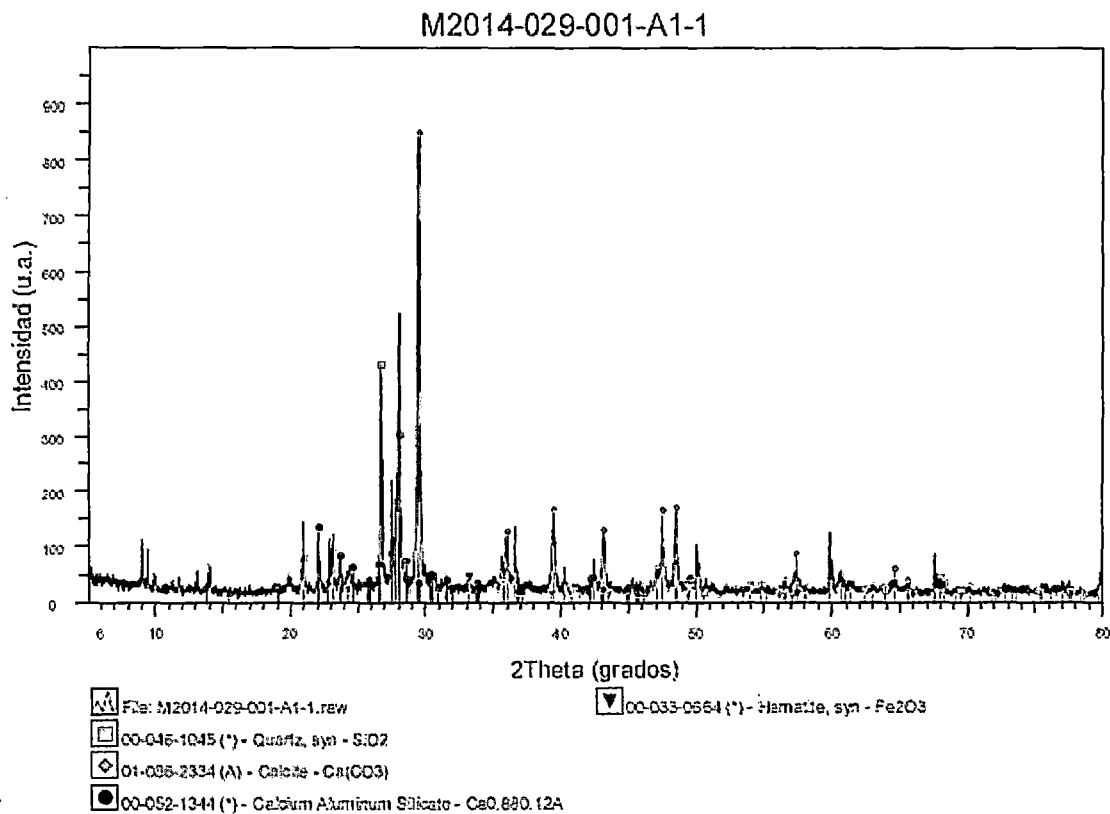


Figura 47. Difractogramas correspondientes a la muestra A1-1.

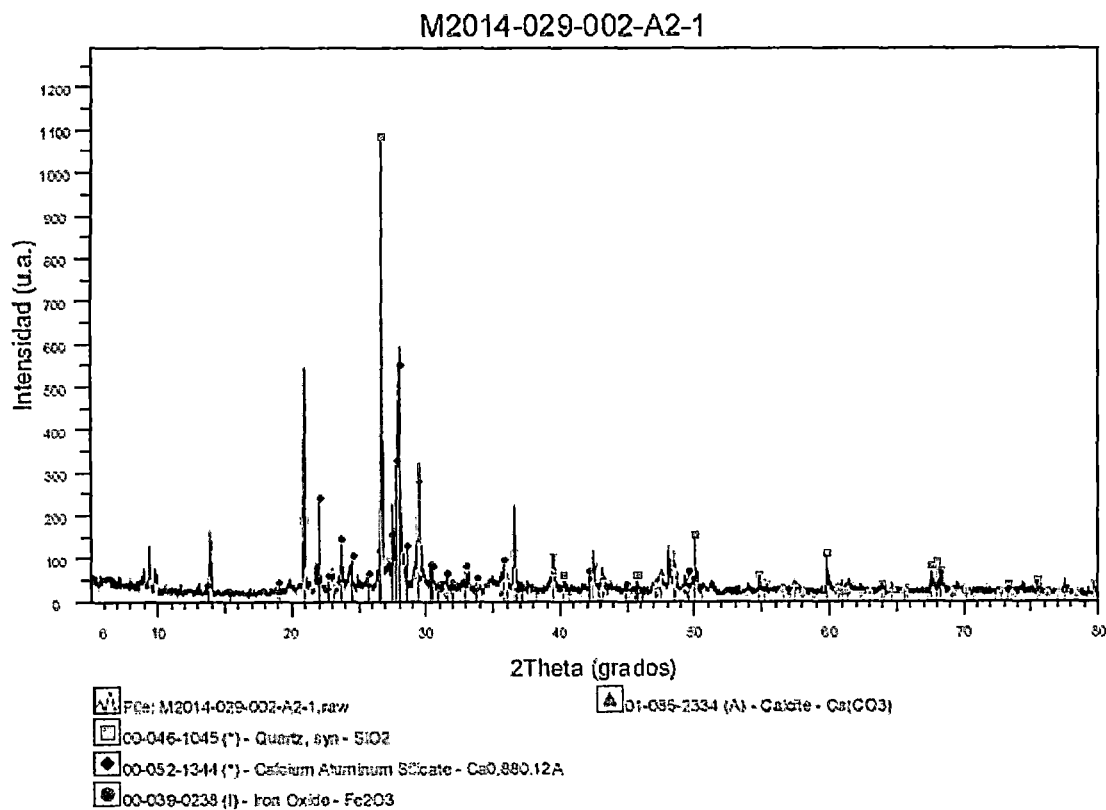


Figura 48. Difractogramas correspondientes a la muestra A2-1.

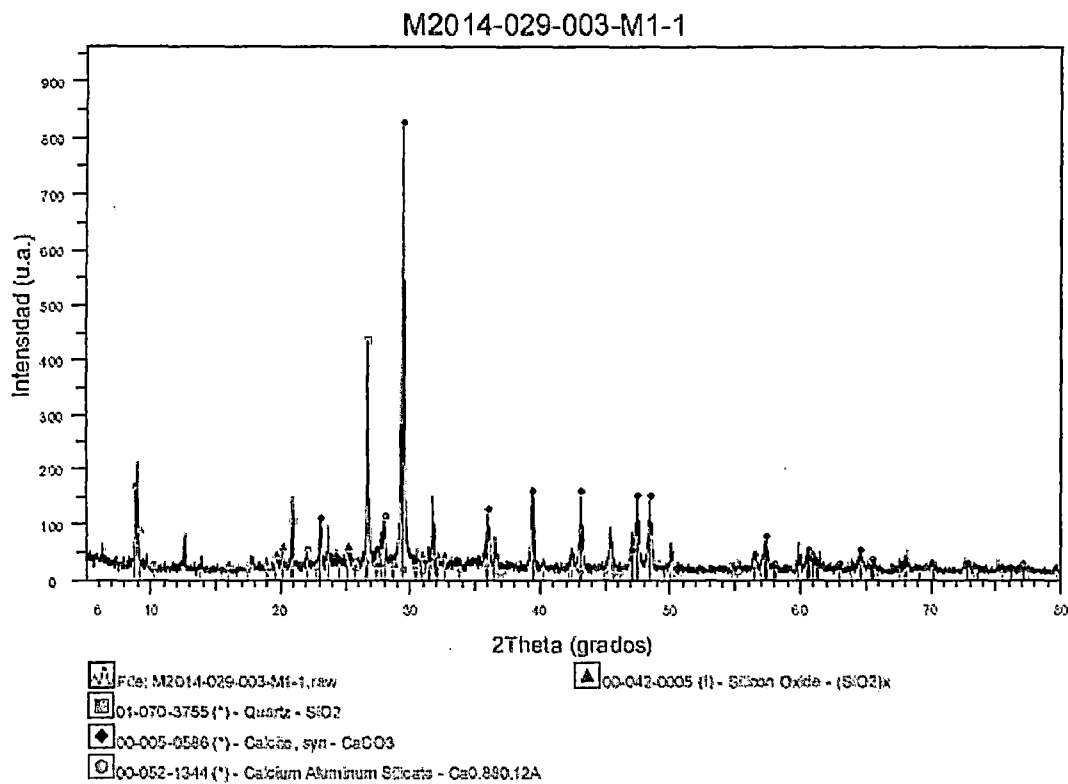


Figura 49. Difractogramas correspondientes a la muestra M1-1.

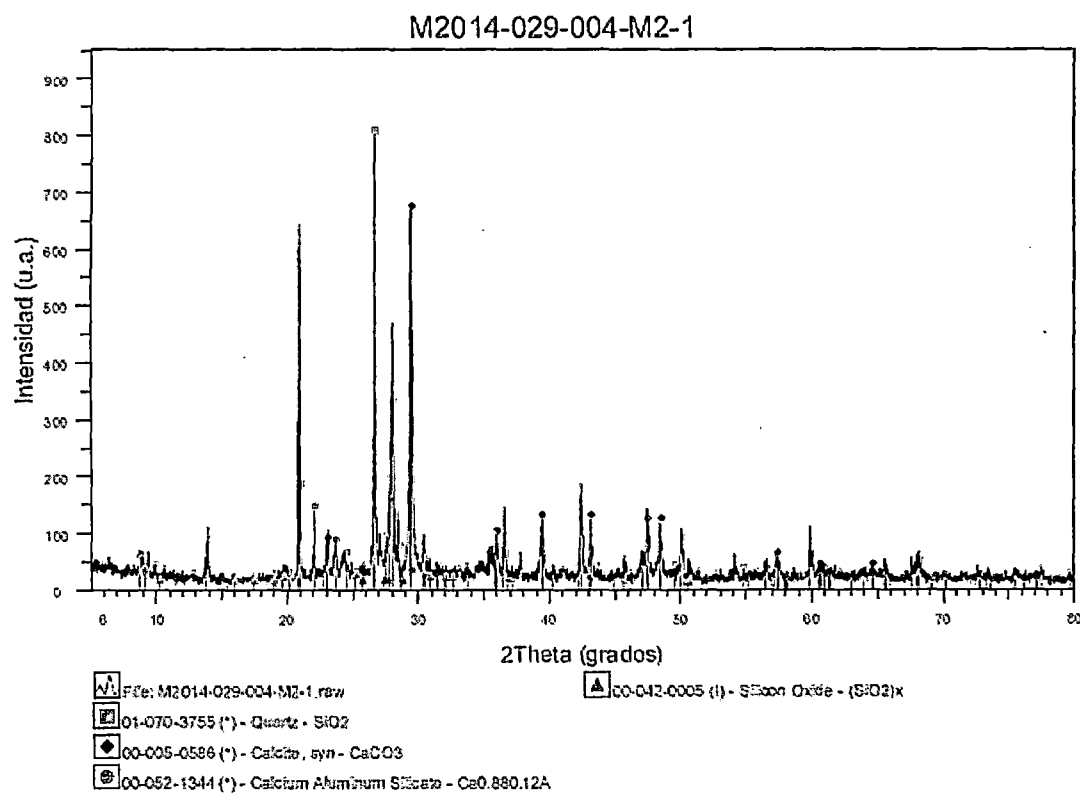


Figura 50. Difractogramas correspondientes a la muestra M2-1.

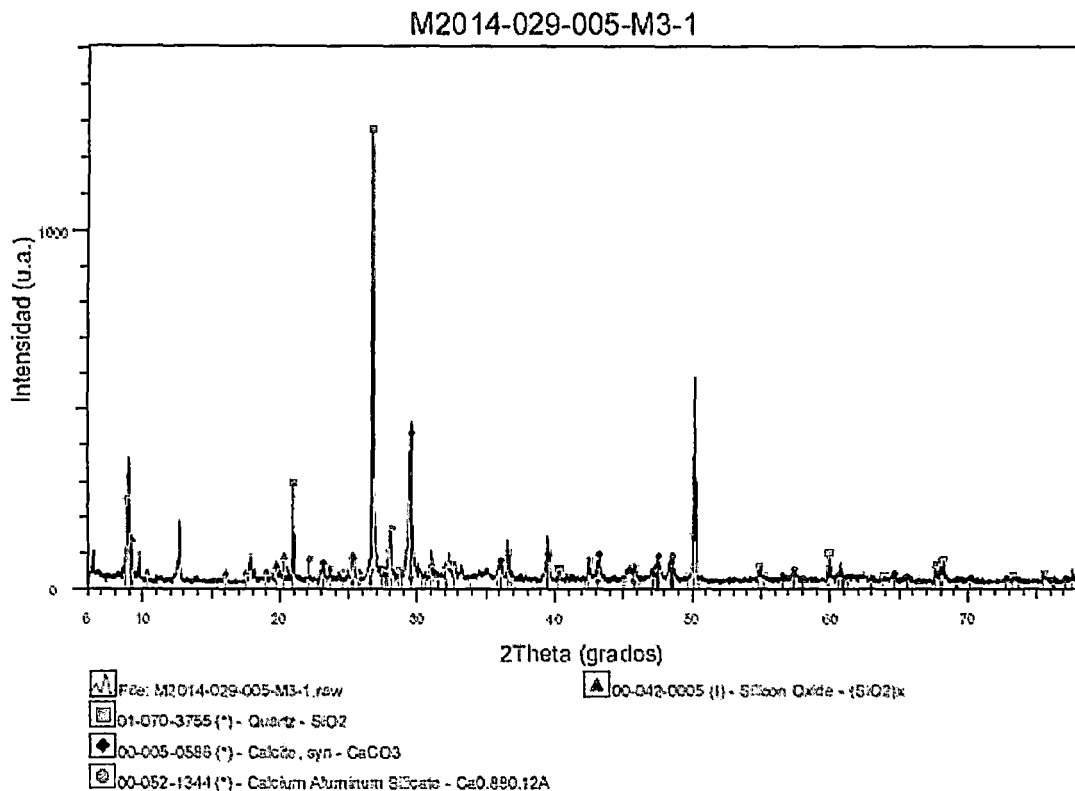


Figura 51. Difractogramas correspondientes a la muestra M3-1.

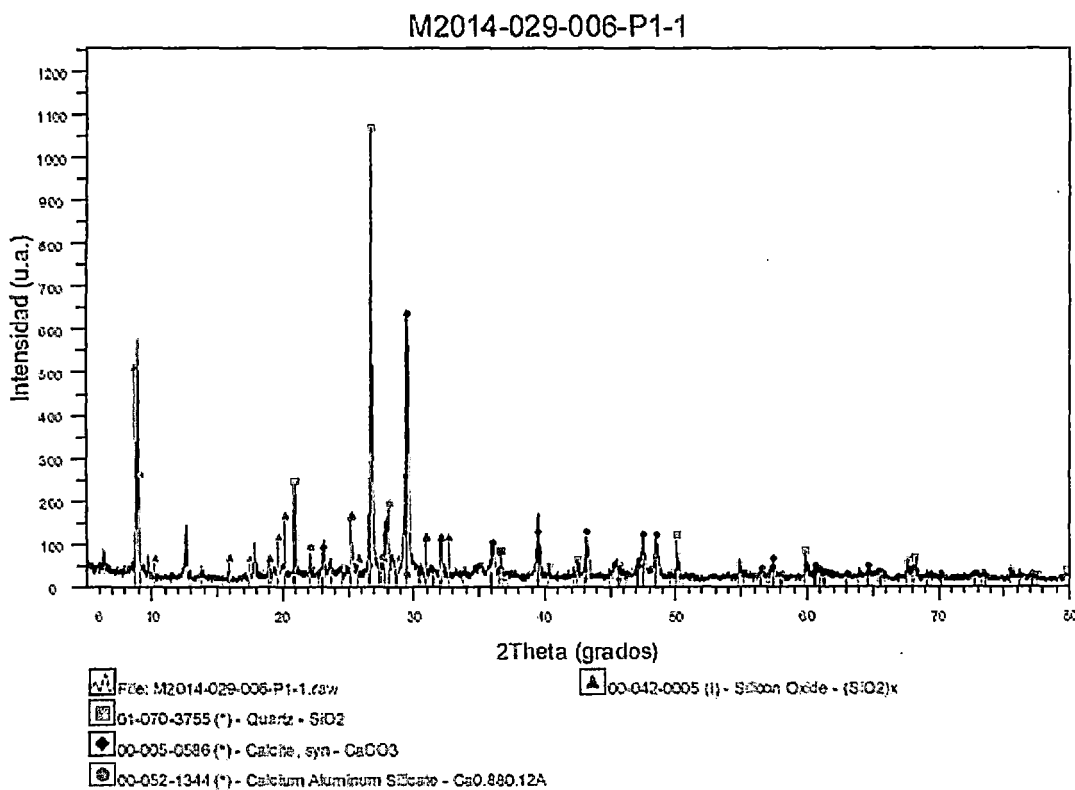


Figura 52. Difractogramas correspondientes a la muestra P1-1.



M2014-029-007-P2-1

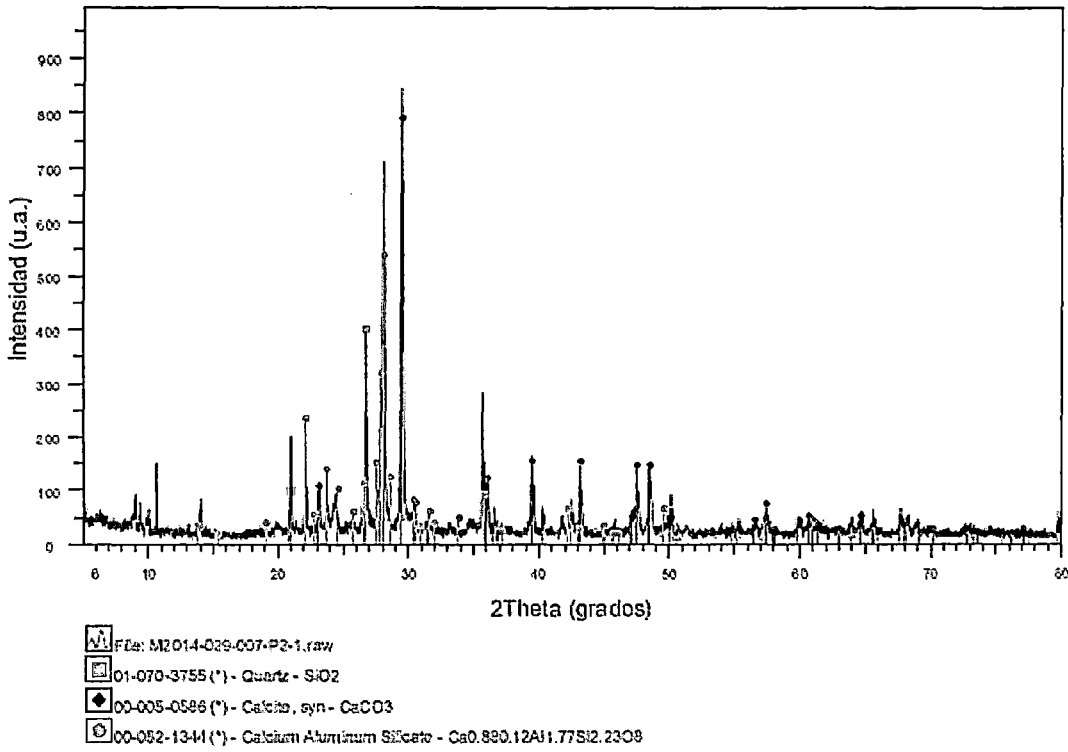


Figura 53. Difractogramas correspondientes a la muestra P2-1.

M2014-029-008-P3-1

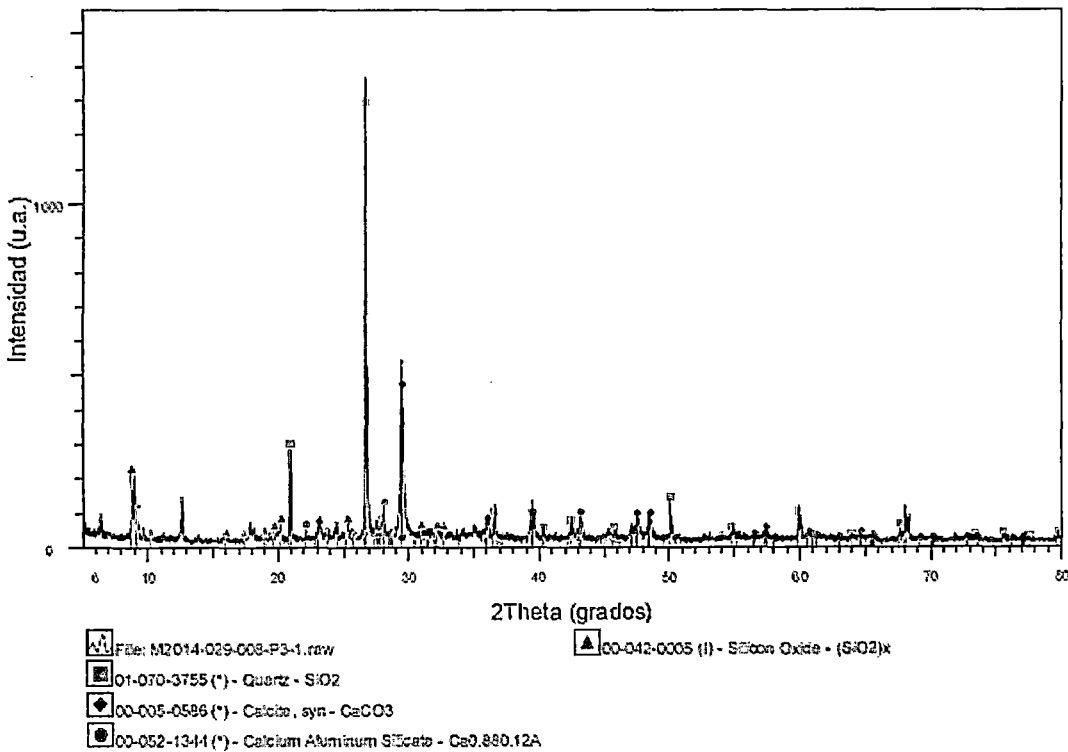


Figura 54. Difractogramas correspondientes a la muestra P3-1.



Los difractograma de las muestras de mortero original, indica que se identificaron las fases Quartz, syn (SiO_2), Calcite ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), Calcium Aluminum Silicate ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y Hematite, syn (Fe_2O_3).

La presencia de cuarzo (SiO_2) es clara evidencia de la utilización de arenas cuarcíticas en el mortero original; por otra parte, la presencia de calcita o carbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) es indicativo de la utilización de la cal. El Silicato de Aluminio y calcio, aunque un poco más complicado de detallar, nos evidencia la presencia de arcilla bentonítica de grano muy fino del tipo de montmorillonita, y que probablemente es responsable del color característico del mortero, así como de características hidráulicas, estas arcillas pudieron estar presentes en la piedra caliza, o haber sido introducidas involuntariamente en la quema de la caliza en los hornos de ladrillo.

Las intensidades (eje de las ordenadas en los difractogramas) están relacionadas cualitativamente con la concentración en los morteros, y al comparar los picos de calcita y cuarzo, se observa que no todas las muestras de morteros son ricas en cuarzo o árido (como se esperaría normalmente).

Es de gran interés observar que las muestra A1, M1 y P2 tienen intensidades bastante altas de carbonato de calcio o calcita (cal) en sus difractogramas, pudiendo decirse que la parte baja de la Portada Principal de la Catedral del Cusco tuvo una mezcla de mortero bastante rica en cal. Por otra parte, la muestra M2 contiene tiene mayor intensidad de bentonita (mineral de la arcilla) que el resto de las muestras.

Se observa una similitud cualitativa en los picos de los difractogramas. En el caso de A1, M1 y P1 presentan dos picos entre 25 y 30° bastante similares. Y en A2, M2 y P2, el parecido se hace más notorio, presentando tres picos característicos entre 25 y 30°. Estas similitudes nos dan una idea acerca de diferencias en el mortero que pudieron existir a medida que la construcción de la Portada Principal avanzaba en altura (¡la construcción duró 110 años!). Además los difractogramas de las muestras M3 y P3 (que tuvieron presencia de cemento) tienen similitud entre sí, lo que evidencia el sellado y posible reposición de los morteros originales con mortero de cemento en los niveles altos de la Portada Principal de la Catedral del Cusco que contaminaron enormemente las muestras extraídas en el nivel alto.

Se realizó también la descripción cualitativa de 1 muestra de DRX (M1), sin embargo, esta descripción debe tomarse con cautela ya que hubo presencia de textura en el preparado de las muestras.

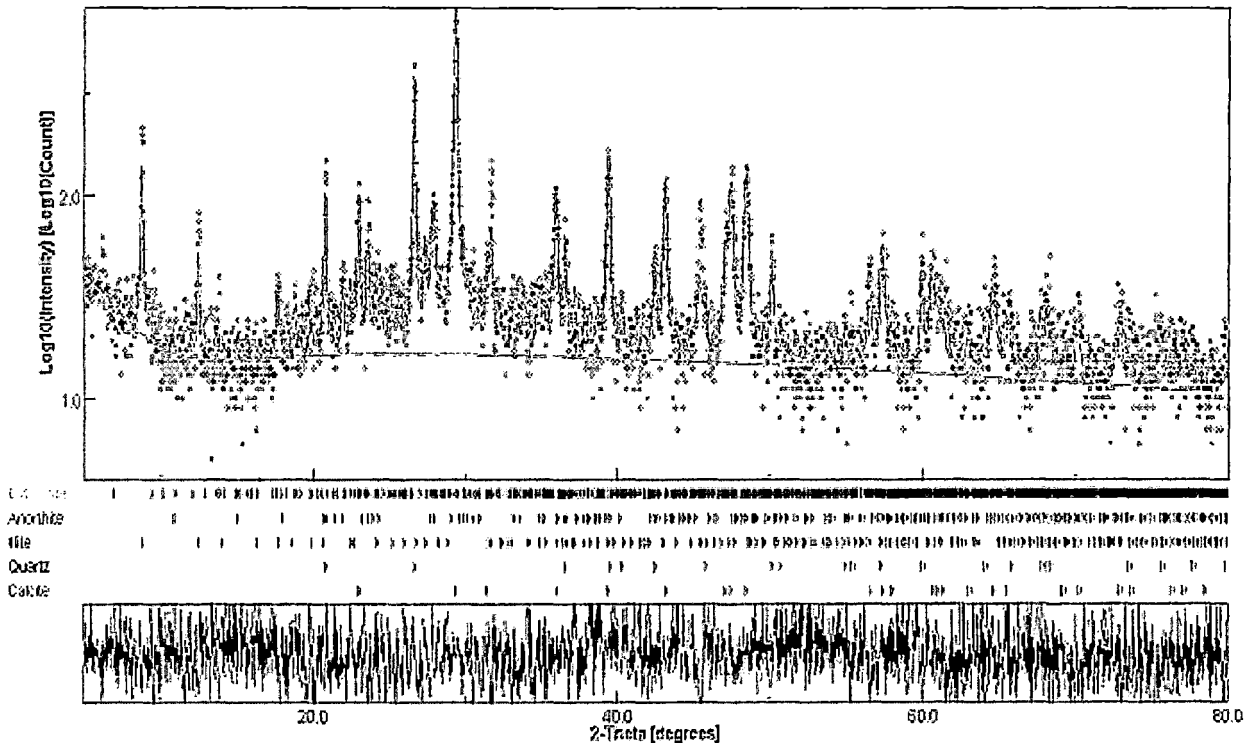


Figura 55. Difractograma y Descripción cuantitativa de la Muestra M1-1

Compuesto en M1	Porcentaje en peso %
Calcita CaCO ₃	52%
Cuarzo SiO ₂	18%
Illita	10%
Bentonita	17%
Anortita	3%

Tabla 12. Descripción cuantitativa de la Muestra M1-1.

La bentonita, anortita³⁸ (CaAl₂Si₂O₈) e illita³⁹ ((K,H₃O)(Al, Mg, Fe)₂(Si, Al)₄O₁₀[(OH)₂, (H₂O)]), son en su mayoría componentes de las arcillas, así también como parte de los agregados. La baja presencia de Anortita e Illita sugieren que la activación

³⁸ Mineral del grupo de los silicatos, pertenece al grupo de las feldespatos llamados plagioclasas, es producto de la reacción entre una arcilla activada y el óxido de cal en el proceso de cocción de la materia prima (caliza) al lograr esta una temperatura de 900°C

³⁹ Mineral presente hasta los 800°C en la calcinación.



del material no se dio a altas temperaturas, pudiendo haber sido la temperatura en los hornos de quema de caliza menor a 800-900°C.

Los resultados de esta muestra M1 indican aproximadamente que la relación cal/agregado en peso es bastante similar a 1:1, sin embargo estos resultados se toman con cautela, afirmando únicamente que la muestra M1 es rica en cal.

5.2.2 Análisis Químico elemental.

Se usó un espectrofotómetro, este instrumento tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por dicha muestra. Esto le permite al operador realizar dos funciones:

1. Dar información sobre la naturaleza de la sustancia en la muestra.
2. Indicar indirectamente qué cantidad de la sustancia que nos interesa está presente en la muestra.

El análisis químico de las muestras se realizó en el laboratorio de Química de la facultad de Química de la UNSAAC por el técnico del laboratorio, sin embargo, se hace una breve descripción de los procesos realizados.

A. OBJETIVO.

El objetivo del ensayo de análisis químico es hallar los compuestos presentes en los morteros originales, entre ellos los porcentajes de Silice y Calcio, entre otros compuestos metálicos. Y separar (disolver) la cal del agregado de las muestras para realizar el análisis granulométrico.

B. EQUIPO.

- ✓ Espectrofotómetro.
- ✓ Ph-metro.
- ✓ Balanza analítica de precisión 0.0001g .
- ✓ Mufla de hasta 1000°C.
- ✓ Estufa.

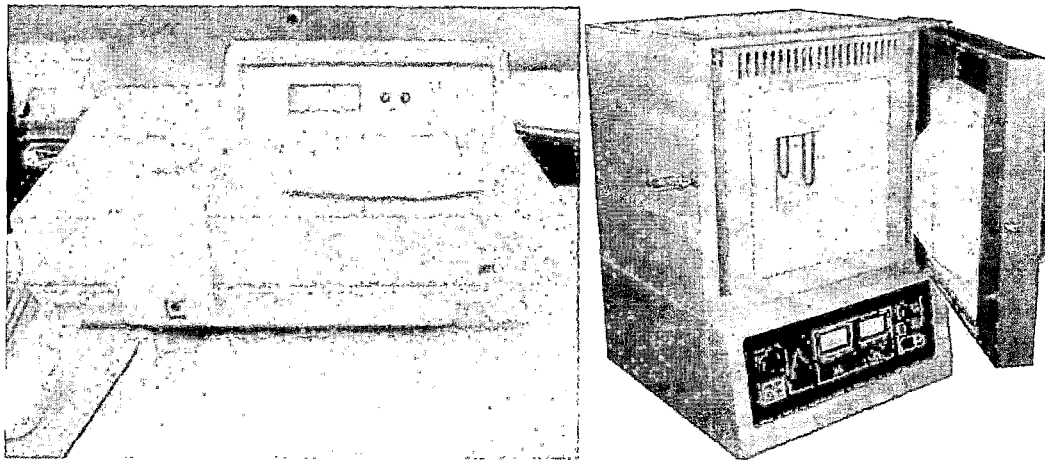


Figura 56. Espectrofotómetro y Mufla.

C. MATERIALES.

- ✓ Muestras de mortero original
- ✓ Buretas.
- ✓ Reactivos: HCl (ácido clorhídrico) y HNO₃ (ácido nítrico).
- ✓ Pilón y morteros metálicos.
- ✓ Tamiz ASTM estandarizado N°100.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

El preparado de la muestra consiste en el triturado usando el Mortero y pilón metálico, hasta que el tamaño de grano sea aproximadamente uniforme y pase el tamiz estandarizado ASTM N°100. A partir de esta muestra triturada se continúan con los análisis.

E. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.

1. Se secan las muestras preparadas (molidas) usando la estufa.
2. Se pesan con bastante precisión una porción de muestra secadas de aproximadamente 3g.
3. Esta es analizada en el espectrofotómetro, dando como resultado la concentración de compuestos metálicos en la muestra (Al y Fe).
4. Otra porción de la muestra es pesada con precisión para ser disgregada.
5. Se disuelve la cal del agregado usando los reactivos (ácido clorhídrico y ácido nítrico) mediante soluciones.
6. Otra porción de la muestra es usada para medir el Ph, esta debe estar en una solución, de proporciones 1:10 muestra:agua destilada en peso.



F. REGISTRO DE DATOS.

No se registraron datos en el proceso de análisis químico ya que estos se realizaron por el técnico del laboratorio de Química de la UNSAAC.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS.

No existió procesamiento de datos, ya que estos se realizaron internamente por el técnico del Laboratorio de Química de la UNSAAC.

H. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados, se muestran a continuación en cuadros comparativos y gráficos.

Porcentaje (%)	A1-3	A2-3	M1-3	M2-3	P1-3	P2-3
SiO ₂	50.06	52.45	58.40	50.19	57.14	33.90
CO ₃	23.00	20.80	18.90	22.60	18.60	35.40
Ca	14.60	13.50	12.20	14.30	12.62	23.10
Mg	0.70	0.62	0.53	0.82	0.46	0.19
Fe ₂ O ₃	1.30	1.70	1.10	1.88	1.60	1.79
Al ₂ O ₃	0.55	0.69	0.28	0.84	0.52	0.74
SO ₄	0.19	0.24	0.21	0.18	0.17	0.28
Otros	9.60	10.00	8.38	9.19	8.89	4.60
Arena. % (*)	45.10	47.20	50.40	43.80	51.30	30.80

Tabla 13. Análisis Químico Elemental. Fuente: Laboratorio de Química - UNSAAC

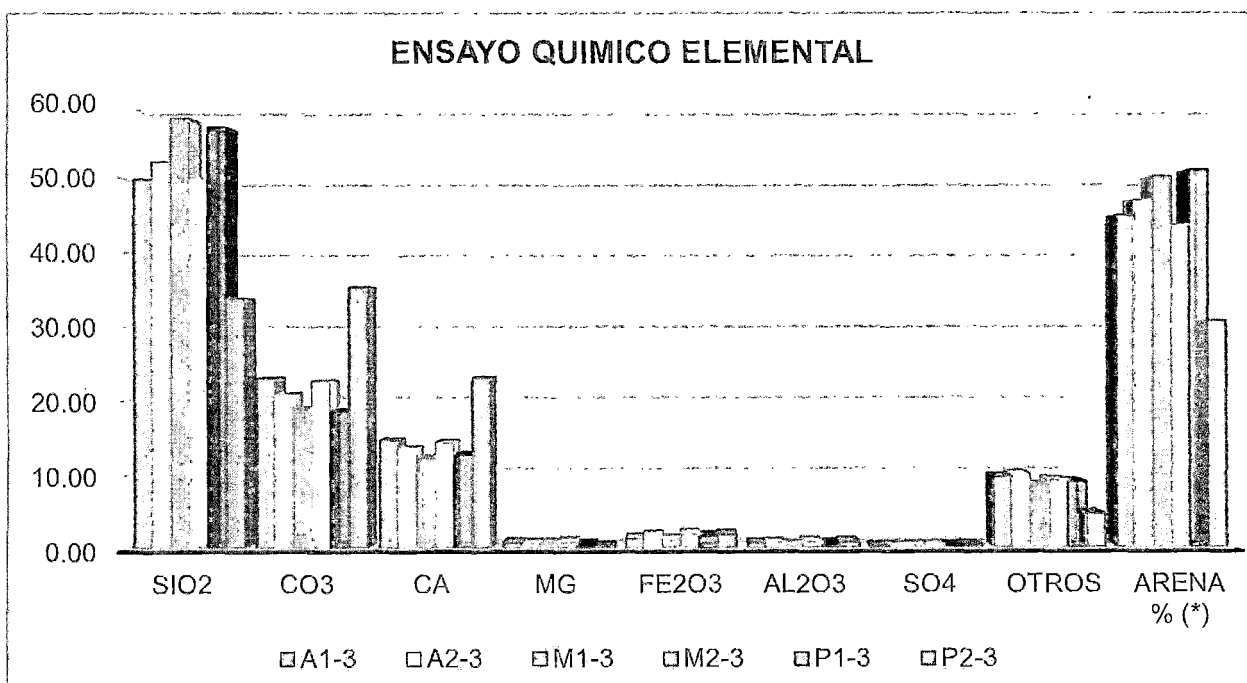


Grafico 4. Cuadro de barras por compuestos y elementos químicos. Muestras de morteros originales.



Se observa que los morteros original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, tienen presente al ión CO_3 y al elemento Ca, siendo ambos componentes del carbonato de calcio (CaCO_3) o piedra caliza, estando la suma de estos en proporciones que varían entre 31 y 58% aproximadamente, evidenciando nuevamente que son morteros de cal.

Los resultados del ensayo químico nos muestran los compuestos de sílice o cuarzo (SiO_2) presentes en grandes concentraciones (entre 35 y 60% aproximadamente) que confirman una vez más que los morteros tienen arenas de origen cuarcítico.

Se identificaron también otros componentes en menor proporción, siendo los más importantes los compuestos metálicos Óxido Férrico (Fe_2O_3) y Alúmina (Al_2O_3), ya que estos están presentes en los minerales de la arcilla. Se puede afirmar que existió arcilla en la composición de los morteros originales, sin embargo no se puede establecer a priori que estos hayan sido añadidos voluntariamente o hayan sido parte de los agregados usados antiguamente.

Del gráfico de barras, se observa que la 3ra y 5ta (M1 y P1) muestra tienen composición muy similar, notándose diferencias de menos de 1.5% en sus composiciones de sílice, carbonato de calcio, óxido férrico y alúmina, confirmando cuantitativamente los parecidos del ensayo de difracción de rayos X en las muestras del 1er cuerpo de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

Las muestras 1ra, 2da y 4ta (A1, A2 y M2) también tienen composición parecida con diferencias de 2.5% entre si en sus composiciones, observando que las muestras de los 2 arcos de la Portada Principal de la Catedral del Cusco son muy similares, junto al muro del 2do cuerpo.

También es de interés ver que la muestra P2 (barra de color verde en el gráfico anterior) presenta porcentajes ligeramente diferentes a los anteriores, notándose que tiene menor porcentaje de cuarzo o sílice y, mayor porcentaje del ión carbonato y calcio, probablemente debido a su gran exposición frente a agentes biológicos de contaminación (ya que esta muestra se extrajo de la basa de la columna que presenta una superficie casi horizontal) que alteraron ligeramente a los morteros originales de esta zona.



De lo anterior se puede decir, mas no afirmar, que la construcción de la Portada Principal de la Catedral del Cusco fue como sigue. Se construyó el primer cuerpo de forma progresiva (pedestales, muros y columnas), el 1er arco de medio punto se construyó junto con los pedestales y muros del 2do cuerpo. Posteriormente el 2do arco y el resto del ático.

Finalmente, de forma general y en base a los datos cuantitativos se puede decir que los morteros originales usados no tuvieron una distinción por elementos constructivos y estructurales en su elaboración que fuese a propósito, diferente, ya que presentan proporciones muy poco variables entre si. Sin embargo, existen ligeras diferencias y agrupaciones entre ellos (que fueron comentados en los párrafos anteriores), probablemente debido a muchos factores como: La situación temporal y duración de la construcción de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, ligeras diferencias entre el material y las canteras explotadas, y los mismos procedimientos de elaboración del mortero que en aquellas fechas era criterio del maestro constructor.

5.2.3 Granulometría del agregado.

Es un método mecánico de caracterización. La aplicación de los ensayos anteriores solo nos permiten conocer los componentes de la mezcla de morteros antiguos, mas no la relación aglomerante/agregado. Por lo tanto es necesario realizar la separación del agregado para determinar la proporción que tuvo esta en el mortero original y para usarlo convenientemente en el mortero de restauración propuesto.

La importancia del estudio granulométrico del agregado o árido radica en el hecho de que el árido constituye el material predominante del mortero, y por tanto su distribución nos dará una idea clara de que arenas de canteras comerciales de la actualidad se aproximan más al árido usado en el mortero antiguo, o recomendar una granulometría adecuada y compatible para ser usada en morteros de Restauración de la Portada Principal de la Catedral del Cusco. Además nos informa idóneamente sobre la compacidad del mortero, tratándose de obtener una granulometría no homogénea ni uniforme.

A. OBJETIVO.

El objetivo del ensayo de caracterización mecánica: "Granulometría del agregado" de los morteros originales de la Catedral del Cusco, es hallar las curvas de distribución

granulométrica, así también como identificar los porcentajes de cal: arena usados en la construcción original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

B. EQUIPO.

- ✓ Juego de tamices granulométricos estandarizados N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200.
- ✓ Balanza electrónica METTLER TOLEDO con precisión de centésimo de gramo.

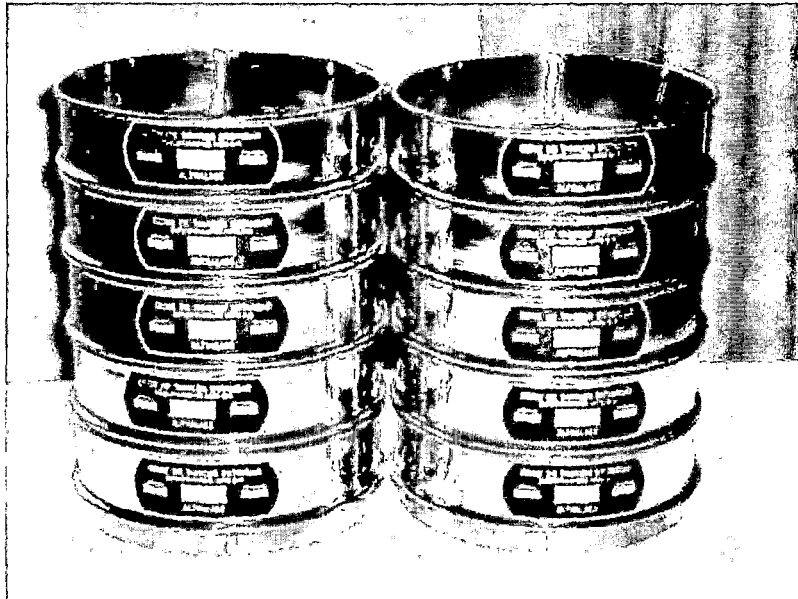


Figura 57. Juego de tamices Estandarizados. N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

C. MATERIALES.

- ✓ Muestras de aproximadamente 3g de mortero original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.
- ✓ Cazuela.
- ✓ Pocillos metálicos.

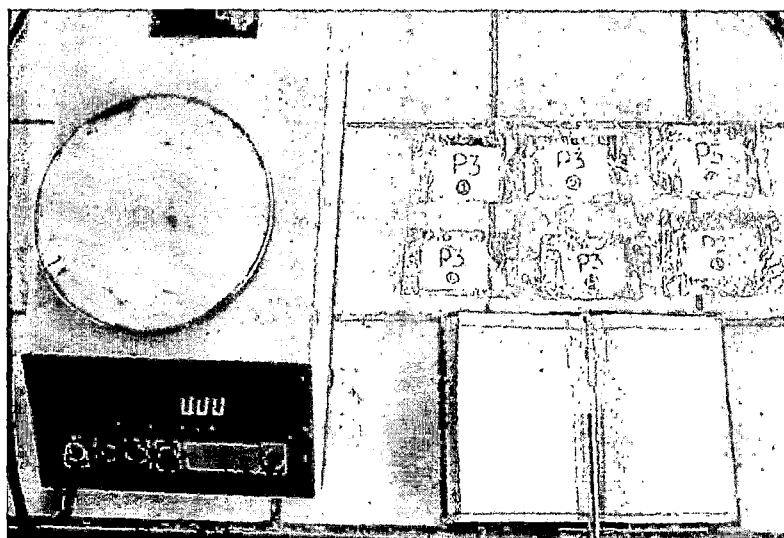


Figura 58. Balanza electrónica de precisión, Muestras ensayadas y Cuaderno de apuntes.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Las muestras tuvieron que ser disueltas en un medio ácido en el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, separando de esta forma la cal (aglomerante) del agregado (arena) sin alterar el tamaño de los granos y partículas originales de la arena.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

1. Se toman datos de los pesos de las muestras después de ser extraídas de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.
2. Después de disolver las muestras, se toman datos de los pesos de la arena.
3. Las arenas son tamizadas usando el juego de tamices completo desde la malla N°4 hasta la malla N° 200, los datos son registrados en un cuaderno de apuntes.
4. Los tamices luego de ser usados, son cuidadosamente limpiados para continuar con el tamizado de la siguiente muestra.

F. REGISTRO DE DATOS.

No se realizó la granulometría a las muestras M3 y P3 debido a que estas se identificaron como muestras de mortero de cemento.



MUESTRA	PESO ANTES (g)	PESO DESPUÉS (g)
A1	2.76	2.01
A2	5.18	3.5
M1	5.26	3.75
M2	6.64	4.6
M3	-	-
P1	2.63	1.88
P2	4.23	2.88
P3	-	-

Grafico 5. Pesos de los componentes áridos de los morteros originales.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Los datos se procesaron usando el programa Excel de Microsoft Office, generando el gráfico de las curvas granulométricas y la tabla de porcentajes y dosificaciones.

H. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Se muestran las curvas granulométricas de los morteros originales (según la nomenclatura establecida anteriormente) y se la compara con los límites de la norma E-070.

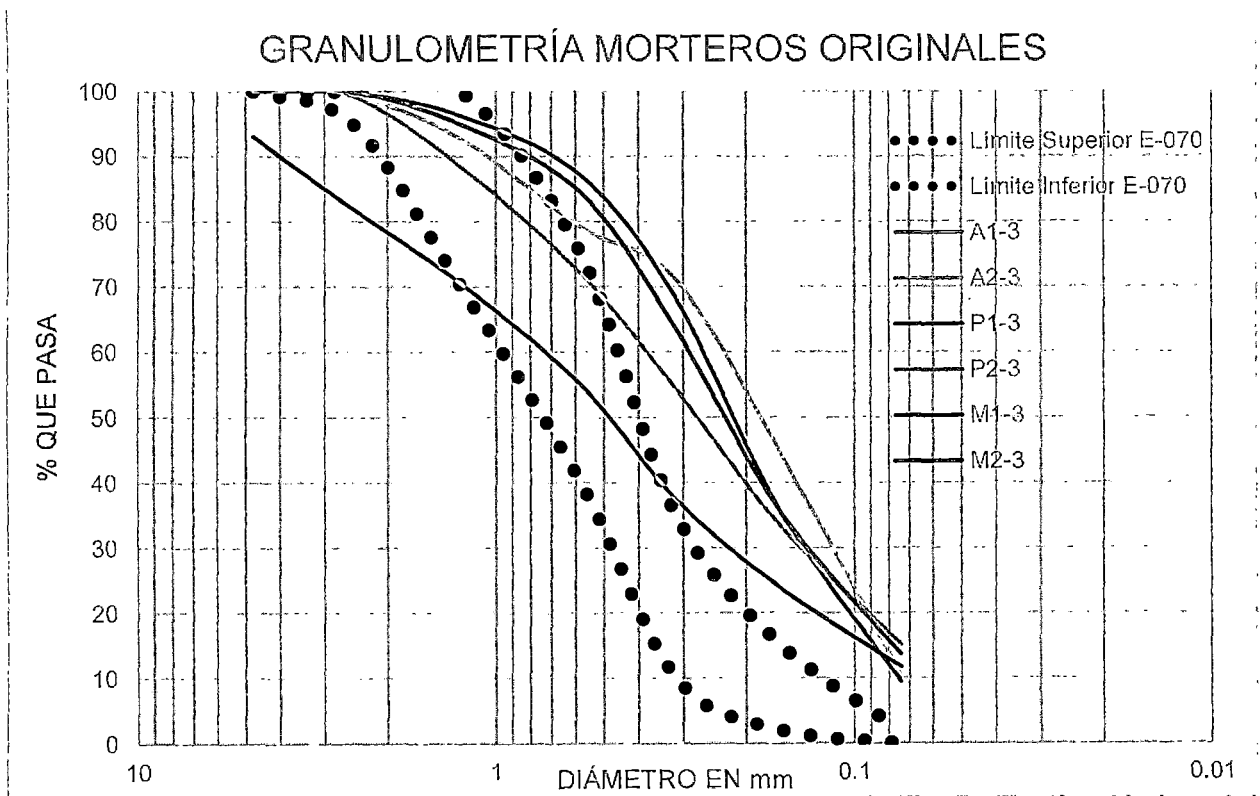


Grafico 6. Granulometría de morteros originales.



La dosificación aproximada aglomerante (cal)/agregado (arena) de los morteros originales se muestra en la siguiente tabla.

MUETRA	ARENA	AGLOMERANTE	DOSIFICACION
A1	72.8%	27.2%	1:2.68
A2	67.6%	32.4%	1:2.08
M1	71.3%	28.7%	1:2.48
M2	69.3%	30.7%	1:2.25
M3	-	-	-
P1	71.5%	28.5%	1:2.51
P2	68.1%	31.9%	1:2.13
P3	-	-	-

Tabla 14. Dosificación aproximada cal/agregado de morteros originales.

Se observa que las curvas granulométricas son gráficamente bastante parecidas entre si , a diferencia de M1, que presenta bastante desviación respecto a las demás, probablemente debido a una mala disolución de la cal del mortero original que generaron aparentes partículas gruesas retenidos en los tamices de mayor abertura.

Ninguna de ellas está dentro de los parámetros que establecen una buena distribución del grano, siendo en general material muy fino, comparable con las curvas granulométricas de la arena de rio de Cunyac y la arena de obra Hades empaquetada industrialmente.

En la tabla de porcentajes y dosificación, se aprecia que la dosificación aproximada de los morteros originales de la Portada Principal de la Catedral del Cusco varían aproximadamente dentro de los valores 1:2.08 y 1:2.68.

5.2.4 Otros ensayos.

Se realizaron ensayos adicionales y diversas medidas para caracterizar el mortero original de La Portada Principal de la Catedral del Cusco, entre ellos la medida de la acidez o alcalinidad, la textura y el color.

5.2.4.1 Acidez o Alcalinidad.

Medida de Ph (iones de hidronio $[H_3O]^+$) de la solución de mortero/agua destilada. Un valor de 7 indica que la medida es neutra. Un valor menor a 7 indica que la medida es ácida o muy ácida. Un valor mayor de 7 indica que la medida es básica o alcalina.

A. OBJETIVOS

El objetivo de este ensayo es determinar el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones de mortero original de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.

B. EQUIPO

- ✓ pH-metro marca HANNA HI991300.

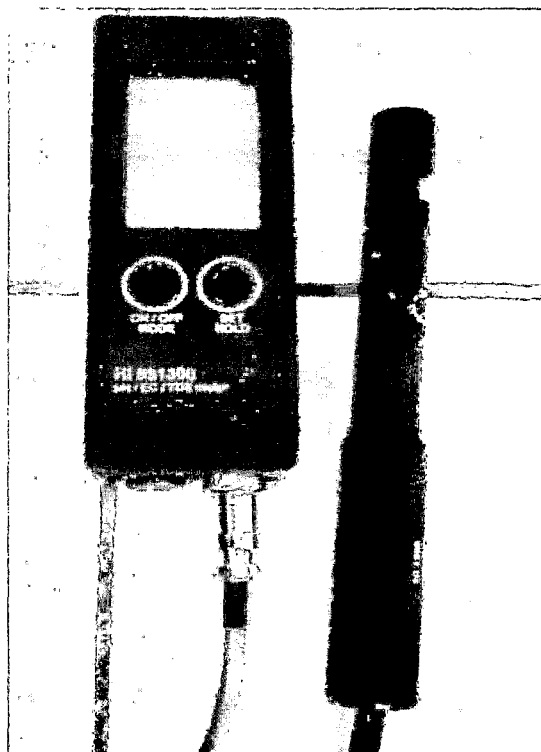


Figura 59. Ph-metro portátil Hanna HI 991300

C. MATERIALES

- ✓ Muestras de mortero.
- ✓ Vaso precipitado de 100ml.
- ✓ Agitador de vidrio.

D. PREPARACION DE LA MUESTRA

Se pesa la muestra, y en un vaso precipitado de 100ml se le añade agua destilada, hasta obtener una solución suelo: solución de 1:2.5 en peso.

E. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

1. Se agita la muestra con una baqueta durante 5 minutos y luego se deja reposar por 30 minutos, antes de realizar la lectura se vuelve agitar.



2. Cuidadosamente se introduce el electrodo del pH-metro en la suspensión de la solución y luego se enciende el pH metro.
3. Se anota el valor de pH-indicado por el aparato, cuando este deje de oscilar.
4. Se retira el electrodo de la suspensión, lavar con agua destilada y secar con un papel toalla.

F. REGISTRO DE DATOS

No es necesario hacer el registro de datos.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS

No es necesario hacer el procesamiento de datos.

H. RESULTADOS.

En la tabla siguiente se observan los resultados de la medida de Ph en los morteros originales, notándose que todos tienen un valor por encima de 7 (neutro). El mayor valor (11.01) se dio en el mortero M3-5, que de acuerdo a resultados anteriores, fue contaminado enormemente con cemento.

Muestra	Valor de Ph	Observaciones
P1-5	9.10	Básico
M1-5	8.13	Básico
A1-5	8.14	Básico
P2-5	8.90	Básico
M2-5	9.10	Básico
A2-5	8.66	Básico
M3-5	11.01	Básico

Tabla 15. Valores de pH de los morteros originales. Fuente: Laboratorio de Química – UNSAAC.

5.2.4.2 Textura.

La textura se realizó mediante observaciones macroscópicas de las muestras de mortero original en microscopio óptico, en el laboratorio de Petrografía de la facultad de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Mineralógicamente y en base a los resultados del ensayo de Difracción de Rayos X, se encontraron los siguientes compuestos minerales en todos los morteros originales.



COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	TEXTURA
Calcita	Es el carbonato de calcio o piedra caliza de fórmula química: CaCO_3	Aspecto fragmentario
Cuarzo	Es una plagioclasa de fórmula química: SiO_2	Textuar clástica o detrítica de grano fino.
Anortita	Mineral del grupo de los silicatos, pertenece al grupo de las feldespatos llamados plagioclasas, de fórmula $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	
Bentonita	Es un mineral presente en las arcillas del tipo montmorillonita, silicatos de aluminio hidratados.	Textura clástica o detrítica de grano muy fino
Illita	Al igual que la bentonita, son silicatos de aluminio hidratados.	-
Hematita	Es el óxido de hierro Fe_2O_3 .	-

Tabla 16. Descripción de la textura de mortero original. Fuente: Laboratorio de Ingeniería Geológica - UNSAAC

Y en general la textura de los morteros se observó similar a la textura de una arenisca o limolita calcárea⁴⁰.

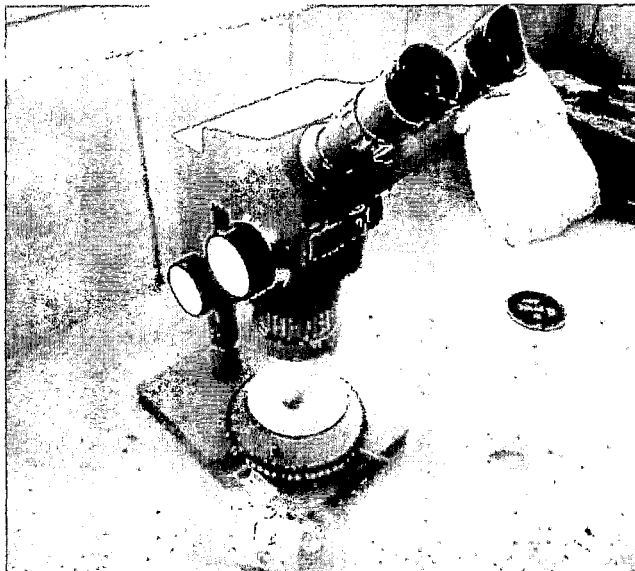


Figura 60. Microscopio óptico para muestras gruesas. Facultad de Ingeniería Geológica. UNSAAC.

⁴⁰ Ing. Mauro Zegarra, Facultad de Ingeniería Geológica, UNSAAC.

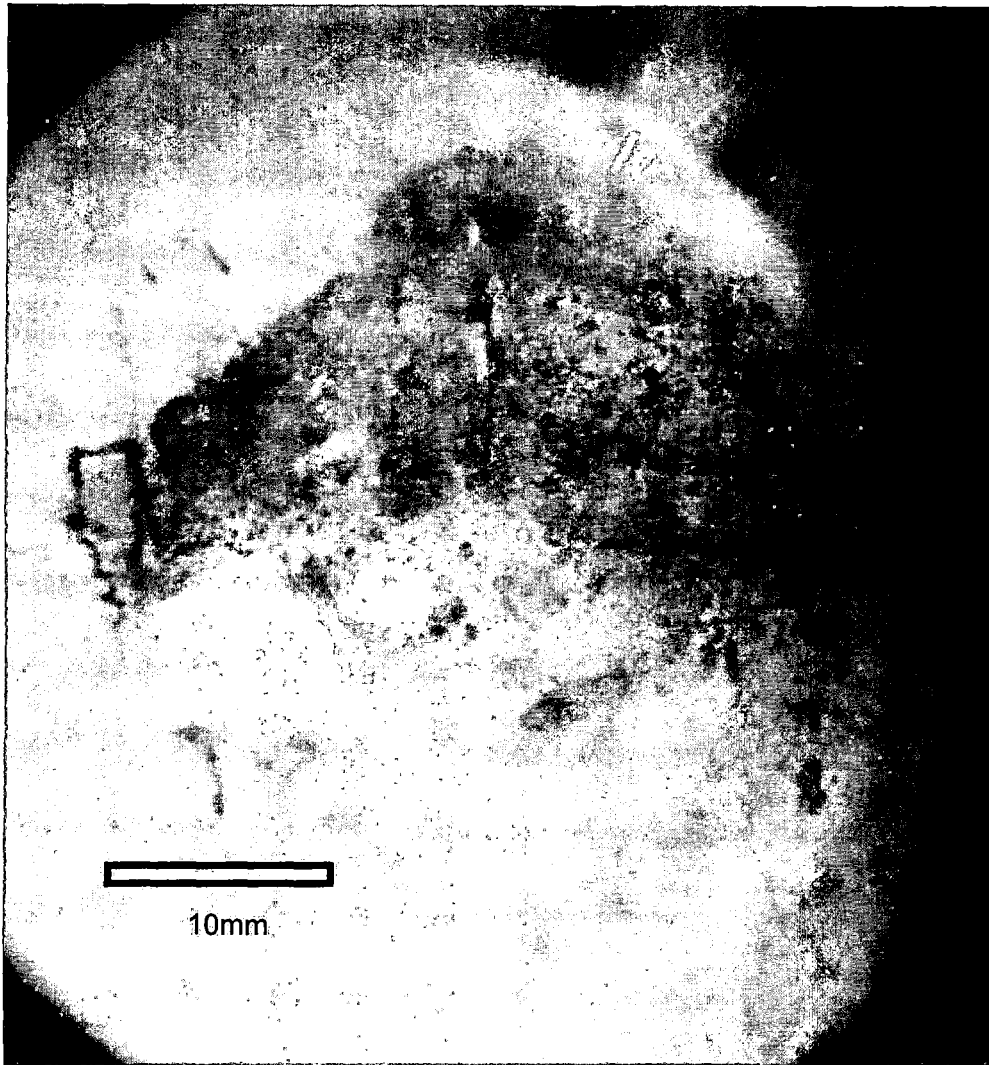


Figura 61. Muestra P2 observada en el Microscopio Óptico.

Es de interés notar que en la Muestra P2 observada en el Microscopio Óptico, se distingue que un sector de la masa del mortero, es solamente cal (sin arena), de lo que se puede inducir que en el proceso de mezclado de los materiales del mortero original, no fue el más adecuado.

3.2.4.3 Color.

Es importante para la caracterización estética y la propuesta de mortero de restauración, ya que debe de ser lo más parecido posible al mortero original. Se usó la escala de color de Munsell, ya que en la bibliografía se realizan ensayos de caracterización de color en los monumentos líticos y patrimonio cultural de la Ciudad del Cusco, usando esta escala (Díaz, Coavoy 2006).

Las características y fundamentos de esta escala se resumen a continuación.

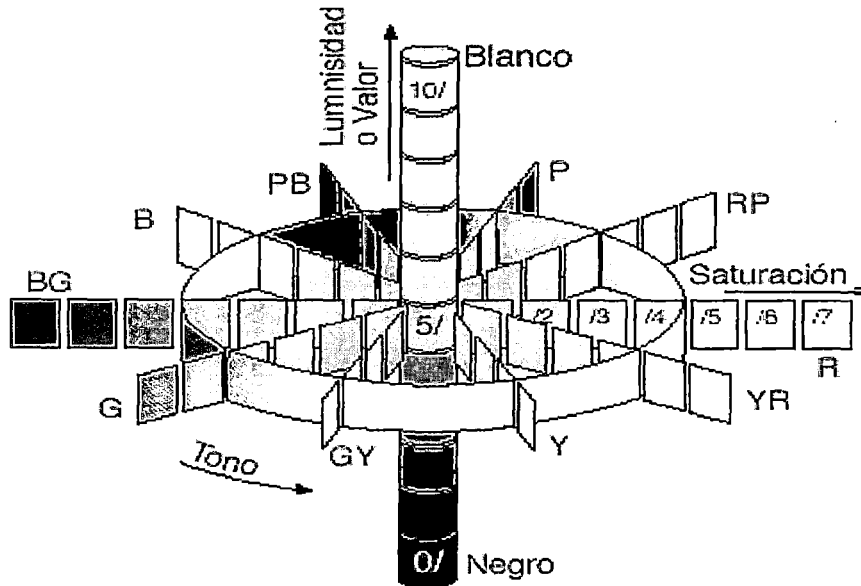


Figura 62. Escala de color de Munsell.

Los tres atributos del color: tono "hue", valor "value" y saturación "croma" se especifican con las iniciales HVC y se expresan con la llamada notación de Munsell de la forma HV/C.

TONOS: Munsell colocó en el orden natural del espectro luminoso sobre un círculo lo que denominamos principales: rojo(R), amarillo(Y), verde(G), azul (B) y púrpura (P) y situó entre cada dos de ellos los tonos intermedios: amarillo-rojo (YR), verde-amarillo(GY), azul-verde (BG), púrpura-azul (PB) y rojo-púrpura (RP). El anterior círculo de los tonos fue subdividido en 100 espacios iguales, de forma que el espacio dedicado a cada tono (por ejemplo para el R) era de 11 espacios de color (5 de ellos delante del R y 5 detrás) coincidiendo el último tono de R con el primero del siguiente tono, el YR. La numeración de cada espacio (seguimos trabajando con el R como ejemplo) era 10RP=0R, 1R, 2R, 3R, 4R, 5R, 6R, 7R, 8R, 9R, 10R=0YR.

VALORES: Para poder mostrar los valores dispuso de un eje perpendicular al círculo de los tonos dividido en 11 partes iguales. Le llamó eje de los colores neutros o eje de los acromáticos. La parte más alta del eje (valor 10) corresponde al blanco y la más baja (valor 0) corresponde al negro.

SATURACIÓN: La saturación, la colocó como si fuesen sucesivas capas de una cebolla que envuelve el cilindro de los valores de manera que, aumentará la saturación



del color conforme se alejan los colores del eje de los valores hacia fuera, el eje de los valores tiene saturación "0", y no hay un límite superior.

A. OBJETIVO.

El objetivo del ensayo de caracterización del color de los morteros originales es identificar cuantitativamente el color de estos mediante la escala de colores de Munsell, especificando sus tres características: Tono, Luminosidad o valor, y Saturación o croma.

B. EQUIPO.

- ✓ Computadora con cualquier programa de Microsoft Office instalado.

C. MATERIALES.

- ✓ Escala gráfica de color de Munsell.
- ✓ Placa de color gris neutro.
- ✓ Muestras de morteros originales.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

La muestra no necesita de una preparación especial.

E. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.

1. Se coloca una placa de color gris neutro, sobre la cual se observará e identificarán los morteros originales.
2. Se procede a colocar la primera muestra sobre la placa.
3. Se comienza identificando el tono aproximado de la muestra, en base a la escala de colores que presenta cualquier programa de Microsoft Office.
4. Posteriormente se identifican las luminosidades y saturaciones. Vale decir que este proceso es aproximado ya que en todo momento es una identificación visual.
5. Se transforman los rangos de tono, luminosidad y saturación (dados en un rango de 255 pixeles en el programa Office), a los valores que nos da la escala de Munsell (letras, y rangos de 10 escalas) usando una proporción aritmética simple.
6. Se termina la identificación escribiendo el color en la escala de Munsell, en la escala de Microsoft Office (rangos de 255 pixeles) y un color visual.



Figura 63. Color de la muestra A2, con placa de papel aluminio como color de fondo gris neutro.

F. REGISTRO DE DATOS.

Los datos fueron registrados en la escala de colores HSL de texto del programa Word de Microsoft Office (dadas en un rango de 255 pixeles).

MUESTRA	COLOR (Office)
A-1	HSL-25-173-164
A-2	HSL-25-173-164
M-1	HSL-25-173-164
M-2	HSL-25-173-164
C-1	HSL-25-173-164
C-2	HSL-25-173-164

Tabla 17. Registro de colores de los morteros originales.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Los datos fueron procesados realizando una proporción aritmética simple, es decir, en la escala de color de Office se tiene un número entre 0 y 255, equivalentemente en la escala de Munsell se tiene un número (entre 0 y 10) o letra (desde R a RP, que tiene 11 variaciones). De esta manera se convirtieron los valores de Office a la escala de Munsell.

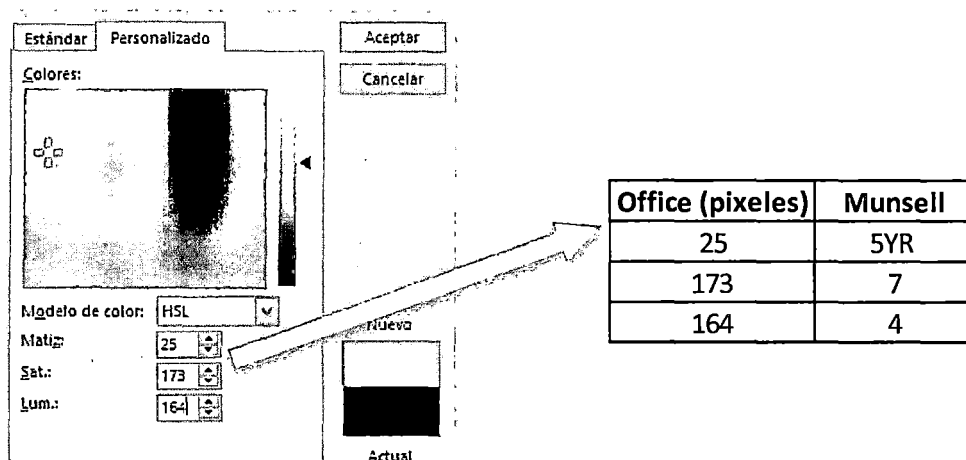


Figura 64. Equivalencia escala de colores HSL de Office, escala de colores de Munsell.

H. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

MUESTRA	COLOR (Munsell)	COLOR
A-1	5YR7/4	
A-2	5YR7/4	
M-1	5YR7/4	
M-2	5YR7/4	
C-1	5YR7/4	
C-2	5YR7/4	

Tabla 18. Denominación de las muestras originales según la escala de color de Munsell.

Claramente, se observa que todas las muestras a excepción de M3 y P3, tienen el mismo color, identificados con la denominación 5YR7/4 en la escala de Munsell, o HSL-25-173-164 en la escala de color de Office

5.3 CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS PROPUESTOS DE RESTAURACIÓN.

Se realizaron 18 combinaciones para propuestas de morteros de restauración en base a las cales y canteras estudiadas. Estas combinaciones se muestran en la siguiente tabla:



MUESTRA	CAL	AGREGADO	DOSIFICACIÓN	
			Cal	Agregado
M1	Cal Hidraulica	Cunyac	1	3
M2			1	2.5
M3			1	2
M4		Mina - Huambutio	1	3
M5			1	2.5
M6			1	2
M7		Huilque	1	3
M8			1	2.5
M9			1	2
M10	Cal de Obra - Hades	Cunyac	1	3
M11			1	2.5
M12			1	2
M13		Mina - Huambutio	1	3
M14			1	2.5
M15			1	2
M16		Huilque	1	3
M17			1	2.5
M18			1	2

Tabla 19. Codificación de morteros propuestos para restauración.

5.3.1 Compresión Axial no confinada.

El resultado de un esfuerzo es la deformación, se encuentra que para esfuerzos suficientemente pequeños, el esfuerzo es proporcional a la deformación; la constante de proporcionalidad depende del material que se deforma. A esta constante de proporcionalidad se le llama modulo elástico⁴¹. Por lo tanto, el modulo elástico se define como la proporción del esfuerzo a la deformación resultante.

La resistencia a la compresión tiene importancia principalmente en los materiales sometidos a compresión tales como los morteros de junta. Los resultados de las pruebas de compresión se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de mortero cumpla con los requerimientos de resistencia adecuada.

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la facultad de ingeniería Civil de la UNSAAC, usando la máquina de compresión simple uniaxial con anillo de compresión y dial de carga, siguiendo pautas de la norma NTP 339.610 para la cantidad de muestras ensayadas (03

⁴¹ Serway & Jewett, 2008.

ensayos similares para ensayo de compresión⁴²). La velocidad de aplicación de deformación fue controlada, establecida en 3.5 mm/s. La calibración del anillo de carga de la máquina de compresión simple, se da de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F = 3.6744X + 4.9982 \text{ (kgf)},$$

$$R^2 = 1.00$$

Donde X es la medida del dial del anillo de carga multiplicada por 10.

A. OBJETIVO

El presente informe tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos a través de las pruebas de compresión usando la máquina de compresión simple uniaxial con anillo de compresión y dial de carga.

B. EQUIPO

- ✓ Máquina de compresión simple uniaxial con anillo de compresión y dial de carga.
- ✓ Vernier

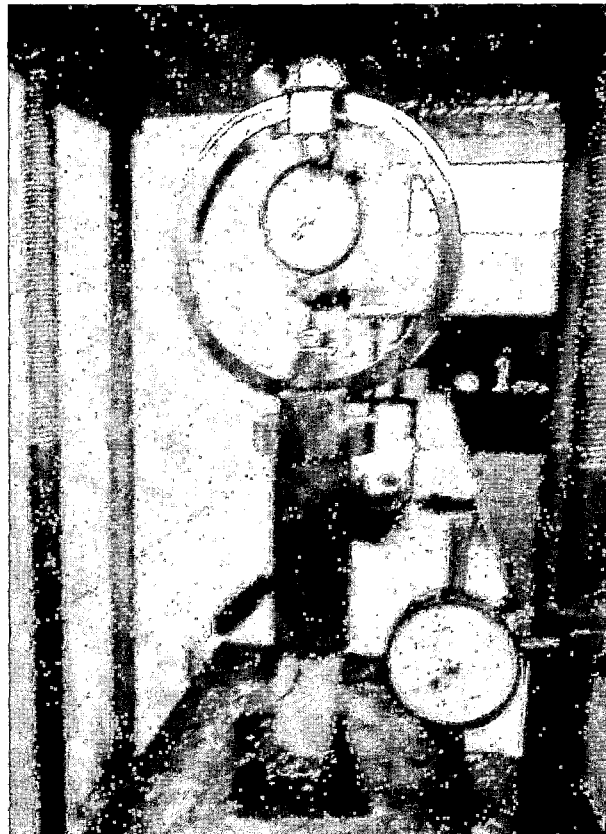


Figura 65. Máquina de Compresión Axial con anillo de carga de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNSAAC.

⁴² NTP 399.610 pag. 9 de 13.

C. MATERIALES

- ✓ Probetas de Mortero.

D. PREPARACION DE LA MUESTRA

Para el ensayo de compresión se elaboraron 3 probetas por cada tipo de mortero, geoméricamente cilindros de 34mm de diámetro con relación de esbeltez 2 a 1, estas se elaboraron 28 días antes de realizar el ensayo y debidamente curadas con agua y temperatura ambiente por inmersión total durante 5 min/día (no existe normas para el curado de mortero de cal).



Figura 66. Probetas para ensayo de Compresión axial no confinada.

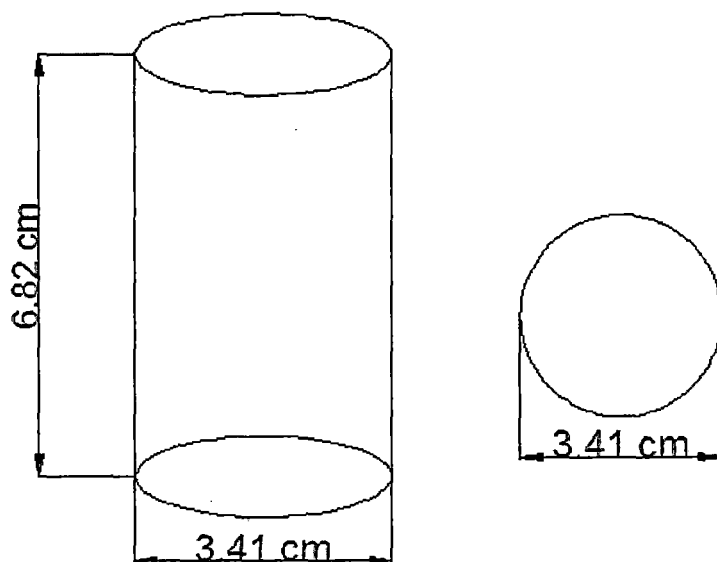


Figura 67. Dimensiones de probeta para ensayo de compresión axial no confinada.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

1. Se comenzó a retirar cada una las probetas de sus respectivos moldes.
2. Se codificaron las probetas para diferenciarlas unas de otras y para el mejor análisis de resultados.
3. Se registraron las diferentes medidas de los diámetros de cada probeta con un vernier previamente al ensayo.
4. Se procedió a colocar las probetas en la máquina de compresión uniaxial cuidadosamente ya que estas tenían que estar debidamente niveladas.
5. Se inició el ensayo aplicando la carga manualmente y tratando en lo posible que sea constante.
6. Se finaliza el ensayo cuando el dial de carga del equipo se queda estático y la probeta comienza a presentar fisuras.
7. Después se registra la carga máxima que soporto la probeta de mortero, este procedimiento se realiza para las diferentes probetas.

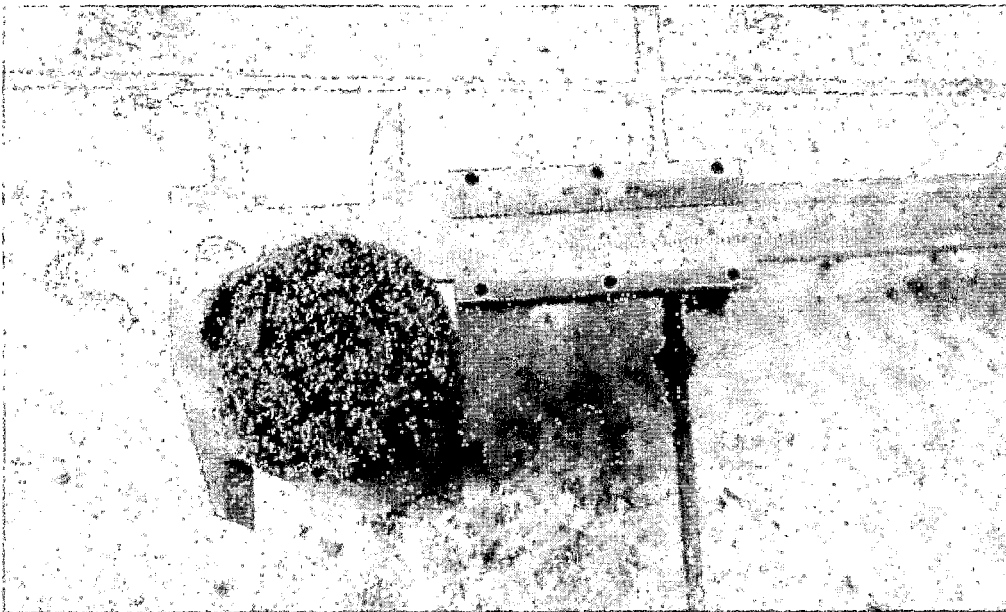


Figura 68. Medición del diámetro de la probeta usando Vernier.

F. REGISTRO DE DATOS

Antes de realizar el ensayo de compresión se realiza la medición de los diámetros de cada mortero como se muestra a continuación:



Tabla 20.Registro de datos: Medición de los diámetros.

MUESTRA	N° DE PROBETA	Diámetro (cm)
M1	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M2	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M3	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M4	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M5	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M6	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M7	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M8	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M9	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43

MUESTRA	N° DE PROBETA	Diámetro (cm)
M10	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M11	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M12	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M13	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M14	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M15	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M16	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M17	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43
M18	1	3.43
	2	3.43
	3	3.43



Figura 69. Probeta de ensayo de Compresión axial no confinada que presenta falla diagonal.

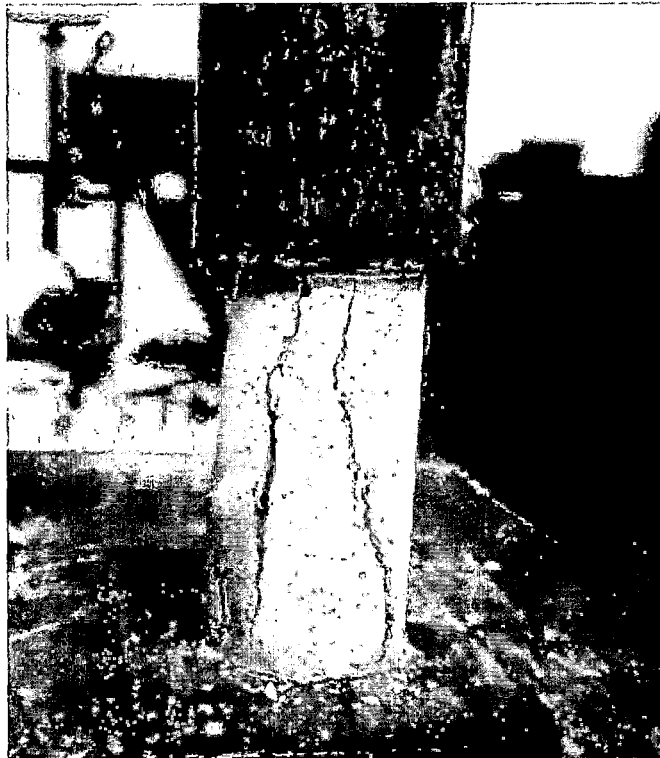


Figura 70. Probeta de ensayo de Compresión axial no confinada que presenta falla vertical.



Figura 71. Probeta de ensayo de Compresión axial no confinada que presenta falla vertical y aplastamiento local.

El patrón característico de falla en los morteros de cal hidráulica de los especímenes fue la falla vertical por tracción en la que ya que estos conservaron su forma cilíndrica y el paralelismo entre sus caras planas. También se visualiza el aplastamiento del espécimen. El patrón de falla que más se repitió en los morteros con cal de obra "Hades", fue la falla diagonal.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS

Del ensayo realizado se tiene las diferentes lecturas de dial de carga para cada tipo de mortero resumido en el siguiente cuadro:



MUESTRA	N° DE PROBETA	Diámetro (cm)	Lectura Dial de Carga	Carga Máxima (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
M1	1	3.43	3.0	115.23	12.48
	2	3.43	3.1	118.90	12.87
	3	3.43	3.3	126.25	13.67
M2	1	3.43	5.2	196.07	21.23
	2	3.43	5.6	210.76	22.82
	3	3.43	5.4	203.42	22.03
M3	1	3.43	8.6	321.00	34.76
	2	3.43	8.6	321.00	34.76
	3	3.43	8.4	313.65	33.96
M4	1	3.43	4.6	174.02	18.84
	2	3.43	4.3	163.00	17.65
	3	3.43	4.5	170.35	18.44
M5	1	3.43	6.5	243.83	26.40
	2	3.43	6.2	232.81	25.21
	3	3.43	6.4	240.16	26.00
M6	1	3.43	6.2	232.81	25.21
	2	3.43	6.8	254.86	27.60
	3	3.43	6.6	247.51	26.80
M7	1	3.43	9.6	357.74	38.74
	2	3.43	9.0	335.69	36.35
	3	3.43	9.4	350.39	37.94
M8	1	3.43	11.0	409.18	44.31
	2	3.43	10.5	390.81	42.32
	3	3.43	10.7	398.16	43.11
M9	1	3.43	9.5	354.07	38.34
	2	3.43	10.8	401.83	43.51
	3	3.43	10.1	376.11	40.72

Tabla 21. Procesamiento de datos para cálculos de resistencia.



MUESTRA	N° DE PROBETA	Diámetro (cm)	Lectura Dial de Carga	Carga Máxima (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
M10	1	3.43	0.8	34.39	3.72
	2	3.43	1.1	45.42	4.92
	3	3.43	1.1	45.42	4.92
M11	1	3.43	1.8	71.14	7.70
	2	3.43	1.7	67.46	7.30
	3	3.43	1.9	74.81	8.10
M12	1	3.43	3.1	118.90	12.87
	2	3.43	2.9	111.56	12.08
	3	3.43	2.85	109.72	11.88
M13	1	3.43	1.8	71.14	7.70
	2	3.43	1.8	71.14	7.70
	3	3.43	1.7	67.46	7.30
M14	1	3.43	2.3	89.51	9.69
	2	3.43	2.4	93.18	10.09
	3	3.43	2.3	89.51	9.69
M15	1	3.43	2	78.49	8.50
	2	3.43	1.8	71.14	7.70
	3	3.43	2	78.49	8.50
M16	1	3.43	0.5	23.37	2.53
	2	3.43	0.4	19.70	2.13
	3	3.43	0.6	27.04	2.93
M17	1	3.43	1.8	71.14	7.70
	2	3.43	1.7	67.46	7.30
	3	3.43	2	78.49	8.50
M18	1	3.43	1.4	56.44	6.11
	2	3.43	1.6	63.79	6.91
	3	3.43	1.5	60.11	6.51

Tabla 22. Procesamiento de datos para cálculos de resistencia.

H. RESULTADOS

Dado que se tiene 3 probetas por cada muestra se tomara en consideración el promedio de las resistencias así teniendo la resistencia final para cada muestra que se tiene siguiente cuadro:



MUESTRA	Resistencia (kg/cm ²)	MUESTRA	Resistencia (kg/cm ²)
M1	13.01	M10	4.52
M2	22.03	M11	7.70
M3	34.49	M12	12.28
M4	18.31	M13	7.57
M5	25.87	M14	9.82
M6	26.53	M15	8.23
M7	37.67	M16	2.53
M8	43.24	M17	7.84
M9	40.86	M18	6.51

Tabla 23. Resultados de resistencia a la compresión de los morteros propuestos para restauración.

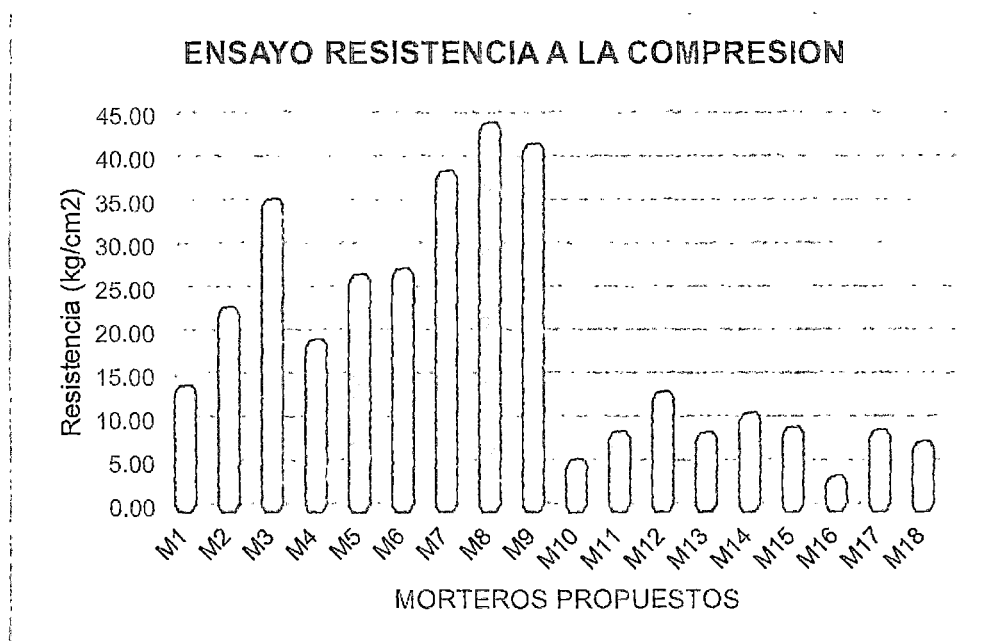


Gráfico 7. Cuadro de barras de morteros propuestos. Ensayo resistencia a la compresión.

Un mortero de restauración tiene una resistencia intermedia con respecto a la totalidad de resultados, la cual evita la incompatibilidad de rigideces causada por altas resistencias y asegura un mayor flujo plástico para que se acomode y reduzca la concentración de esfuerzos a medida que gana resistencia.

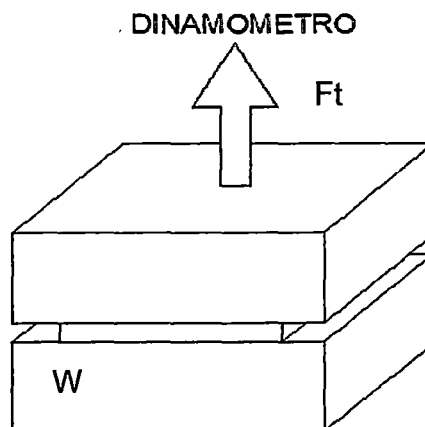
De los resultados obtenidos se toma como referencia la mitad superior de morteros (9 morteros) que obtuvieron mayor valor de resistencia (los que se observan sombreados en la tabla anterior) ya que no existe un reglamento donde especifique el valor mínimo resistencia que debe tener un mortero y estos datos servirán para un análisis comparativo.

Se puede observar en el anterior grafico que todos los morteros de mayor resistencia están compuestos por cal hidráulica y agregado árido de las 3 diferentes canteras estudiadas.

5.3.2 Adherencia.

La adherencia es probablemente la propiedad más determinante de los morteros, pues de ella depende que los diferentes materiales se comporten y respondan como un único elemento integrado. La adherencia depende de numerosas variables, algunas complejas por lo que es difícil de predecir su comportamiento. El mortero debe ser capaz de absorber los esfuerzos, sirviendo de ligante entre las piezas para que no se separen ni originen fisuraciones.

El ensayo consiste en unir dos bloques de piedra andesita de 20x10-11x4cm con cada muestra de mortero propuesto (18 muestras), en la que usando un dinamómetro se ejercerá una fuerza la cual hace que el mortero experimente un esfuerzo de tracción midiendo indirectamente la adhesión del mortero.



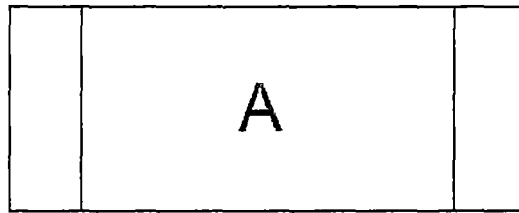


Figura 72. Esquema de especímenes para ensayo de Adherencia.

$$\sigma_t = \frac{F_t - W}{A}$$

Donde : F_t = fuerza de tracción (lectura del dinamómetro kgf)

A = area efectiva en contacto con el mortero(cm^2)

W = peso de piedra(kg^2)

A. OBJETIVO

El objetivo de este ensayo es que a partir de la medición de la adherencia de manera indirecta y a si saber los valores de adherencia de cada muestra de mortero.

B. EQUIPO

- ✓ Dinamómetro.

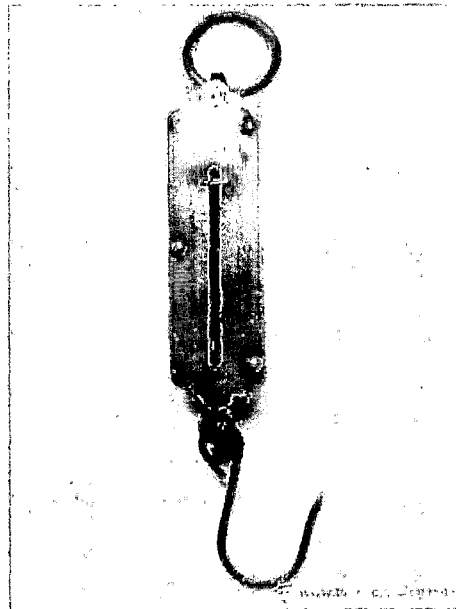


Figura 73. Dinamómetro.

C. MATERIALES

- ✓ Muestras de mortero.
- ✓ 2 piedras andesitas de dimensión 20x10-11x8.



- ✓ Espátula.
- ✓ Pasillos de plástico (para mezcla).
- ✓ Pipeta.
- ✓ Probeta graduada.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

La preparación de la muestra es parte del procedimiento de ensayo, que se detalla en el siguiente acápite.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

1. Se comenzó a preparar la mezcla de mortero para cada tipo.
2. Se humedeció los bloques de piedra para luego vaciar el mortero en un determinado área de contacto.
3. Se codificaron cada bloque para diferenciarlas unas de otras y para el mejor análisis de resultados.
4. Se procedió a colocar el otro bloque encima y retirar los excedentes de mortero.
5. Se dejó hasta el día siguiente para luego comenzar a curar por riego 2 veces al día, por un tiempo de 28 días.
6. Después de transcurrido los 28 días se realiza el ensayo el cual consiste en quitar el bloque superior con ayuda de un dinamómetro y así medir indirectamente la adherencia.
7. Se registraron las diferentes medidas de áreas en la cual estaba en contacto el mortero después del ensayo para tener el área efectiva de contacto del mortero.



Figura 74. Mortero colocado sobre el bloque de piedra andesita inferior.

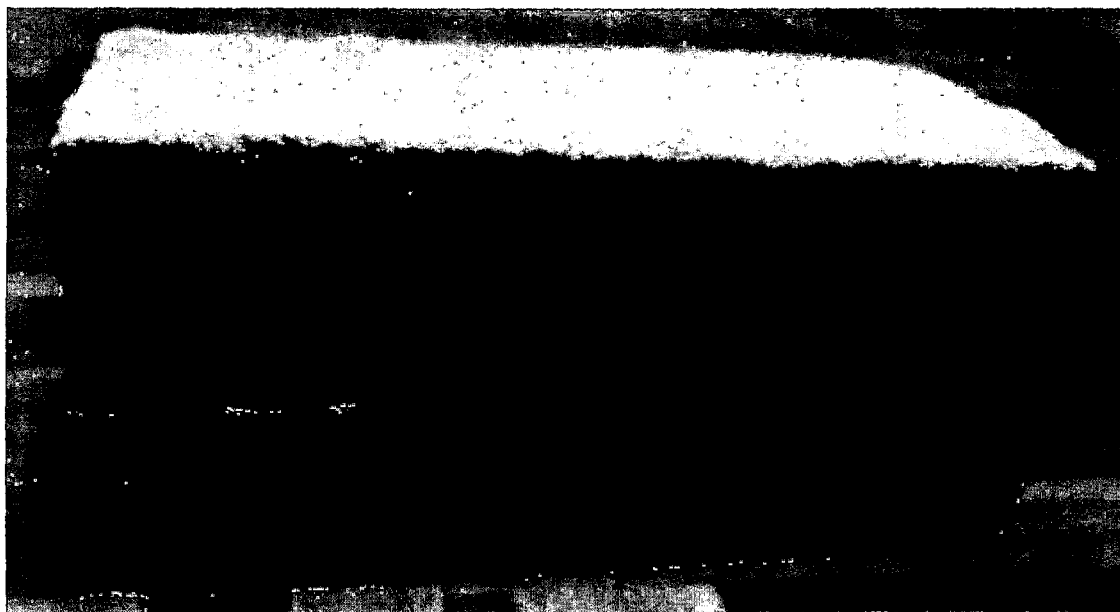


Figura 75. Espécimen codificado para ensayo de Adherencia

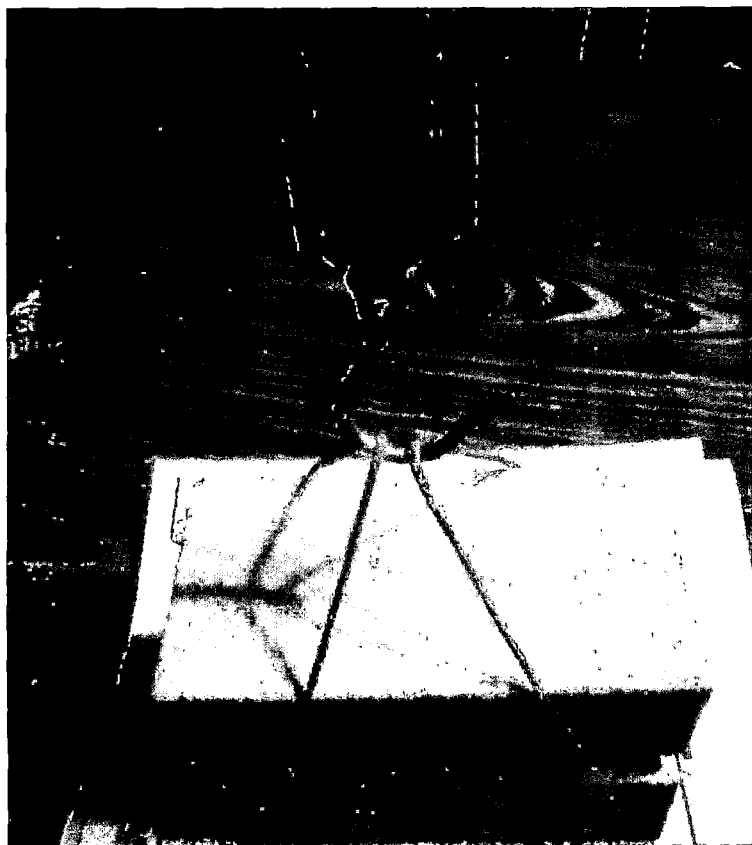


Figura 76. Ensayo de Adherencia.

F. REGISTRO DE DATOS

Después de realizar el ensayo de adherencia se realiza la medición de las áreas efectivas de cada uno de los tipos de muestras y el peso de los bloques de piedra que se encuentran en la parte superior. Finalmente se tiene el siguiente cuadro:



MUESTRA	Peso Piedra Encima (Kgf)	Longitud (cm)	Ancho (cm)
M1	2.148	15.500	9.500
M2	1.794	14.500	10.000
M3	1.889	15.000	10.000
M4	2.613	12.000	10.500
M5	1.896	12.000	10.500
M6	1.984	12.000	10.000
M7	2.185	19.000	10.000
M8	1.600	18.500	10.500
M9	1.691	17.250	10.000
M10	1.855	15.500	10.000
M11	1.950	15.500	10.000
M12	2.040	16.000	9.500
M13	2.005	17.500	10.500
M14	1.850	18.500	10.000
M15	1.994	15.000	10.500
M16	1.971	17.750	9.500
M17	1.904	16.500	10.000
M18	1.873	16.000	10.500

Tabla 24. Registro de datos: peso de bloque y área de contacto efectivo del mortero.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS

Del ensayo realizado se tiene las diferentes lecturas del dinamómetro el cual restando el peso del bloque superior se tendrá la fuerza resultante y además se calcula el área teniendo los datos de largo y ancho estos datos obtenidos se resume en el siguiente cuadro:



MUESTRA	Peso Piedra Encima (Kgf)	Lectura de Dinamómetro (Kgf)	Fuerza Resultante (Kgf)	Área (cm ²)
M1	2.148	22.500	20.352	147.250
M2	1.794	26.000	24.206	145.000
M3	1.889	32.000	30.111	150.000
M4	2.613	26.000	23.387	126.000
M5	1.896	27.360	25.464	126.000
M6	1.984	32.000	30.016	120.000
M7	2.185	30.000	27.815	190.000
M8	1.600	31.750	30.150	194.250
M9	1.691	32.150	30.459	172.500
M10	1.855	23.000	21.145	155.000
M11	1.950	26.000	24.050	155.000
M12	2.040	18.000	15.960	152.000
M13	2.005	20.450	18.445	183.750
M14	1.850	21.800	19.950	185.000
M15	1.994	22.500	20.506	157.500
M16	1.971	19.500	17.529	168.625
M17	1.904	22.800	20.896	165.000
M18	1.873	24.500	22.627	168.000

Tabla 25. Procesamiento de datos: cálculo de fuerza resultante y área efectiva.

H. RESULTADOS

Después de realizar el procesamiento de datos, los valores de adherencia (kg/cm²) obtenidos para cada muestra de mortero se resumen en el siguiente cuadro:

MUESTRA	Esfuerzo de tracción (kg/cm ²)
M1	0.138
M2	0.167
M3	0.201
M4	0.186
M5	0.202
M6	0.250
M7	0.146
M8	0.155
M9	0.177

MUESTRA	Esfuerzo de tracción (kg/cm ²)
M10	0.136
M11	0.155
M12	0.105
M13	0.100
M14	0.108
M15	0.130
M16	0.104
M17	0.127
M18	0.135

Tabla 26. Resultados de adherencia de morteros propuestos para restauración.

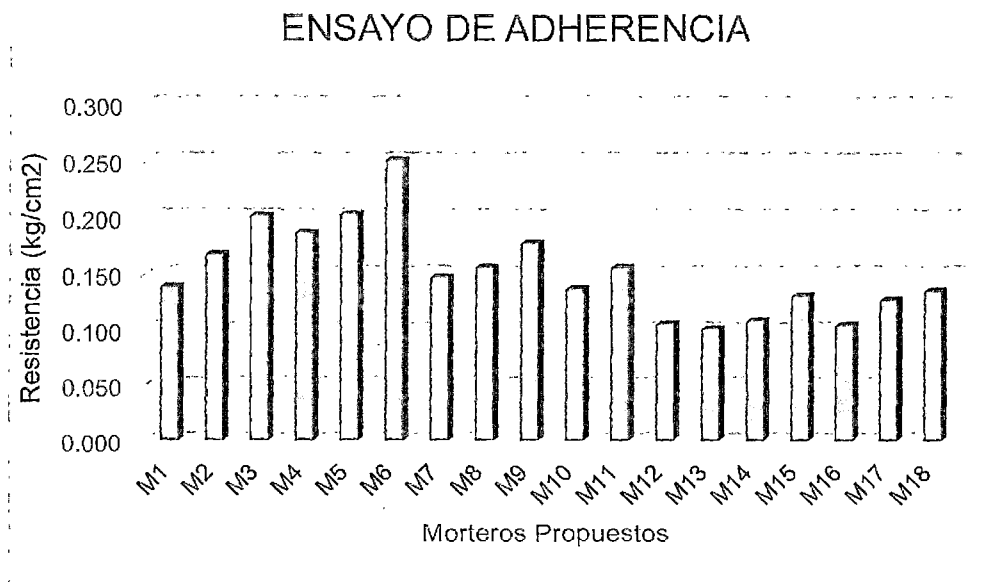


Grafico 8. Cuadro de barras de morteros propuestos. Ensayo de adherencia.

Se observa en el ensayo de adherencia que el 89% de morteros preparados con cal hidráulica tienen buena adherencia y solo el 11% preparados con cal de obra tienen buena adherencia.

5.3.3 Permeabilidad.

Una de las funciones principales de un mortero es evitar la penetración del agua de lluvia hasta el interior o cualquier otra sustancia líquida, así se evita el deterioro posterior de los materiales que conforman el interior.

Los ensayos de permeabilidad se realizarán en especímenes cilíndricos de 34mm de diámetro y aproximadamente 40mm de altura, se midió el tiempo en que una carga de agua constante de aproximadamente 1cm demora en atravesar el total de la altura de la probeta, con la finalidad de determinar el coeficiente de permeabilidad de manera indirecta. Un mortero de restauración requiere muy poca a nula permeabilidad a los fluidos.

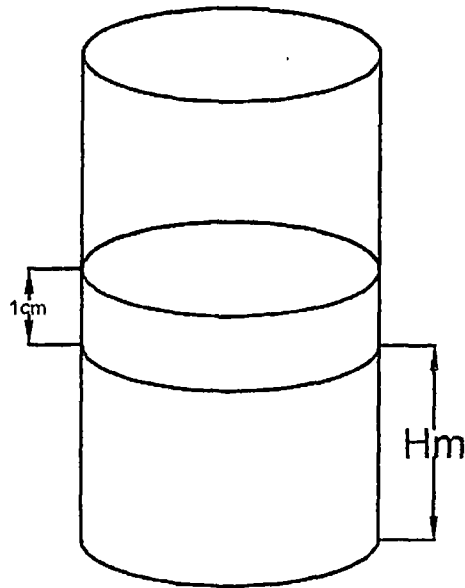


Figura 77. Esquema del espécimen para ensayo de Permeabilidad.

Donde : H_m = altura de la muestra de mortero.

1cm = altura de carga de agua.

Se usa la siguiente tabla de clasificación de suelos⁴³ para tener una idea del grado de permeabilidad de los morteros propuestos de restauración.

Grado de Permeabilidad	Valor de K (cm/s)
Elevado	superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Prácticamente impermeable	menor de 10^{-7}

Tabla 27. Clasificación de suelos según su permeabilidad. Fuente: T.W. Lambe y R.V. Whitman – Mecánica de Suelos. México (1997)

A. OBJETIVO

El objetivo de este ensayo es que a partir de la medición de la permeabilidad de manera indirecta y a si tener valores de permeabilidad de cada muestra de mortero.

B. EQUIPO

No se utilizó ningún equipo para este ensayo.

⁴³ T.W. Lambe y R.V. Whitman – Mecánica de Suelos. México (1997)



C. MATERIALES

- ✓ Muestra de mortero.
- ✓ Pipeta.
- ✓ Vernier.
- ✓ Cronometro.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

La preparación de la muestra es parte del procedimiento de ensayo, que se detalla en el siguiente acápite.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- ✓ Se prepara y se vacía el mortero en un tubo de 68 mm de altura y 34 mm de diámetro hasta una altura aproximada de 40 mm, este proceso se realizara para cada tipo de mortero propuesto.
- ✓ Se hace un curado de las muestras por 28 días, el cual consiste en sumergir la muestra en agua por 5 min y 2 veces al día.
- ✓ Al día siguiente de terminar el curado de las muestras se realiza el ensayo este consiste primero en medir la altura que tiene la muestra de mortero y luego 1 cm de carga de agua en cada muestra.
- ✓ Después de colocar el agua se tomara el tiempo en que se demora pasar la primera gota de agua hasta el otro extremo y este mismo proceso se realiza para todas las muestras de mortero.



Figura 78. Probetas para ensayo de permeabilidad.



F. REGISTRO DE DATOS

Antes de realizar el ensayo se medirá la altura de cada muestra que se encuentra en el tubo de plástico y durante el ensayo se medirá el tiempo en que demora pasar una gota hasta el otro extremo teniendo el siguiente cuadro:

Muestra	Altura (cm)	Tiempo (s)
M1	4.2	1024.5
M2	4.1	4166.0
M3	4.3	3377.5
M4	4.2	949.0
M5	4.2	8820.5
M6	4.6	20032.0
M7	3.9	850.0
M8	3.5	1191.5
M9	4.1	6883.0
M10	2.9	678.0
M11	3.7	1179.5
M12	3.9	496.0
M13	3.4	592.5
M14	3.7	164.0
M15	3.7	295.5
M16	4.2	478.5
M17	4.2	545.0
M18	3.9	386.5

Tabla 28. Registro de datos: altura de muestras de mortero y tiempo en seg.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS

Mediante una hoja Excel se realizaran los cálculos de permeabilidad de cada muestra de mortero.

H. RESULTADOS

Del cálculo realizado se tiene el siguiente cuadro que nos resume los valores obtenidos:

Muestra	Permeabilidad (10^{-3} cm/s)	Muestra	Permeabilidad (10^{-3} cm/s)
M1	4.10	M10	4.28
M2	0.98	M11	3.14
M3	1.27	M12	7.86
M4	4.43	M13	5.74
M5	0.48	M14	22.56
M6	0.23	M15	12.52
M7	4.59	M16	8.78
M8	2.94	M17	7.71
M9	0.60	M18	10.09

Tabla 29. Resultado de permeabilidad de morteros propuestos para restauración.

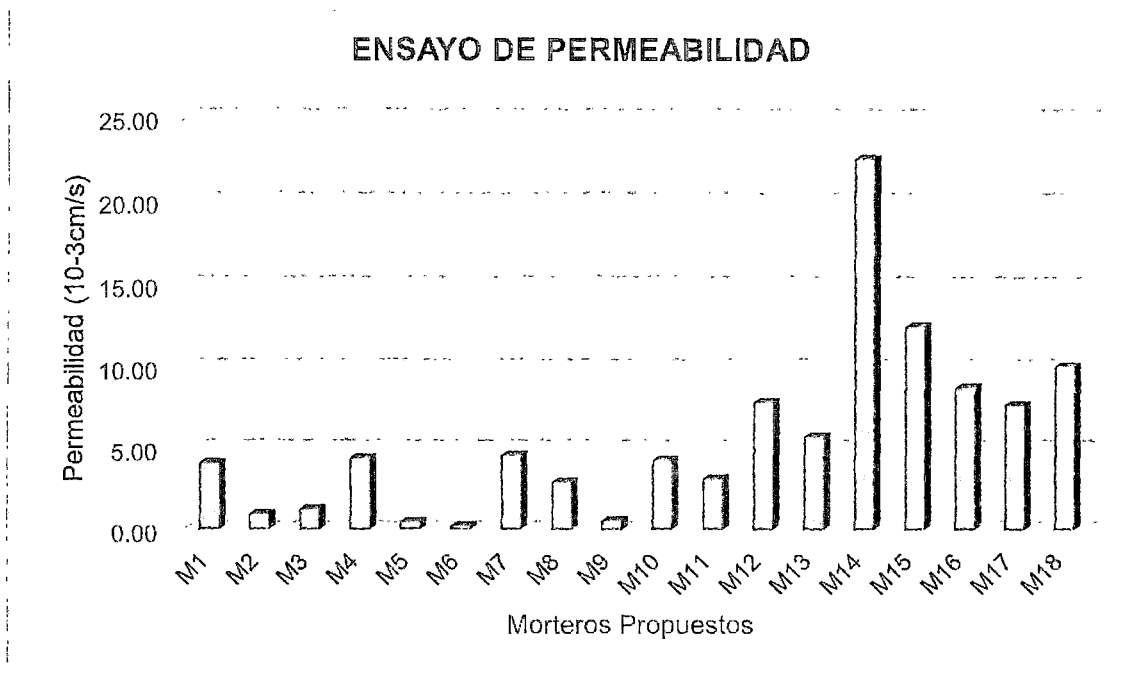


Grafico 9. Cuadro de barras de morteros propuestos. Ensayo de permeabilidad.

Se puede observar en el anterior grafico que 7 de los 9 morteros de menor permeabilidad están compuestos por cal hidráulica y agregado árido de las 3 diferentes canteras estudiadas y los otros 2 morteros compuesto por cal de obra y agregado de Cunyac.

5.3.4 Durabilidad.

Se evaluó la durabilidad de probetas cilíndricas de mortero simulando variaciones climáticas abruptas de temperatura, tomando como referencia el ensayo de la norma UNE 67-034-86⁴⁴, con las modificaciones pertinentes de acuerdo a la naturaleza y las características de los materiales estudiados en el presente trabajo de investigación.

El método consiste en someter probetas de mortero a ciclos de hielo-deshielo. La norma indica que el número de ciclos que se deben realizar debe ser 30, pero debido a la naturaleza de los materiales estudiados, y a su poca resistencia, el número de ciclos completados fue inferior para todas las probetas.

⁴⁴ UNE 67-034-86. Teja de arcilla cocida. Ensayo de helacidad.

A. OBJETIVO.

El objetivo del ensayo de durabilidad es determinar cuál de los morteros propuestos es el más durable en términos de ciclos de hielo-deshielo.

B. EQUIPO.

- ✓ Refrigerador normal con freezer de -10 a -5°C.
- ✓ Balanza electrónica METTLER TOLEDO con precisión de centésimo de gramo.

C. MATERIALES.

- ✓ Probetas cilíndricas de morteros de restauración.
- ✓ Recipiente contenedor de plástico.

D. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Se realizaron 18 muestras, una por cada combinación de 2 cales, 3 arenas y 3 dosificaciones, vaciadas con forma cilíndrica de 34mmx de diámetro por una altura aproximada de 40mm. Estas muestras fueron ensayadas secas, después de ser sometidas a 28 días de curado por inmersión en agua durante 2 minutos por día.

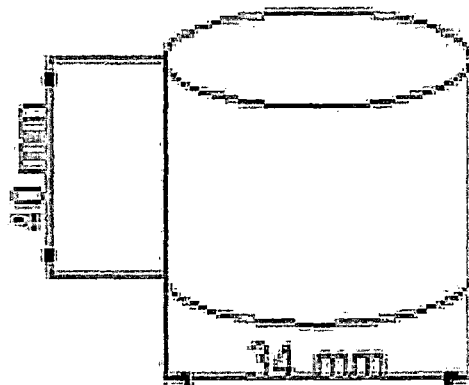


Figura 79. Esquema de espécimen de mortero para ensayo de Durabilidad.

E. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

1. Usando la balanza de precisión, se pesa cada muestra, registrando sus datos.
2. Se colocan las probetas rotuladas y ordenadas sobre el recipiente contenedor de plástico.
3. Se sumergen todas las probetas en agua a temperatura ambiente durante un día.

4. Las muestras se dejan al aire durante unos minutos y luego se introducen al freezer del refrigerador durante 16h.
5. Se retiran las muestras congeladas, y se las deja sumergidas en agua a temperatura ambiente durante 8h.
6. Los pasos de 4 a 5 completan 1 ciclo de 24h. Se detiene el ensayo al notar que una muestra se ha desintegrado completamente, caso contrario, se completan 30 ciclos.
7. Finalmente se registran los pesos de las muestras después de secadas a temperatura ambiente durante 1 día.

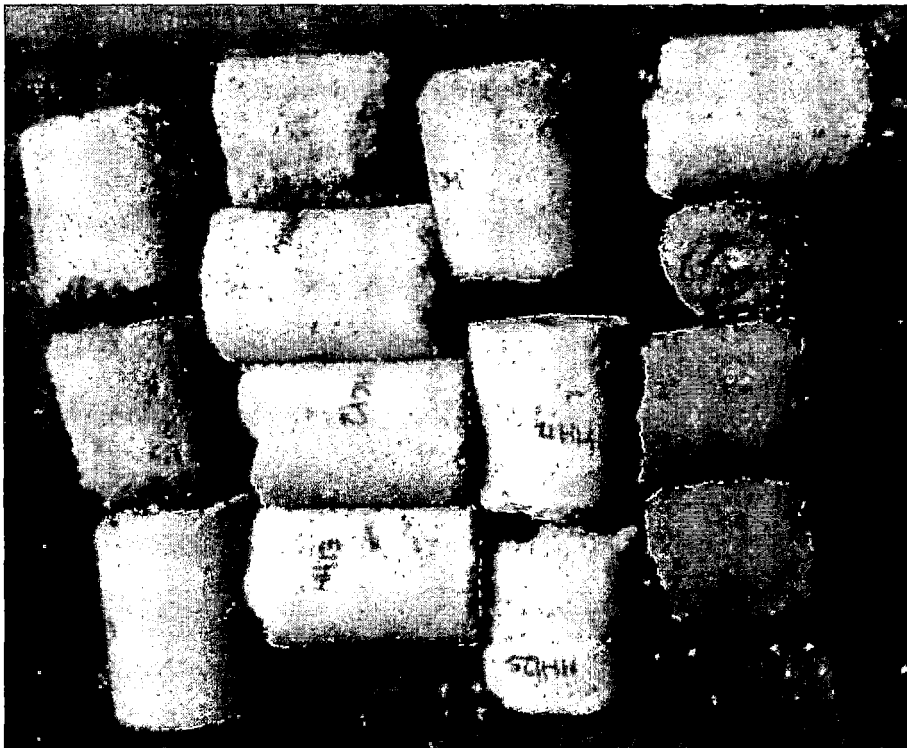


Figura 80. Probetas de mortero propuesto congeladas en el primer ciclo de hielo

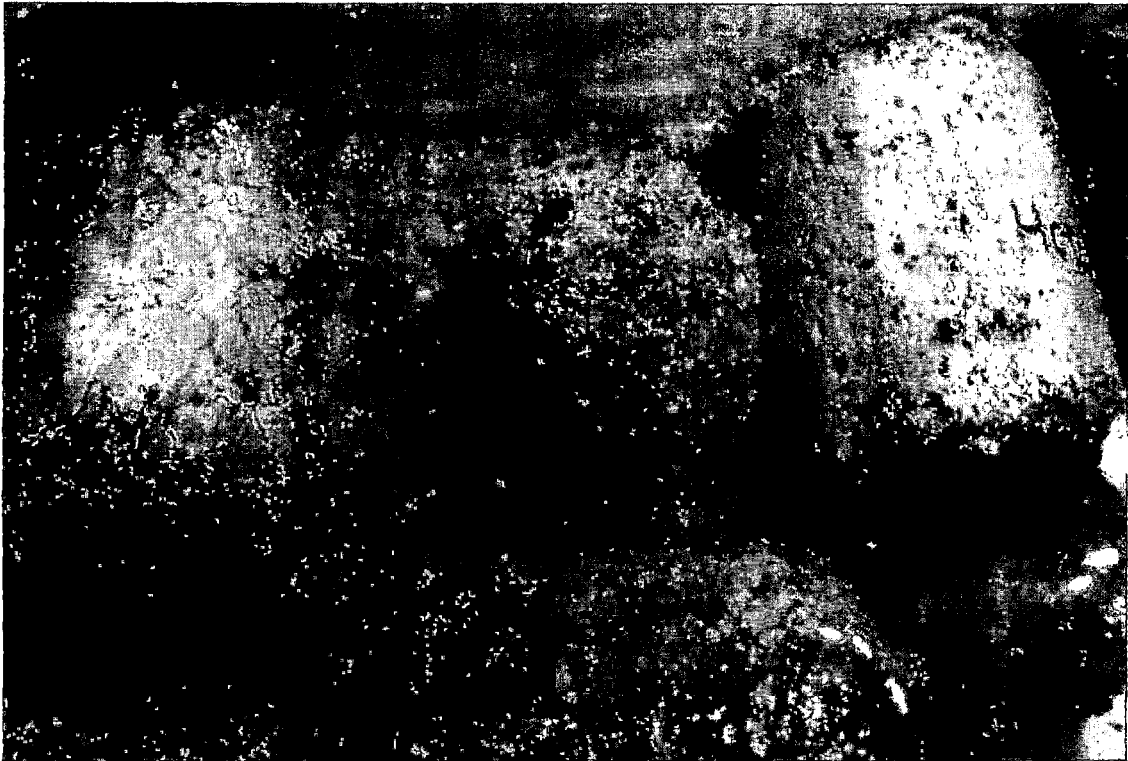


Figura 81. Deterioro de morteros de cal de obra en el 5to ciclo de hielo-deshielo.

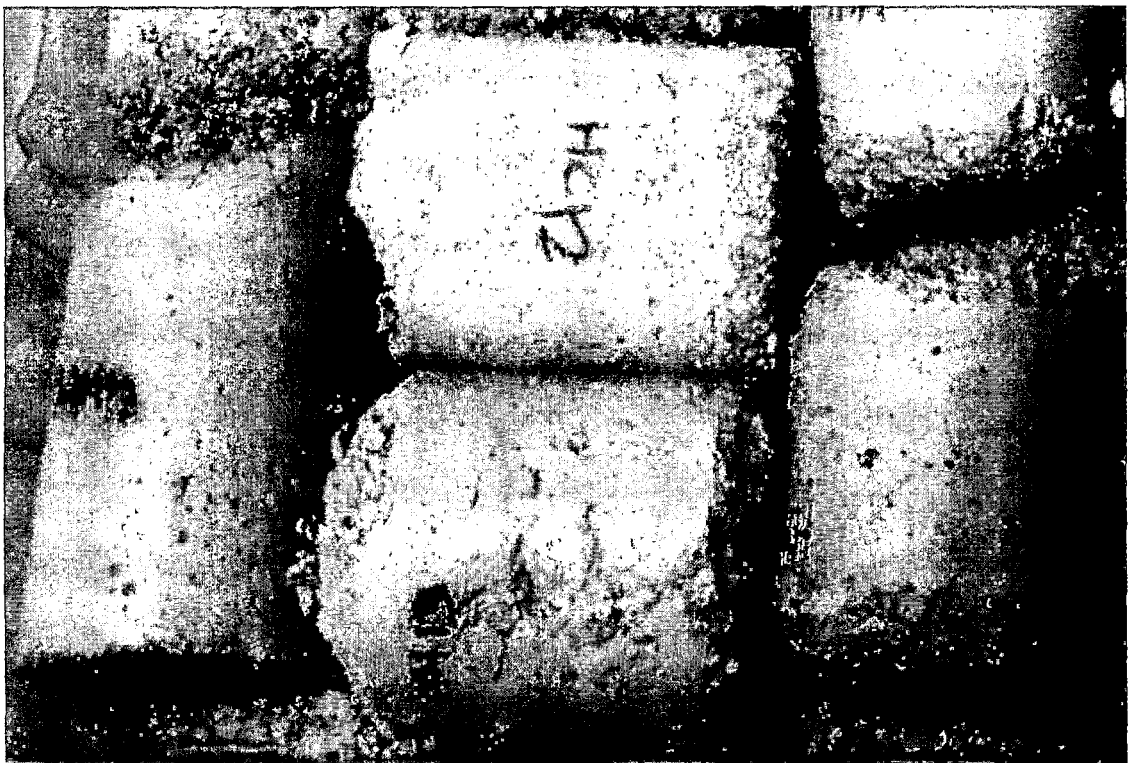


Figura 82. Deterioro de morteros de cal hidráulica en el 5to ciclo de hielo-deshielo.



F. REGISTRO DE DATOS.

El registro de los datos terminó después de 7 ciclos, debido a que 3 probetas se desintegraron completamente.

ENSAYO DE DURABILIDAD		
MUESTRA	PESO ANTES(g)	PESO DESPUÉS (g)
M1	72.05	65.84
M2	80.8	74.2
M3	86.58	81.5
M4	84.63	77.78
M5	85.89	79.23
M6	92.38	85.5
M7	80.77	74.85
M8	69.57	63.23
M9	73.3	67.26
M10	62.53	25.36
M11	74.1	24.6
M12	79.29	36.18
M13	59.9	0
M14	25.72	0
M15	63.64	16.87
M16	58.23	0
M17	70.45	23.4
M18	51.77	9.2

Tabla 30. Registro de datos: Peso antes y después de realizado el ensayo.

G. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Se usó una hoja de cálculo en Microsoft Excel para realizar el cálculo del porcentaje de peso perdido de los morteros propuestos de restauración después de 7 ciclos de hielo-deshielo.

H. RESULTADOS.

Los resultados se muestran como porcentajes de pérdida de pesos.



MUESTRA	PÉRDIDA DE PESO (%)
M1	8.6
M2	8.2
M3	5.9
M4	8.1
M5	7.8
M6	7.4
M7	7.3
M8	9.1
M9	8.2

MUESTRA	PÉRDIDA DE PESO (%)
M10	59.4
M11	66.8
M12	54.4
M13	100
M14	100
M15	73.5
M16	100
M17	66.8
M18	82.2

Tabla 31 Resultados de durabilidad de morteros propuestos para restauración.

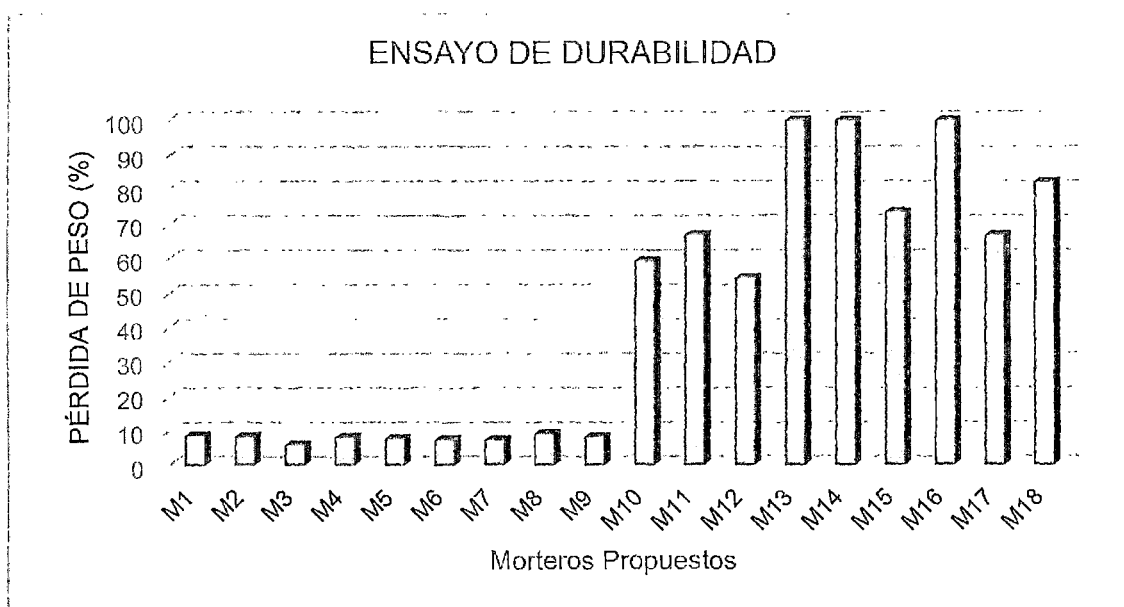


Grafico 10. Cuadro de barras de morteros propuestos. Ensayo de durabilidad.

De los resultados obtenidos se toman como “buenos” la mitad (9 morteros) de menor valor ya que no existe un reglamento o norma donde se especifique el valor mínimo de pérdida de peso después de ser sometidos a ciclo de hielo-deshielo que debe tener un mortero, por lo que estos datos servirán solamente para un análisis comparativo entre ellos.

Se puede observar que todos los morteros hechos con cal hidráulica (muestras M1 a M9) lograron un porcentaje de pérdida de peso entre 5.9 y 9.1%, a diferencia de los morteros hechos con cal de Obra que lograron un porcentaje de pérdida de peso entre 54.4 y 100%.



La peor combinación fue Cal de obra con agregado de Huambutio, ya que 2 de las 3 muestras se desintegraron luego de 7 ciclos de hielo-deshielo. Sin embargo, el mismo agregado, pero con cal hidráulica, logro excelentes resultados. Se puede decir que la cal hidráulica tiene mejores resultados respecto del ensayo de durabilidad como ciclos de hielo-deshielo, independiente del tipo de agregado usado.

5.3.5 Otros ensayos.

Se realizó la medida de Ph y la identificación del color.

5.3.5.1 Acidez o alcalinidad

Un mortero de restauración debe tener un valor de PH igual o muy cercanamente superior a 7, esto es, debe ser neutro o básico, de esta forma no será un material agresivo a la unidad de albañilería histórica (piedra andesita).

Para la identificación de la acidez o alcalinidad de los morteros propuestos de restauración, se siguió el mismo procedimiento descrito en 5.2.4.1. A continuación se muestran los resultados.

MUESTRA	MEDICION DE PH	OBSERVACIONES
M1	9.18	Básico
M2	9.18	Básico
M3	9.18	Básico
M4	10.17	Básico
M5	10.17	Básico
M6	10.17	Básico
M7	9.25	Básico
M8	9.25	Básico
M9	9.25	Básico
M10	8.90	Básico
M11	8.90	Básico
M12	8.90	Básico
M13	8.85	Básico
M14	8.85	Básico
M15	8.85	Básico
M16	9.40	Básico
M17	9.40	Básico
M18	9.40	Básico

Tabla 32. Valores de pH de morteros propuestos. Fuente: Laboratorio de Química – UNSAAC.

De los resultados obtenidos se observa que los datos de Ph de las combinaciones propuestas de mortero son valores mayores a 7, es decir, todos son básicos.



5.3.5.2 Color.

Los morteros propuestos de restauración presentan diferentes colores dependiendo del color característico del agregado usado. La proporción cal/arena y los diferentes tipos de cales no afectan notoriamente al color del mortero propuesto. La caracterización de los morteros propuestos se presentan en la siguiente tabla resumen, además se presenta el color de un mortero de cemento para fines de comparación.

Para la identificación de los morteros propuestos de restauración, se siguió el mismo procedimiento descrito en 5.2.4.3. Solo se presentan los resultados.

MUESTRA	COLOR (Munsell)	COLOR (Office)	COLOR
M1	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M2	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M3	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M4	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M5	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M6	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M7	7Y7/2	HSL-50-75-150	
M8	7Y7/2	HSL-50-75-150	
M9	7Y7/2	HSL-50-75-150	
M10	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M11	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M12	9YR6/2	HSL-35-75-150	
M13	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M14	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M15	5YR7/3	HSL-25-120-164	
M16	7Y7/2	HSL-50-75-150	
M17	7Y7/2	HSL-50-75-150	
M18	7Y7/2	HSL-50-75-150	
Mortero de cemento	8/0	HSL-0-0-200	

Tabla 33. Denominación de los morteros propuestos según la escala de color de Munsell.



Es evidente que el agregado utilizado es determinante en el color, y el mortero de cemento es bastante diferente al resto de morteros. El mortero (M4, M5, M6, M13, M14, M15) con agregado de Mina de Huambutio (5YR7/3) es el que se asemeja más al color del mortero original (5YR7/4), existiendo únicamente una pequeña diferencia en la escala de saturaciones.

El color del mortero de cemento es diferente a los demás.

5.4 COMPROBACIÓN DE VARIABLES.

Cuadro de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLES DEPENDIENTES						
	RESISTENCIA (kg/cm ²)	ADHERENCIA (kg/cm ²)	PERMEABILIDAD (10-3cm/s)	DURABILIDAD (%)	PH	COLOR	
						MUNSELL	COLOR
M1	13.01	0.14	4.10	8.6	9.18	9YR6/2	
M2	22.03	0.17	0.98	8.2	9.18	9YR6/2	
M3	34.49	0.20	1.27	5.9	9.18	9YR6/2	
M4	18.31	0.19	4.43	8.1	10.17	5YR7/3	
M5	25.87	0.20	0.48	7.8	10.17	5YR7/3	
M6	26.53	0.25	0.23	7.4	10.17	5YR7/3	
M7	37.67	0.15	4.59	7.3	9.25	7Y7/2	
M8	43.24	0.16	2.94	9.1	9.25	7Y7/2	
M9	40.86	0.18	0.60	8.2	9.25	7Y7/2	
M10	4.52	0.14	4.28	59.4	8.90	9YR6/2	
M11	7.70	0.16	3.14	65.8	8.90	9YR6/2	
M12	12.28	0.11	7.86	54.4	8.90	9YR6/2	
M13	7.57	0.10	5.74	100.0	8.85	5YR7/3	
M14	9.82	0.11	22.56	100.0	8.85	5YR7/3	
M15	8.23	0.13	12.52	73.5	8.85	5YR7/3	
M16	2.53	0.10	8.78	100.0	9.40	7Y7/2	
M17	7.84	0.13	7.71	65.8	9.40	7Y7/2	
M18	6.51	0.13	10.09	82.2	9.40	7Y7/2	

Tabla 34. Cuadro resumen de variables.

5.5 ELECCIÓN DEL MORTERO DE RESTAURACIÓN.

Del ítem anterior 5.4 Comprobación de Variables se puede destacar que el tipo de mortero M6 cumple con las características para ser un mortero de restauración (definido en el Capítulo 3.3.8) que son las siguientes:

- El mortero de restauración escogido es lo más similar respecto al color y textura.
- El mortero de restauración escogido tiene una resistencia intermedia del orden de 26kg/cm² a los 28 días, la cual evita la incompatibilidad de rigideces causada por altas resistencias y asegura un mayor flujo plástico para que se acomode y reduzca la concentración de esfuerzos a medida que gana resistencia.



- El mortero de restauración escogido tiene una dosificación 1:2:0.70 cal hidráulica, agregado (Mina – Huambutio) y agua. Dicha cantidad de agua es la necesaria para tener una trabajabilidad adecuada.
- El mortero de restauración escogido tiene la mayor adherencia según los datos obtenidos y con respecto a los demás morteros propuestos.
- El mortero de restauración escogido cumple con ser menos poroso (menos permeable) según los datos obtenidos anteriormente ya que tiene un valor de $0.23 * 10^{-3} \text{ cm/seg}$ y es el más impermeable con respecto a las demás combinaciones de morteros realizados, considerando la tabla del capítulo 3.6.3. Concluyendo que el mortero escogido es la combinación más impermeable hallada, y no permitirá el ingreso acelerado de agua o algún contaminante exterior fluido.
- El mortero de restauración escogido tiene el menor porcentaje de pérdida de peso respecto al análisis de durabilidad realizado.
- El mortero de restauración escogido tiene un valor de PH mayor y próximo a 7, esto indica que es básico, y por ende dicho mortero no será un material agresivo a la piedra histórica (andesita).



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

- ✓ En base a los datos cuantitativos se puede decir que los morteros originales usados no tuvieron una distinción por elementos constructivos y estructurales en su elaboración original que fuese a propósito, diferente, ya que presentan proporciones muy poco variables entre sí.
- ✓ Estas pequeñas diferencias pueden ser producto de:
 - La situación temporal y duración de la construcción de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.
 - Ligeras diferencias entre el material y las canteras explotadas.
 - Procedimientos de elaboración del mortero que en aquellas fechas era criterio del maestro constructor.
- ✓ La temperatura de los hornos en los que se realizó la calcinación de las piedras calizas fue menor a 800° - 900°C.
- ✓ Existió presencia de minerales de arcilla tales como la bentonita (montmorillonita) e illita que son silicatos de aluminio hidratados, que pudieron agregarse a la mezcla mediante las impurezas de las calizas, o formar parte del agregado usado (arenas sucias).
- ✓ Las curvas granulométricas de las muestras A1-3, A2-3, P1-3, P2-3 y M2-3 sugieren que se usó arena fina similar a las características granulométricas del agregado de río de Cunyac.
- ✓ El valor de Ph de todas las muestras es superior a 7, detectándose un máximo de 11.01 en la muestra M3, indicio de la utilización de cemento, por su carácter alcalino.
- ✓ Petrográficamente la textura de los morteros originales es similar a una arenisca o limolita calcárea.
- ✓ El color de todas las muestras de mortero, a excepción de M3 y P3, se identificaron como 5YR7/4 en la escala de color de Munsell, mientras que las muestras M3 y P3 se identificaron como 8/0 en la misma escala.
- ✓ Se concluye respecto a la Tabla 34. Comprobación de variables, que el mortero tipo M6 (1:2 cal hidráulica y agregado de Huambutio respectivamente), es el más



adecuado de los morteros propuestos y recomendado para su uso como mortero de restauración.

6.2 RECOMENDACIONES.

- ✓ Se recomienda usar el mortero propuesto M6 (H:M 1:2) para su uso en restauraciones futuras de la Portada Principal de la Catedral del Cusco.
- ✓ Se recomienda realizar un estudio de identificación de "inadecuadas" restauraciones anteriores de mortero en la Portada Principal de la Catedral del Cusco, para prever una futura restauración adecuada.
- ✓ Se recomienda el control de calidad de los materiales usados en una futura restauración de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, así también como cumplir con los criterios técnicos descritos en la presente investigación.
- ✓ Se recomienda realizar trabajos multidisciplinarios en el estudio de monumentos históricos, incluyendo a profesionales de las áreas de física, química, biología, petrografía, historia, entre otros para una caracterización mucho más detallada y exhaustiva.
- ✓ Se recomienda continuar con los estudios de caracterización de los morteros originales de la Portada Principal de la Catedral del Cusco, y de la Catedral en general, mediante ensayos y técnicas adicionales que no se pudieron realizar en esta investigación para contar con información científica más precisa sobre nuestro patrimonio histórico cultural.
- ✓ Se recomienda realizar investigaciones de este tipo, no solo en la Catedral del Cusco, sino también, en los demás monumentos históricos de valor cultural presentes en el Cusco.



6.3 BIBLIOGRAFÍA.

Badillo, J., & Rodriguez, R. (2010). *Mecánica de Suelos. Tomo 1*. México D.F.: Limusa.

Caballero Romero, A. (s.f.). *Guías Metodológicas para los planes y tesis de maestría y doctorado*. Lima: Ugraph S.A.C.

Cañon B., J. (2012). *Caracterización Físico-química y Mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*. Colombia., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Diaz V., T., & Coavoy F., D. (2006). *Estudio de los efectos de los contaminantes atmosféricos en los monumentos líticos y patrimonio cultural pictórico de la ciudad del Cusco*. Cusco.

Fernandes, M., Mirao, J., Velosa, A., & Candeias, A. (s.f.). *Estabilización de tierra con cal - Ventajas y Desventajas*. Obtenido de <https://www.academia.edu>:
https://www.academia.edu/7447318/Estabilizaci%C3%B3n_de_tierra_con_cal._Ventajas_y_desventajas

Gallegos, H. (1991). *Albañilería Estructural*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Harvey V., A., & Harvey R., K. (2014). *Trilogía Divina, La Basílica Catedral del Cusco, la Iglesia de la Sagrada Familia y el Triunfo, Antología*. Cusco.

Historia de los Morteros. (1995). Obtenido de www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/download/263/263:
<https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iaph.es%2Frevistaph%2Findex.php%2Frevistaph%2Farticle%2Fdownload%2F263%2F263&ei=jPehVK6-EYGkNorgagL&usq=AFQjCNEJvRXLzSddfllijN2kYZMGvm4oA&sig2=E45z3V1q>

ICOMOS. (Octubre de 2003). *Principios para el análisis conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico*. Obtenido de <http://www.international.icomos.org>:
http://www.international.icomos.org/charters/structures_sp.pdf

Jara P., E., & Fabián S., J. (2014). *Guía de Prácticas de Edafología*. Lima: UNMSM.

Olarte J., Proaño R., Scaletti H., Torres M., & Zavala C. (s.f.). *Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de la Catedral del Cusco*. Obtenido de www.cismid.uni.edu.pe: <http://www.cismid.uni.edu.pe/articulos/paper-cuzco.pdf>

Regal, A. (1964). *Materiales de Construcción*. Lima.



Sepulcre A. , A. (s.f.). *Análisis comparativo de determinados aspectos sobre la hidráulica en los morteros de cal.*

Valderrama M., S. (2000). *Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación científica.* Lima: San Marcos.

Varios, A. (2003). *Metodología de Diagnóstico y Evaluación de Tratamientos para la Conservación de los Edificios Históricos.* Granada: Comares.

Vásquez Bustamante, O. (2013). *Reglamento Nacional de Edificaciones.* Lima.

Walpole, R. (1984). *Probabilidad y estadística para ingenieros.* Interamericana.



6.4 ANEXOS.



PERMISO PARA EXTRACCION DE MUETRAS
ORTORGADO POR LA DIRECCION
DESCONCENTRADA DE CULTURA CUSCO.



PERÚ

Ministerio de Cultura

Dirección
Desconcentrada de
Cultura Cusco

Sub Dirección Desconcentrada
de Patrimonio Cultural y
Defensa del Patrimonio Cultural

División de
Patrimonio Cultural

"Año de la Promoción de la Industria Responsable y del Compromiso Climático"

INFORME N° 129-2014-SCZF- AFPC-SDDPCDPC-DDC-CUS/MC

A : **ARQTA. MARIA CRISTINA CORNEJO DURAND**
JEFE AREA FUNCIONAL PATRIMONIO CULTURAL

DE : **ARQTA. SABY C. ZÁRATE FERRO.**
COORDINADORA DEL CENTRO HISTÓRICO DEL CUSCO.

ASUNTO : **SOLICITA AUTORIZACIÓN PARA EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DE**
MORTEROS DE LA PORTADA PRINCIPAL DE LA CATEDRAL DEL
CUSCO.

REFERENCIA : **H.R N° 201411544**
H.R.N° 201411665
H.R.N° 201412036 (Descargo a Esquela de Requerimiento)

FECHA : **Cusco, 27 de Octubre 2014**

27 OCT. 2014

26 OCT. 2014

Mediante el presente me dirijo a su despacho con la finalidad de dar opinión en relación a la solicitud de autorización para la extracción de morteros de la portada principal de la Catedral del Cusco, al respecto informo:

1° El objeto de la investigación es halla el mortero que pueda ser utilizado en la intervención que se prevé realizar, mortero que además de ser el más conveniente por tema estructural debe ser compatible e interactuar con los materiales pétreos.

2° Por una parte el Decano de la Facultad de Ingeniería Civil Dr. Ing. José F. Marín Loayza, presenta a los alumnos Jorge Luis Aquehua Tarco y Julio Cesar Sucasaca Rodríguez que viene desarrollando la Tesis titulada "Estudio de los Morteros de la Portada Principal de la Catedral del Cusco"; en coordinación con la oficina de Proyectos Patrimoniales del Arzobispado del Cusco, que a partir del Sr. Arzobispo del Cusco Juan Antonio Ugarte Pérez hacen conocer la necesidad de realizar investigaciones con el fin de materializar una propuesta de intervención.

3° En coordinación con los estudiantes se ha realizado una primera inspección el día 20 de octubre, con la finalidad de identificar en base a plano de trabajo los sectores propuestos para la extracción mencionada; debiendo precisar lo siguiente:

- Se ha previsto la extracción de 45 sectores de la portada principal: identificados bajo tres aspectos de acuerdo a comportamiento estructural; arcos, muros y pilastras.
- La extracción abarca un área de 4cm de largo por una profundidad de 5cm.
- Se utilizaran cinceles bastante finos, los mismos que deben garantizar no lesionar los elementos líticos de la portada.
- Con el fin de alcanzar las alturas mayores, se armarían andamios de hasta 6 cuerpos.

4° Con fecha 22 de octubre 2014 se expidió la Esquela de Requerimiento N° 116-2014-AFPC-SDDPCDPC-DDC-CUS/MC, con la finalidad de que se alcance el sustento del procedimiento técnico que se propone realizar en la mencionada portada.

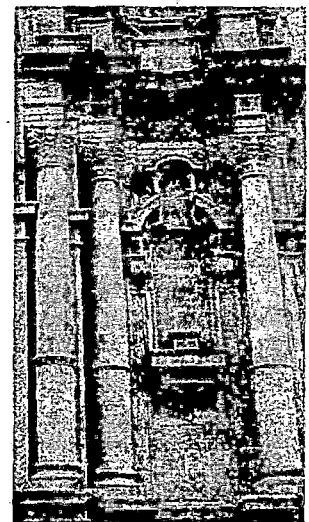
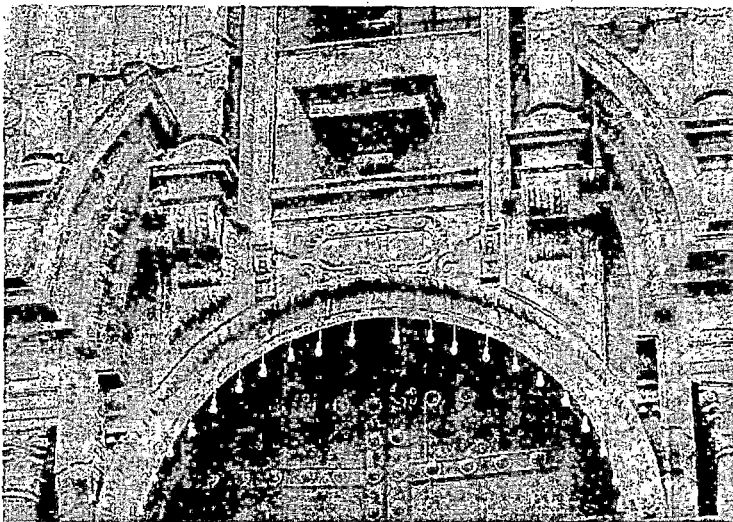
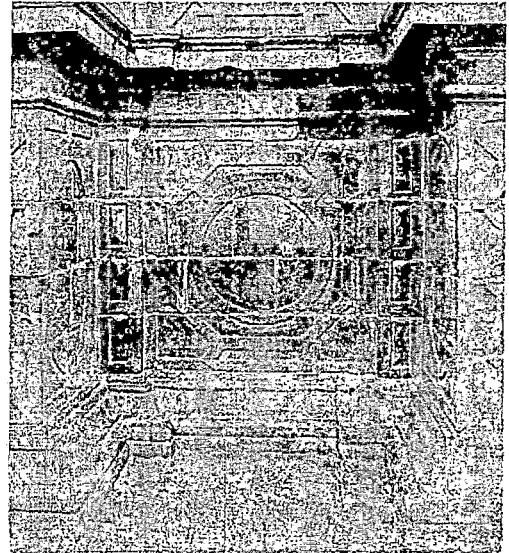
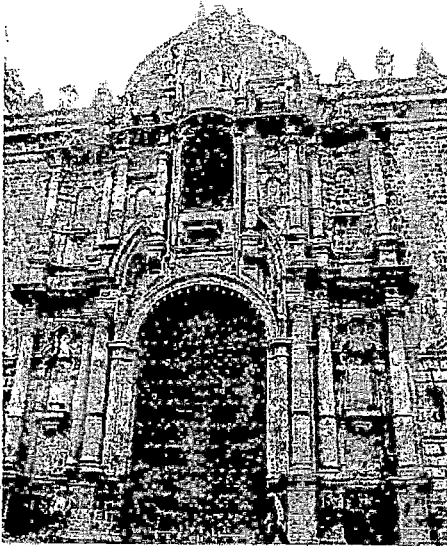
En respuesta a la esquela aludida, el Decano de la Facultad de Ingeniería Civil alcanza mediante H.R.N° 201412036 de fecha 23/10/14 la documentación requerida.

5° En la inspección se ha podido identificar que los morteros empleados lejos de garantizar la vigencia de los elementos conformantes, han dañado los elementos líticos que la



"Año de la Promoción de la Industria Responsable y del Compromiso Climático"

conforman la portada, además se verificó que el comportamiento del mortero varía de acuerdo a la ubicación; así mismo se observó que sobre el mortero se hay aplicado cemento.



Portada principal de la que se solicita extracción de muestras de tres tipos mortero de muros, pilares y arcos.

Conclusiones .-

1° Considerando que la investigación del mortero empleado en la Catedral, específicamente en la portada principal, tiene por objeto definir el mortero compatible con los elementos conformantes, y habiendo los recurrentes cumplido con alcanzar la documentación sustentadora en cumplimiento a Esquela de Requerimiento N° 116-2014-AFPC-SDDPCDPC-DDC-CUS/MC, y teniendo en cuenta que es una evaluación que será monitoreada por la Oficina de Proyectos Patrimoniales del Arzobispado de Cusco; la opinión de la suscrita para autorización de extracción de mortero es PROCEDENTE, debiendo considerar que se ha previsto ocho puntos de los que se extraerá 5 muestras, haciendo un total de 40 extracciones cada una de 2gr, de acuerdo a plano adjunto

“Año de la Promoción de la Industria Responsable y del Compromiso Climático”

2° La investigación está a cargo de los estudiantes de la facultad de Ingeniería Civil con aval del decano de dicha facultad; así como debe concretizarse conjuntamente que la Oficina de Proyectos Patrimoniales del Arzobispado del Cusco, razón por la cual las acciones que ameriten deberán estar acompañadas por esta instancia.

3° Debe hacerse énfasis en que la extracción no debe dañar en absoluto ninguno de los elementos conformantes de la portada, por tanto el uso de las herramientas y los procedimientos a emplear deben ser continuamente monitoreados y de acuerdo a la descripción que se realiza en la memoria descriptiva.

4° Con la finalidad de garantizar este proceso, deberá realizarse el registro fotográfico previo, durante y al finalizar la extracción de las muestras de mortero.

5° Los resultados a los que se arriben deberán ser informados a la DDC-Cusco con la finalidad de difundir las cualidades de la propuesta que vaya a realizarse una vez se identifique el mortero compatible con los elementos líticos.

6° Por lo tanto en base a lo manifestado se sugiere dar respuesta favorable al Decano de la Facultad de Ingeniería Civil Dr. Ing. José F. Marín Loayza, presenta a los alumnos Jorge Luis Aquehua Tarco y Julio Cesar Sucasaca Rodríguez, para la extracción de las muestras de mortero de la portada principal de la Catedral del Cusco. Deberán considerar los aspectos expuestos en la parte conclusiva del presente informe.

7° De la misma manera, se sugiere dar respuesta institucional al Sr. Arzobispo del Cusco Juan Antonio Ugarte Pérez, considerando lo manifestado en el presente informe, más aun por ser ellos quienes conjuntamente a través de la oficina de Proyectos Patrimoniales viene acompañando este proceso.

Es cuanto informo a Usted, para su conocimiento y fines consecuentes.

Atentamente,

MINISTERIO DE CULTURA
DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA DE CUSCO
ÁREA FUNCIONAL DE PATRIMONIO CULTURAL - SDDPCDC



Arqta. Saby Zárate Ferro
COORDINADORA DEL CENTRO HISTÓRICO DEL CUSCO AFPC



"Año de la Promoción de la Industria Responsable y del Compromiso Climático"

Cusco, octubre 28 del 2014

OFICIO N° 982 -2014-SDDPCDPC-DDC-CUS/MC

Señor:

Dr. Ing. JOSE F. MARIN LOAYZA

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

PRESENTE.-

REF.: Hoja de Ruta N° 11544 y 12036-2014.

De mi consideración:

Previo cordial saludo, me dirijo a usted en representación del Director de la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco del Ministerio de Cultura, Arqto. Edwin Ricardo Ruíz Caro Villagarcía, en calidad de Sub Director de la Sub Dirección Desconcentrada de Patrimonio Cultural y Defensa del Patrimonio Cultural, para manifestarle que en atención a los documentos de la referencia cumpro en hacer llegar adjunto, copia del Informe N° 129-2014-SCZF-AFPC-SDDPCDPC-DDC-CUS/MC, para su conocimiento y manifestarle la procedencia de lo solicitado, debiendo cumplir con las acciones indicadas en el mencionado documento.


Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente,

c.c. Arch.

MMP/env.

MINISTERIO DE CULTURA
DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA CUSCO
SUB DIRECCIÓN DESCONCENTRADA PATRIMONIO CULTURAL



ARQTO. MARCO D. MARCES PAREJA
SUB DIRECTOR



**INFORME DE ANALISIS DE DIFRACCION DE
RAYOS X - LABORATORIA DE CIENCIAS
FISICAS - UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS DE LIMA.**



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Lima, 04 de diciembre del 2014

Sr. Julio César Sucasaca Rodríguez
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional San Antonio de Abad del Cusco
Presente.-

De mi mayor consideración:

Es grato dirigirme a usted para saludarlo cordialmente y, a la vez, hacerle llegar adjunto a esta carta el informe de medición y análisis de ocho (08) muestras de mortero, de acuerdo a la cotización N°. 045-LDRX-FCF-UNMSM-2014.

Sin otro particular, reciba mis saludos cordiales.

Atentamente,



Dr. Carlos Landauro Sáenz
Laboratorio de Difracción de Rayos-X

Adj.: Informe N°. 029-LDRX-FCF-UNMSM-14 del servicio de medida y de análisis por difracción de rayos X.

Ciudad Universitaria, Pabellón de Ciencias Físicas, Calle Germán Amézaga N° 375, Lima, 1 (Perú)
Teléfono: 619-7000 anexo 3821.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

REPORTE DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE UNA MUESTRA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Informe N.º 029-LDRX-FCF-UNMSM-2014

Fecha: 04 de diciembre del 2014

Solicitante: Sr. Julio Sucasaca / **e-mail:** jcsr11@hotmail.com

Institución: Universidad Nacional San Antonio de Abad del Cusco

CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES:

Condiciones de la medición:

- El análisis se realizó en un Difractómetro marca **BRUKER**, modelo **D8-FOCUS**.
- Se empleó un tubo de Cu cuya longitud de onda, correspondiente a $K_{\alpha 1}$ -Cu, es $\lambda=1.5406\text{Å}$.
- Rango angular de análisis (2θ):
Inicio: 5° .
Final: 80° .
Paso: 0.02° .
Tiempo por paso: 2 seg.
- Generador Rayos-X:
Voltaje de salida del tubo= 40 kV.
Corriente de salida del tubo = 40 mA.
- Tipo de detector:
Contador de centelleo.

Características de las muestras analizadas:

Se analizaron ocho (08) muestras en polvo identificadas, por el solicitante, como morteros. Estas muestras tuvieron que ser pulverizadas en un mortero de agata para así reducir su textura granulosa. Dichas muestras fueron codificadas tal como se indica en la Tabla 1; además se muestra la codificación brindada por el solicitante.

Tabla 1. Codificación de las muestras medidas y analizadas.

Código LDRX	Código solicitante
M2014-029-001	A1-1
M2014-029-002	A2-1
M2014-029-003	M1-1
M2014-029-004	M2-1



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Tabla 1 (continuación). Codificación de las muestras medidas y analizadas.

Código LDRX	Código solicitante
M2014-029-005	M3-1
M2014-029-006	P1-1
M2014-029-007	P2-1
M2014-029-008	P3-1

ANÁLISIS DEL DIFRACTOGRAMA DE LAS MUESTRAS:

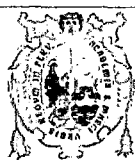
Los difractogramas correspondientes a las ocho (08) muestras analizadas, listadas en la tabla 1, se observan en las figuras 1-8. Con la finalidad de distinguir tanto las posiciones angulares como la intensidad de los picos en cada muestra, se compararon los cuatro primeros difractogramas, como se puede ver en la Figura 9, y los cuatro restantes mostrados en la Figura 10.

Al realizar la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-001" (Figura 1) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se identificaron principalmente las fases *Quartz, syn* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Hematite, syn* (Fe_2O_3). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 46-1045, 86-2334, 52-1344 y 33-0664 respectivamente (Figura 11).

También, de la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-002" (Figura 2) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se identificó principalmente las fases *Quartz, syn* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Iron Oxide* (Fe_2O_3). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 46-1045, 86-2334, 52-1344 y 39-0238 respectivamente (Figura 12).

Asimismo, la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-003" (Figura 3) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 permitió la identificación principalmente de las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Silicon Oxide* (SiO_2). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586, 52-1344 y 42-0005 respectivamente (Figura 13).

También, de la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-004" (Figura 4) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se identificó principalmente las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite, syn* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Silicon Oxide* (SiO_2). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586, 52-1344 y 42-0005 respectivamente (Figura 14).



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

De la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-005" (Figura 5) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se identificó principalmente las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Silicon Oxide* (SiO_2). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586, 52-1344 y 42-0005 respectivamente (Figura 15).

Asimismo, la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-006" (Figura 6) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 permitió la identificación principalmente de las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Silicon Oxide* (SiO_2). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586, 52-1344 y 42-0005 respectivamente (Figura 16).

También, la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-007" (Figura 7) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 permitió la identificación principalmente de las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) y *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586 y 52-1344 respectivamente (Figura 17).

Finalmente, de la comparación del difractograma de la muestra codificada como "M2014-029-008" (Figura 8) con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se identificó principalmente las fases *Quartz* (SiO_2), *Calcite, syn* ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), *Calcium Aluminum Silicate* ($\text{Ca}_{0.88}\text{Al}_{1.77}\text{Si}_{2.23}\text{O}_8$) y *Silicon Oxide* (SiO_2). Las fichas JCPDS-PDF asociadas a estas fases son 70-3755, 05-0586, 52-1344 y 42-0005 respectivamente (Figura 18).



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

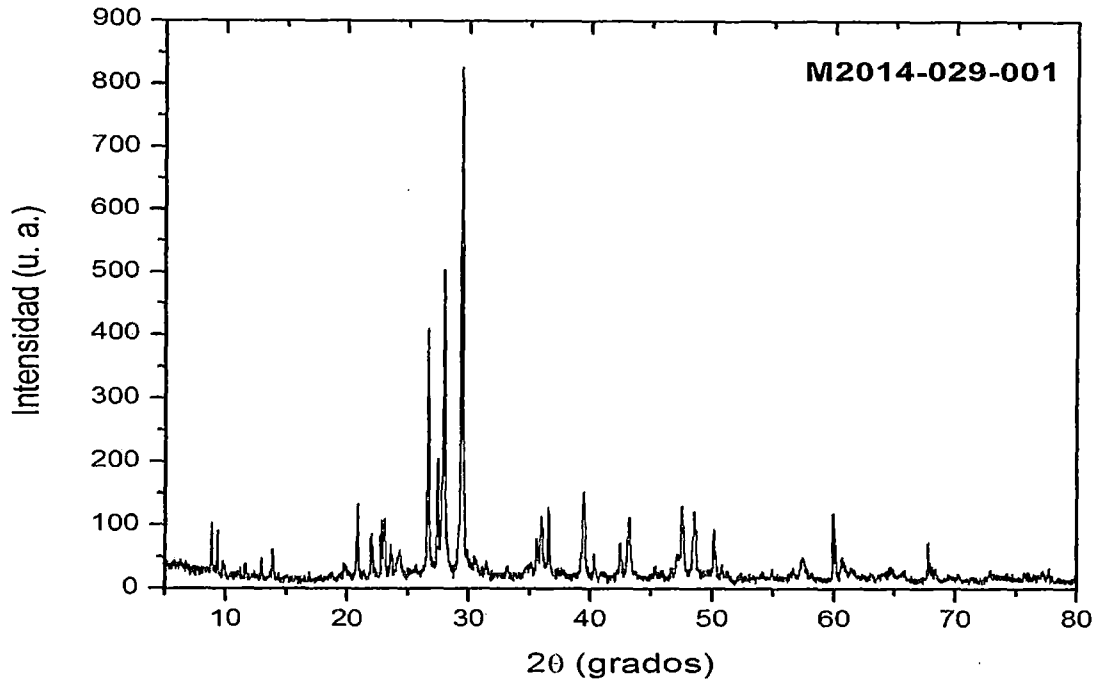


Figura 1. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-001".

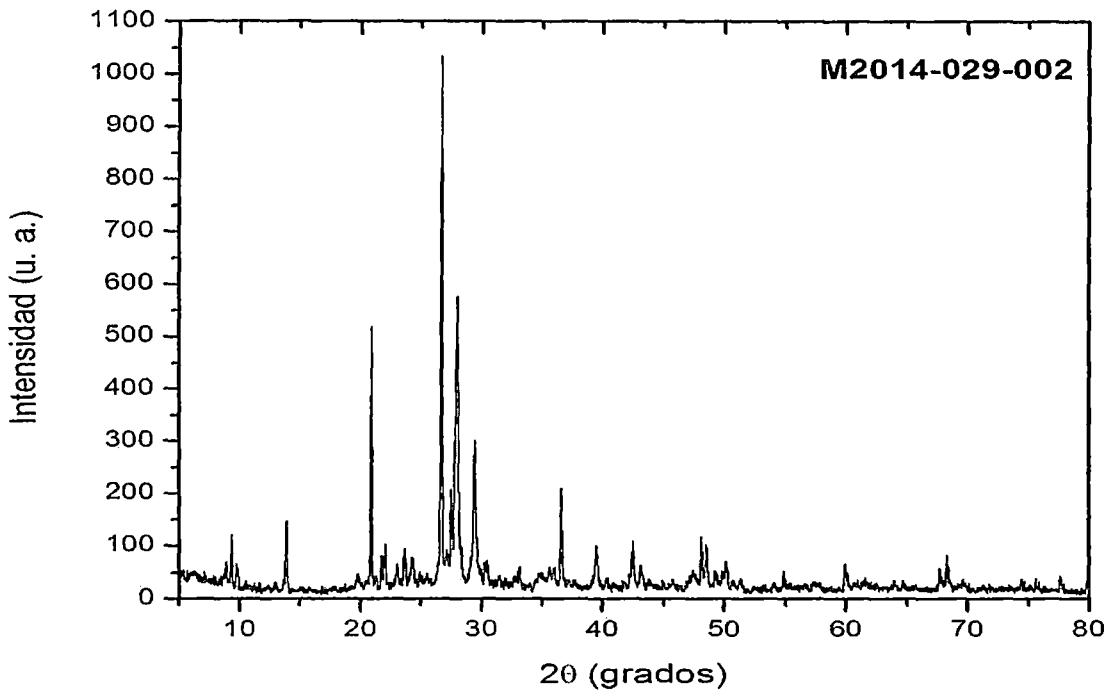


Figura 2. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-002".



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

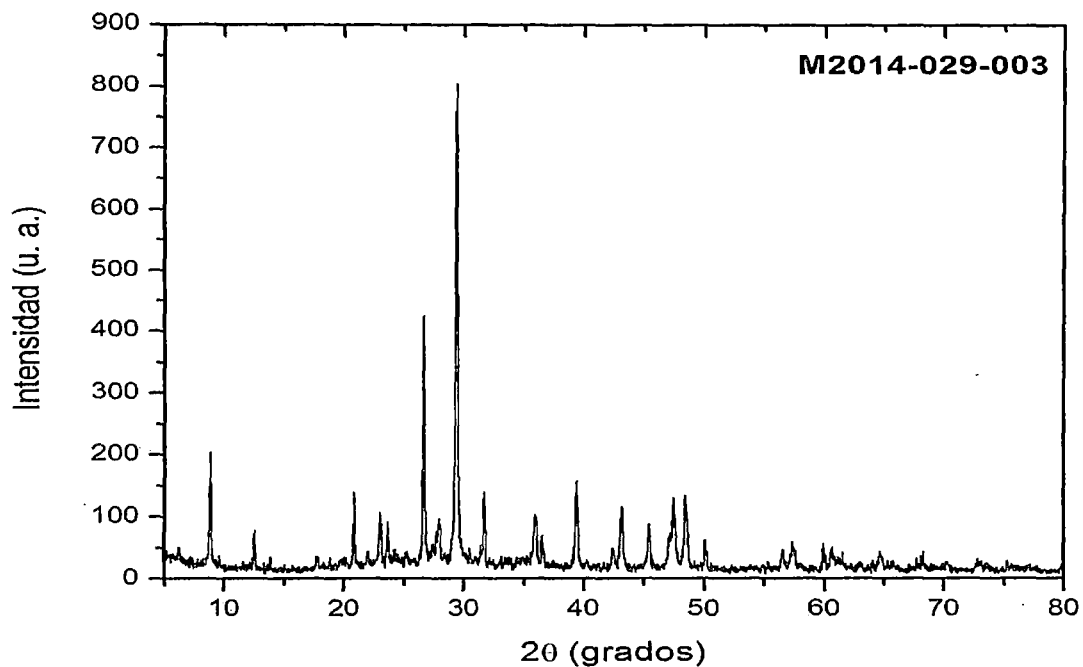


Figura 3. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-003".

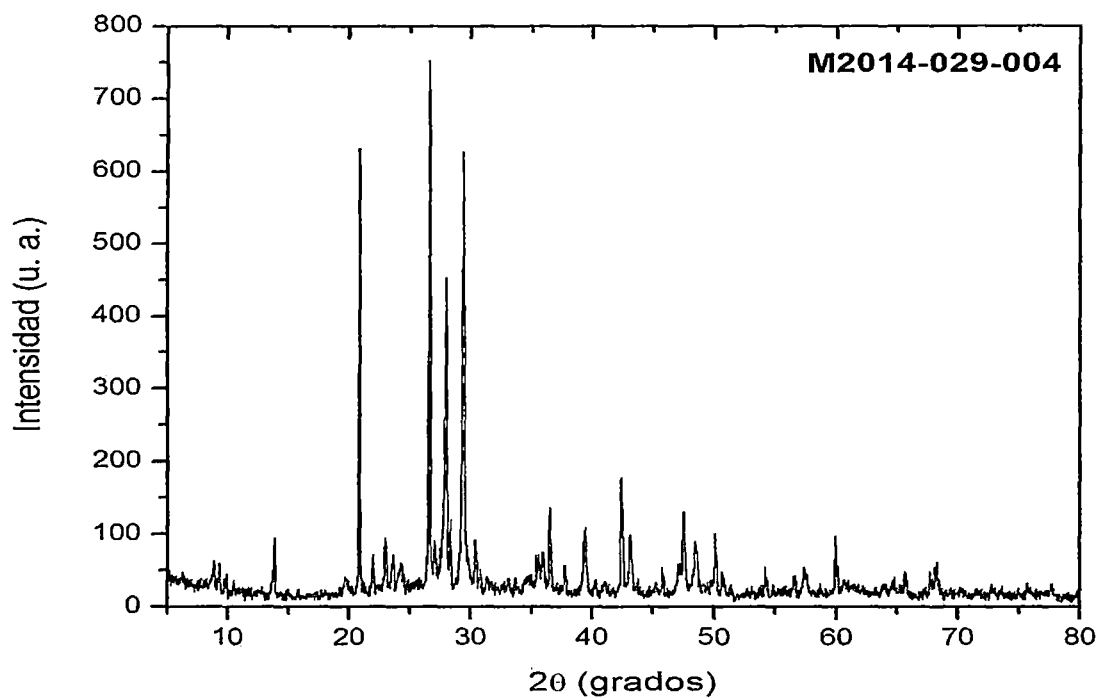


Figura 4. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-004".



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

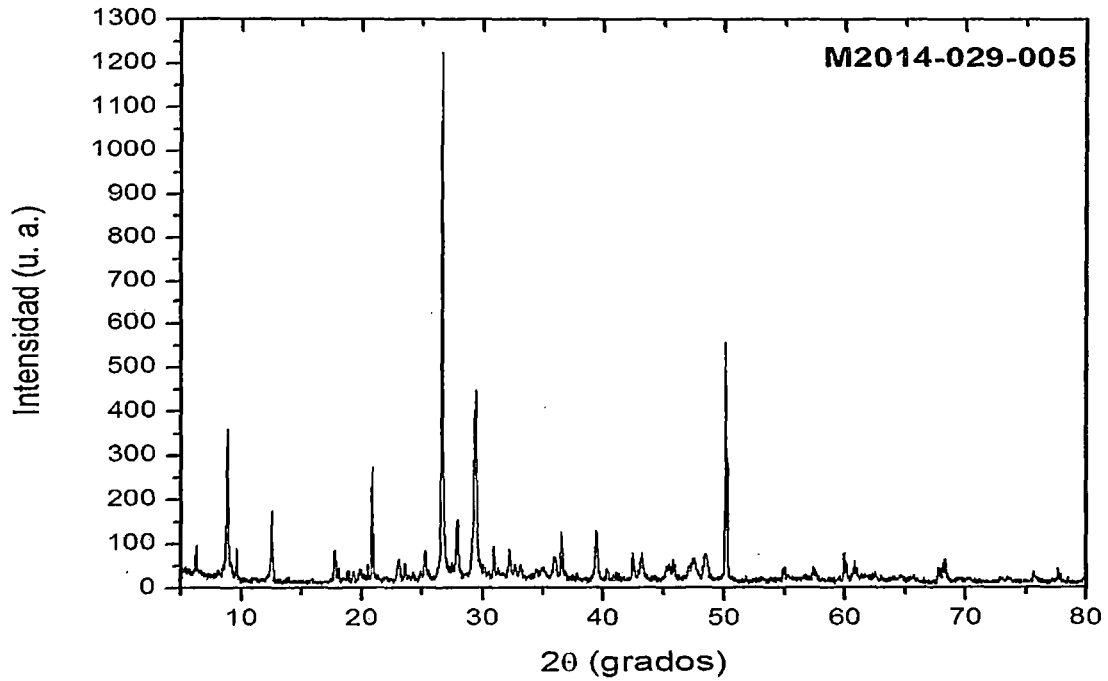


Figura 5. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-005".

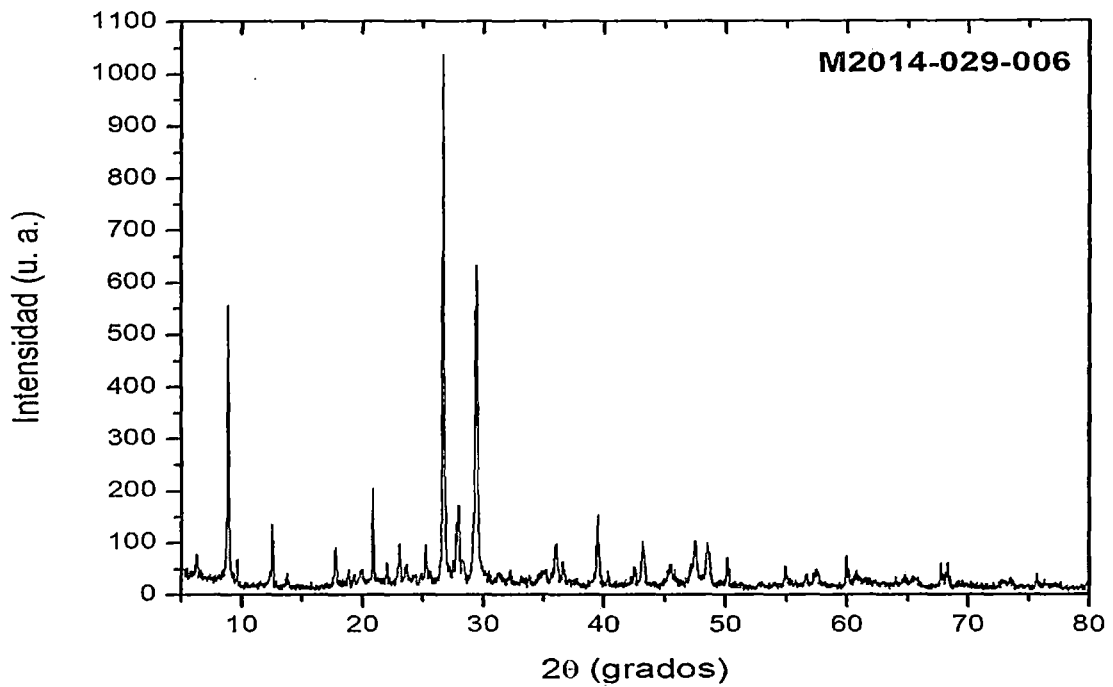


Figura 6. Difractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-006".



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

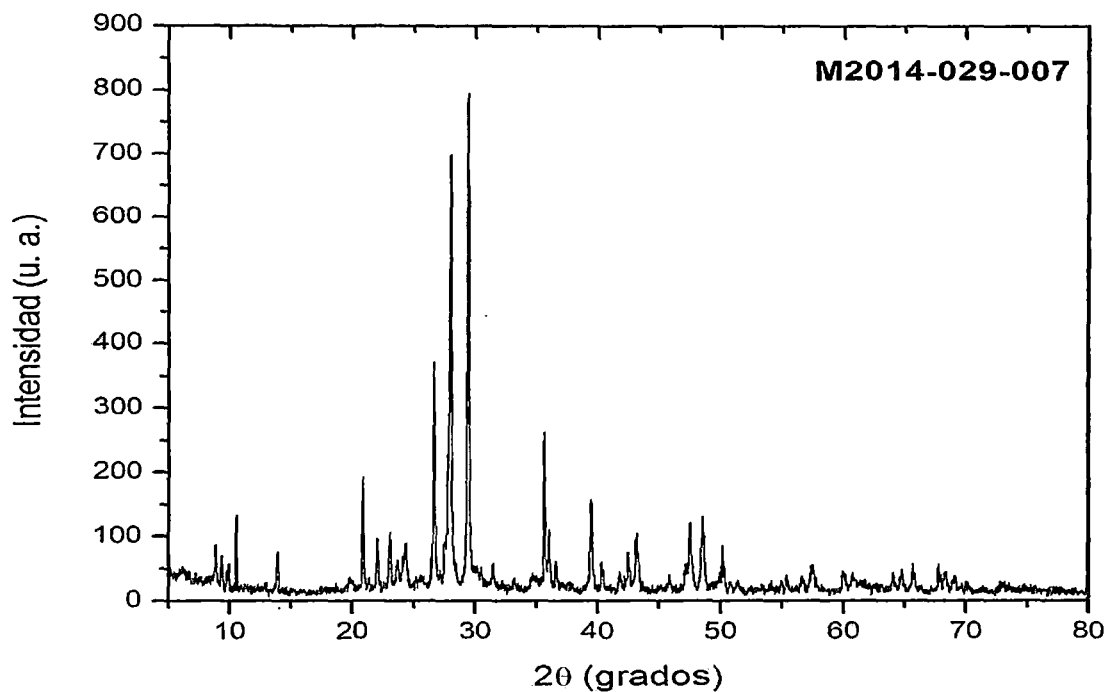


Figura 7. Diffractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-007".

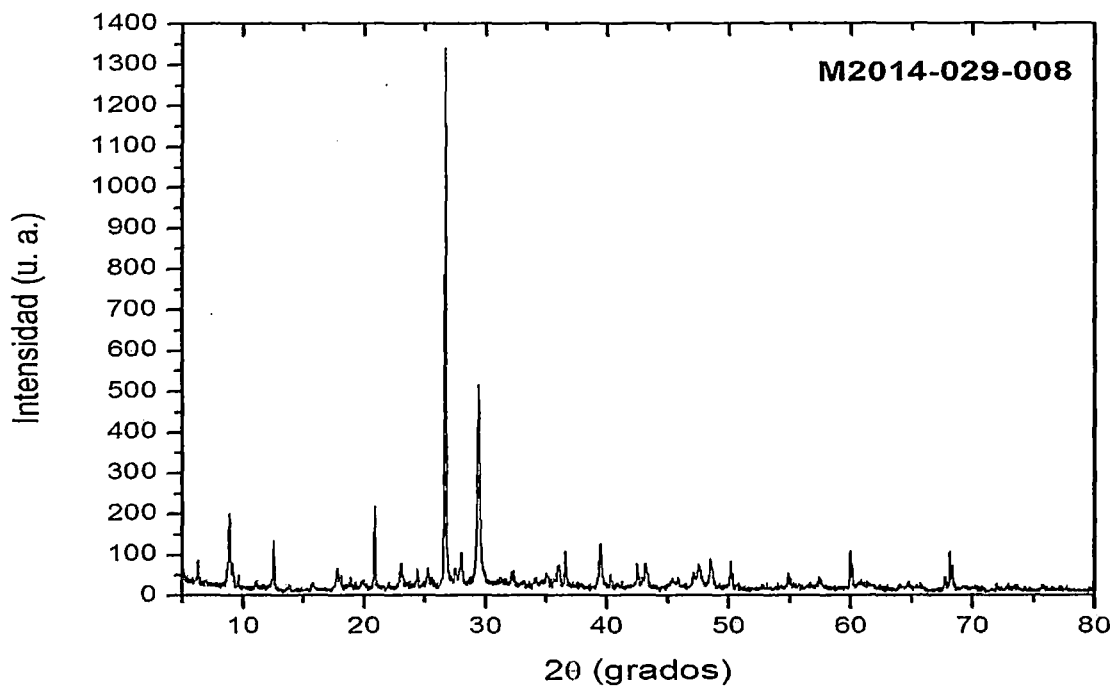
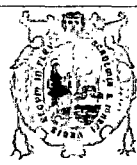


Figura 8. Diffractograma de la muestra analizada y codificada como "M2014-029-008".



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

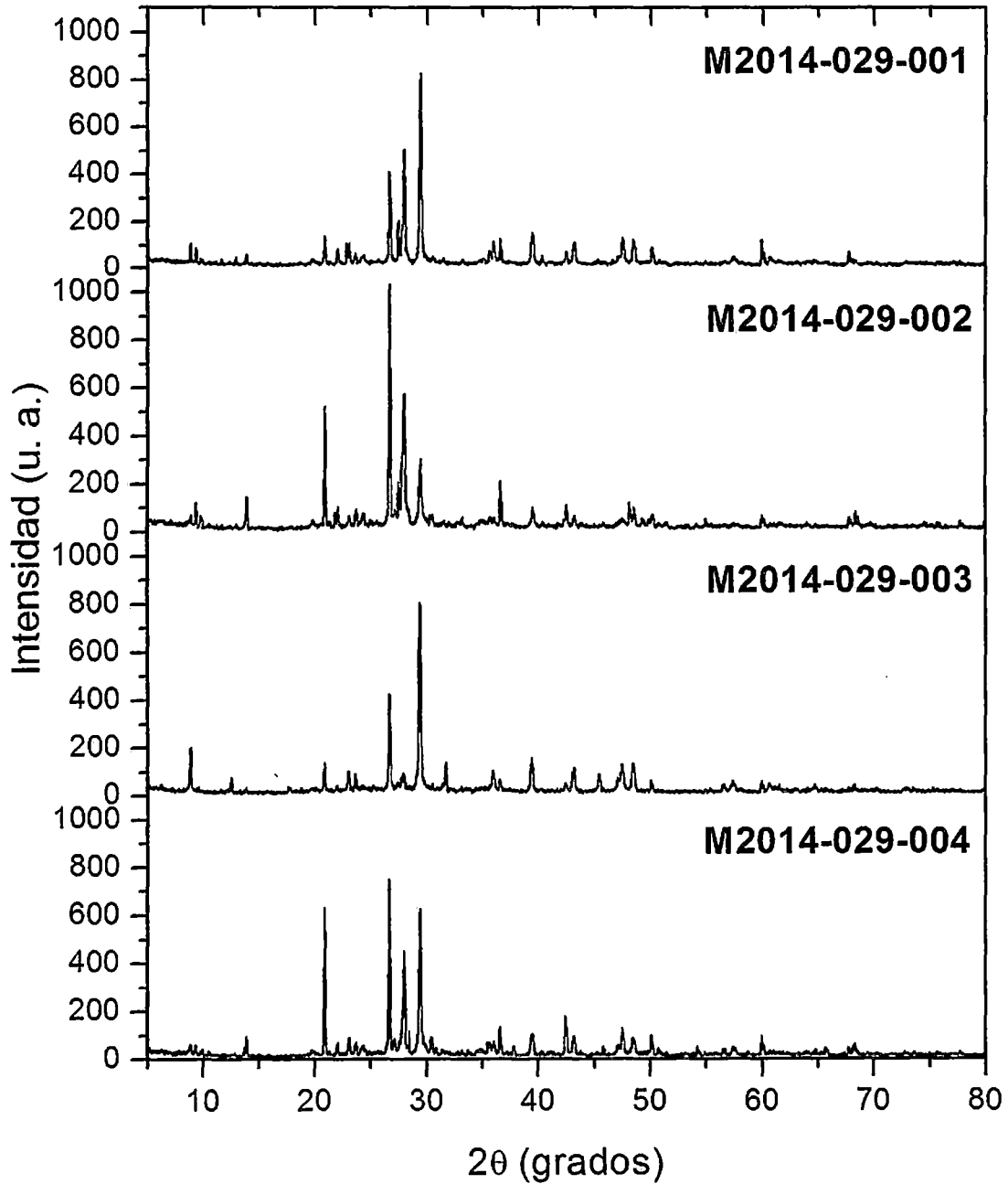


Figura 9. Comparación de los difractogramas correspondientes a las muestras "M2014-029-001", "M2014-029-002", "M2014-029-003" y "M2014-029-004"



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

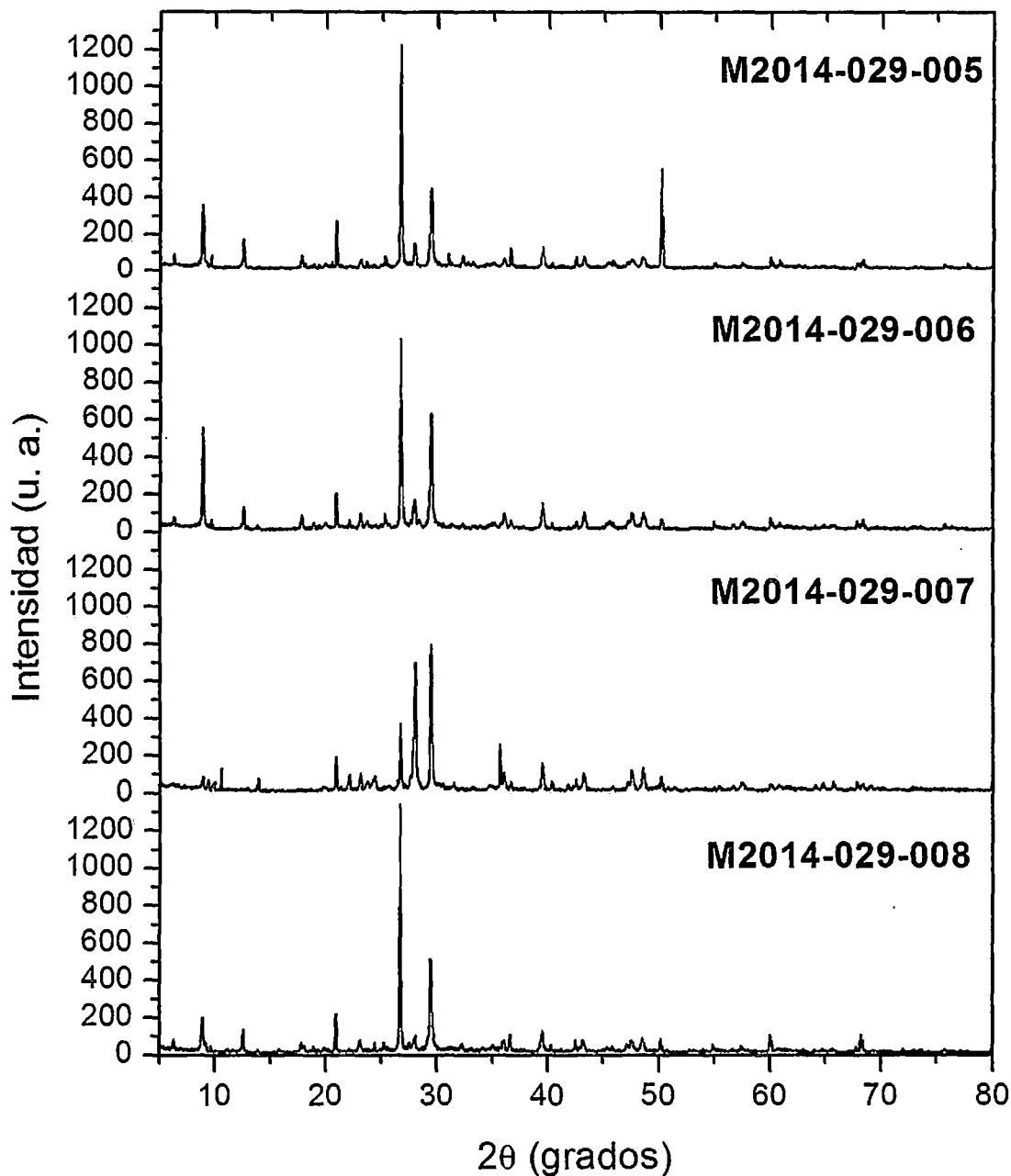
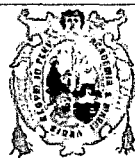


Figura 10. Comparación de los difractogramas correspondientes a las muestras "M2014-029-005", "M2014-029-006", "M2014-029-007" y "M2014-029-008"



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

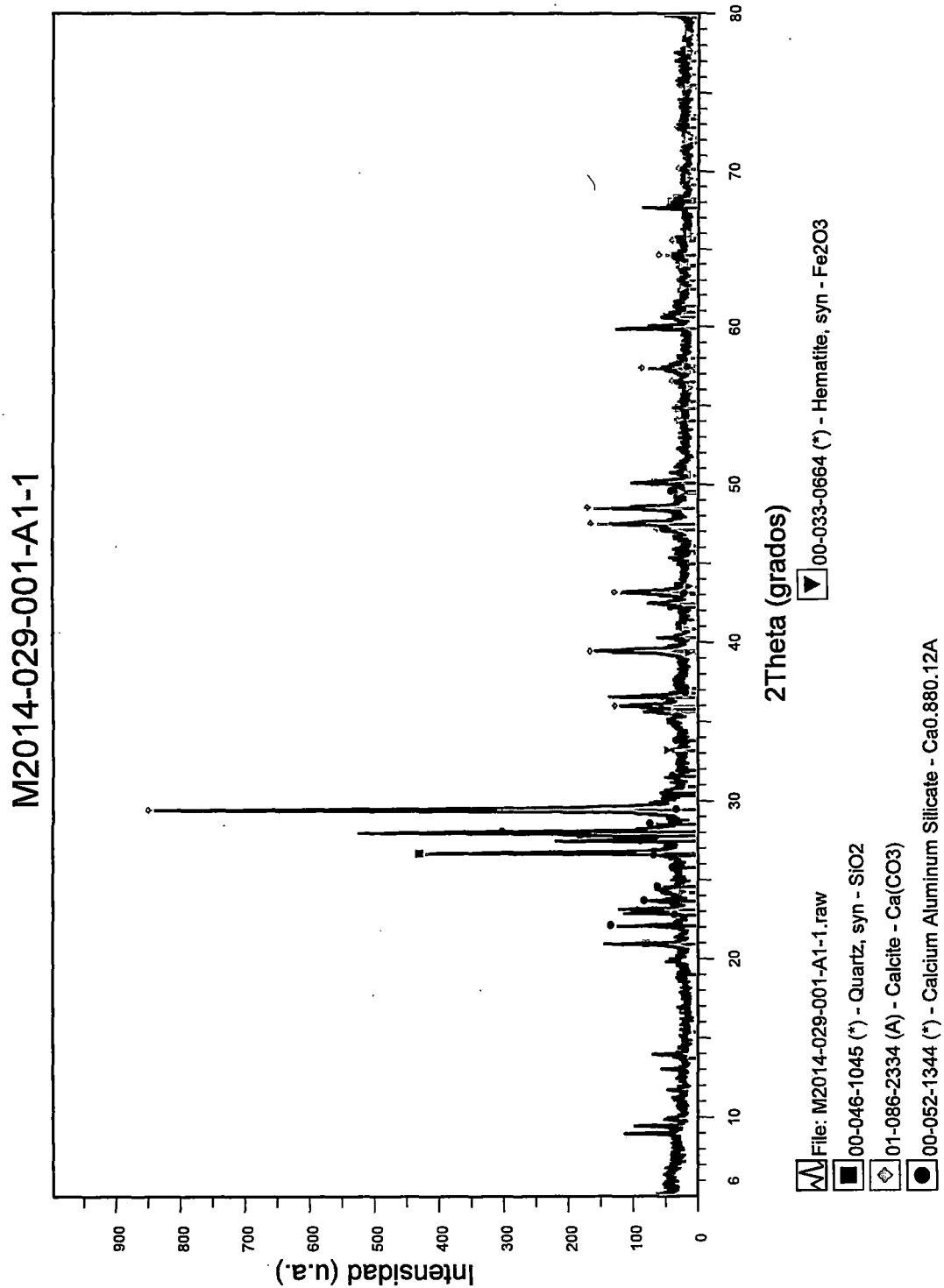


Figura 11. Difractograma de la muestra "M2014-029-001" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

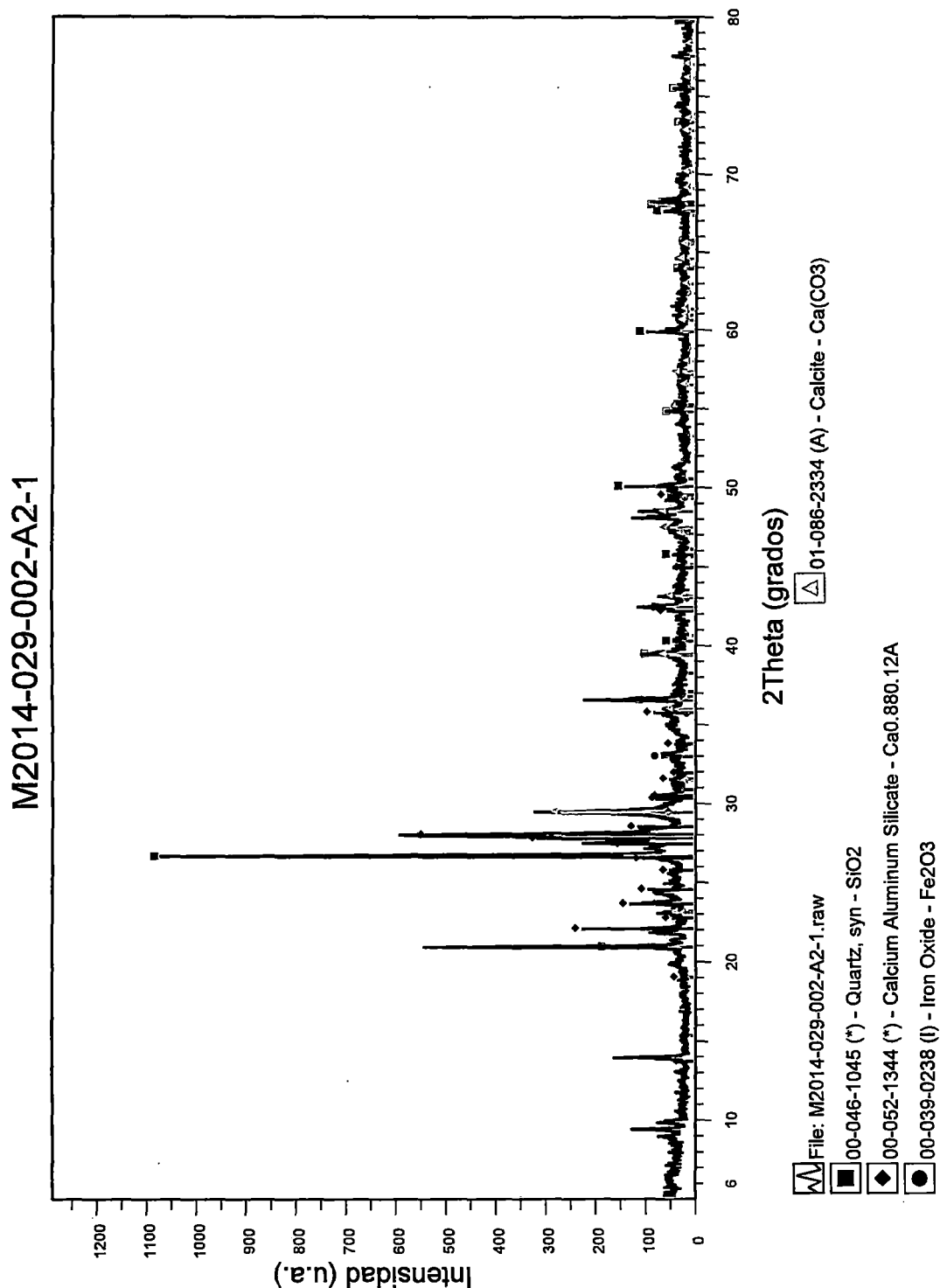


Figura 12. Difractograma de la muestra "M2014-029-002" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

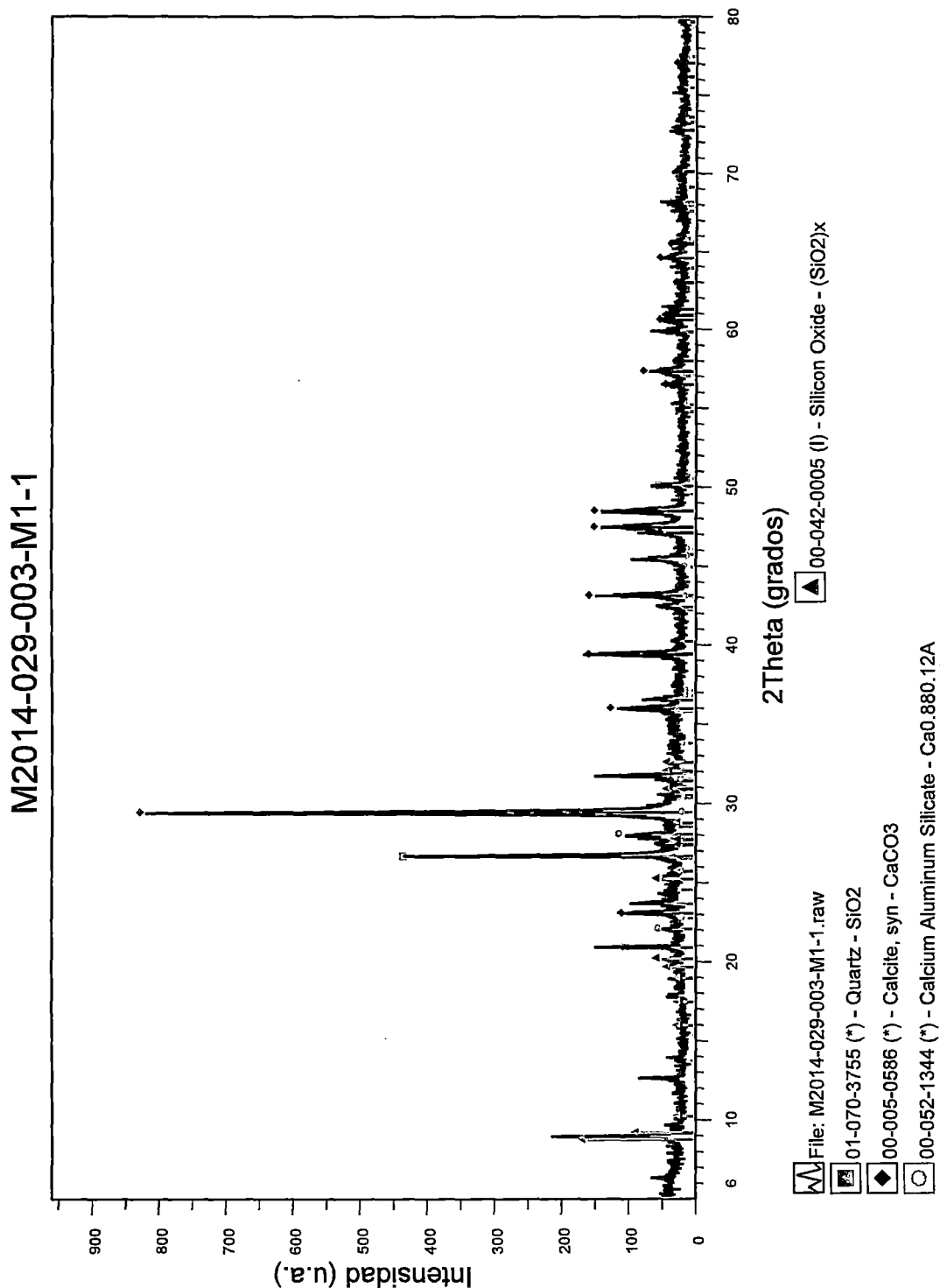


Figura 13. Difractograma de la muestra "M2014-029-003" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

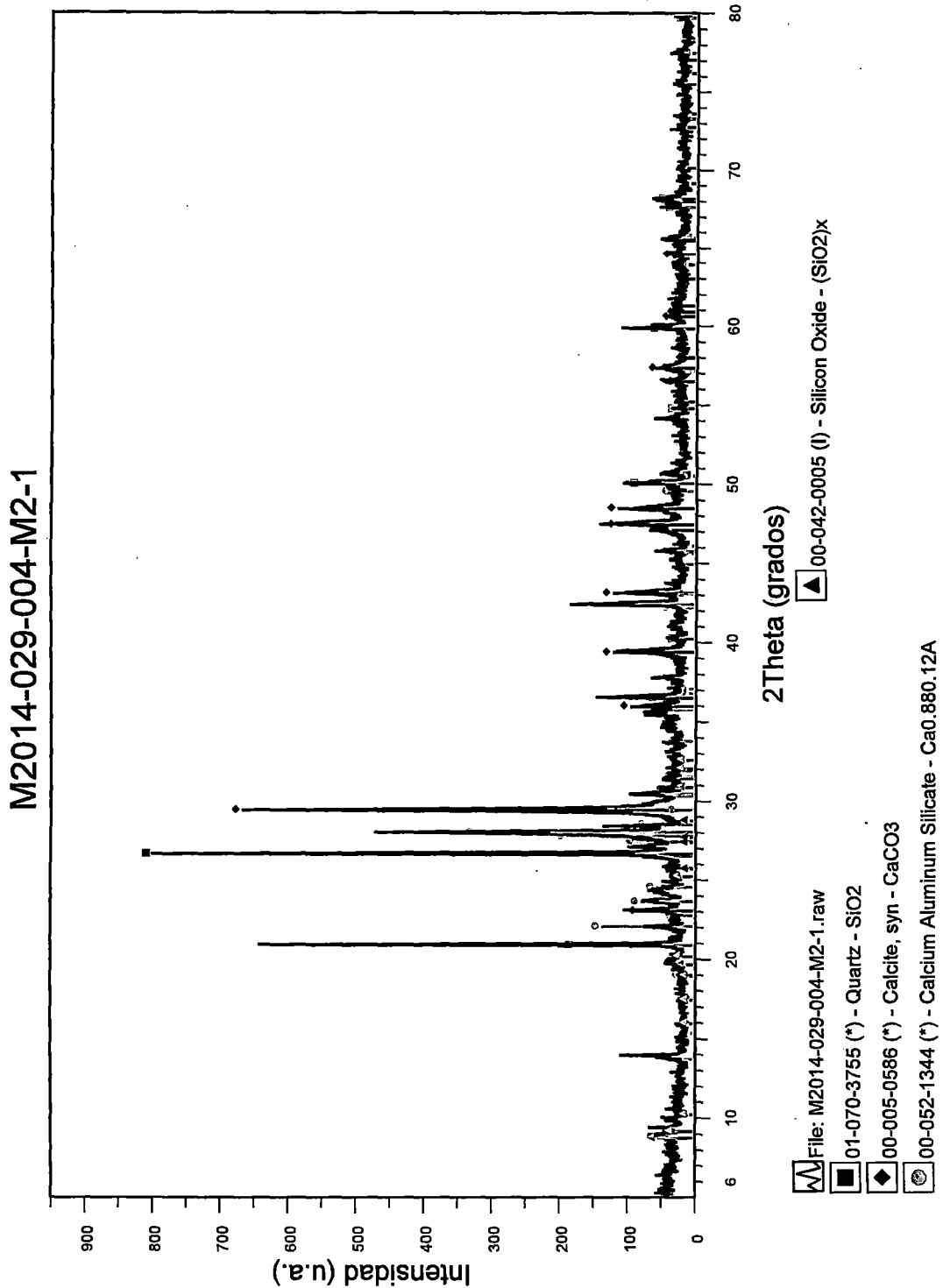


Figura 14. Difractograma de la muestra "M2014-029-004" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

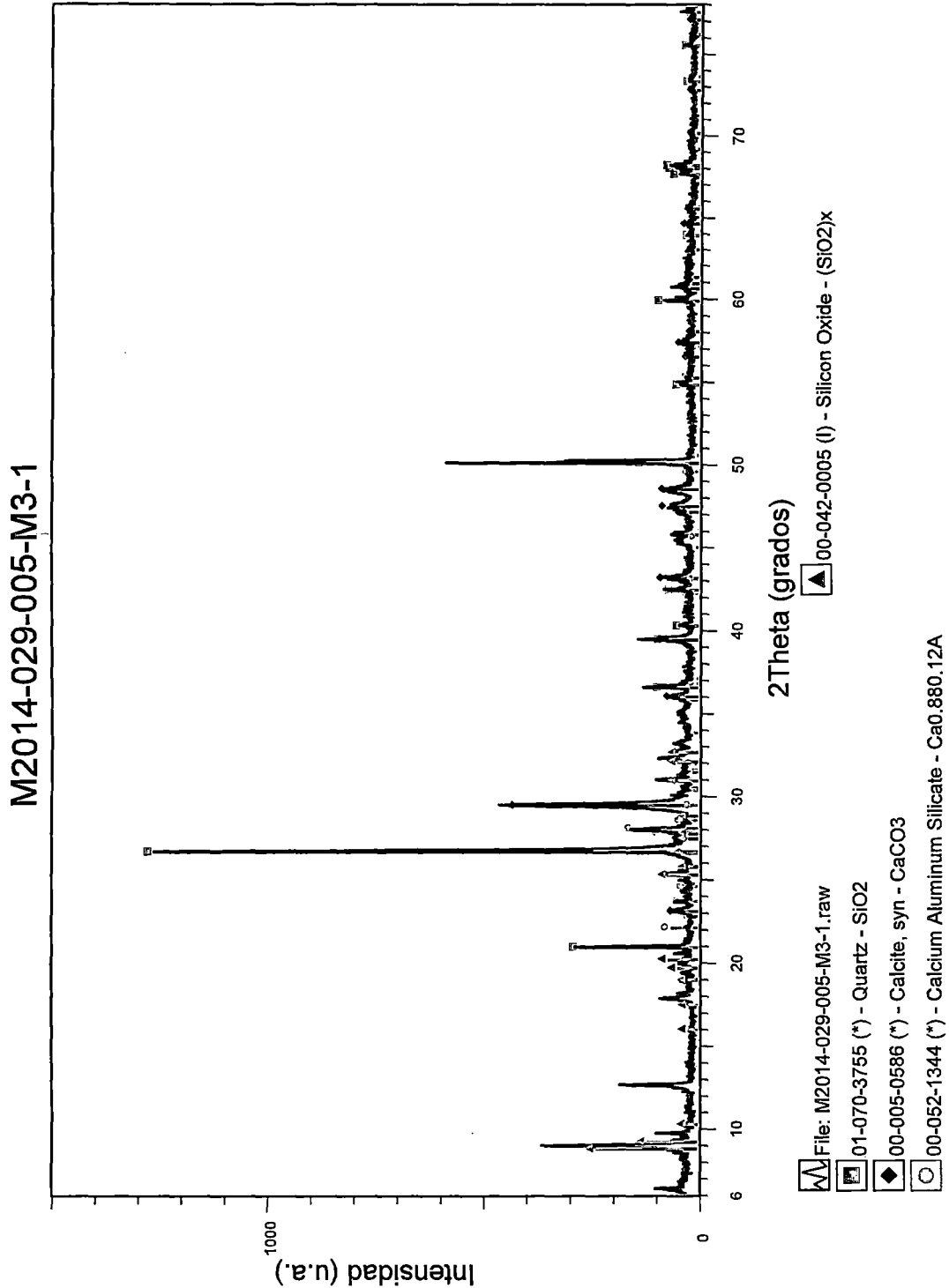


Figura 15. Difractograma de la muestra "M2014-029-005" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

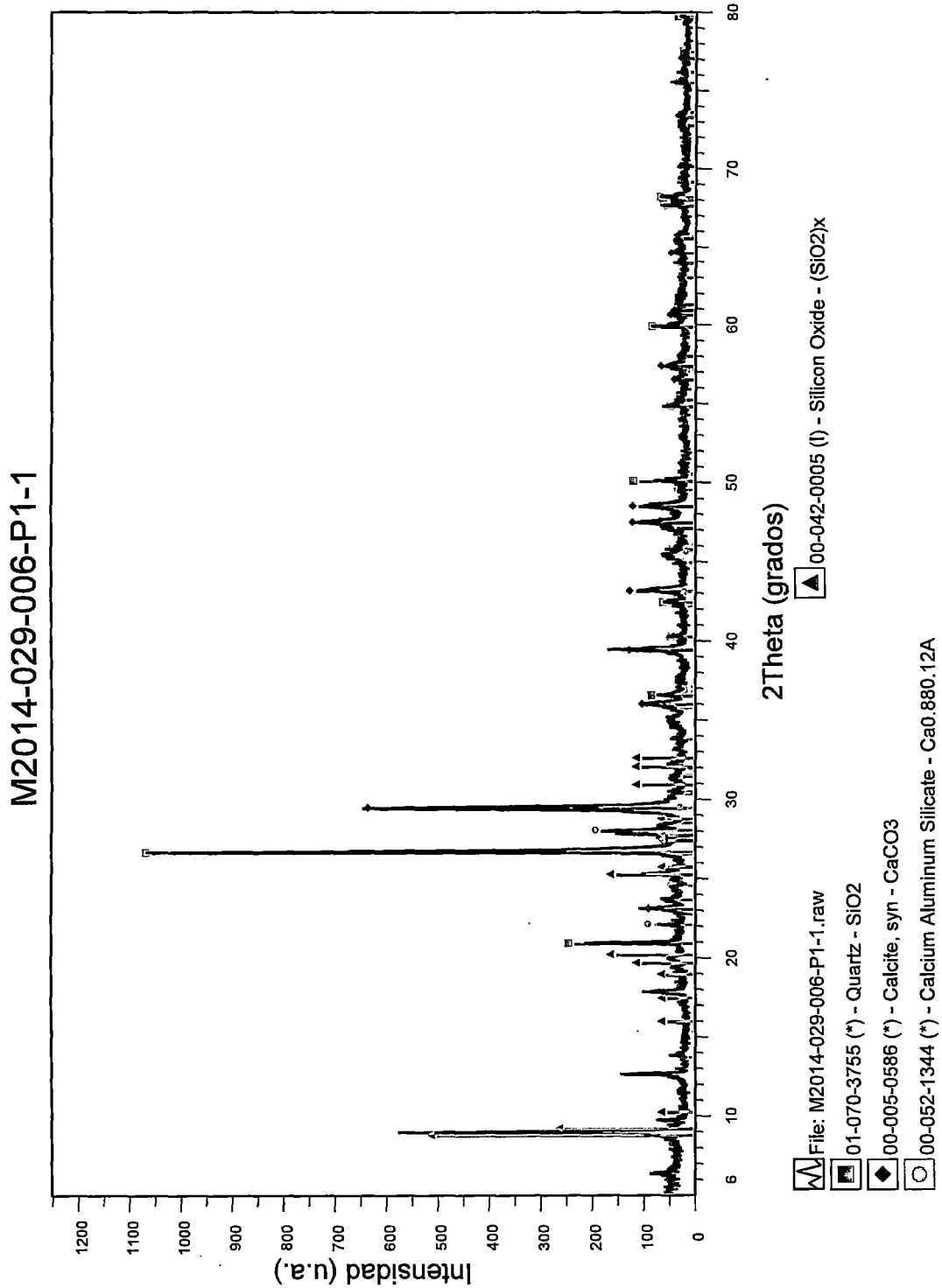


Figura 16. Difractograma de la muestra "M2014-029-006" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

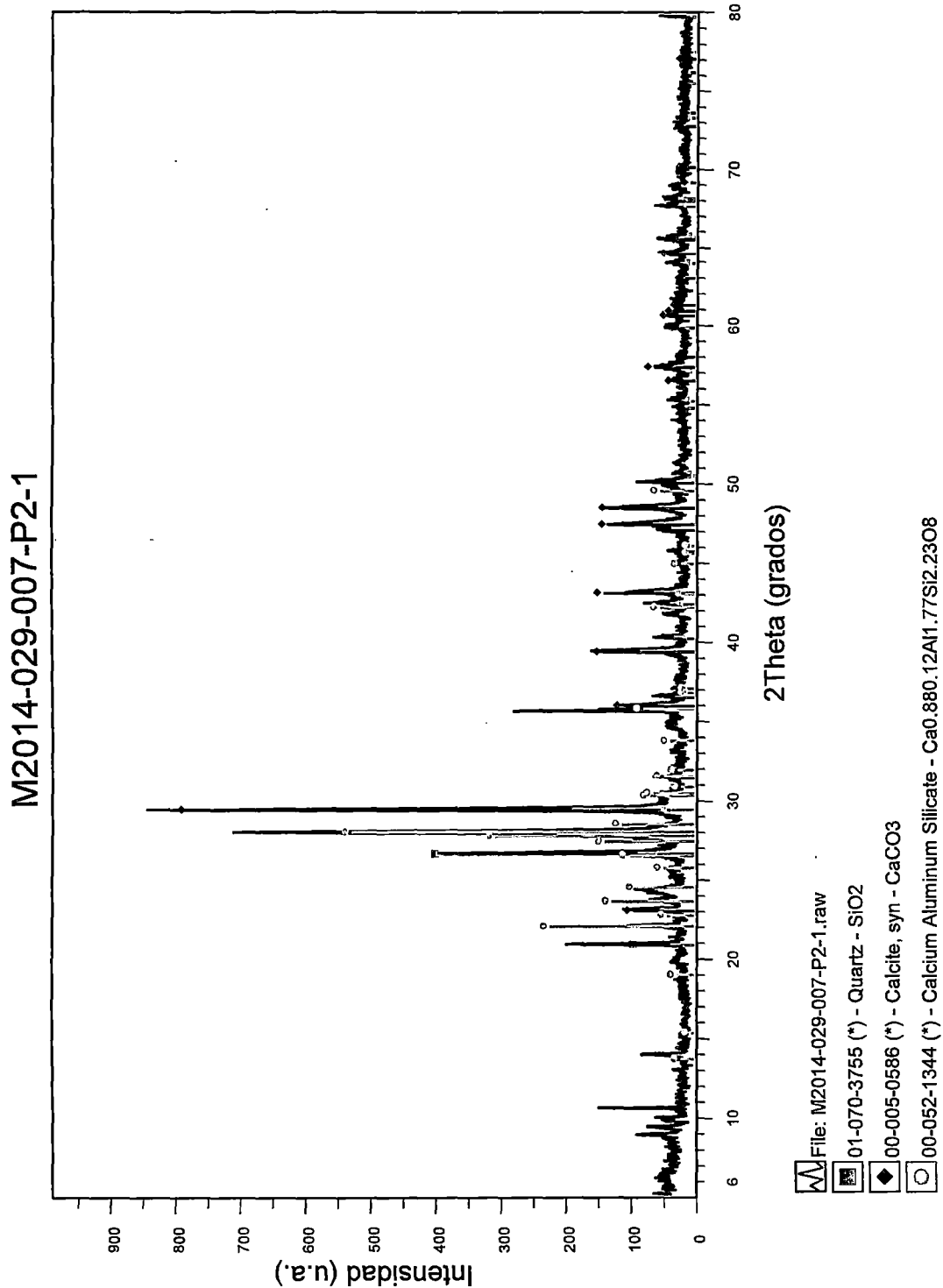


Figura 17. Difractograma de la muestra "M2014-029-007" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

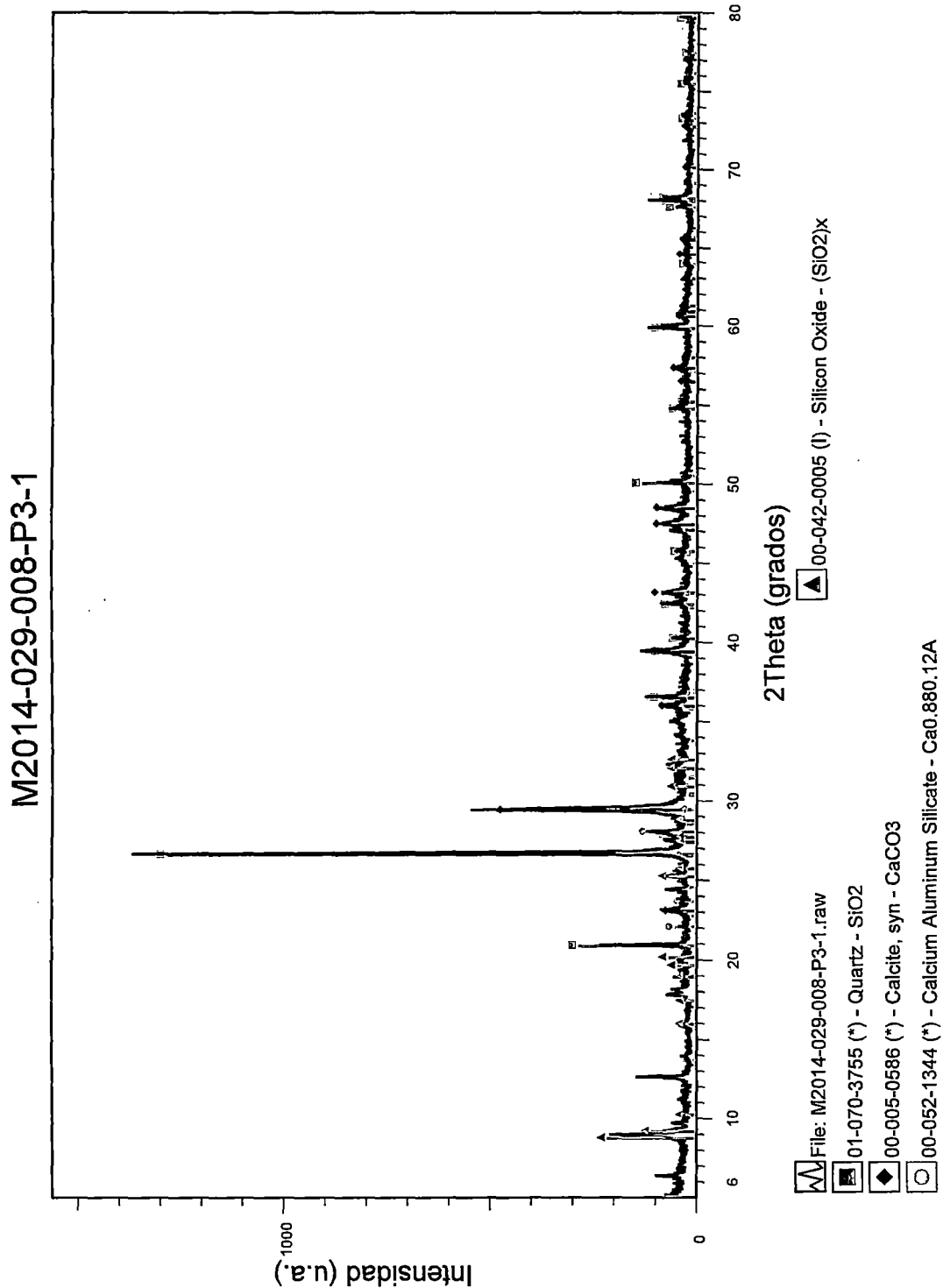


Figura 18. Difractograma de la muestra "M2014-029-008" con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.



**INFORME DE ANALISIS DE QUIMICO
ELEMENTAL - LABORATORIA DE QUIMICA -
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAB DEL CUSCO.**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA INFORME DE ANALISIS

Nº0665-14-LAQ

SOLICITANTE: JORGE LUIS AQUEHUA TARCO

MUESTRA : CAL
1.-CAL HIDRAULICA
2.-CAL DE OBRA HADES

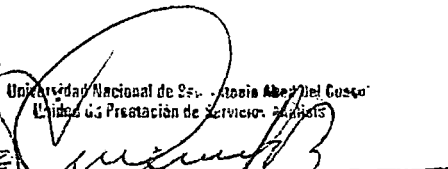
FECHA : 0/30/10/2014

RESULTADO ANALISIS QUIMICO:

	1	2
Humedad %	14.80	13.20
CaO %	68.70	63.20
CaCO ₃ %	4.40	7.90
SO ₄ ⁼ %	0.11	0.06
SiO ₂ %	5.20	8.70
MgO %	2.10	2.76
Fe ₂ O ₃ %	1.82	0.24
Al ₂ O ₃ %	0.39	0.44

*

Cusco, 19 de Noviembre 2014


 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios de Análisis
Melquides Herrera Arivilca
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831

UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA INFORME DE ANALISIS

Nº0666-14-LAQ

SOLICITANTE: JORGE LUIS AQUEHUA TARCO

MUESTRA : AGREGADOS
1.-MINA HUAMBUTIO
2.-CUNYAC

FECHA : 6/30/10/2014

RESULTADO ANALISIS QUIMICO:

	1	2
SiO ₂ %	92.90	95.30
CO ₃ %	1.20	0.07
SO ₄ %	0.28	0.00
Cl ⁻ %	0.09	0.00
Ca %	0.82	0.04
Mg %	0.04	0.01
Fe ₂ O ₃ %	0.27	0.08
Al ₂ O ₃ %	0.13	0.12

Cusco, 19 de Noviembre 2014



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Análisis

Melquides Herrera Arzuffa
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANÁLISIS QUÍMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA INFORME DE ANALISIS

Nº0663-14-LAQ

SOLICITANTE: JORGE LUIS AQUEHUA TARCO

MUESTRA : MORTEROS

FECHA : 0/30/10/2014

RESULTADO ANALISIS QUIMICO:

	A1(3)	A2(3)	M1(3)	M2(3)	P1(3)	P2(3)
SiO ₂ %	50.06	52.45	58.40	50.19	57.14	33.90
CO ₃ ⁼ %	23.00	20.80	18.90	22.60	18.60	35.40
Ca %	14.60	13.50	12.20	14.30	12.62	23.10
Mg %	0.70	0.62	0.53	0.82	0.46	0.19
Fe ₂ O ₃ %	1.30	1.70	1.10	1.88	1.60	1.79
Al ₂ O ₃ %	0.55	0.69	0.28	0.84	0.52	0.74
SO ₄ ⁼ %	0.19	0.24	0.21	0.18	0.17	0.28
Arena % (*)	45.10	47.20	50.40	43.80	51.30	30.80

(*) También corresponde a la Sílice.

Cusco, 19 de Noviembre 2014

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Analíticos

[Signature]
Margarita Herrera Arbolica
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANALISIS QUIMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831

UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA
INFORME DE ANALISIS

Nº0781-14-LAQ

SOLICITANTE: ARZOBISPADO DEL CUSCO

MUESTRA : AGREGADO

HUILQUE

FECHA : 09/12/2014

RESULTADO ANALISIS FISICO-QUIMICO:

pH	8.22
SiO ₂ %	96.40
CO ₃ ⁼ %	0.28
Ca %	0.06
Mg %	0.02
Fe ₂ O ₃ %	0.26
Al ₂ O ₃ %	0.50
SO ₄ ⁼ %	0.08
Cl ⁻ %	0.16
Otros %	2.24

Cusco, 15 de Diciembre 2014



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Analíticos

Melquedes Herrera Arteaga
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANALISIS QUIMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831

UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA INFORME DE ANALISIS N°0664-14-LAQ

SOLICITANTE: JORGE LUIS AQUEHUA TARCO

MUESTRA : MORTEROS

FECHA : 0/30/10/2014

RESULTADO ANALISIS QUIMICO:

	A1(4)	A2(4)	M1(4)	M2(4)	M3(4)	P1(4)	P2(4)
SiO ₂ %	59.40	66.60	64.00	52.00	60.80	62.20	46.50
CO ₃ %	21.20	15.60	19.20	27.10	20.60	22.80	25.20
Ca %	13.50	10.10	12.23	17.30	13.22	14.90	17.10
Mg %	0.20	0.50	0.36	0.61	0.33	0.38	0.40
Fe ₂ O ₃ %	0.92	0.76	0.55	1.22	1.10	0.60	1.96
Al ₂ O ₃ %	0.13	0.41	0.19	0.42	0.28	0.39	1.10
SO ₄ %	0.06	0.12	0.12	0.18	0.04	0.14	0.17

Cusco, 19 de Noviembre 2014



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Químicos

Melquides Herrera Arizaca
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANALISIS QUIMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722

Apartado Postal 921 - Cusco Perú

Pabellón C - Of. 106

Teléfono - fax - modem: 224831

UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA INFORME DE ANALISIS

NR0779-14-LAQ

SOLICITANTE: ARZOBISPADO DEL CUSCO

MUESTRAS : MORTEROS Y GREGADOS

FECHA : 6/09/12/2014

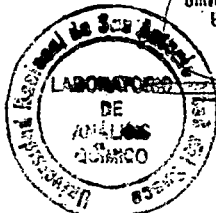
RESULTADO ANALISIS:

	pH		pH
A1 (5)	8.90	Cal Obra Hades	11.20
A2 (5)	9.00	Cal Hidraulica	11.60
M1 (5)	9.05	Agregado Cunyac	8.25
M2 (5)	9.10	Agregado Huambutio	8.50
M3 (5)	8.98	Cantera Huilque	8.22
p1 (5)	9.10		
P2 (5)	8.90		

	pH
HC 1:25	9.18
HH 1:25	9.25
HM 1:25	10.17
OH 1:25	9.40
OM 1:25	8.85
C.Obra Cunyac	8.90

Cusco, 11 de Diciembre 2014

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Analíticos



Melgodes Herrera Arizaca
RESPONSABLE DEL LABORATORIO
DE ANALISIS QUÍMICO