

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Propuesta de formulación de mortero industrial de cal para uso en  
restauración de estructuras prehispánicas mayas

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Manuel David Emilio Marroquín Flores  
para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Propuesta de formulación de mortero industrial de cal para uso en  
restauración de estructuras prehispánicas mayas

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Manuel David Emilio Marroquín Flores  
para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

2022



Vo. Bo.:

(f) \_\_\_\_\_  
M.Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Tribunal Examinador:

(f) \_\_\_\_\_  
M.Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) \_\_\_\_\_  
M.A. Ing. José Andrés Lam Ceballos

(f) \_\_\_\_\_  
MBA. Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano

Fecha de aprobación: Guatemala, 24 de octubre de 2022





## PREFACIO

Este trabajo es producto de la convergencia de diversos factores, es una combinación del interés personal por la historia y la arqueología, junto a los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería química industrial y el deseo de realizar un proyecto que fuera de utilidad para el desarrollo integral y sostenible de Guatemala; debe su origen al apoyo recibido del Ing. Cristián Rossi, por quien las etapas iniciales de este proyecto fueron posibles, gracias a su generosidad y disposición de ayudar a quien fuera su alumno.

Asimismo, este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y auspicio de Cementos Progreso a través del Centro de Investigación y Desarrollo (CID), Centro Tecnológico (CETEC) y sus laboratorios, quienes brindaron su tiempo, equipo e instalaciones para llevar a cabo todos los análisis y ensayos necesarios para caracterizar y analizar materiales y muestras. Agradezco en especial al Lic. Luis Velásquez, Inga. Marcia Salguero e Ing. Emmanuel Montúfar, y su equipo; quienes siempre estuvieron dispuestos a apoyar, asesorar, compartir su conocimiento y experiencia conmigo y por quienes la ejecución y culminación de este proyecto fue posible.

Agradezco al Arq. Raúl Noriega por el apoyo brindado al desarrollo del presente proyecto al compartir su trabajo y experiencia y, las técnicas artesanales y constructivas que se realizan para los trabajos de restauración en el Parque Nacional Yaxhá y Sitio Arqueológico La Blanca. Agradezco también al Ing. Gamaliel Zambrano por el apoyo, asesoría y guía brindados a lo largo del proceso de estructuración y concretización del presente trabajo de graduación.

Por último, agradezco el apoyo incondicional de mi familia, especialmente de mi madre quien ha seguido y acompañado de cerca este proyecto desde sus inicios hasta su culminación y que hoy ve concretado. Agradezco al Creador, de quien emana toda la ciencia y sabiduría.



A mi Patria, Guatemala.

*«¿Por qué la quieres  
tanto, me decían,  
si es amarga y cruel  
como el alma de un basta?  
¿Por qué, si es tan chiquita  
y tan hambrienta, que en ella  
a uno sólo le queda por delante  
la ardua tarea de morirse?*

*Pero yo siempre respondía,  
que te quiero tanto,  
porque aún sumido en la tiniebla  
oyendo el largo llanto  
de tus hijos,  
no puedo ignorar  
que detrás de mí  
comienza, en verdad,  
tu madrugada.»*

Otto René Castillo



# ÍNDICE

	Página
PREFACIO .....	ix
LISTA DE CUADROS .....	xv
LISTA DE FIGURAS .....	xix
RESUMEN.....	xxiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
A. GENERAL .....	3
B. ESPECÍFICOS .....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	5
IV. MARCO TEÓRICO.....	7
A. Morteros mayas.....	7
1. Introducción a la arquitectura maya.....	7
2. Aplicación de los morteros .....	8
3. Materiales constitutivos .....	8
4. Proceso de elaboración .....	9
B. Patrimonio arqueológico maya.....	11
1. Convenciones internacionales para la conservación del patrimonio.....	11
2. Legislación guatemalteca en materia de conservación .....	13
C. Restauración arquitectónica en el área maya.....	15
1. Criterios generales de conservación.....	15
2. Métodos de restauración .....	17
3. Materiales .....	19
D. Morteros .....	19
1. Clasificación .....	19
2. Constituyentes.....	21
3. Propiedades.....	26
4. Proceso de fabricación de la cal.....	29
E. Valores de referencia para el diseño de morteros de pega para unidades de mampostería .....	32
1. Normas para materiales a utilizar en morteros.....	32

2.	Clasificación de morteros de pega para unidades de mampostería .....	32
3.	Selección del mortero según su uso .....	35
V.	ANTECEDENTES .....	37
VI.	METODOLOGÍA.....	39
A.	Materiales y métodos.....	39
B.	Ensayos.....	45
C.	Propuesta de formulación .....	49
VII.	RESULTADOS .....	51
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
IX.	CONCLUSIONES.....	81
X.	RECOMENDACIONES.....	83
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	85
XII.	ANEXOS.....	89
A.	Datos originales .....	89
B.	Cálculos de muestra.....	96
C.	Datos calculados.....	102
D.	Análisis de error .....	110
E.	Informes de ensayos y análisis realizados .....	111
F.	Documentación complementaria .....	163
G.	Requisitos según convenios internacionales y legislación guatemalteca en materia de conservación del patrimonio .....	169
XIII.	GLOSARIO.....	173

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Tolerancias de concentraciones de impurezas en el agua de mezclas.....	25
Cuadro 2. Transformaciones químicas en el tratamiento térmico de la harina cruda de cemento portland...31	31
Cuadro 3. Clasificación ASTM C270 de morteros de pega para mampostería simple, según resistencia a la compresión a 28 días y según dosificación (partes por volumen). ....	33
Cuadro 4. Requisitos para la especificación por proporciones .....	34
Cuadro 5. Requisito para la especificación por propiedades <sup>A</sup> .....	35
Cuadro 6. Proporciones de materiales para diseños propuestos de mortero .....	45
Cuadro 7. Determinación de humedad libre de morteros y materiales actuales <sup>A</sup> .....	51
Cuadro 8. Pérdida al fuego de morteros y materiales actuales (950 °C) <sup>B</sup> .....	51
Cuadro 9. Cuantificación de las fases minerales por difracción de rayos X de morteros y materiales actuales .....	55
Cuadro 10. Análisis mineralógico de morteros y materiales actuales seleccionados .....	55
Cuadro 11. Pérdida al fuego de agregados (950°C) <sup>C</sup> .....	56
Cuadro 12. Cuantificación de las fases minerales de agregados por difracción de rayos X .....	56
Cuadro 13. Determinación de terrones de arcilla y partículas friables en los agregados.....	56
Cuadro 14. Estabilidad a la disgregación de los agregados finos mediante el uso de sulfato de sodio .....	57
Cuadro 15. Estabilidad a la disgregación de los agregados gruesos mediante el uso de sulfato de sodio .....	58
Cuadro 16. Examen cualitativo de agregados gruesos .....	58
Cuadro 17. Porcentaje de flujo de diseños propuestos en estado fresco.....	61
Cuadro 18. Porcentaje de retención de agua de los diseños propuestos en estado fresco.....	61
Cuadro 19. Masa unitaria húmeda de los diseños propuestos en estado fresco .....	61
Cuadro 20. Porcentaje de aire en los diseños propuestos en estado fresco.....	62
Cuadro 21. Resistencia a la compresión de los diseños propuestos en estado endurecido .....	62
Cuadro 22. Resistencia a la adherencia de los diseños propuestos en estado endurecido .....	63
Cuadro 23. Formulación de mortero de cal para uso en restauración de estructuras prehispánicas mayas ...	64
Cuadro 24. Costo de premezcla de un mortero cal-arena para restauración de estructuras prehispánicas mayas. ....	65
Cuadro 25. Costo de premezcla de mortero propuesto para restauración de estructuras prehispánicas mayas. ....	65

Cuadro 26. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 1, mediante análisis SEM. .....	89
Cuadro 27. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 2, mediante análisis SEM. .....	90
Cuadro 28. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 5, mediante análisis SEM. .....	90
Cuadro 29. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 1.....	91
Cuadro 30. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 2.....	91
Cuadro 31. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 5.....	92
Cuadro 32. Masas y volúmenes de materiales utilizados en la preparación de los morteros propuestos.....	92
Cuadro 33. Resultados de ensayos de mezcla húmeda de morteros de referencia y propuestos.....	93
Cuadro 34. Resultados de ensayo de resistencia de morteros endurecidos de referencia y diseños propuestos .....	94
Cuadro 35. Precio de mercado de materiales utilizados en la formulación propuesta .....	95
Cuadro 36. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 5, mediante análisis SEM. .....	102
Cuadro 37. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 2, mediante análisis SEM. .....	102
Cuadro 38. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 5 mediante análisis SEM. .....	103
Cuadro 39. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 1.	103
Cuadro 40. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 2.	104
Cuadro 41. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 5.	104
Cuadro 42. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 1. ....	105
Cuadro 43. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 2. ....	105
Cuadro 44. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 5. ....	105
Cuadro 45. Proporción de materiales en la mezcla seca de morteros propuestos. ....	106
Cuadro 46. Resultados promedio de ensayos de mezcla húmeda de morteros de referencia y propuestos.	106
Cuadro 47. Resistencias promedio a la compresión y adherencia de muestras de diseños de mortero propuestos.....	107



Cuadro 48. Precio por kilogramo de material requerido para la preparación del mortero propuesto.....	108
Cuadro 49. Cantidad de materiales y su costo asociado para la preparación de 100kg de premezcla de mortero de cal-arena similar a mortero de referencia.....	108
Cuadro 50. Cantidad de materiales y su costo asociado para la preparación de 119kg de premezcla del mortero propuesto.....	109
Cuadro 51. Minuta de reunión consultiva con Tomás Barrientos, arqueólogo en la Universidad del Valle de Guatemala.....	163
Cuadro 52. Minuta de reunión consultiva con Josué Guzmán, arqueólogo en Proyecto El Mirador.....	164
Cuadro 53. Minuta de reunión consultiva con Raúl Noriega, arquitecto restaurador en DECORSIAP.....	165
Cuadro 54. Minuta de reunión consultiva con Raúl Noriega, arquitecto restaurador en DECORSIAP.....	167
Cuadro 55. Principales de criterios de conservación establecidos por entes nacionales e internacionales en materia de conservación en cuanto a las características recomendadas para materiales de conservación...	169
Cuadro 56. Características deseables en los morteros de restauración para trabajos de conservación y restauración en sitios arqueológicos mayas de las Tierras Bajas.....	171



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Análisis termogravimétrico de pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá, sin fecha).....	52
Figura 2. Análisis termogravimétrico de losa fundida hecha con cal Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá, mayo 2019) .....	52
Figura 3. Análisis termogravimétrico de losa fundida hecha con cal artesanal (Edificio 13, Yaxhá, septiembre 2017) .....	53
Figura 4. Análisis termogravimétrico de pasta de cal Horcalsa y material reciclado (Yaxhá, sin fecha).....	53
Figura 5. Análisis termogravimétrico de cal artesanal añejada en agua (Yaxhá, febrero 2017).....	54
Figura 6. Análisis termogravimétrico de cal Horcalsa añejada en agua (Yaxhá, marzo 2021) .....	54
Figura 7. Determinación de la granulometría de agregado fino .....	56
Figura 8. Determinación de la granulometría de agregado grueso .....	57
Figura 9. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice del agregado fino .....	59
Figura 10. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice del agregado grueso.....	59
Figura 11. Determinación de la reactividad álcali-carbonato del agregado fino .....	60
Figura 12. Determinación de la reactividad álcali-carbonato del agregado grueso .....	60
Figura 13. Informe de ensayo: determinación de humedad libre de Muestra 1.....	111
Figura 14. Informe de ensayo: determinación de humedad libre de Muestras 2 a 6.....	112
Figura 15. Informe de ensayo: pérdida al fuego de Muestra 1. ....	113
Figura 16. Informe de ensayo: pérdida al fuego de Muestras 2 a 6. ....	114
Figura 17. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 1.....	115
Figura 18. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 2.....	116
Figura 19. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 3.....	117
Figura 20. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 4.....	118
Figura 21. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 5.....	119
Figura 22. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 6.....	120
Figura 23. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 1.....	121
Figura 24. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 2.....	122
Figura 25. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 3.....	123
Figura 26. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 4.....	124

Figura 27. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 5. ....	125
Figura 28. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 6. ....	126
Figura 29. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 1 en la Muestra 1. ....	127
Figura 30. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 1 de la Muestra 1. ....	127
Figura 31. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 2 de la Muestra 1. ....	127
Figura 32. Espectro EDS y datos representativos del spectrum 3 de la Muestra 1. ....	128
Figura 33. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 2 en la Muestra 1. ....	128
Figura 34. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 4 de la Muestra 1. ....	128
Figura 35. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 13 de la Muestra 1. ....	129
Figura 36. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 14 de la Muestra 1. ....	129
Figura 37. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 15 de la Muestra 1. ....	129
Figura 38. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 16 de la Muestra 1. ....	130
Figura 39. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 17 de la Muestra 1. ....	130
Figura 40. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 18 de la Muestra 1. ....	130
Figura 41. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 19 de la Muestra 1. ....	131
Figura 42. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 1 en la Muestra 2. ....	131
Figura 43. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 1 de la Muestra 2. ....	131
Figura 44. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 2 de la Muestra 2. ....	132
Figura 45. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 3 de la Muestra 2. ....	132
Figura 46. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 4 de la Muestra 2. ....	132
Figura 47. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 5 de la Muestra 2. ....	133
Figura 48. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 2 en la Muestra 2. ....	133
Figura 49. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 6 de la Muestra 2. ....	133
Figura 50. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 7 de la Muestra 2. ....	134
Figura 51. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 3 en la Muestra 5. ....	134
Figura 52. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 20 de la Muestra 5. ....	134
Figura 53. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 21 de la Muestra 5. ....	135
Figura 54. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 22 de la Muestra 5. ....	135
Figura 55. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 23 de la Muestra 5. ....	135
Figura 56. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 24 de la Muestra 5. ....	136
Figura 57. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 4 en la Muestra 5. ....	136
Figura 58. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 25 de la Muestra 5. ....	136
Figura 59. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 26 de la Muestra 5. ....	137

Figura 60. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 27 de la Muestra 5. ....	137
Figura 61. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 28 de la Muestra 5. ....	137
Figura 62. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 29 de la Muestra 5. ....	138
Figura 63. Informe de ensayo: análisis químico (LOI) de agregado fino y grueso. ....	139
Figura 64. Informe de ensayo: difracción de rayos X de agregado fino. ....	140
Figura 65. Informe de ensayo: difracción de rayos X de agregado grueso. ....	141
Figura 66. Informe de ensayo: terrones y partículas friables en agregado fino. ....	142
Figura 67. Informe de ensayo: granulometría de agregado fino. ....	143
Figura 68. Informe de ensayo: granulometría de agregado grueso. ....	144
Figura 69. Informe de ensayo: estabilidad a la disgregación de agregado fino. ....	145
Figura 70. Informe de ensayo: estabilidad a la disgregación de agregado grueso. ....	146
Figura 71. Informe de ensayo: reactividad potencial álcali sílice de agregado fino. ....	147
Figura 72. Informe de ensayo: reactividad potencial álcali sílice de agregado grueso. ....	148
Figura 73. Informe de ensayo: reactividad álcali carbonato de agregado fino. ....	149
Figura 74. Informe de ensayo: reactividad álcali carbonato de agregado grueso. ....	150
Figura 75. Informe de ensayos de mezcla de mortero de referencia: Artesanal. ....	151
Figura 76. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 1. ....	152
Figura 77. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 2. ....	153
Figura 78. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 3. ....	154
Figura 79. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 3 (duplicado). ....	155
Figura 80. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 4. ....	156
Figura 81. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5. ....	157
Figura 82. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5 (duplicado). ....	158
Figura 83. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5 (triplicado). ....	159
Figura 84. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 6. ....	160
Figura 85. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 7. ....	161
Figura 86. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 7 (duplicado). ....	162



## RESUMEN

Actualmente la restauración y conservación arqueológica de las estructuras prehispánicas mayas de las Tierras Bajas involucra el uso de morteros de cal fabricados artesanalmente y la experimentación con morteros fabricados utilizando cal hidratada comercial con el propósito de garantizar procedimientos y materiales afines a la fábrica original de las estructuras. Sin embargo, el uso de estos morteros artesanales no considera una formulación específica para cada aplicación y con características basadas en normativas técnicas para garantizar una resistencia, durabilidad y trabajabilidad adecuadas. Es por ello, que se propuso una formulación de un mortero de pega para unidades de mampostería en cumplimiento con la Norma NTG 41050 haciendo uso de la técnica moderna y tomando en consideración los lineamientos de conservación aplicables. Se propone un mortero de pega para unidades de mampostería de cemento-cal tipo O para uso en restauración arqueológica de estructuras mayas con una formulación de cal-arena-cemento de 1:2:  $\frac{1}{4}$ , con las características: constituido de materiales compatibles con los elementos originales, apariencia similar, flujo de 109.5%, retención de agua de 83%, contenido de aire de 4.0%, resistencia a la compresión de 3.2164 MPa, y resistencia a la adherencia de 0.1310 MPa; que cumple con los requisitos de propiedades enumeradas en la Norma NTG 41050 y con los criterios de conservación propuestos en las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia. Se recomienda evaluar el desempeño en campo del mortero propuesto, así como el efecto de las impurezas del agregado fino en la resistencia del mortero.





# I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo propone una formulación de un mortero de pega de unidades de mampostería, compuesto de cementantes procesados industrialmente para la sustitución de los morteros preparados artesanalmente para el uso en trabajos de restauración y conservación de sitios arqueológicos prehispánicos mayas del área de las Tierras Bajas en Petén, Guatemala. La formulación del mortero aquí propuesto, es producto de una evaluación técnica a nivel de laboratorio de acuerdo a las especificaciones establecidas en la norma NTG 41050 Mortero de pega para unidades de mampostería y las características requeridas para materiales de restauración en concordancia con los lineamientos contenidos en las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia y enmarcado en la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación. La conservación y restauración de los bienes culturales forma parte de un proceso que tiene por objetivo devolver estabilidad y eficiencia estructural a un bien deteriorado, respetando su integridad a través de una mínima intervención procurando la mayor autenticidad posible (Larios Villalta, 2009).

En los sitios arqueológicos, las restauraciones son principalmente intervenciones en los edificios con arquitectura expuesta con el propósito de estabilizar la estructura, la cual se realiza a través de trabajos de restitución de volúmenes erosionados para asegurar la estabilidad de los parámetros constructivos. Mientras que la conservación es una actividad que se lleva a cabo en diversos grados de intervención: relleno de la arquitectura visible, limpieza de escombros, restitución de volúmenes, reintegración de elementos estructurales, reintegración de elementos de la fábrica perdidos por saqueo, reparación de grietas y fisuras, resane de estucos, bancas pisos y escalinatas (Noriega Girón y Quintana Samayoa, 2021). La conservación y restauración de la arquitectura expuesta deben asegurar no solamente la estabilidad y protección de la infraestructura sino también considerar la compatibilidad de los materiales y técnicas modernas con los elementos originales para garantizar una armonización entre elementos y la protección a la degradación que pueda ocurrir tal como lo establecen las cartas de convenciones internacionales mencionadas con anterioridad.

Actualmente la restauración de sitios arqueológicos del área de las Tierras Bajas se realiza apegándose a las técnicas constructivas artesanales y materiales similares a la fábrica original. Si bien el uso del mortero se utiliza extensivamente para la restitución de volúmenes y consolidación de las estructuras; estos morteros no están formulados acorde a una norma técnica según el uso y requisitos estructurales. Es por este motivo que se buscó desarrollar una propuesta de mortero de pega para unidades de mampostería que pueda utilizarse en trabajos de restauración de sitios arqueológicos en cumplimiento con criterios de conservación y la Norma NTG 41050. Al finalizar la experimentación, se determinó una formulación de mortero de pega para mampostería que involucra agregados reciclados del sitio, cal hidratada y cemento hidráulico en proporciones tales que se cumplen los requisitos de conservación y especificaciones técnicas.



## II. OBJETIVOS

### A. GENERAL

Proponer una formulación para un mortero genérico industrializado de cal de acuerdo con resultados de pruebas de laboratorio, costos y evaluación de características similares a los morteros tradicionales artesanales, para uso en trabajos de restauración arqueológica que se produzca en forma económica y sostenible.

### B. ESPECÍFICOS

1. Determinar la humedad, composición química de los morteros artesanales de restauración, granulometría, características físicas y reactividad de los agregados para proponer un mortero producido industrialmente.
2. Comparar las características físicas y mecánicas del mortero propuesto, obtenidas de análisis de laboratorio con la normativa técnica guatemalteca NTG 41050, la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación y, lineamientos para la restauración y conservación arqueológica contenidos en las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia.
3. Establecer la formulación y parámetros para la fabricación del mortero propuesto de acuerdo con: requisitos de conservación y evaluaciones de laboratorio.
4. Evaluar económicamente la formulación, estimar el costo del mortero propuesto y obtener información de referencia para su futura producción.



### III. JUSTIFICACIÓN

La conservación y restauración de los sitios arqueológicos en las Tierras Bajas guatemaltecas es un tema de importancia para el gremio de arqueólogos y para el sector turístico. La conservación de estos sitios arqueológicos ha sido un reto, ya que, para los fines establecidos, es necesario utilizar elementos compatibles con los materiales originales, es por ello que los materiales utilizados para la restauración de sitios arqueológicos se han fabricado de manera artesanal.

Desde el año de 2013 la Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN) en el Plan de desarrollo integral de Petén 2032, ha establecido el programa estratégico: Desarrollo del turismo ecológico y arqueológico maya de Petén el cual busca promover circuitos turísticos como parte del eje de desarrollo económico territorial. Es por ello que la arqueología, más allá de los fines académicos y de investigación, también debe velar por la conservación y habilitación de los sitios arqueológicos para garantizar una explotación turística sostenible de los mismos.

Hasta el año de 2019, el Atlas Arqueológico de Guatemala contabilizaba 580 centros prehispánicos en Petén, de los cuales solamente 45 reciben mantenimiento por parte del Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH) (González, 2019). El Ministerio de Cultura y Deportes (MCD) reportó que durante el año de 2020 se realizaron acciones de conservación y restauración en 64 sitios y parques arqueológicos en Guatemala. Adicionalmente, se realizan acciones de mantenimiento, protección, conservación y restauración en 12 parques y sitios arqueológicos, tales como Tikal, Mirador y Yaxhá-Nakum-Naranjo. Lo cual se traduce en una inversión Estatal de Q.2.982,000.00 en la conservación y rescate de sitios arqueológicos prehispánicos en Guatemala en el año antes indicado.

La conservación de los edificios con arquitectura expuesta requiere de la intervención a distintos niveles, los cuales incluyen: el relleno de la arquitectura visible, limpieza de escombros, restitución de volúmenes perdidos, reintegración de elementos estructurales faltantes y elementos originales perdidos por el saqueo, reparación de grietas y fisuras, resane de estucos, grafitos, bancas, pisos y escalinatas.

Para realizar adecuadamente las intervenciones en el patrimonio cultural prehispánico es necesario elegir correctamente los materiales, procedimientos y técnicas para aplicar en la restauración. Es por ello que se sugiere, en metodologías de restauración, que el arquitecto restaurador conozca la composición química y mineralógica, las características y propiedades, defectos, comportamiento y tiempo de vida útil de los materiales y técnicas de construcción. Este es el punto de partida para desarrollar el presente trabajo de investigación y desarrollo, el cual busca emular las características similares a los morteros tradicionales mayas. Este punto será de beneficio para la conservación del patrimonio cultural y natural y, para la

investigación arqueológica. Esto permitiría eliminar los procedimientos artesanales de calcinación de caliza para la preparación de los morteros, que requiere el agotamiento de los recursos forestales para la extracción maderera (de bosques y selvas aledañas) aunado a la contaminación del medio ambiente por la emisión de gases de efecto invernadero, así como aumentar la disponibilidad de materiales genéricos con formulación definida para las mezclas de cementos, morteros y estucos en las labores de restauración.

La razón de formular un mortero general a base de cal para su aplicación en trabajos de restauración y conservación arqueológica, deriva del interés de desarrollar materiales compatibles con los elementos de construcción originales de las estructuras prehispánicas y que puedan ser producidos industrialmente. Para desarrollar el mortero genérico en mención, los materiales se deberán apegar a la caracterización química de los morteros tradicionales mayas, con el fin de asegurar la compatibilidad de materiales y características físicas, químicas y mecánicas que cumplan con los principales requisitos para la conservación del patrimonio arqueológico prehispánico.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Morteros mayas

#### 1. Introducción a la arquitectura maya

La arqueología se asocia a la llamada cultura material, lo que comprende tanto las realizaciones con las cuales los pueblos antiguos trataron de solucionar sus problemas de subsistencia, así como a los patrones de asentamiento y organización social. Conforme se avanza en la interpretación del hecho arqueológico, es notorio que la cosmovisión de los pueblos adquiere relevancia en el análisis de la cultura material. La arquitectura mesoamericana estaba basada en una concepción de correspondencia del Universo con elementos terrenales como las casas, los templos, el temascal, o el campo; los cuales se concebían como modelos reducidos del Cosmos (Alcina Franch, 1999).

Las estructuras arquitectónicas básicas mesoamericanas tenían un contenido simbólico para las culturas, por ejemplo, las pirámides se asociaban con una fuerza simbólica a partir de la concepción del cosmos como la unidad de dos pirámides, unidas por la base formando un octaedro; los temascales o baños de vapor significaban la unión del Inframundo con el mundo superior, siendo el vapor la unión del fuego con el agua; y las casas de forma cuadrada marcadas por las cuatro esquinas y centro con postes, para expresar el concepto de Universo a través de figuras rectangulares (Alcina Franch, 1999).

En cuanto a los edificios característicos de la civilización maya pueden listarse construcciones como las pirámides con templos, las cuales en las Tierras Bajas guatemaltecas son características, ya que presentan elevación, decorado escultórico y barroquismo. Por otra parte, los palacios no son modelos repetidos sistemáticamente, sino que en todos los casos constan de una o varias series de cámaras alargadas e intercomunicadas abiertas al exterior y que se asienta generalmente en una plataforma de perfil piramidal. La cancha de juego de pelota es una estructura que se encuentra en toda Mesoamérica, pero tuvo especial importancia en la civilización maya, la cual constaba de dos banquetas apoyadas en dos muros verticales con talud. Otros edificios característicos, son los observatorios astronómicos, las fortificaciones, las viviendas, los depósitos de granos, los acueductos, cisternas y las calzadas o *sacbeob* (Alcina Franch, 1999).

Los edificios que constituyen unidades mínimas a su vez formaron parte de conjuntos amplios, donde los edificios se interrelacionaban acorde a las funciones para los que fueron destinados. Una de las agrupaciones más comunes de estructuras piramidales, es aquella en la que una pirámide mayor se acompaña por pirámides menores alrededor de una plaza. En el caso de los palacios, éstos pudieron enlazarse en torno

a patios, y al igual que las pirámides, suelen alzarse sobre plataformas a las que se accede por escalinatas (Alcina Franch, 1999).

## 2. Aplicación de los morteros

Los mayas utilizaron los morteros, estuco y concreto en la mayoría de sus estructuras. El cemento maya era enriquecido o aplicado en diferentes estados según el propósito para el cual se necesitaba utilizar; para fines decorativos se aplicaba en estado puro y en usos estructurales se enriquecía con arenas y gravas calizas para fabricar morteros y concretos. Los estucos fueron utilizados principalmente para construir tableros de relieves en fachadas, construir mascarones o como acabado fino en muros y detalles arquitectónicos. Los morteros y concreto fueron utilizados principalmente como material de construcción en aplicaciones estructurales. Los morteros se utilizaron para construir muros en los edificios y revestir cisternas y caminos, se utilizó como material de liga para mampostería y para construir los arcos falsos, bóvedas saledizas, entre otros (Díaz Coutiño, Ramírez de Alba, & Pérez Campos, 2001). El concreto se utilizó en una mezcla con agregados graduados, para fines estructurales en la construcción de basamentos y muros de contención, caminos y cisternas (Ramírez de Alba, *et al.*, 1999).

## 3. Materiales constitutivos

Los adelantos tecnológicos en el uso de materiales y métodos de construcción, permitieron a los mayas construir edificios de grandes dimensiones. Para ello utilizaron la piedra caliza, la cual es abundante en la región de las Tierras Bajas, con lo que iniciaron el uso progresivo de los materiales cementantes a base de cal, lo cual les permitió la fabricación de estucos, morteros y concretos (Ramírez de Alba, *et al.*, 1999).

### a. Cal

La cal se utilizó como material de construcción de manera abundante en las Tierras Bajas, debido a la geología de la zona. Aunque la obtención de roca caliza no presenta dificultades de obtención, el uso de la cal estuvo diferenciado acorde al nivel socioeconómico al que pertenecía la construcción. En cuanto a la arquitectura civil, se empleó una gran cantidad de cal, en contraposición a la arquitectura doméstica donde predominó el uso de tierra y lechada de cal (Lorenzo Mora, 2019).

La cal conglomerada los elementos constitutivos de los estucos, morteros y concretos mayas. La cal se obtiene por la calcinación de rocas calizas, compuestas principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), con un bajo contenido de material arcilloso (Lorenzo Mora, 2019).



## b. Áridos

Los áridos son los agregados o cargas que se añaden al conglomerante, que en el caso de la matriz cementante maya es la cal, para fabricar un cemento que según su pureza y el tamaño de los agregados puede derivar en estuco, mortero o concreto. Los áridos cumplen la función de estabilizar el volumen de la masa, disminuyen la retracción, confieren dureza, color y textura al mortero (Lorenzo Mora, 2019).

Generalmente, en las Tierras Bajas, los cementos de cal fueron enriquecidos con *sascab*, trozos de cal fraguada, arenas duras de cuarzo, material residual procedente de la talla de sillares, y piedra pulverizada derivada de la extracción de caliza (Lorenzo Mora, 2019).

## c. Aditivos

Los aditivos son sustancias agregadas en pequeñas cantidades, pero que logran producir modificaciones específicas a las propiedades del mortero. Los aditivos más relevantes en la fabricación y mejora de las características de los estucos fueron los exudados vegetales, extraídos de cortezas de árboles. Los constructores mayas también emplearon arcillas como aditivos a las pastas de cal, como lubricante en las mezclas destinadas a obras murales (Lorenzo Mora, 2019).

## 4. Proceso de elaboración

Aunque no existen suficientes evidencias arqueológicas de las zonas de producción de la cal, se infiere que la fabricación del cemento maya constaba principalmente de la extracción de la roca, la calcinación de la caliza, la hidratación de la cal viva, y la adición de áridos y aditivos.

### a. Procesamiento del conglomerante

En la región central de las Tierras Bajas, es posible minar la caliza a la superficie del suelo, extrayéndola con herramientas que permitan fracturar la roca en bloques y apalancarlos para su extracción (Lorenzo Mora, 2019).

Se infiere que el proceso de calcinación de la caliza se componía del molido y quemado de rocas calizas con intrusiones arcillosas a temperaturas no mayores de 900°C en piras de madera, en un proceso denominado como calcinación. El fundamento de la calcinación es la transformación del carbonato de calcio en óxido de calcio. A diferencia de los procesos modernos, en los morteros mayas, la temperatura de calcinación no da paso a la formación de silicatos y aluminatos (Díaz Coutiño, *et al.*, 2001).

Por último, para fabricar la pasta de cal, el óxido de calcio o cal viva para ser empleado necesitó hidratarse para producir cristales de hidróxido de calcio. No se conoce el método utilizado por los constructores mayas para apagar la cal, Lorenzo Mora (2019) sugiere que algunos de los métodos elementales del apagado de la cal que pudieron haber sido empleados en Mesoamérica son: el apagado por exposición (pudrición), del que se obtiene la cal apagada en polvo; el apagado por inmersión, del que se obtiene la cal apagada en forma de pasta y el apagado por mezclado en caliente, mediante el cual la cal se apaga a la vez que se obtiene el mortero en forma de pasta densa.

#### b. Adición del árido

Para la fabricación de mortero fresco, es necesaria la adición de la carga o árido, que aporta resistencia una vez el mortero se haya endurecido. Las arenas calcíticas que los constructores mayas añadieron a las pastas de cal pudieron añadirse junto a la cal viva antes de apagarse o bien a la cal ya apagada (Lorenzo Mora, 2019).

En el caso de haberse añadido el árido a la cal apagada, este pudo mezclarse bien con la cal en polvo, producto del apagado por pudrición, o bien con la cal en pasta, si ésta fue apagada por pudrición. En ambos casos la proporción que se presume fue empleada fue de 1:3 cal-árido (Lorenzo Mora, 2019).

Por otra parte, en el caso que al árido fuera añadido a la cal viva en seco y se mezclan conjuntamente mientras se adiciona agua en la proporción justa para apagar la cal e ir formando el mortero. De manera similar al caso anterior, la proporción inicial de cal-árido fue de 1:3, pero debido a la expansión de la cal al apagarse por este método, la proporción final aproximada en el mortero sería de 2:3. Esta forma de apagado y mezclado del mortero contaría con mayor cantidad de conglomerante en comparación a las mezclas fabricadas con cal previamente apagada (Lorenzo Mora, 2019).

#### c. Aditivos

Estudios que han indagado en diferentes aspectos la producción de morteros y el empleo de aditivos orgánicos extraídos de diversas cortezas de árboles, sugieren que los constructores mayas pudieron macerar cortezas de algunas especies arbóreas, como el ramón, pixoy o habin, para la adición de las mismas a las balsas de apagado de la cal viva. Se presume que estos aditivos orgánicos, específicamente las gomas, actuaban como aditivos glutinosos, que lograban un estuco más fuerte, resistente y con mayor retención de agua (Lorenzo Mora y Carrascosa Moliner, 2015).

#### d. Carbonatación

La carbonatación es el proceso de endurecimiento del mortero, lo cual sucede por reacción del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono atmosférico para transformarse en carbonato de calcio. La carbonatación se caracteriza por la disminución de la trabajabilidad y plasticidad debido a un aumento de la rigidez en la estructura del mortero, propiciada por la precipitación de carbonato de calcio en la mezcla. Algunos aspectos que influyen en la carbonatación son: la porosidad, pues conlleva una mejor circulación del aire y por ende dióxido de carbono en el material; y la composición de la cal, ya que cales dolomíticas presentan carbonataciones más lentas en comparación a cales ricas en hidróxido de calcio. En mezclas con aditivos orgánicos, las pastas de cal presentan morfologías cristalinas características por el efecto que tienen estos aditivos en la precipitación del carbonato de calcio (Lorenzo Mora, 2019).

## B. Patrimonio arqueológico maya

### 1. Convenciones internacionales para la conservación del patrimonio

En cuanto a materia de conservación del patrimonio cultural se refiere, existe una serie de cartas que han sido producto de conferencias internacionales de arquitectura (Conferencia Internacional de Arquitectura Moderna -CIAM-, Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Cultura (UNESCO) cuyo objetivo ha sido establecer los lineamientos generales para la conservación y restauración del patrimonio y bienes culturales de las naciones.

En el caso de Guatemala, se consideran principalmente la Carta de Atenas (Conferencia de Atenas, 1931), Carta de Venecia (Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, 1964) y la Carta de Cracovia (Conferencia Internacional sobre Conservación «Cracovia 2000») como las guías para la conservación, restauración del patrimonio artístico y arqueológico del país. Por lo que es aceptado, dentro de la comunidad de arqueólogos guatemaltecos seguir los lineamientos contenidos en estas cartas internacionales y definir los criterios en materia de restauración a partir de los estatutos definidos en estas conferencias internacionales.

De los puntos más sobresalientes de las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia en materia de la restauración de edificaciones, monumentos y sitios arqueológicos y concernientes al desarrollo de las propuestas de mortero para uso en la restauración de estructuras prehispánicas mayas encontramos en la Carta de Atenas (Conferencia de Atenas, 1931) que en la resolución número 2 manifiesta la necesidad de protección y mantenimiento que asegure la conservación:

«En el caso que la restauración sea indispensable, debido a degradaciones o destrucciones, se debe respetar la obra histórica y artística del pasado sin prescribir el estilo de ninguna época. La Conferencia

recomienda mantener, cuando sea posible, la ocupación de los monumentos asegurando así su continuidad vital, con tal de que el destino moderno respete el carácter histórico y artístico de la obra.» También encontramos en la resolución número 4, se establecen los principios y técnicas de restauración en relación a ruinas de edificaciones:

«...Cuando se trata de ruinas, se impone una conservación escrupulosa y cuando las condiciones lo permiten es conveniente colocar en su lugar los elementos originales que se encuentren (anastilosis): los materiales nuevos necesarios para esta operación deberán ser siempre reconocibles...»

En cuanto al uso de materiales modernos, la resolución número 5 indica que:

«...se aprueba el uso juicioso de todos los recursos de la técnica moderna y muy especialmente el del cemento armado. Se expresa la opinión de que normalmente estos medios de refuerzo deban disimularse para no alterar el aspecto y el carácter del edificio por restaurar...»

Por último, en lo concerniente al estilo de las construcciones, en la resolución número 7 se recomienda:

«La Conferencia recomienda respetar la construcción de los edificios, el carácter y la fisonomía de la ciudad, especialmente en la proximidad de los monumentos antiguos»

(UNESCO, 2006)

Por otra parte, la Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y de Conjuntos Histórico-Artísticos (también llamada Carta de Venecia) emanada del II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia 1964, en cuanto a la conservación de monumentos establece lo siguiente:

«Artículo 5°. La conservación de monumentos siempre resulta favorecida por su dedicación a una función útil a la sociedad; tal dedicación es por supuesto deseable pero no puede alterar la ordenación o decoración de los edificios.»

«Artículo 6°. La conservación de un monumento implica la de un marco a su escala, cuando el marco tradicional subsiste, éste será conservado y toda construcción nueva, toda destrucción y cualquier arreglo que pudiera alterar las relaciones entre los volúmenes y los colores, será desechada.»

En cuanto a la restauración, la carta refiere lo siguiente:

«Artículo 9°. [...] Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos. Su límite está allí donde comienza la hipótesis en el plano de las reconstituciones basadas en conjeturas, todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento.»

«Artículo 10°. Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia.»

«Artículo 12°. Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.»

(UNESCO, 2006)

Por último, en la Carta de Cracovia 2000: Principios para la Conservación y Restauración del Patrimonio Construido promulgada por la Conferencia Internacional sobre Conservación «Cracovia 2000» es posible encontrar las siguientes propuestas de principios para la conservación y restauración del patrimonio edificado:

«Principio 2. El mantenimiento y la reparación son una parte fundamental del proceso de conservación del patrimonio, estas acciones tienen que ser organizadas con una investigación sistemática, inspección, control, seguimiento y pruebas. Hay que informar y prever el posible deterioro y tomar las adecuadas medidas preventivas.»

«Principio 5. Cualquier intervención que afecte al patrimonio arqueológico, debido a su vulnerabilidad, debe estar estrictamente relacionada con su entorno, territorio y paisaje [...] Como en el resto de los casos, los trabajos de conservación de hallazgos arqueológicos deben basarse en el principio de mínima intervención. Estos deben ser realizados por profesionales y la metodología y las técnicas deben ser controladas estrictamente.»

«Principio 10. [...] La intervención elegida debe respetar la función original y asegurar la compatibilidad con los materiales y las estructuras existentes, así como con los valores arquitectónicos. Cualquier material y tecnología nuevos deben ser probados rigurosamente, comparados y adecuados a la necesidad real de la conservación. Cuando la aplicación “in situ” de nuevas tecnologías puede ser relevante para el mantenimiento de la fábrica original, estas deben ser continuamente controladas teniendo en cuenta los resultados obtenidos, su comportamiento posterior y la posibilidad de una eventual reversibilidad.»

(UNESCO, 2006)

## 2. Legislación guatemalteca en materia de conservación

En el ámbito de la protección de la cultura y bienes culturales, el Estado de Guatemala cuenta con legislación que garantiza la protección, fomento y preservación de los mismos, que, aunque trata muchos aspectos de manera general, no se establecen lineamientos puntuales para la conservación, indicando únicamente que el Estado delega en el Instituto de Antropología e Historia (IDAEH) la rectoría para la conservación del patrimonio. Aunque el Estado delega autoridad en materia de conservación al IDAEH, aún no se cuenta con una guía oficial emitida por esta institución que recopile los lineamientos aprobados para la restauración, conservación y protección de los bienes culturales, por lo que se consideran como guías

principales las Cartas promovidas por convenciones internacionales de protección del patrimonio como lo son las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia.

En la Constitución Política de la República de Guatemala, en el Título II, Capítulo II, Sección Segunda, se establecen aquellos artículos concernientes a la Cultura, cuyo propósito es la preservación, fomento, y protección de los bienes culturales, de los cuales los siguientes son de especial relevancia para la protección y preservación del patrimonio nacional:

«Artículo 59. Protección e investigación de la cultura. Es obligación primordial del Estado proteger, fomentar y divulgar la cultura nacional; emitir las leyes y disposiciones que tienda a su enriquecimiento, restauración, preservación y recuperación; promover y reglamentar su investigación científica, así como la creación y aplicación de tecnología apropiada.»

«Artículo 61. Protección al patrimonio cultural. Los sitios arqueológicos, conjuntos monumentales y el Centro Cultural de Guatemala, recibirán atención especial del Estado, con el propósito de preservar sus características y resguardar su valor histórico y bienes culturales. Estarán sometidos a régimen especial de conservación el parque Nacional Tikal, el Parque Arqueológico de Quiriguá y la ciudad de Antigua Guatemala, por haber sido declarados Patrimonio Mundial, así como aquellos que adquieran similar reconocimiento.»

(UNESCO, 2006)

La Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación, Decreto Número 26-97 del Congreso de la República de Guatemala fue promulgada para promover el rescate, investigación, salvamento, recuperación, conservación y valorización de los bienes culturales del país. En esta ley se tratan temas relacionados con la definición del patrimonio, así como las medidas de protección que deben implementarse y las sanciones aplicables a la alteración de los bienes. Cuanto refiere al patrimonio encontramos que:

«Artículo 2. Patrimonio Cultural. Forman el patrimonio cultural de la nación los bienes e instituciones que por ministerio de la ley o por declaratoria de autoridad lo integren y constituyan bienes muebles o inmuebles, públicos y privados, relativos a la paleontología, arqueología, historia, antropología, arte, ciencia y tecnología, y la cultura en general, incluido el patrimonio intangible, que coadyuven al fortalecimiento de la identidad nacional.»

La protección y conservación del patrimonio cultural y proyectos encaminados a este fin:

«Artículo 9. Protección. Los bienes culturales protegidos por esta ley no podrán ser objeto de alteración alguna salvo en el caso de intervención debidamente autorizada por la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural. Cuando se trate de bienes inmuebles declarados como Patrimonio Cultural de la Nación o que conforme un Centro, Conjunto o Sitio Histórico. Será necesario, además, autorización de la Municipalidad bajo cuya jurisdicción se encuentre.»

«Artículo 15. Protección. La protección de un bien cultural inmueble comprende su entorno ambiental. Corresponderá a la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural, a través del Instituto de Antropología e Historia, delimitar el área de influencia y los niveles de protección.

«Artículo 16. Desarrollo de proyectos. Cuando un ente público o una persona natural o jurídica, nacional o extranjera, con capacidad científica y técnica fehacientemente comprobada, pretenda desarrollar proyectos de cualquier índole en inmuebles centros o conjuntos históricos, urbanos o rurales y en zonas o sitios arqueológicos, paleontológicos o históricos, comprendidos en esta ley, deberá en forma previa a su ejecución, someter tales proyectos a la aprobación de la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural, que dispondrá el cumplimiento de las condiciones técnicas requeridas para la mejor protección y conservación de aquellos, bajo su vigilancia y supervisión.»

Por último, dentro de las sanciones que se detallan en la presente ley, se encuentran aquellas relacionadas a la modificación no autorizada en bienes culturales:

«Artículo 32. Prohibiciones. Se prohíbe a toda persona natural o jurídica, nacional o extranjera, hacer trabajos de exploración, excavación terrestre o subacuática y de restauración en lugares o zonas paleontológicas, arqueológicas y extraer de ellas cualquier objeto que contenga, salvo los previamente autorizados por la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural»

«Artículo 55. Modificaciones ilícitas de bienes culturales. Quien realizare trabajos de excavación, remoción o rotura de tierras, modificaciones del paisaje o alteración de monumentos en sitios arqueológicos, históricos, zonas arqueológicas, centros o conjuntos históricos, sin previa autorización de la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural, se le impondrá la pena de seis a nueve años de privación de libertad, más una multa de cien mil a un millón de quetzales.»

(UNESCO, 2006)

## C. Restauración arquitectónica en el área maya

### 1. Criterios generales de conservación

Actualmente en Guatemala, no existe un manual o guía oficial aprobada por una institución rectora en materia de conservación que reúna una serie de lineamientos, procedimientos, instrucciones, criterios, entre otros, para llevar a cabo trabajos de restauración en sitios arqueológicos, estructuras coloniales, y edificaciones modernas y contemporáneas. Por lo que se utilizan como guía base las Cartas de Venecia, Cracovia y Atenas para la conservación de sitios arqueológicos en el país, y algunos manuales que han redactado arqueólogos y restauradores con base en su experiencia de trabajos en campo.

Según la Carta de Venecia, la restauración es:

«una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos.»

Para el caso de la conservación monumental, considerando que las edificaciones se encuentran expuestas al medio ambiente y la intemperie, la conservación debe ser un conjunto de acciones que permitan mantener el objeto por un periodo de tiempo prolongado y no una intervención única afecta nuevamente al envejecimiento y erosión de la estructura y restauraciones realizadas (Larios Villalta, 2009).

La restauración es un proceso cuyo objetivo es devolver al bien cultural deteriorado, su estabilidad y eficiencia estructural, respetando su integridad por medio de una mínima intervención sin rejuvenecer el objeto restaurado procurando la mayor autenticidad posible. Considerando que la restauración es de carácter excepcional, las intervenciones son temporales justificadas según el estado del bien cultural. Si el estado del bien es bueno, se requerirán trabajos de monitoreo y mantenimiento; si el estado de conservación es malo, se deber evaluar el límite de intervención con técnicas de restauración (Larios Villalta, 2009).

En el año 2005, el Taller internacional de formación sobre conservación y restauración de piedra caliza en zonas arqueológicas del área Maya (Delegación de Patrimonio Mundial, 2010) definió una lista de criterios de intervención, cuando se busca devolver la eficiencia y estabilidad estructural a un monumento, por lo que:

- Toda intervención tiene que respetar el contexto/entorno natural.
- Solo se intervendrá si la estructura está dañada o en riesgo, lo cual se define por el diagnóstico.
- Las intervenciones tienen que ser reversibles, es decir que se puedan eliminar, que permitan nuevas intervenciones en el futuro y no generar efectos secundarios.
- Todas las intervenciones tienen que utilizar los sistemas constructivos tradicionales y materiales originales (utilización de cal apagada y terrón) o compatibles con los originales.
- Las intervenciones no deberán usar cemento ni hierro.
- Las intervenciones deben explorar el uso de tecnologías nuevas, siempre y cuando no comprometan los valores y la conservación del sitio en el presente y el futuro.

Aunque se recomienda, como parte de las características de una intervención que se realice a bienes culturales, que los trabajos de conservación deben ser, en la medida de lo posible de carácter reversible: es decir: que permita, de ser necesario, realizar futuras intervenciones; no impedir el acceso a las evidencias propias del objeto restaurado; aprovechar al máximo el o los materiales existentes, propios del objeto restaurado; mantener la armonía en color tono, textura, forma y escala. Si fueran necesarias las adiciones estas serán menos notorias que los materiales originales y que al mismo tiempo sean identificables (Magaña Juárez, 2010).



## 2. Métodos de restauración

Según explican Raúl Noriega y Oscar Quintana (2021) en el artículo: Conservación y arquitectura maya en Petén, Guatemala, que considerado el estado de conservación de los bienes culturales y patrimonio registrado en sitios fuera del Parque Nacional Tikal, a nivel estatal a partir de 1987:

«...se decidió atender como prioridad el patrimonio edificado con arquitectura expuesta y en peligro de perderse. Este patrimonio visible y en condición de colapso fue descrito en un catálogo de 128 sitios con datos actualizados, y clasificado según tres tipos de condiciones:

1. Edificios dañados de muy difícil acceso y por lo tanto sin posibilidad, al menos a corto y mediano plazo, de poder ser parte de un sistema de ciudades mayas habilitadas al visitante,
2. Yacimientos menos espectaculares con daños y arquitectura visible, cercanos a las redes viales actuales o adyacentes a poblados recientes, y
3. Edificios en peligro, pero en condiciones estratégicas más favorables para una inversión a corto plazo.»

En los sitios arqueológicos, los restauradores realizan intervenciones en los edificios con arquitectura expuesta con el propósito de estabilizar la estructura. La estabilización de las estructuras, se realiza a través de trabajos de restitución de volúmenes en las plataformas escalonadas que constituyen los edificios de arquitectura expuesta. Generalmente, se restituyen los volúmenes erosionados en la base de muros con el propósito de asegurar la estabilidad de los parámetros constructivos (Noriega Girón y Quintana Samayoa, 2021).

La conservación de los edificios con arquitectura expuesta, se lleva a cabo en distintos grados de intervención: relleno de la arquitectura visible, limpieza de escombros, restitución de volúmenes, reintegración de elementos estructurales, reintegración de elementos de la fábrica perdidos por saqueo, reparación de grietas y fisuras, resane de estucos, bancas pisos y escalinatas (Noriega Girón y Quintana Samayoa, 2021).

### a. Estabilización

La estabilización es un trabajo de conservación que busca hacer estable una estructura al fortalecerla con acciones que buscan devolver la capacidad estructural de los elementos debilitados. Sin embargo, no se deberá interpretar la consolidación como una intervención que busca aumentar la dureza de los materiales deteriorados. En el caso de monumentos antiguos en estado ruinoso estos tienden a adquirir cierto equilibrio y estabilidad con los escombros y medio circundante, por lo que el deterioro puede causarse por los mismos trabajos de investigación (Larios Villalta, 2003).

Cuando se presentan pérdidas de los recubrimientos, estucos argamasas y morteros por deterioro y contaminación por materiales orgánicos, que no implica un caso de inestabilidad estructural, pero sí una fuente de contaminación e inestabilidad futura se realizan tareas de rejuntamiento. El rejuntado implica limpiar las juntas para eliminar el material contaminado y sustituirlo por un aglutinante limpio, estable y compatible con los materiales originales (Larios Villalta, 2003).

Otra manera de brindar soporte y estabilidad a las estructuras es por medio del *embono* o *embone*, en el cual se aplica un relleno rústico con materiales similares a los originales que se integran a los rellenos y núcleos. Los embones refuerzan y protegen partes expuestas al ambiente, con el propósito de evitar la filtración de agua que podría dañar y deteriorar la estructura (Larios Villalta, 2003).

En el caso de partes que estén en proceso de desprendimiento y requieren la fijación de las mismas, se llevan a cabo trabajos de resane. El resane implica el relleno de grietas, fijación de complementos, reparación de estucos o aplanados. En los trabajos de resane se aplican pastas o morteros de cal en las áreas donde se presentan fisuras, grietas y desprendimiento de elementos que necesitan ser rellenadas para conservar la forma fijar y estabilizar dichos elementos (Pérez Robles, 2017)

#### b. Reintegración

La reintegración es un procedimiento que permite restaurar partes originales que estén cayendo o que ya hayan caído. Para reintegrar partes de una estructura es necesario documentar la posición de los elementos de la misma con el propósito de colocarlas de manera más fidedigna a la estructura. En la mayor parte de las edificaciones del área maya las piedras calizas utilizadas en la construcción de los monumentos son tan frágiles que normalmente se destruyen por lo que es difícil realizar trabajos de reintegración (Larios Villalta, 2003).

#### c. Integración

La integración es el trabajo que se realiza para completar partes faltantes en una estructura. La integración se convierte en un complemento de la estructura, por lo que esta debe realizarse en casos donde hará comprensible el monumento. Adicionalmente, los trabajos de integración deberán ser indistinguibles, es decir se incorporan armónicamente a la estructura; pero deberá ser reconocible a corta distancia (Larios Villalta, 2003)

### 3. Materiales

Las estructuras mayas y su estabilidad no dependen de la fuerza o debilidad de los morteros ya que las construcciones estaban fundamentadas en el equilibrio que se logra con la organización espacial de los materiales. En los sitios arqueológicos mayas lo más frecuente es encontrar lodos de arcilla de cal o tierra caliza usados como aglutinantes en las estructuras, contrario a los recubrimientos o estucos los cuales fueron elaborados con cal de la mejor calidad (Larios Villalta, 2003).

Ya que las estructuras mayas estaban construidas según el equilibrio estructural por peso y contrapeso de los elementos, generalmente se evita el uso de cemento Portland en las mezclas aglutinantes ya que pueden resultar de una dureza y resistencia mayor a la de los elementos de construcción de la estructura. Actualmente se recomienda el uso de pastas de cal preparadas artesanalmente con el propósito de utilizar materiales de dureza similar a aquellos elementos de construcción originales y garantizar la compatibilidad entre los materiales. En casos donde la elaboración de pastas artesanales de cal no es posible, el uso de cal hidratada comercial se considera como un aglutinante aceptable para la preparación de argamasa. En casos donde la calidad de la argamasa no presenta resultados satisfactorios en su aplicación, se recomienda utilizar cemento Portland en una proporción no excedente de 5% (Larios Villalta, 2003).

## D. Morteros

### 1. Clasificación

El mortero se define como una mezcla constituida por un conglomerante y áridos finos que reaccionan con el agua que se adiciona en la mezcla y que con el tiempo adquiere resistencia. Los morteros pueden mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido al agregar aditivos químicos y adiciones minerales. Estas mezclas son empleadas como: material de asentamiento o de unión de elementos, material de recubrimiento, recubrimiento o acabado de superficies (Calderón Bravo, 2016).

Dentro de los morteros se distinguen dos grupos principales: los morteros aéreos y los hidráulicos. Los aéreos endurecen por interacción con el aire al perder agua por secado por aire y fraguan lentamente por la carbonatación con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el aire. Los hidráulicos endurecen en medios húmedos ya que poseen constituyentes provenientes de calizas impurificadas con sílice y alúmina, por lo que desarrollan resistencias iniciales altas (Sánchez de Guzmán, 2001).

a. Base de cal

Estos morteros se constituyen principalmente de hidróxido de calcio o cal, arena y agua. Las cales que pueden utilizarse pueden ser de tipo aérea o hidráulica, siendo la cal hidráulica aquella que logra fraguar o endurecer en medios húmedos a diferencia de las cales aéreas. Las propiedades de estos morteros están limitadas por el proceso de fraguado, ya que tienen la característica de ser de baja resistencia mecánica, pero cuentan con una elevada capacidad de deformación, permeabilidad al agua y trabajabilidad. Algunas mezclas pueden estar compuestas hasta en un 5% de cemento y otros aditivos para mejorar sus propiedades (Calderón Bravo, 2016).

Para este tipo de morteros, las proporciones cal-arena frecuentemente utilizadas en morteros aéreos es de 1:2 para pañetes y 1:3 o 1:4 para mampostería simple. Si la proporción cal-arena aumenta, el mortero pierde ductilidad y trabajabilidad (magro); por otra parte, si este fuera más graso (una relación cal-arena menor) tienden a ocurrir contracciones y agrietamientos en el mortero endurecido (Sánchez de Guzmán, 2001).

b. Base de cal con puzolanas

Estos morteros se caracterizan por ser plásticos, trabajables, de porosidad media y resistencias mecánicas de baja a media. La cal y la finura y actividad de la puzolana influyen en la reactividad del cemento ya que las puzolanas están formadas por silicatos que en la mezcla dan lugar a la formación de productos insolubles y estables similares a aquellos formados en la hidratación del cemento Portland (Calderón Bravo, 2016).

c. Basado en ligantes hidráulicos

Este tipo de morteros son productos minerales artificiales que en mezcla con el agua forman una pasta que al endurecer se logran obtener compuestos estables cuya principal característica es su dureza y resistencia. En estas mezclas el ligante hidráulico principal es el cemento Portland junto a la cal hidráulica (Calderón Bravo, 2016).

Estos morteros son apropiados para aplicaciones donde se requiere gran trabajabilidad, buena retención de agua y alta resistencia inicial. Generalmente, se toma como base una relación 1:3 cemento-cal, donde se puede sustituir parte del cemento por cal. Cuando el contenido de cemento es alto, las características serán: alta resistencia y endurecimiento relativamente rápido; pero habrá una contracción volumétrica de 3%. Si el contenido de cal es alto, será menos resistente, aunque será más plástico y permeable; pero la contracción será de hasta 9% (Sánchez de Guzmán, 2001).

#### d. Mixtos

Este tipo de morteros se caracteriza por la interacción de dos aglomerantes en la mezcla, como lo es la cal y el cemento y sirven para evitar una baja adherencia y alta porosidad de los morteros de cemento y arena en proporciones superiores a 1:5. Estos morteros presentan ventajas como lo es un fraguado rápido, ausencia de grietas por retracción, plasticidad y adherencia altas. Estos morteros pueden sustituir a aquellos morteros de cal en casos donde el revestimiento está expuesto a una alta erosión (Calderón Bravo, 2016).

La aplicación de este tipo de morteros, es en situaciones donde se requieren altas resistencias iniciales o resistencias elevadas del mortero endurecido. La trabajabilidad de este mortero hidráulico es variable y depende de la proporción cemento-arena usada. Ya que este tipo de portero pretende ser una especie de soldadura, puesto que cada grano de arena está cubierto por una capa de cemento, la cantidad de cemento no puede disminuir mucho para que la mezcla no sea áspera. Para aumentar la trabajabilidad de este tipo de morteros, se pueden utilizar arenas con pequeñas fracciones de limo o arcilla (Sánchez de Guzmán, 2001).

#### e. Mortero de pega

Los morteros de pega de mampostería son utilizados para la unión de estas en un elemento estructural, considerando que el mortero por sí solo no es un elemento estructural. Estos morteros, según la Norma COGUANOR NTG 41050, tienen el propósito de:

«...unir las unidades de mampostería en un ensamblaje que actúa como un elemento integral que tiene unas características de comportamiento deseadas. El mortero de pega influye en las propiedades estructurales del ensamblaje de mampostería a la vez que reduce su permeabilidad.»

## 2. Constituyentes

### a. Conglomerantes

Los conglomerantes son materiales que tienen la capacidad de unir fragmentos de diferentes materiales y cohesionar al conjunto por efecto de reacciones químicas en la mezcla. Los conglomerantes que se utilizan en la fabricación de morteros son productos inorgánicos y minerales que se obtienen a partir de materias primas naturales. Los principales tipos de conglomerantes que existen son dos: la cal y el cemento (Calderón Bravo, 2016).

La cal se utiliza como un plastificante y ligador que produce una adherencia entre los diversos componentes de la mezcla; además les proporciona a los morteros plasticidad, laborabilidad y capacidad de retener agua. Las cales pueden a su vez clasificarse en aéreas o hidráulicas según el tipo de fraguado que

resulte más favorable. La cal aérea hidratada tiende a endurecer únicamente en presencia del aire, ya que la cal amasada con agua y expuesta a la atmósfera sufre un proceso de fraguado que inicia con la cristalización del hidróxido de calcio y que posteriormente endurece al carbonatarse con el dióxido de carbono presente en la atmósfera. Por otra parte, la cal hidráulica tiende a endurecer lentamente mientras reacciona con el anhídrido carbónico para formar nuevamente carbonato de calcio (Calderón Bravo, 2016).

La definición del cemento, en un sentido amplio, como explica Sánchez de Guzmán (2001) es:

«...un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas.»

Por lo que, propiamente dicho, los cementos abarcan una gran variedad de materiales cementantes como las cales, asfaltos y alquitranes; no específicamente un único tipo de cemento, generalmente asociado al cemento Portland.

## b. Árido

Los áridos son los materiales que tienen una resistencia propia suficiente y que no intervienen ni afectan las propiedades y características de un mortero; pero a su vez son necesarios para garantizar la suficiente adherencia con la pasta endurecida de mortero. Los áridos pueden considerarse como materiales inertes, ya que no desarrollan ningún tipo de reacción química con los demás constituyentes de un mortero. Aunque se consideren como inertes, existe el caso de algunos agregados cuyas fracciones más finas presentan actividades hidráulicas que coadyuvan al desarrollo de la resistencia mecánica característica del mortero (Sánchez de Guzmán, 2001).

Los agregados pueden clasificarse de muchas maneras, generalmente esta clasificación se lleva a cabo considerando su tamaño, procedencia y densidad. La forma de clasificar agregados según su tamaño se realiza según su distribución de tamaño a través de un análisis granulométrico. La fracción fina, cuyas partículas tiene un tamaño que varía entre 0.074 a 4.76 milímetros, es el conjunto de agregados finos que comúnmente se llama arena; por otra parte, aquellas partículas de diámetro mayor a 4.76 milímetros se denomina agregado grueso o grava (Sánchez de Guzmán, 2001).

Otra clasificación para los áridos, es según su procedencia, es decir si han sido fabricados o provienen de fuentes naturales. Los naturales, como su nombre lo indica, provienen de fuentes naturales como depósitos de arrastres fluviales. Los agregados artificiales, por el contrario, son aquellos que se obtuvieron a partir de productos y procesos industriales como: arcillas, escorias de alto horno, Clinker o limaduras de hierro. La última forma de clasificar a los agregados es según su densidad, ya que depende de la cantidad de masa por unidad de volumen del volumen de los poros. Esta clasificación es de utilidad ya que la densidad del agregado

afecta la densidad del concreto o mortero, pudiéndose obtener ligeros, normales o pesados (Sánchez de Guzmán, 2001).

Aunque en la mayoría de los casos los agregados se consideran químicamente inertes con el resto de elementos en la mezcla, existe una reacción química favorable de los agregados, denominadas como epitaxia. Esta reacción tiene la peculiaridad de favorecer que se dé la adherencia de ciertos agregados calizos y la pasta de cemento conforme transcurre el tiempo. También existen otras reacciones que pueden llegar a causar expansiones dentro de la masa endurecida de concreto, las cuales inducen esfuerzos de tensión que pueden hacer fallar la integridad estructural, considerando que la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente un 10% de la resistencia a la compresión (Sánchez de Guzmán, 2001).

La reacción agregado-álcali es la más común que se produce entre las formas inestables de óxidos de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) e hidróxidos alcalinos en la pasta de cemento ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ). Esta reacción produce un gel hinchable que aumenta su volumen conforme absorbe agua, ocasionando presiones internas en el concreto que general agrietamientos y rupturas de la pasta de cemento. Otra reacción que, aunque menos frecuente, puede suceder es una reacción álcali-carbonato, la cual es similar a la reacción agregado-álcali, que sucede entre ciertos tipos de calizas dolomíticas y los álcalis del cemento (Sánchez de Guzmán, 2001).

### c. Agua

El agua tiene un rol importante en las reacciones de los cementantes en estado plástico, el proceso de fraguado y el estado endurecido. El agua es un componente que le da la capacidad a las pastas de cemento de fraguar y endurecer para formar un bloque único junto a los agregados. Este componente puede clasificarse según su aplicación en agua de curado y agua de mezclado (Sánchez de Guzmán, 2001).

El agua de mezclado es una cantidad definida de agua por volumen unitario de concreto o mortero que requiere el cemento para producir una pasta adecuadamente hidratada, que permite una lubricación apropiada de los agregados cuando la mezcla se encuentra fresca. La pasta de cemento, partiendo de una mezcla plástica de cemento y agua, va adquiriendo una nueva estructura conforme se produce la hidratación del cemento. La estructura resultante es una formación denominada gel de cemento. En una proporción de pasta hidratada el agua se encuentra en dos formas: agua de hidratación o no evaporable y agua evaporable (Sánchez de Guzmán, 2001).

El agua de hidratación es la parte del agua original añadida a la pasta durante el mezclado y que reacciona químicamente con el cemento para formar la parte de la fase sólida del gel. Se denomina no evaporable porque en una fracción de pasta hidratada, esta se conserva en la pasta en condiciones de 0% de humedad ambiental y 110°C de temperatura. Por otra parte, el agua evaporable es aquella que no se conserva en la

pasta a las condiciones de temperatura y humedad antes indicadas. El gel de cemento tiene la característica de contar con un gran desarrollo superficial interno, por lo que ejerce una atracción molecular sobre una parte del agua evaporable y que puede estar en tres condiciones distintas según su proximidad a la superficie del gel: adsorbida, capilar y libre (Sánchez de Guzmán, 2001).

El agua de curado es en realidad un conjunto de condiciones en las que la hidratación de la pasta evoluciona sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrata y el mortero alcanza sus propiedades potenciales. Por lo anterior, el agua de curado es un suministro adicional de agua para mantener hidratado el cemento. Este suministro adicional está regido por: la humedad ambiental del medio, el espacio que ocupan los productos de hidratación y la densidad del agua no evaporable (Sánchez de Guzmán, 2001).

Tanto el agua de mezclado como de curado deben estar libres de contaminaciones para evitar corrosión en los morteros y concretos, generalmente, se recomienda el uso de agua potable; aunque el agua puede contener sales, azúcares o cítricos en altas concentraciones, entre otros, que pueden ser perjudiciales para el concreto o mortero. En la Tabla 1, se detalla un resumen de las tolerancias máximas de concentraciones de impurezas en el agua de mezclado de morteros o concretos. Las normas técnicas que recogen los ensayos especificados para la calidad del agua para uso en morteros y concretos están dictadas por las normas:

Calcio y magnesio en el agua – Norma ASTM D-511

Cloruros – Norma ASTM D-512

Sulfatos – Norma ASTM D-516

pH del agua ASTM D-1293

Acidez y alcalinidad del agua ASTM D-1067

Definición de términos relativos al agua ASTM D-1129

Partículas y materia disuelta en el agua ASTM D-1888

(Sánchez de Guzmán, 2001)



Cuadro 1. Tolerancias de concentraciones de impurezas en el agua de mezclas

Impurezas	Máxima concentración tolerada	
	Carbonato de sodio y potasio	1,000
Cloruro de sodio	20,000	ppm
Cloruro, como Cl (concreto preesforzado)	500	ppm
Cloruro, como Cl (concreto húmedo o con elementos de aluminio, metales similares o galvanizados)	1,000	ppm
Sulfato de sodio	10,000	ppm
Sulfato, como SO <sub>4</sub>	3,000	ppm
Carbonatos de calcio y magnesio, como ión bicarbonato	400	ppm
Cloruro de magnesio	40,000	ppm
Sulfato de magnesio	25,000	ppm
Cloruro de calcio (por peso de cemento en el concreto)	2%	
Sales de hierro	40,000	ppm
Yodato, fosfato, arsenato y borato de sodio	500	ppm
Sulfito de sodio	100	ppm
Ácido sulfúrico y ácido clorhídrico	10,000	ppm
pH	6.0 a 8.0	
Hidróxido de sodio (por peso de cemento en el concreto)	0.5%	
Hidróxido de potasio (por peso de cemento en el concreto)	1.2%	
Azúcar	500	ppm
Partículas en suspensión	2,000	ppm
Aceite mineral (por peso de cemento en el concreto)	2%	
Agua con algas	0	ppm
Materia orgánica	20	ppm
Agua de mar (concentración total de sales para concreto no reforzado)	35,000	ppm
Agua de mar para concreto reforzado o preesforzado	No recomendable	

Fuente: *Tecnología del Concreto y del Mortero* (Sánchez de Guzmán, 2001).

#### d. Aditivos

Los aditivos son sustancias que pueden ser tanto inorgánicas como orgánicas, y cuyo objetivo en la mezcla es modificar las propiedades de los conglomerantes en estado fresco. Estas sustancias pueden presentarse como polvos sólidos o líquidos, y cuya proporción en la mezcla no debe exceder el 5% del peso

del cemento. Los aditivos más utilizados en la fabricación de morteros son los aireantes, plastificantes, retardantes, hidrofugantes, retenedores de agua, entre otros (Calderón Bravo, 2016).

### 3. Propiedades

Las propiedades de los morteros varían según su estado, este puede ser fresco o endurecido. Por lo que sus propiedades plásticas, mecánicas y químicas varían según los arreglos en la microestructura del mortero.

#### a. Estado fresco

##### 1) Trabajabilidad

Esta propiedad puede considerarse como la más importante para los morteros en estado plástico. La trabajabilidad resulta de la combinación de otras propiedades como lo son: la plasticidad, consistencia, cohesión y adhesión. La trabajabilidad, como propiedad, es producto del flujo y movilidad de las partículas lubricadas en un medio conformado por la pasta cementantes. Esta propiedad es determinada principalmente por la graduación de: el agregado, las proporciones entre los materiales, el contenido de aire y de agua. Esta propiedad es satisfactoria cuando, bajo la influencia de dos factores: la succión de la unidad de mampostería y el ritmo de evaporación de agua, el mortero mantiene esta propiedad que depende de la retención de agua y características de fraguado (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

##### 2) Flujo

El flujo inicial es una propiedad que indica el aumento porcentual en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero cuando colocado en una mesa de flujo y después de levantarlo 25 veces una carrera de 12.7 milímetros en 15 segundos. Esta característica también se determina después de la succión, que es una propiedad que se determina de la misma manera como se indicó anteriormente, pero aplicado a una muestra que se le ha aplicado determinado vacío. La relación de flujo entre el flujo de la succión y el flujo inicial, resulta en la retención de agua (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

En obra, los morteros de pega requieren un mayor valor de flujo, lo cual involucra un mayor contenido de agua. Las normas para morteros de pega comúnmente exigen retenciones de agua mínimas de 75% basadas en un flujo inicial con un valor entre 105 a 115%. Para la mayoría de los morteros de pega, la resistencia a la adherencia se incrementa con el aumento del flujo hasta que sea perceptible la migración de agua libre (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

### 3) Retención de agua y capacidad de retención de agua

La retención de agua de un mortero bajo succión, es una medida de su habilidad para retener su agua de mezclado. Esta es una propiedad que está relacionada con el tiempo de aplicación disponible antes que este se endurezca. Esta propiedad aumenta con un incremento del contenido de cal o de aditivos incorporadores de aire, la adición de finos de arena o utilizando materiales retenedores de agua en la mezcla (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

### 4) Características de endurecimiento

Aún en estado plástico, el endurecimiento de un mortero radica en sus características de fraguado, lo cual se puede comprobar con su resistencia a la deformación. El fraguado inicial es un indicador del grado de hidratación de una pasta de cemento puro, por lo que un endurecimiento prematuro es perjudicial para el uso de un mortero. Los morteros de pega se endurecen a medida que adquiere resistencia (se endurece) y pierde agua mediante el fraguado normal. El proceso de endurecimiento puede verse afectado por la temperatura del medio, ya que se acelera a temperaturas altas y se retarda con temperaturas bajas (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

#### b. Estado endurecido

##### 1) Adherencia

La adherencia se considera como la propiedad física más importante de un mortero endurecido. Esta propiedad, a su vez, se constituye de tres factores: resistencia, grado de adherencia y durabilidad. Ya que la adherencia involucra la convergencia de diversas variables que dificultan la reproducibilidad de los ensayos en laboratorio para determinarla; entre estas variables pueden identificarse: el contenido de aire, la cohesión del mortero, tiempo transcurrido entre la aplicación y colocación de elementos de mampostería, la succión de la unidad de mampostería, la capacidad de retención de agua del mortero, las condiciones de curado, entre otras (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

Algunos de los métodos de ensayo que permiten evaluar la resistencia de adherencia de los morteros de pega con elementos de mampostería son los siguientes: ASTM C952, ASTM C1072, ASTM C1357, ASTM E518 y ASTM E72. El grado de adherencia también puede determinarse indirectamente por ensayo de movimiento relativo de agua a través de la mampostería, como se indica en el método de ensayo ASTM E514 (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

La resistencia a la tensión y compresión del mortero es superior a la resistencia a la adherencia que se pueda dar entre el mortero y el elemento de mampostería. Las juntas de mortero son más susceptibles a las fallas por adherencia, por lo que es necesario garantizar un contacto completo entre el mortero y la unidad de mampostería para evitar la infiltración de humedad entre las juntas. La resistencia de adherencia por tensión aumenta con un incremento del contenido de cemento en la mezcla (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

## 2) Extensibilidad y flujo plástico

Por extensibilidad se comprende la máxima deformación unitaria por tensión a la ruptura, por lo que esta propiedad es un índice de la máxima elongación posible bajo fuerzas de tensión. Los morteros con bajas resistencias que tienen un módulo de elasticidad más bajo tienden a presentar un mayor flujo plástico en comparación a aquellos que presentan módulos de elasticidad más altos. Es por ello que debe evitarse el uso de morteros con resistencias más altas que las necesarias, ya que el flujo plástico permite que la mampostería pueda sufrir pequeños movimientos sin la abertura aparente de las juntas de mortero (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

## 3) Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de un mortero es generalmente uno de los criterios principales para la selección del tipo de mortero, pues se relaciona, comúnmente, con propiedades como la resistencia a la tensión y absorción del mortero. Esta propiedad está estrechamente relacionada con el contenido de cemento y la relación agua-cemento. La resistencia a la compresión, a diferencia de otros ensayos, proporciona resultados consistentes por lo que se considera la base para determinar la compatibilidad entre los elementos que conforman el mortero. El método de ensayo NTG 41050h1 (ASTM C780) es útil para determinar la resistencia a la compresión de cubos o cilindros de mortero (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

En el caso de los morteros la resistencia a la compresión no debe ser el único parámetro de selección, ya que generalmente la resistencia de adherencia es más importante, así como la trabajabilidad y retención de agua, las cuales permiten una buena adherencia. La resistencia a la flexión es un factor que indica la capacidad del mortero para resistir agrietamientos, puesto que los morteros deben ser más débiles que los elementos de mampostería, con el propósito que las grietas o fisuras ocurran en el mortero y puedan ser reparadas (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

La resistencia a la compresión de un mortero aumenta con el contenido de cemento en la mezcla, por el contrario, la resistencia a la compresión disminuye con el aumento de cal, arena, agua y aire en la mezcla. Usualmente es preferible que los morteros tengan una mayor adherencia a costa de la resistencia a la

compresión, por lo que se debe evitar agregar agua fuera de los límites de tiempo entre mezclado y retemplado (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

#### 4) Durabilidad

La unión de los morteros de pega con ciertos elementos de mampostería, donde no se considera la exposición puede llevar no solo al mortero sino también al elemento de mampostería a problemas de durabilidad. Aquellos muros de mampostería expuestos a la intemperie, por ambos lados, requieren de morteros más durables; caso contrario a aquellos casos donde la mampostería se mantiene relativamente seca o que se encuentra expuesta por un único lado (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35).

### 4. Proceso de fabricación de la cal

El proceso de fabricación de la cal se fundamenta principalmente en la calcinación de las rocas calizas, las cuales son formaciones ricas en calcio que al exponerse a altas temperaturas libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y se obtiene óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), el cual es un cemento de amplio uso y aplicación. Industrialmente, el proceso se realiza en hornos capaces de llevar los materiales a temperaturas de alrededor de mil grados centígrados lo cual propicia la descomposición térmica del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) hasta obtener óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), también conocido como cal viva, que posteriormente es hidratado para obtener hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) o portlandita para finalmente ser comercializado como cal hidratada.

#### a. Obtención y preparación de la piedra caliza

La materia prima para la fabricación de cal la cual es objeto de exploración geológica es la caliza. En términos geológicos la caliza es una roca sedimentaria producto de depósitos de materiales densos y duros; y puede encontrarse como rocas o en ocasiones constituir formaciones montañosas. La evaluación de la idoneidad de las materias primas se basa en su composición química. Para los componentes calizos, el estándar calizo se utiliza como criterio para determinar el contenido de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y de los constituyentes hidráulicos como el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en la roca. Las exploraciones de depósitos de caliza tienen tres objetivos: (1) verificar la calidad de los materiales, (2) establecer el rango de variación de la calidad de los materiales a lo largo de la vida operativa del depósito y (3) verificar las reservas trabajables de los materiales. (Schäfer, 1983)

Las materias primas utilizadas en la fabricación de cal se obtienen generalmente en minas a cielo abierto o en operaciones de cantera. El método de extracción mayoritariamente utilizado es la técnica de banca o escalones en donde los depósitos de materia son extraídos en varios escalones de altura determinada. Las operaciones de extracción pueden ocurrir en dos modalidades: sobre el nivel del suelo en una ladera de una

montaña o bajo en nivel del suelo, en excavaciones que involucran elevar los materiales extraídos. Durante la extracción lo más recomendable es contar con diversos puntos de extracción en la cantera con el propósito de contar con un control de la composición de la materia prima. El equipo mecánico para la extracción depende principalmente de la tasa de producción y las distancias de acarreo de materiales. Una consideración importante en las operaciones de extracción es un interajuste apropiado entre la maquinaria empleada, para que las capacidades de cada una estén en concordancia con el resto y se eviten inconvenientes causados por la incompatibilidad entre capacidades de carga, alimentación, descarga, entre otras (Schuberth, 1983).

El propósito del procesamiento preparatorio de las materias primas es convertir materiales química y mineralógicamente distintos en una harina cruda de composición homogénea. Para este efecto las materias primas son reducidas de tamaño en dos etapas, la reducción primaria o trituración y la reducción secundaria o molienda. Generalmente la trituración es una operación que reduce las rocas hasta un tamaño de partícula de entre 80 y 20 mm, para alimentar la siguiente etapa. Antes que el material triturado pase a una siguiente etapa, sucede una clasificación de tamaño, que en el contexto de la trituración y molienda, es sinónimo de separar o dividir las partículas de materiales compuestos de una mezcla de partículas de diferentes tamaños en rangos de tamaño o fracciones. La separación según el tamaño de partícula se realiza por medio de tamizaje. Por lo que las partículas que no cumplen con el tamaño adecuado, son trituradas nuevamente hasta alcanzar la reducción de tamaño adecuada (Schneider & Binder, 1983).

## b. Calcinación

La calcinación de la piedra caliza se realiza en hornos cilíndricos, los cuales pueden ser: horizontales, donde la carga de piedra caliza es sometida a un aumento progresivo de temperatura hasta llegar a una zona de descarbonatación por lo que este tipo de hornos garantizan una descarbonatación completa produciendo cales de reactividad controlada; o verticales, los cuales tienen una alimentación por la parte superior mientras el producto cae hacia la parte inferior del horno, atravesando niveles que incorporan una serie de quemadores para crear zonas de incineración hasta la descarga del horno donde la cal es descargada, en este tipo de hornos se obtiene una cal de baja reactividad (Lhoist, s.f.).

Durante la calcinación ocurre una descomposición del carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) en donde éste es disociado, descarbonatado y calcinado a temperaturas superiores a  $896^\circ\text{C}$ . A esta temperatura la presión de disociación es mayor a 1 bar por lo que se iguala a la presión externa. La entalpía de reacción  $\Delta H$  es 1660 kJ/kg. El valor de temperatura de calcinación  $896^\circ\text{C}$  corresponde a la calcita pura que con la presencia de otros componentes puede cambiar a temperaturas menores, por lo que en la práctica este proceso empieza a ocurrir a temperaturas entre  $500$  y  $600^\circ\text{C}$ . Este efecto se debe a reacciones químicas del óxido de calcio con óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) resultando en la formación de los sistemas:  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (=CA), y  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (=CS). El contenido de óxido de calcio (CaO) por ende, es menor a temperaturas inferiores a

800°C, aumentando aproximadamente 20% a mayores temperaturas. Es por ello que la calidad de producto obtenido se relaciona directamente con el proceso de calcinación al cual fue sometido (Knöfer, 1983). Las transformaciones químicas que ocurren en los hornos de calcinación se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Transformaciones químicas en el tratamiento térmico de la harina cruda de cemento portland

Temperatura °C	Proceso	Transformación química
< 200	Liberación del agua libre (secado)	
100... 400	Liberación del agua absorbida	
400... 750	Descomposición de arcillas con la formación de metacaolín	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2) + 4 H_2O$
600... 900	Descomposición de la metacaolín y otros compuestos con formación de una mezcla óxido reactiva	$Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2 SiO_2$
600... 1000	Descomposición de la piedra caliza con formación de sistemas CS y CA	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3 CaO + 2 SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$

Fuente: *Cement Engineer's Handbook* (Knöfer, 1983).

### c. Molienda e hidratación

Una vez obtenida la cal de los hornos (CaO), esta es sometida nuevamente a operaciones de reducción de tamaño por lo que los fragmentos de cal son molidas en molinos giratorios de bolas, pendulares verticales o de muelas hasta obtener un polvo fino con un tamaño de partícula menor a 0.2mm. Los productos hidratados se obtienen en equipos denominados hidratadores, que constan de una serie de cámaras de hidratación y un premezclador donde el agua (H<sub>2</sub>O) reacciona con el óxido de calcio o cal viva (CaO) hasta obtener hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), liberando calor en el proceso (Lhoist, s.f.). La reacción de hidratación produce 15,300 calorías/mol, siendo su cinética de reacción favorecida hasta una temperatura de 100°C y completándose eficientemente cuando se utiliza un 50% de exceso de agua respecto a la requerida estequiométricamente (Coloma Álvarez, 2008).

El proceso de apagado de la cal o de hidratación, busca producir un hidrato seco con un contenido de agua de 20% aproximadamente, ya que la cal en una forma hidratada es más estable y menos reactiva en comparación al óxido de calcio o cal viva el cual reacciona exotérmicamente en contacto con el agua (Lhoist, s.f.).

## E. Valores de referencia para el diseño de morteros de pega para unidades de mampostería

### 1. Normas para materiales a utilizar en morteros

La normativa COGUANOR NTG 41050 (ASTM C-270) relativa a los morteros de pega para elementos de mampostería, especifica que los materiales usados en la fabricación de dichos morteros deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Materiales cementantes
  - Cementos hidráulicos, tipos UGC, ARI, MRS, ARS, MCH y BCH; especificación NTG 41095 Cementos hidráulicos por desempeño (ASTM C1157).
  - Cemento de mampostería: especificación ASTM C91 Cemento de mampostería
  - Cemento para morteros de pega; especificación ASTM C1329 Cemento para mortero de pega
  - Cal viva; especificación ASTM C5 Cal viva para propósitos estructurales
  - Cal hidratada; especificación NTG 41018 Cal hidratada para la construcción (ASTM C207)
  - Pasta de cal hidratada; especificación ASTM C1489 Pasta de cal para propósitos estructurales
- Agregado
  - Agregados para mortero de pega; especificación ASTM C144 Agregados para morteros de mampostería
- Agua
  - Deberá ser limpia y libre de aceites, ácidos álcalis, sales, materiales orgánicos y de sustancia perjudiciales para el mortero.
- Aditivos
  - Aditivos mejoradores de adherencia, trabajabilidad, acelerantes o retardantes de fraguado, repelentes de agua; especificación ASTM C1384 Aditivos para los morteros de mampostería
  - Pigmentos colorantes; especificación ASTM C979 Pigmentos para concreto coloreado integralmente

### 2. Clasificación de morteros de pega para unidades de mampostería

Generalmente la clasificación de los morteros está dada por normativas nacionales de cada país, según propiedades específicas de resistencia a la compresión, acorde a las características de los materiales utilizados en la preparación. La norma ASTM C270 Especificaciones para morteros de mampostería, clasifica a los



morteros según sus propiedades mecánicas y dosificación; designando cada tipo por las letras: M, S, N, O y K. En esta clasificación de morteros, estos están especificados por proporciones o por propiedades, pero no por ambos casos y se listan según su calidad como se muestra en el Cuadro 3 (Sánchez de Guzmán, 2001).

Cuadro 3. Clasificación ASTM C270 de morteros de pega para mampostería simple, según resistencia a la compresión a 28 días y según dosificación (partes por volumen).

Tipo de mortero	Resistencia a compresión			Cemento Portland	Cemento albañilería	Cal	Agregado fino suelto
	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(psi)				
M	17.2	175	2500	1 1	1 -	0.25	Entre 2.25 y 3 veces la suma de cemento y cal utilizados
S	12.4	126	1800	0.5 1	1 -	0.25 a 0.50	
N	5.2	53	750	- 1	1 -	0.50 a 1.25	
O	2.4	25	350	- 1	1 -	1.25 a 2.50	
K	0.5	5	75	1	-	2.50 a 4.00	

Fuente: *Tecnología del Concreto y del Mortero* (Sánchez de Guzmán, 2001).

La especificación por proporción rige cuando se refiere a la norma ASTM C270; por otra parte, la clasificación por propiedades depende de la resistencia a: la compresión, retención de agua y contenido de aire. Los morteros especificados por proporción deben cumplir con las proporciones descritas en la norma ASTM C270 (ver Cuadros 4 y 5). Los requisitos para las especificaciones aplican para especímenes de laboratorio y no para morteros mezclados preparados en obra. Las proporciones de materiales establecidas para un diseño de mortero en el laboratorio y que cumpla con la norma ASTM C270 deben emplearse en obra al momento de la mezcla del mortero; ya que se espera que el comportamiento observado en laboratorio se mantenga en obra.

Cuadro 4. Requisitos para la especificación por proporciones

Mortero	Tipo	Proporciones por volumen (Materiales comandantes)								Proporción de agregado (medio en condiciones húmedo suelto)
		Cemento hidráulico	Cemento para mortero de pega			Cemento de mampostería			Cal hidratada o pasta de cal	
			M	S	N	M	S	N		
Cemento-cal	M	1	...	...	...	...	...	...	Más ¼	
	S	1	...	...	...	...	...	...	Más de ¼ a ½	
	N	1	...	...	...	...	...	...	Más de ½ a 1 ¼	
	O	1	...	...	...	...	...	...	Más de 1 ¼ a 2 ½	
Cemento para mortero de pega	M	1	...	...	1	...	...	...	...	No menos que 2 ¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	M	...	1	...	...	...	...	...	...	
	S	½	...	...	1	...	...	...	...	
	S	...	...	1	...	...	...	...	...	
	N	...	...	...	1	...	...	...	...	
Cemento de mampostería	O	...	...	...	1	...	...	...	...	
	M	1	...	...	...	...	...	1	...	
	M	...	...	...	...	1	...	...	...	
	S	½	...	...	...	...	...	1	...	
	S	...	...	...	...	...	1	...	...	
	N	...	...	...	...	...	...	1	...	
O	...	...	...	...	...	...	...	1	...	

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca NTG 41050. Mortero de pega para unidades de mampostería. (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35)

Cuadro 5. Requisito para la especificación por propiedades <sup>A</sup>

Mortero	Tipo	Resistencia a la compresión promedio mínima MPa (lb/pulg <sup>2</sup> )	Retención de agua mínima %	Contenido de aire máximo % <sup>B</sup>	Proporción de agregado (medido en condiciones húmedo suelto)
Cemento - cal	M	17.2 (2,500)	75	12	No menos que 2 ¼ y no más que 3 ½ veces de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	12.4 (1,800)	75	12	
	N	5.2 (750)	75	14 <sup>C</sup>	
	O	2.4 (350)	75	14 <sup>C</sup>	
Cemento para mortero de pega	M	17.2 (2,500)	75	12	
	S	12.4 (1,800)	75	12	
	N	5.2 (750)	75	14 <sup>C</sup>	
	O	2.4 (350)	75	14 <sup>C</sup>	
Cemento de mampostería	M	17.2 (2,500)	75	18	
	S	12.4 (1,800)	75	18	
	N	5.2 (750)	75	20 <sup>D</sup>	
	O	2.4 (350)	75	20 <sup>D</sup>	

A. Únicamente para mortero preparado en laboratorio  
 B. Propiedades requeridas para mortero preparado en el laboratorio mezclado con una cantidad de agua para que produzca un flujo de  $110 \pm 5\%$ . El mortero para uso en la obra debe ser mezclado con la máxima cantidad de agua consistente con la trabajabilidad requerida, en orden de proveer suficiente agua para satisfacer el requisito de velocidad de absorción inicial de las unidades de mampostería. Las propiedades del mortero de pega preparado en el laboratorio a un flujo de  $110 \pm 5\%$ , como se requiere por esta especificación, pretenden aproximarse al flujo y propiedades del mortero preparado en obra, después que ha sido colocado y que la succión de las unidades de mampostería haya sido satisfecha.  
 C. Cuando el refuerzo estructural está embebido en un mortero de cemento-cal o en un mortero de cemento para mortero de pega, el máximo contenido de aire debe ser 12%.  
 D. Cuando el estructural está embebido en un mortero de cemento de mampostería, el máximo contenido de aire debe ser 18%.

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca NTG 41050. Mortero de pega para unidades de mampostería. (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012:35)

### 3. Selección del mortero según su uso

Como se mencionó anteriormente, la norma ASTM C270 clasifica originalmente los morteros en cinco tipos, aunque posteriormente se haya eliminado el mortero tipo K. Debido a los diversos factores que intervienen en la aplicación de un mortero, no puede aplicarse un mortero a todos los casos, por lo que se

tiende a variar las proporciones de los materiales en las mezclas para mejorar algunas propiedades específicas. Como regla práctica se acostumbra a utilizar el mortero con la resistencia más baja que se ajusta a los requisitos del trabajo (Arriola Donis, 2009).

Los morteros tipo M son aquellos que ofrecen una durabilidad mayor en comparación al resto de morteros, por lo que es apto para mampostería reforzada con o sin refuerzo sujetas a grandes cargas de compresión. Este tipo es el más adecuado para aquellas estructuras en contacto con el suelo como cimentaciones, muros de contención, aceras, tuberías de aguas servidas y pozos. Los morteros de tipo S, por otra parte, se caracterizan por una alta adherencia y es utilizado en estructuras sujetas a cargas compresivas normales que requieren de alta resistencia de adherencia como en el caso de revestimientos (Arriola Donis, 2009).

El mortero tipo N es un mortero de propósito general, por lo que es adecuado para estructuras sobre el nivel del suelo, como es el caso de paredes internas y divisiones. Por último, el mortero tipo O es de baja resistencia y alto contenido de cal, por lo que su uso es adecuado para paredes y divisiones sin carga al igual que para revestimientos exteriores (Arriola Donis, 2009).

## V. ANTECEDENTES

Existen diversas investigaciones arqueológicas, memorias de proyectos de restauración que se han realizado en sitios arqueológicos mayas en el área de las Tierras Bajas de Petén; así como manuales empíricos que tratan acerca de la elaboración de morteros fabricados artesanalmente para incorporar en los trabajos de conservación y restauración en los sitios arqueológicos. Entre estas se encuentra la realizada por Lorenzo Mora (2019) quien estudió los materiales compatibles con la composición de los estucos en las edificaciones que conforman el sitio arqueológico La Blanca, ubicado en el Departamento de Petén, para garantizar una intervención eficaz y sostenible. En esta investigación se trata de recuperar las técnicas tradicionales y materiales afines para experimentar sobre su proceso de elaboración y proponer un mortero que pueda ser utilizado en la restauración de estucos (recubrimientos) en las estructuras que conforman dicho sitio arqueológico con la proporción 1:3 de cal y arena.

Por otra parte, en la recopilación de criterios de restauración arquitectónicos en el área maya, propuestos por Larios Villalta (2003) recomienda aquellos materiales de mayor compatibilidad con los elementos de fábrica que constituyen las edificaciones de los sitios arqueológicos; por lo que hace hincapié en el uso de argamasas añejadas de cal viva calcinadas artesanalmente a pesar que considera los materiales comerciales como la cal y el cemento Portland apropiados en trabajos de reintegración y cuando se desea obtener morteros con mejores características que aquellos propuestos inicialmente. Por lo anterior la preparación que se propone es de: 1 parte de pasta de cal añeja por 3 partes de arena; y en el caso del uso del cemento Portland se propone no utilizarlo en más de un 5% en las mezclas.

Si bien se han investigado las dosificaciones de materiales para el diseño de morteros para uso en uniones de elementos de mampostería, así como el análisis técnico de los mismos para verificar el cumplimiento con las normativas técnicas aplicables para morteros de pega para elementos de mampostería como lo realizado por Arriola Donis (2009), no se ha estudiado ni propuesto aún, dosificaciones para morteros de pega para elementos de mampostería en trabajos de restauración arqueológica, así como la determinación de sus propiedades resistivas y verificación de cumplimiento con normativas relacionadas a los morteros de pega. Por último, en el área de la investigación arqueológica no se ha realizado estudios técnicos formales que busquen la formulación de morteros para el uso en aplicaciones de restauración y conservación haciendo uso de materiales comerciales para producir materiales de mayor resistencia y en proporciones definidas para alcanzar un grado de aceptabilidad según una norma técnica de construcción.



## VI. METODOLOGÍA

### A. Materiales y métodos

Como fase preliminar al diseño de morteros para el uso en aplicaciones de restauración y conservación arqueológica del área maya de las tierras bajas de Guatemala, se procedió a realizar una investigación de campo para recolectar datos, normativas y experiencia en campo para definir las características adecuadas con las que deberá contar un mortero de pega de elementos de mampostería propuesto para restauración arqueológica.

Se llevó a cabo una exploración y recopilación bibliográfica y entrevistas con personal del Departamento de Conservación y Restauración de Sitios Arqueológicos y Patrimonio (DECORSIAP), del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (DECOBRIC) del Instituto de Antropología e Historia de Guatemala (IDAEH); así como de la Dirección del Departamento de Arqueología de la Universidad del Valle de Guatemala y, arquitectos restauradores en los sitios arqueológicos del Parque Nacional Yaxhá-Nakum-Naranjo y El Mirador en Petén para recolectar información relativa a: los lineamientos de conservación, las características de los materiales y métodos de fabricación de cal artesanal y de las mezclas de morteros utilizados actualmente en trabajos de restauración en sitios arqueológicos.

Se consultaron las normativas aplicables a la conservación de patrimonio, los lineamientos contenidos en las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia y el marco legal guatemalteco en materia de protección del patrimonio y bienes culturales en Guatemala, contenido en la Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación, Decreto Número 26-97 del Congreso de la República de Guatemala.

Para analizar los morteros artesanales que se utilizan en trabajos de restauración en sitios arqueológicos del área de las Tierras Bajas se llevaron a cabo: determinaciones de humedad libre, ensayo de pérdida al fuego, análisis termogravimétricos, difracción de rayos X, y análisis SEM EDS para determinar la composición y características de los materiales empleados para la preparación de los morteros artesanales.

Para determinar el porcentaje de pérdida al fuego (LOI) de los materiales, se llevó a cabo el procedimiento como se indica en la norma ASTM C114 Métodos de Ensayo. Determinación del análisis químico del cemento hidráulico. Para lo cual se calentó una masa determinada de material a una temperatura de 950°C para determinar la pérdida de masa de la muestra al ser calcinada y obtener un indicador de pre-hidratación y carbonatación de la muestra. Para lo cual se utilizó: una balanza, un crisol y una mufla. El procedimiento para determinar el porcentaje de pérdida al fuego fue el siguiente:

1. Se taró un crisol con tapadera.
2. Se transfirió aproximadamente 1g de muestra preparada, tamizada por un mesh número 100 (149  $\mu\text{m}$ ).
3. Se pesó el crisol con tapadera y la muestra.
4. Se calentó la muestra hasta una temperatura aproximada de 400°C durante 30 minutos.
5. Posteriormente, se continuó calentando hasta alcanzar una temperatura de 950°C, la cual se mantuvo durante 20 minutos.
6. Para determinar el porcentaje de pérdida al fuego se utilizó la Ecuación 1.

Ecuación 1. Porcentaje de pérdida al fuego (LOI)

$$LOI, \% = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Donde:

- A, masa del crisol con la muestra antes de calentar
- B, masa del crisol con la muestra después de calentar
- C, masa original de la muestra

Para determinar la humedad libre presente en los materiales, se llevó a cabo el procedimiento como se indica en la norma ASTM C25 Métodos de ensayo estandarizados para el análisis químico de caliza, cal viva y cal apagada. Humedad libre en caliza hidratada. Método. Para lo cual se calentó una masa determinada de material a una temperatura de 110°C para determinar la cantidad de humedad libre contenida en la muestra. El procedimiento para determinar la humedad libre fue el siguiente:

1. Se taró un crisol con tapadera
2. Se pesó 1g de muestra en un crisol con tapadera.
3. Se calentó la muestra en el crisol sin la tapadera en un horno de secado a una temperatura de 110°C durante 2 horas.
4. Se colocó la tapadera al crisol y se colocó en un desecador.
5. Después se procedió a pesar nuevamente el crisol con tapadera.
6. Se determinó la humedad libre con la Ecuación 2.

Ecuación 2. Determinación del porcentaje de humedad libre

$$\text{Humedad libre, \%} = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Donde:

- A, masa del crisol con la muestra antes de calentar
- B, masa del crisol con la muestra después de calentar
- C, masa original de la muestra



Para determinar la composición y características de los materiales empleados para la preparación de los morteros artesanales se llevaron a cabo los siguientes análisis:

1. Para caracterizar y cuantificar la abundancia de los compuestos químicos de las muestras, a través del cambio en masa en función de la temperatura en una atmósfera controlada, se llevó a cabo un análisis termogravimétrico con un sistema de análisis térmico STARe en un equipo Mettler Toledo, con un rango de temperatura desde 30°C hasta 950°C.
2. Para determinar y cuantificar las fases minerales presentes en los morteros artesanales se realizó mediante la técnica analítica de rayos X con afinamiento Retrieved en un equipo Epyreal, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de  $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$  con una duración de 4 minutos por barrido.
3. Para determinar la variación composicional de los morteros artesanales se llevaron a cabo análisis SEM EDS, en un microscopio de barrido electrónico (SEM) y mediante un espectroscopio de energía dispersiva (EDS) se obtuvo una valoración elemental de la composición de los cristales de los materiales que componían los morteros, así como la topografía y el tamaño de los mismos.

Para determinar las características químicas y físicas de los morteros artesanales, la incidencia de los agregados (finos y gruesos) en el desempeño del mortero, así como la granulometría y reactividad de los mismos se llevaron a cabo los siguientes ensayos: ensayo para la determinación de terrones de arcilla y partículas friables en los agregados según la Norma COGUANOR NTG 41010 h10 para agregados finos; granulometría de agregados según la Norma COGUANOR NTG 41010 h1; ensayo para de determinación de la estabilidad de la disgregación de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio según la Norma COGUANOR NTG 41010 h6; análisis químico mediante fluorescencia de rayos X; y ensayo para la determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-carbonato de los agregados según los métodos químicos ASTM C 289 y UNE 146507-2 EX.

Para la determinación aproximada de terrones de arcilla y partículas friables en los agregados, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41010 h10 (ASTM C142) Método de ensayo. Determinación de terrones de arcilla y de partículas friables (desmenuzables) en los agregados. Para lo cual se utilizó una balanza en concordancia con la especificación ASTM C1005, horno de secado, contenedores y tamices según especificación ASTM E11. El procedimiento para la determinación del terrones y partículas friables fue el siguiente:

1. Las muestras de agregado se secaron hasta peso constante a una temperatura de 110°C.
2. Se determinó la masa de la muestra de ensayo y se extendió una capa delgada en el fondo del contenedor y se cubrió con agua destilada, dejando la muestra en remojo durante 24 horas.
3. Se rodaron y apretaron las partículas individuales entre el pulgar y el índice, rompiendo las partículas a tamaños más pequeños.

4. Se clasificaron todas las partículas que pudieron ser rotas con los dedos que pueden ser removidos por tamizado húmedo.
5. Se removieron cuidadosamente las partículas retenidas en el tamiz y se secaron a masa constante a una temperatura de 110°C.
6. Se dejaron enfriar las partículas y se determinó su masa.
7. Se separaron las muestras de agregado fino conservando aquellas más gruesas que el tamiz de 1.18mm (No. 16).

Para la determinación de la granulometría de los agregados finos, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41010 h1. Método de ensayo. Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso. Para lo cual se utilizó una balanza de 0.1% de exactitud, tamices estandarizados según especificación ASTM E11, agitador mecánico de tamices y un horno de secado. El procedimiento para la determinación del terrones y partículas friables fue el siguiente:

1. Se secaron las muestras de ensayo a masa constante a una temperatura de 110°C;
2. Se pesaron 300g de muestra de agregado fino;
3. Se seleccionaron los tamices de tamaño de abertura nominal: 0.075mm, 0.15mm, 0.30mm, 0.60mm, 1.18mm, 2.36mm, 4.75mm y 9.5mm;
4. Se acomodaron los tamices en orden de tamaño de abertura decreciente de arriba hacia abajo y se colocó la muestra en el tamiz superior;
5. Se agitaron los tamices mecánicamente hasta que no más del 1% en masa del material retenido en cualquier tamiz pudiera pasar ese tamiz;
6. Se terminó la masa de cada tamaño de incremento en una balanza; y
7. Se calcularon los porcentajes retenidos totales al 0.1% más cercano respecto a la masa total de la muestra seca inicial.

Para la determinación de la estabilidad a la disgregación de los agregados, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41010 h6. Método de ensayo. Determinación de la estabilidad a la disgregación de los agregados mediante el uso del sulfato de sodio o del sulfato de magnesio. Para lo cual se utilizó una balanza de 0.1% de exactitud, tamices estandarizados según especificación ASTM E11, un horno de secado, recipientes perforados e hidrómetro según especificación ASTM E 100. El procedimiento para la determinación la disgregación de los agregados fue el siguiente:

1. Se preparó una solución saturada de sulfato de sodio disolviendo  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  grado USP, asegurando que la densidad relativa de la solución se encontrara entre 1.151 y 1.174;
2. Se prepararon los agregados finos lavando las muestras en un tamiz de 300  $\mu\text{m}$  (No. 50) y se secó a peso constante a 110°C; seleccionando las muestras de suficiente tamaño para producir 100g

después de ser tamizados a través de los tamices de los siguientes tamaños: 300 $\mu$ m (No. 50), 600 $\mu$ m (No. 30), 1.18mm (No. 16), 2.36mm (No. 8), 4.75mm (No. 4) y 9.5mm (3/8 pulg);

3. Se prepararon las muestras de agregado grueso lavando completamente y secando a 110°C; seleccionando una muestra de 1.5kg y se tamizó a través de los tamices de los siguientes tamaños: 9.5mm (3/8 pulg), 19.0mm (3/4 pulg), 37.5mm (1 ½ pulg) y 63.0mm (2 ½ pulg);
4. Se sumergieron las muestras en la solución saturada de sulfato de sodio por un periodo de tiempo mayor a 16 horas y menor a 18 horas, cubriendo con una capa de 12.5mm de solución saturada sobre la superficie de los agregados;
5. Se drenó la solución de las muestras y se calentó una temperatura de 110°C hasta alcanzar peso constante de la muestra;
6. Se lavaron las muestras enfriadas a temperatura ambiente y después se lavó la muestra con agua a 43°C hasta que la solución de sulfato de sodio se removió por completo de la muestra;
7. Las muestras lavadas se secaron en un horno de secado a una temperatura de 110°C hasta alcanzar peso constante;
8. Se tamizó el agregado fino con los tamices indicados en el numeral 2;
9. Se tamizó el agregado grueso con los tamices indicados en el numeral 3;
10. Se pesaron las masas de los materiales retenidos en los tamices y se registró la cantidad retenida; y
11. Se determinó la pérdida durante el ensayo como la diferencia entre cada cantidad retenida después del ensayo y el peso inicial de la fracción de la muestra ensayada.

Para la determinación de la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma ASTM C289 Método de Ensayo Estándar para Reactividad potencial Álcali-Sílice de Agregados. Para lo cual se utilizó una balanza de 0.1% de exactitud, equipo de trituración y molido, tamices estandarizados según especificación ASTM E11, reactor resistente a la corrosión, baño isotérmico, y un espectrofotómetro UV-VIS. El procedimiento para la determinación de la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados fue el siguiente:

1. Se pesaron tres porciones representativas de 25g de muestra seca para ensayo de 150 a 300 $\mu$ , previamente molida y tamizada;
2. Se colocó una porción en cada reactor y se agregó 25ml de solución de NaOH 1.0N; se agregó la misma cantidad de solución a un cuarto reactor que sirvió como blanco;
3. Se sellaron los reactores y se colocaron en un baño líquido a una temperatura de 80°C durante 24 horas;
4. Después de enfriar los reactores y sin agitar, se decantó la solución del agregado en un crisol Gooch con un papel filtro de grado analítico y se filtró al vacío, recolectando la solución filtrada; para terminar, se rasparon los remanentes y se colocaron en el crisol;

5. Se determinó el sílice disuelto por el método fotométrico, para lo cual se prepararon soluciones de concentración conocida de sílice variando desde 0.0 hasta 0.5 mmol/L a partir de una solución de silicato de sodio para preparar una curva de calibración; y
6. Para obtener la concentración de sílice se leyó la concentración de la solución directamente de la curva de calibración preparada previamente, a partir de soluciones diluidas al 25% de las soluciones filtradas de agregados.

Para la determinación de la reactividad potencial álcali-carbonato de los agregados se llevó a cabo el procedimiento descrito en la Norma UNE 146507-2 EX Ensayos de áridos: determinación de la reactividad potencial de los áridos: método químico. Parte 2, determinación de la reactividad álcali-carbonato. Para lo cual se utilizó triturador de mandíbulas, molino, tamices normalizados de 2.5 y 0.16mm, aparato para medir la densidad óptica de una disolución a 520 y 620nm acorde a la norma UNE-EN 196-2. El procedimiento para la determinación de la reactividad potencial álcali-carbonato de los agregados fue el siguiente:

1. Se redujo el tamaño de los agregados gruesos hasta un tamaño de 2.5mm;
2. Se pesaron muestras representativas de aproximadamente 30g para los agregados finos y gruesos;
3. Se pulverizaron las muestras hasta que todo el material haya atravesado el tamiz normalizado de 0.16mm;
4. Se prepararon soluciones para determinar del contenido de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y alúmina ( $Al_2O_3$ ) según se establece en la norma UNE-EN 196-2;
5. Se procedió a disolver la muestra pulverizada con las soluciones preparadas según la norma UNE-EN 196-2;
6. Se determinó el contenido de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y alúmina ( $Al_2O_3$ ) por medio de fluorescencia de rayos X y se calculó el contenido de los estos mediante las expresiones de los apartados 13.12.2, 13.13.2 y 13.11.2 de la norma UNE-EN 196-2; y
7. Se compararon los contenidos contra una gráfica de la relación CaO/MgO en relación al contenido de  $Al_2O_3$ .

Posterior a la determinación de la composición química, caracterización física y proporciones de los morteros artesanales de restauración y la definición de las características deseadas para el mortero propuesto, así como el cumplimiento de las normas y convenios en materias de conservación del patrimonio se establecieron los siguientes materiales como los más adecuados para ser incluidos en las formulaciones de los diseños propuestos:

1. Agua potable,
2. cal hidráulica,
3. agregados (finos y gruesos) reciclados de excavaciones en sitios arqueológicos, y
4. cemento hidráulico.

## B. Ensayos

A partir de los materiales indicados en el inciso anterior, se procedió a realizar ensayos de las formulaciones propuestas o diseños para el mortero de restauración variando las proporciones de los materiales (como se indica en el Cuadro 6). Los ensayos correspondientes para determinar los rangos de valores técnicos de las propiedades de los morteros propuestos se llevaron a cabo según se establece en la Normativa Técnica Guatemalteca: NTG 41050 (ASTM C270) Mortero de pega para unidades de mampostería. Las características que se evaluaron para todos los diseños propuestos y el control fueron: porcentaje de flujo, porcentaje de retención de agua, masa unitaria húmeda, porcentaje de aire, resistencia a la compresión y a la adherencia a 7 y 28 días.

Cuadro 6. Proporciones de materiales para diseños propuestos de mortero

Diseño	Cal	Arena	Cemento <sup>F</sup>
Artisanal (Referencia)	1 <sup>A</sup>	2 <sup>D</sup>	0
Diseño 1	1 <sup>B</sup>	1.5 <sup>D</sup>	0
Diseño 2	1 <sup>C</sup>	2 <sup>D</sup>	0
Diseño 3	1 <sup>B</sup>	2	1/11
Diseño 4	1 <sup>B</sup>	2 <sup>D</sup>	1/9
Diseño 5	1 <sup>B</sup>	2 <sup>E</sup>	1/6
Diseño 6	1 <sup>B</sup>	2 <sup>D</sup>	1/5
Diseño 7	1 <sup>B</sup>	2 <sup>D</sup>	1/4

Observaciones:

<sup>A</sup> Pasta de cal artesanal añeja (Parque Nacional Yaxhá)

<sup>B</sup> Cal Horcalsa Tipo Especial

<sup>C</sup> Cal Chapina

<sup>D</sup> Agregados reciclados cernidos con tamiz ¼” (Parque Nacional Yaxhá)

<sup>E</sup> Agregados reciclados cernidos con tamiz ¼” sin finos por debajo de 1/16” (Parque Nacional Yaxhá)

<sup>F</sup> Cemento hidráulico tipo UG, Cemento UGC 4000psi

Para preparar los diseños, éstos se mezclaron como se indica en la normativa NTG 41050 (ASTM C270) Mortero de pega para unidades de mampostería. Para lo cual se utilizó un mezclador eléctrico para cemento, una paleta mezcladora helicoidal, un recipiente de mezcla, un raspador y un recipiente medidor de 1 litro de capacidad. El procedimiento para la mezcla de los diseños fue el siguiente:

1. Se vertieron los materiales para para una amasada en el recipiente de mezclado iniciando con el agregado fino;

2. Después se agregó la cal y el cemento y se mezcló durante 30 segundos, aproximadamente, a una velocidad lenta;
3. Posteriormente se agregó lentamente agua en una cantidad suficiente para para obtener un flujo de  $110 \pm 5\%$  en mientras se continuaba mezclando;
4. Se detuvo la mezcladora y se cambió a una velocidad media y se mezcló durante 30 segundos;
5. Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar el mortero durante 90 segundos y se arrastró hacia el fondo el mortero adherido a la pared del recipiente; por último,
6. Se mezcló durante 60 segundos a una velocidad media.

Para determinar la cantidad de agua necesaria en la mezcla se agregó agua hasta que la mezcla tuviera un flujo de  $110 \pm 5\%$ , según se indica en la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41003 h13 (ASTM C1437) Método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico. Para lo cual se utilizó una mesa de flujo y molde para los especímenes de flujo, un calibrador para medir el flujo y apisonador, paleta y una regla recta. El procedimiento para la determinación del flujo fue el siguiente:

1. Se limpió y secó la mesa superior del flujo y se colocó el molde de flujo al centro;
2. Se colocó una capa de mortero de aproximadamente 2.5 cm de espesor y se golpeó uniformemente 20 veces con el apisonador;
3. Luego se llenó el molde con mortero y se apisonó uniformemente 20 veces con el apisonador;
4. Se enrasó el molde con mortero hasta obtener una superficie plana con el borde superior del molde, pasando el canto de la espátula con un movimiento aserrado;
5. Se levantó el molde del mortero, un minuto después de haber completado la operación de mezclado;
6. Se dejó caer la mesa superior de flujo 25 veces en 15 segundos;
7. Se midió el diámetro del mortero a lo largo de las 4 líneas grabadas en el tope de la mesa superior del flujo con el calibrador (especificado en la norma NTG 41011) y se registraron los diámetros como el número de divisiones del calibrador;
8. Por último, se sumaron las 4 lecturas del calibrador y se dividió el total dentro del diámetro interior del molde del mortero (Ecuación 3).

Ecuación 3. Determinación de porcentaje de flujo

$$\% \text{ Flujo} = \frac{\sum \Phi_i}{\Phi_{\text{interior molde}}} \times 100$$

Para determinar la retención de agua, ésta se determinó según la normativa NTG 41104 h2 (ASTM C1506-17) Método de ensayo. Determinación de la retención de agua en morteros a base de cemento hidráulico y cernidos. Para lo cual se utilizó: un apisonador una regla, mesa de flujo, papel filtro tipo 1 clase B de 150 mm de diámetro, un medidor de vacío, una bomba de vacío y un aparato de filtración compuesto por un plato perforado sobre un embudo conectado por una llave a de paso de tres vías a un matraz de vacío de 1 litro de capacidad. El procedimiento para determinar la retención de agua fue el siguiente:

1. Se colocó el papel filtro humedecido en el fondo del plato del embudo y se verificó que no hubiera fugas en el sistema de vacío;
2. Se ajustó el vacío a 7.0 kPa y se cerró el vacío;
3. Se determinó el flujo como se indicó en anteriormente, siguiendo el método de ensayo contenido en la norma NTG 41003 h13 (ASTM C1437);
4. Después se devolvió el mortero al recipiente de mezcla y se mezcló por 15 segundos a velocidad media e inmediatamente después al mezclado;
5. Se llenó el plato perforado con el material ligeramente por encima del borde;
6. Se apisonó 15 veces el plato en su borde y en puntos aleatorios en la muestra;
7. Se llenó y alisó al ras del plato con una regla;
8. Se aplicó vacío al mortero durante 60 segundos;
9. Se deslizó el plato fuera del embudo retirando el agua restante en la parte inferior del plato y se procedió a determinar el flujo de la muestra cómo se indica en el método de ensayo de la norma NTG 41003 h13 (ASTM C1437).
10. La retención de agua para el mortero se determinó utilizando la Ecuación 4.

Ecuación 4. Retención de agua

$$\% \text{ Retención de agua} = \frac{\% \text{ Flujo mezclado inicial}}{\% \text{ Flujo después de succión}} \times 100$$

Para determinar el contenido de aire, se llevó a cabo el procedimiento como se indica en la norma UNE-EN 1015-7 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. Para lo cual se utilizó un recipiente de 1 litro con tapa metálica con una cámara de aire estanca con manómetro acoplada, un apisonador, una paleta y regla para enrasar. El procedimiento para la determinación del contenido de aire fue el siguiente:

1. Se determinó el valor del flujo del mortero como se describe en la Norma NTG 41003 h13;
2. Se utilizó una muestra de 1.5 litros de mortero fresco;
3. Se llenó el recipiente con mortero en cuatro capas de grosor similar, apisonando con 10 golpes cada capa;
4. Se eliminó el exceso de mortero y se enrasó el recipiente, se limpió el mismo y se colocó la tapa;
5. Se cerró la válvula de aireación entre la cámara de aire y el recipiente y se llenó el espacio de aire entre la tapa y la superficie del mortero con agua inyectada a través de una válvula secundaria hasta que se llenó el espacio vacío manteniendo una tercera válvula abierta;
6. Se inyectó aire en la cámara de aire hasta alcanzar una presión estable. Se cerraron las válvulas secundaria y terciaria;
7. Se abrió la válvula de aireación hasta alcanzar el equilibrio, y se procedió a leer el contenido de aire en el manómetro; y

8. Se calculó el contenido de aire como el valor medio de los valores individuales de dos muestra de mortero.

Para determinar la resistencia a la compresión se determinó como se indica en la norma NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M) Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado. Para lo cual se utilizaron: balanza, moldes de especímenes cúbicos de 50 mm, apisonador, espátula, gabinete (conforme la especificación ASTM C511) y una máquina hidráulica de compresión (conforme la especificación ASTM E4). El procedimiento para determinar la resistencia fue el siguiente:

1. Después de haber determinado el flujo del mortero, se retomó el mortero en el recipiente de mezclado y se mezcló por 15 segundos a velocidad media;
2. Se aplicó un recubrimiento delgado de desenfocante en las caras interiores del molde, y se limpió el exceso;
3. Se sellaron las superficies de las juntas del molde aplicando un recubrimiento de grasa liviana y se limpió el exceso;
4. Se sellaron los moldes a sus placas con un sellante estanco para efectuar un sello hermético en las líneas de contacto externas entre el molde y la placa base;
5. Se completó la consolidación del mortero en los moldes apisonando manualmente, colocando una capa de 25 mm en el fondo del molde y apisonando 32 veces;
6. Se llenó el molde con mortero y se procedió a apisonar como en la primera capa y se niveló y enrasó el mortero en el molde con una espátula
7. Se almacenaron los moldes sobre sus placas planas en un gabinete de curado por 72 horas, exponiendo sus superficies superiores al aire húmedo.
8. Se liberaron los cubos de los moldes y se sumergieron en agua saturada de cal en el gabinete durante 7 días hasta realizar el primer ensayo y durante 28 días para realizar el segundo ensayo;
9. Al finalizar el tiempo de curado, se secaron los especímenes y se revisó la planicidad de las caras del cubo;
10. Se sometieron a carga las caras verdaderamente planas del cubo y se aplicó una carga sobre el espécimen con el rango de 200 a 400 lb/s;
11. Por último, se registró la carga total indicada en la máquina de ensayo y se calculó la resistencia a la compresión como se indica en la Ecuación 7.

Ecuación 5. Resistencia a la compresión

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde:

$f_m$ , resistencia a la compresión [lb/pulg<sup>2</sup>, psi]

P, carga total máxima [lb]



A, área de la superficie cargada [pulg<sup>2</sup>]

Para determinar la resistencia a la adherencia se llevó a cabo el procedimiento descrito en la norma: NTG 41050 h7 (ASTM C952) Método de ensayo. Determinación de la resistencia de adherencia por tracción del mortero de pega y las unidades de mampostería. Para lo cual se utilizaron ladrillos de barro cocido (conforme especificación ASTM C67) y el diseño de mortero de pega propuesto preparado acorde la norma NTG 41050 (ASTM C270). El procedimiento para determinar la adherencia de los diseños propuestos fue el siguiente:

1. Se preparó el espécimen de ensayo de manera que se formará una cruz con los dos ladrillos al colocarlos de manera perpendicular uno sobre el otro, unidos entre sí por el mortero de pega;
2. Se curaron los especímenes en bolsas cerradas herméticamente por 7 días;
3. Transcurridos los 7 días de almacenamiento, se removieron de la bolsa y se almacenaron a una temperatura de  $24 \pm 8^\circ\text{C}$  y una humedad relativa entre 30 y 70%;
4. Se colocaron los especímenes entre los aplicadores de carga superior e inferior y se colocó el ensamble en la máquina de ensayos centrado respecto al eje vertical de los cabezales;
5. Se cargó el espécimen a una velocidad de 2.7 kN (600lb) por minuto para causar la falla del mismo en 1 o 2 minutos; se registró;
6. Se registró la máxima carga aplicada y el tipo de falla experimentados por el espécimen.; y,
7. Se calculó la resistencia de adherencia por tracción máxima utilizando la Ecuación 8.

Ecuación 6. Resistencia a la adherencia por tracción

$$T \text{ [lb/pulg}^2\text{]} = \frac{A \text{ [lb]}}{B \text{ [pulg}^2\text{]}}$$

Donde:

T, resistencia a la adherencia por tracción [lb/pulg<sup>2</sup>]

A, carga total aplicada [lb]

B, área de la sección transversal de adherencia [pulg<sup>2</sup>]

## C. Propuesta de formulación

Para la establecer la formulación del mortero de restauración propuesto, a partir del ensayo de formulación que cumplió con los requisitos contenidos en la norma NTG 41050 (ASTM 270) y los requisitos de conservación y restauración contenidos en las Cartas de Atenas, Venecia, Cracovia y la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación:

1. Se compararon las características y el desempeño de los diseños propuestos con los requisitos establecidos en la Norma NTG 41050.

2. Se consideraron los requisitos de materiales para conservación contenidos en las Cartas de Atenas, Venecia, Cracovia y la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación.
3. Se determinó la masa de los materiales que componían las proporciones de la fórmula propuesta.
4. Se listaron los parámetros de fabricación del mortero propuesto según la fórmula cuyas características y desempeño en las pruebas de laboratorio se ajustaron de mejor manera a las normas y requisitos previamente listados.
5. Se consultaron precios de mercado de los materiales que constituyen la fórmula propuesta para obtener el costo de fabricar el mortero de restauración.

## VII. RESULTADOS

Cuadro 7. Determinación de humedad libre de morteros y materiales actuales <sup>A</sup>

No.	Muestra	Humedad Libre $\pm 0.005\%$
1	Pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá; sin fecha)	42.23
2	Losa fundida hecha con Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá; mayo 2019)	4.64
3	Losa fundida hecho con cal artesanal (Edificio 13, Yaxhá; septiembre 2017)	21.19
4	Pasta de cal Horcalsa y material reciclado (Yaxhá; sin fecha)	10.50
5	Cal artesanal añejada en agua (Yaxhá; febrero 2017)	24.55
6	Cal Horcalsa añejada en agua (Yaxhá; marzo 2021)	29.50

<sup>A</sup> Determinado a 110 °C durante 2 horas

Cuadro 8. Pérdida al fuego de morteros y materiales actuales (950 °C) <sup>B</sup>

No.	Muestra	LOI $\pm 0.005\%$
1	Pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá; sin fecha)	40.05
2	Losa fundida hecha con Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá; mayo 2019)	41.05
3	Losa fundida hecha con cal artesanal (Edificio 13, Yaxhá; septiembre 2017)	40.91
4	Pasta de cal Horcalsa y material reciclado (Yaxhá; sin fecha)	37.08
5	Cal artesanal añejada en agua (Yaxhá; febrero 2017)	29.15
6	Cal Horcalsa añejada en agua (Yaxhá; marzo 2021)	28.58

<sup>B</sup> Expresada como porcentaje en masa (w/w)

Figura 1. Análisis termogravimétrico de pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá, sin fecha)

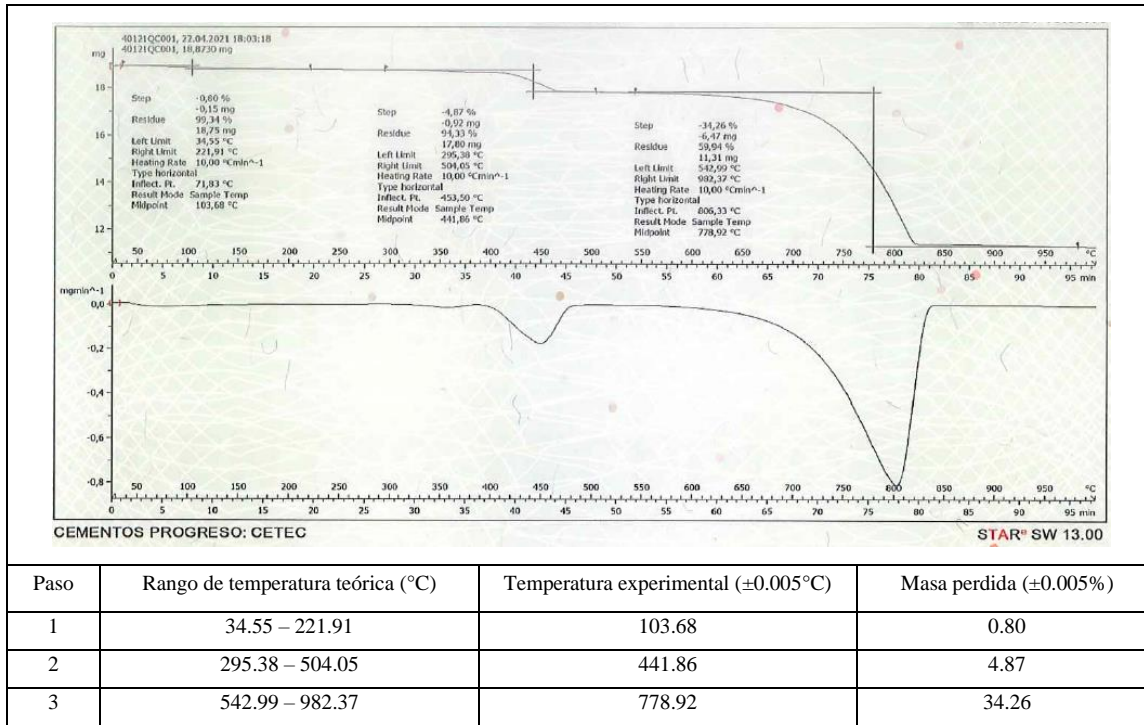


Figura 2. Análisis termogravimétrico de losa fundida hecha con cal Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá, mayo 2019)

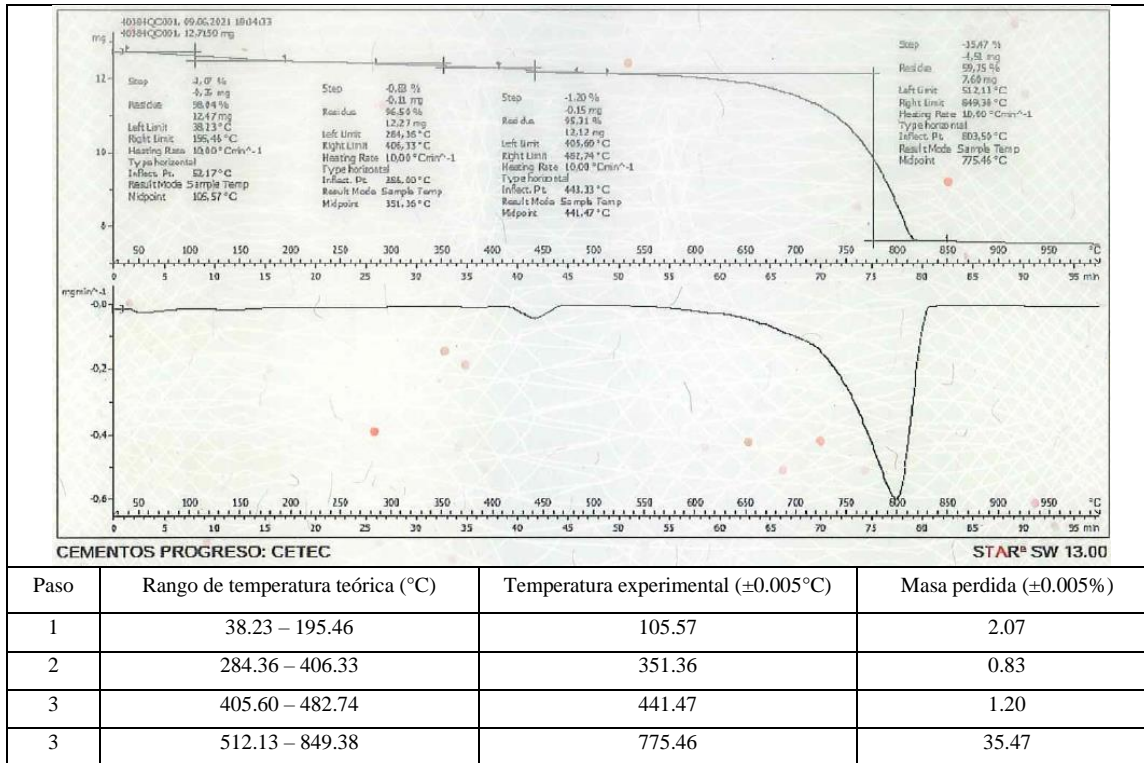


Figura 3. Análisis termogravimétrico de losa fundida hecha con cal artesanal (Edificio 13, Yaxhá, septiembre 2017)

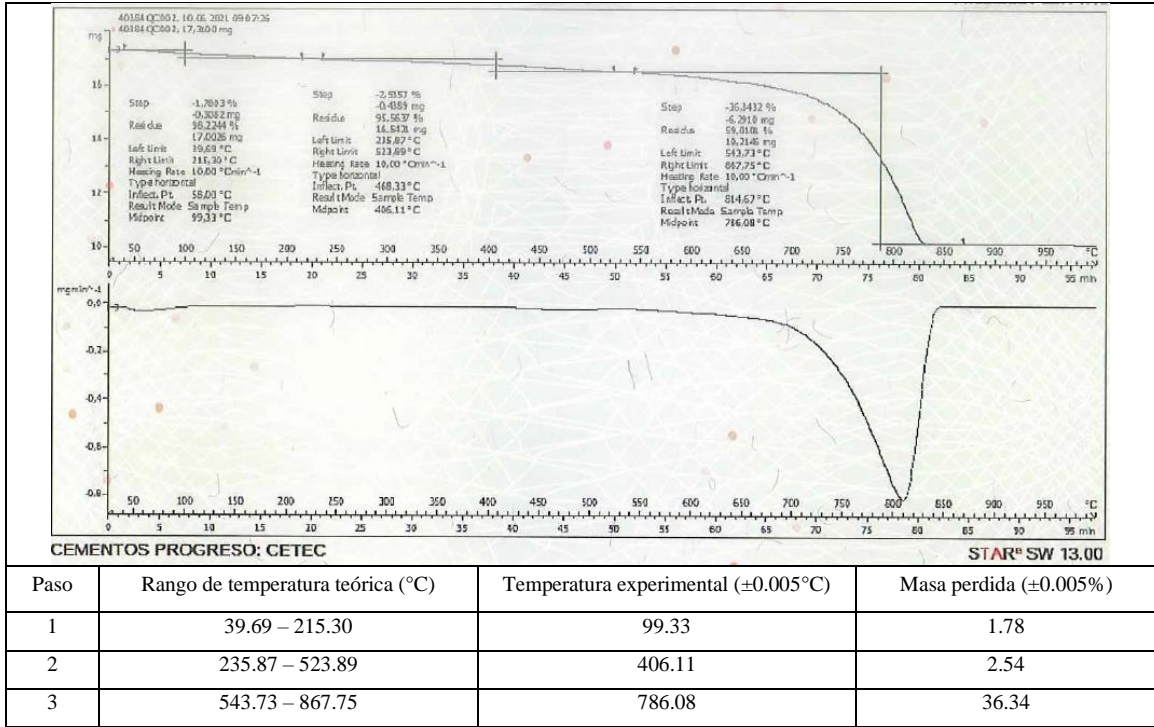


Figura 4. Análisis termogravimétrico de pasta de cal Horcalsa y material reciclado (Yaxhá, sin fecha)

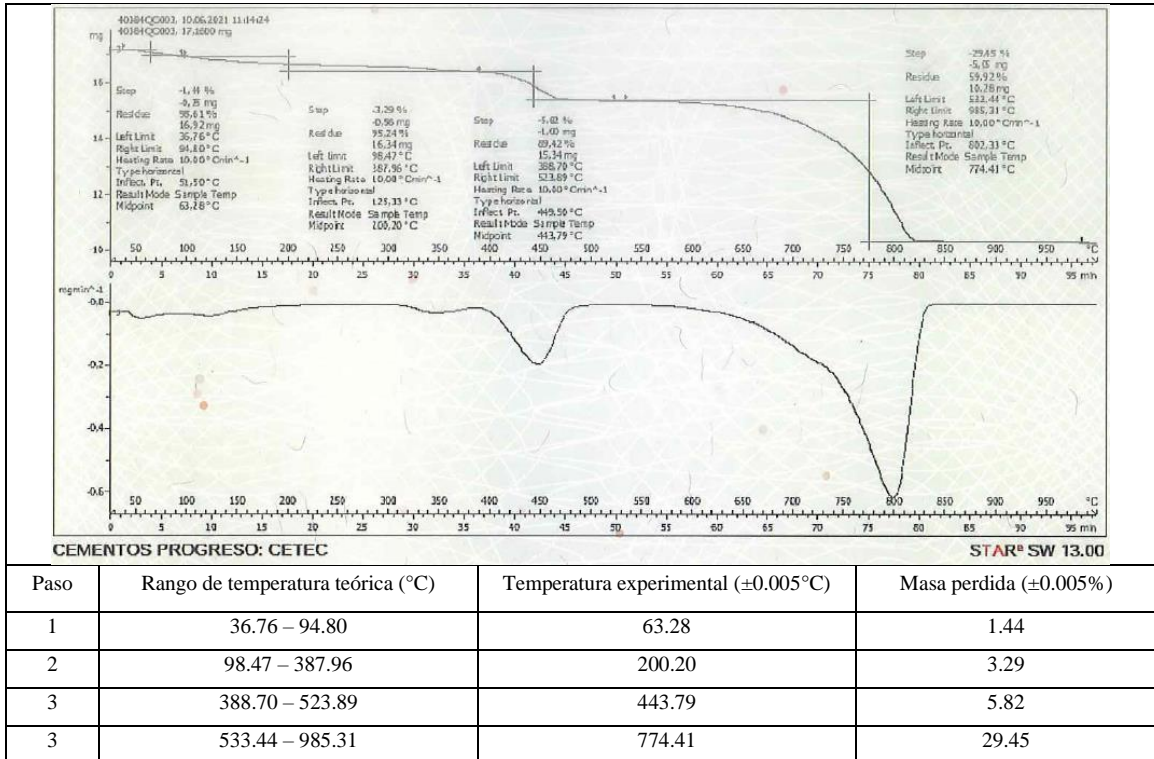




Figura 5. Análisis termogravimétrico de cal artesanal añejada en agua (Yaxhá, febrero 2017)

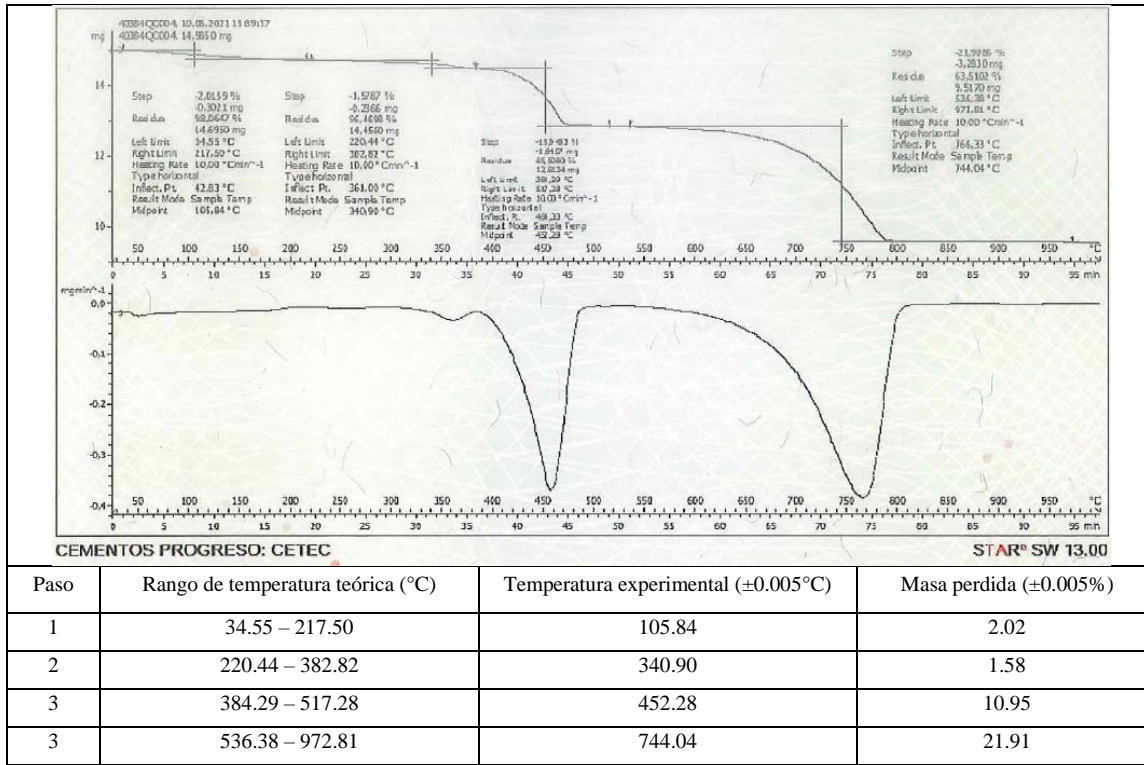
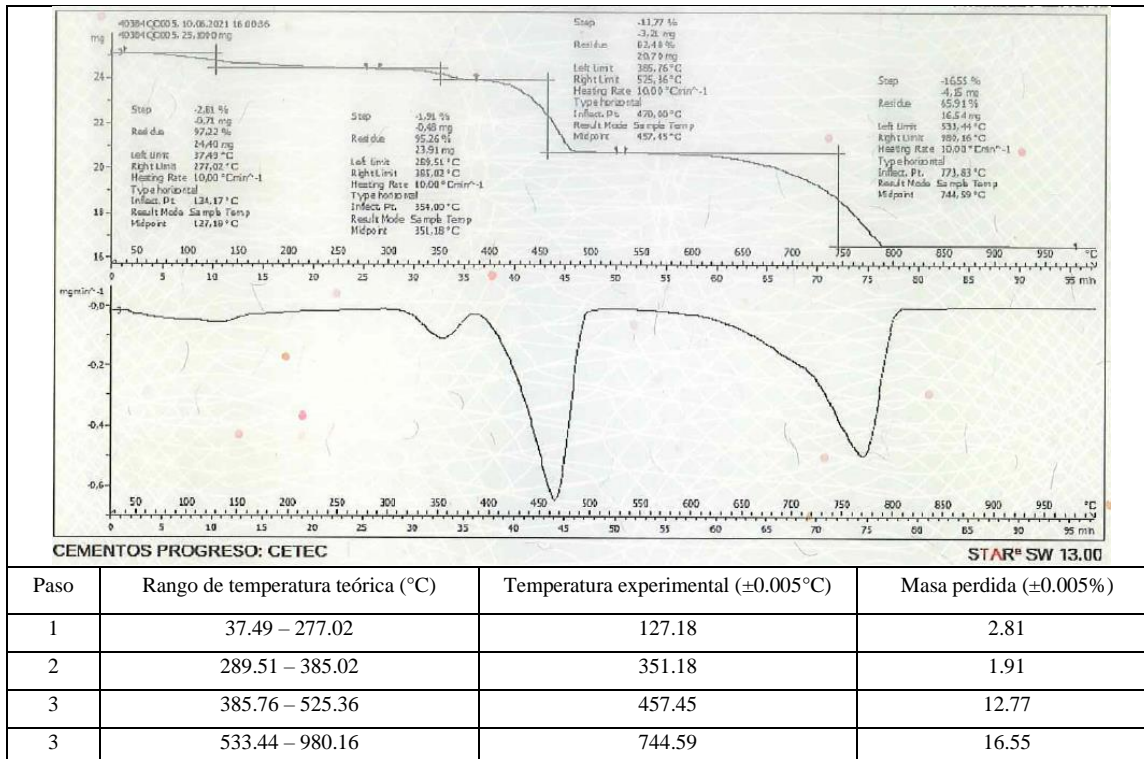


Figura 6. Análisis termogravimétrico de cal Horcalsa añejada en agua (Yaxhá, marzo 2021)



Cuadro 9. Cuantificación de las fases minerales por difracción de rayos X de morteros y materiales actuales

No.	Muestra	Concentración $\pm 0.005\%$ p/p		
		Calcita CaCO <sub>3</sub>	Dolomita CaMgCO <sub>3</sub>	Portlandita Ca(OH) <sub>2</sub>
1	Pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá; sin fecha)	69.90	18.60	12.10
2	Losa fundida hecha con Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá; mayo 2019)	84.00	15.70	0.30
3	Losa fundida hecha con cal artesanal (Edificio 13, Yaxhá; septiembre 2017)	0.00	100.00	0.00
4	Pasta de cal Horcalsa y material reciclado (Yaxhá; sin fecha)	43.440	23.20	33.40
5	Cal artesanal añejada en agua (Yaxhá; febrero 2017)	8.80	6.60	84.60
6	Cal Horcalsa añejada en agua (Yaxhá; marzo 2021)	0.00	0.00	100.00

Cuadro 10. Análisis mineralógico de morteros y materiales actuales seleccionados

No.	Muestra	Especie	SEM	
			Presencia (cantidad)	Tamaño promedio ( $\mu\text{m}$ )
1	Pasta de cal artesanal con material selecto (Yaxhá; sin fecha)	CaCO <sub>3</sub>	Si (3)	52.2 $\pm$ 0.09
		CaMgCO <sub>3</sub>	Si (7)	72.0 $\pm$ 0.13
		Ca(OH) <sub>2</sub>	No	No determinado
		CaB <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	Si (1)	No determinado
2	Losa fundida hecha con Horcalsa (Juego de pelota, Yaxhá; mayo 2019)	CaCO <sub>3</sub>	Si (5)	115.8
		CaMgCO <sub>3</sub>	No	No determinado
		Ca(OH) <sub>2</sub>	No	No determinado
		CaCO <sub>2</sub>	Si (1)	92.4 $\pm$ 0.05
		Ca <sub>3</sub> C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si (1)	26.7 $\pm$ 0.05
	Ca <sub>2</sub> CO	Si (1)	No determinado	
5	Cal artesanal añejada en agua (Yaxhá; febrero 2017)	CaCO <sub>3</sub>	Si (6)	123.0 $\pm$ 0.12
		CaMgCO <sub>3</sub>	Si (1)	No determinado
		Ca(OH) <sub>2</sub>	No	No determinado
		CaO	Si (3)	89.5 $\pm$ 0.09

Cuadro 11. Pérdida al fuego de agregados (950°C) <sup>c</sup>

No.	Muestra	±0.005%
1	Agregado fino	42.04
2	Agregado grueso	42.88

<sup>c</sup> Expresado como porcentaje en masa (w/w)

Cuadro 12. Cuantificación de las fases minerales de agregados por difracción de rayos X

No.	Muestra	Concentración ±0.005% p/p		
		Calcita CaCO <sub>3</sub>	Dolomita CaMgCO <sub>3</sub>	Cuarzo SiO <sub>2</sub>
1	Agregado fino	98.80	0.00	1.20
2	Agregado grueso	93.90	4.60	1.50

Cuadro 13. Determinación de terrones de arcilla y partículas friables en los agregados

Muestra	Pérdida ±0.05%
Agregado fino	1.2

Figura 7. Determinación de la granulometría de agregado fino

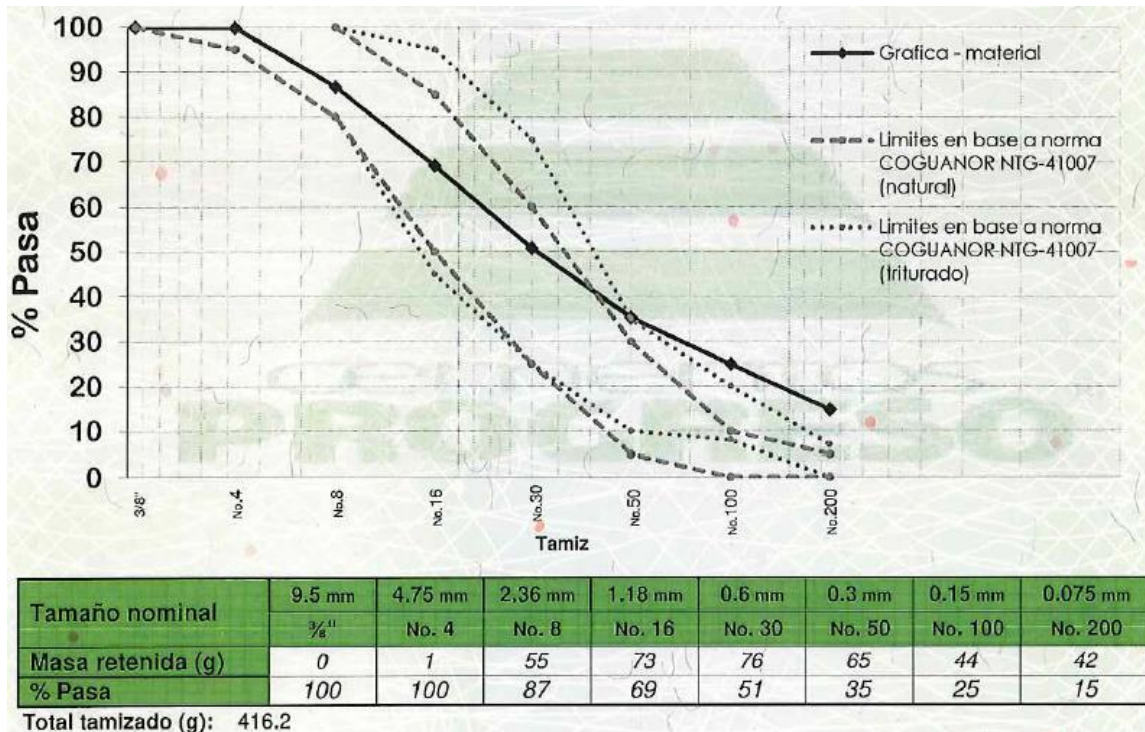
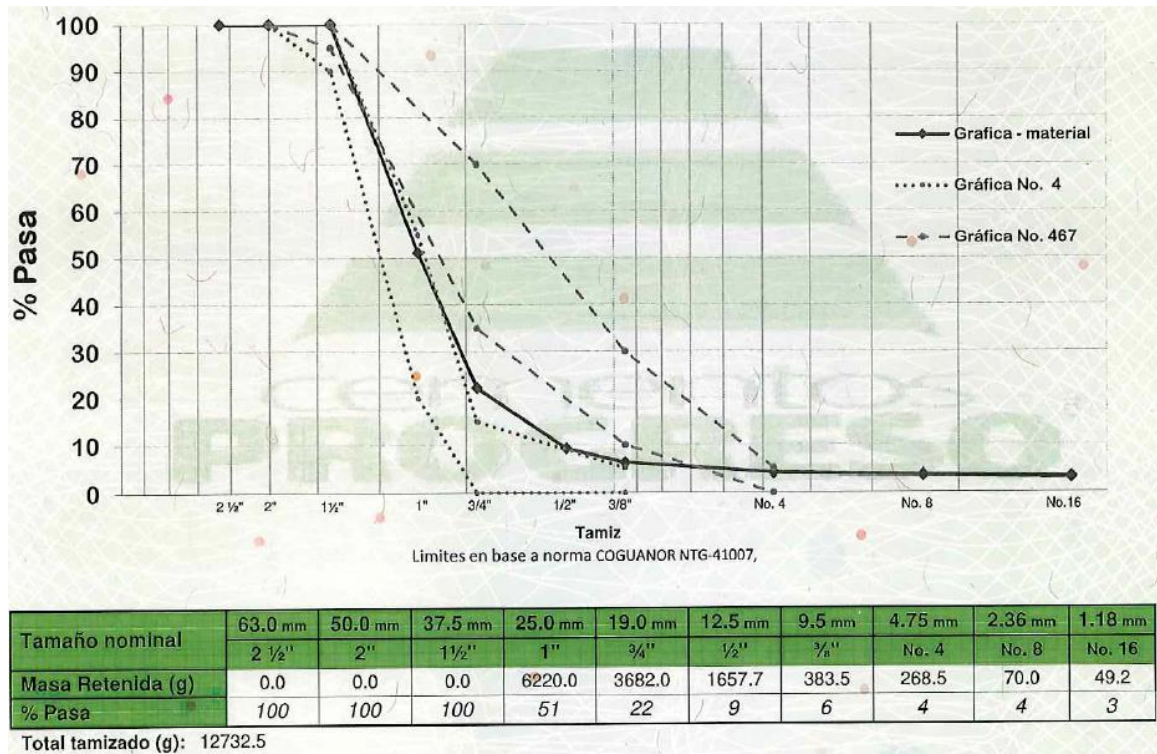




Figura 8. Determinación de la granulometría de agregado grueso



Cuadro 14. Estabilidad a la disgregación de los agregados finos mediante el uso de sulfato de sodio

Fracciones				Graduación por fracción %	Masa por fracción (g)		Pérdida por fracción %	Promedio ponderado %
Pasa		Retenido			Antes del ensayo	Después del ensayo		
tamiz	mm	tamiz	mm					
3/8"	9.50	No. 4	4.75	0.1	--	--	68.8	0.1
No. 4	4.75	No. 8	2.36	13.2	100.0	31.2	68.8	9.1
No. 8	2.36	No. 16	1.18	17.5	100.0	48.5	54.5	9.0
No. 16	1.18	No. 30	0.60	18.4	100.0	47.2	52.8	9.7
No. 30	0.60	No. 50	0.30	15.5	100.0	55.1	44.9	7.0
No. 50	0.30	No. 100	0.15	10.5	--	--	--	--
			Fondo	24.9	--	--	--	--
Totales				100				35

Cuadro 15. Estabilidad a la disgregación de los agregados gruesos mediante el uso de sulfato de sodio

Fracciones				Graduación por fracción %	Masa por fracción (g)		Pérdida por fracción %	Promedio ponderado %
Pasa		Retenido			Antes del ensayo	Después del ensayo		
tamiz	mm	tamiz	mm					
2 ½"	63.0	1 ½"	37.5	0.0	--	--	12.3	0.0
1 ½"	37.5	¾"	19.0	77.8	1502.7	1318.1	12.3	9.6
¾"	19.0	3/8"	9.5	16.0	1003.7	845.2	15.8	2.5
3/8"	9.5	No. 4	4.75	2.1	300.7	229.1	23.8	0.5
			Fondo	4.1	--	--	23.8	1.0
Totales				100				14

Cuadro 16. Examen cualitativo de agregados gruesos

Fracciones				Acción producida por el ensayo								No. Total de partículas antes del ensayo
Pasa		Retenido		Rotura		Desmoronamiento		Agrietamiento		Escamas		
tamiz	mm	tamiz	mm	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	
2 ½"	63.0	1 ½"	37.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1 ½"	37.5	¾"	19.0	9	17	8	15	5	9	0	0	54

Figura 9. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice del agregado fino

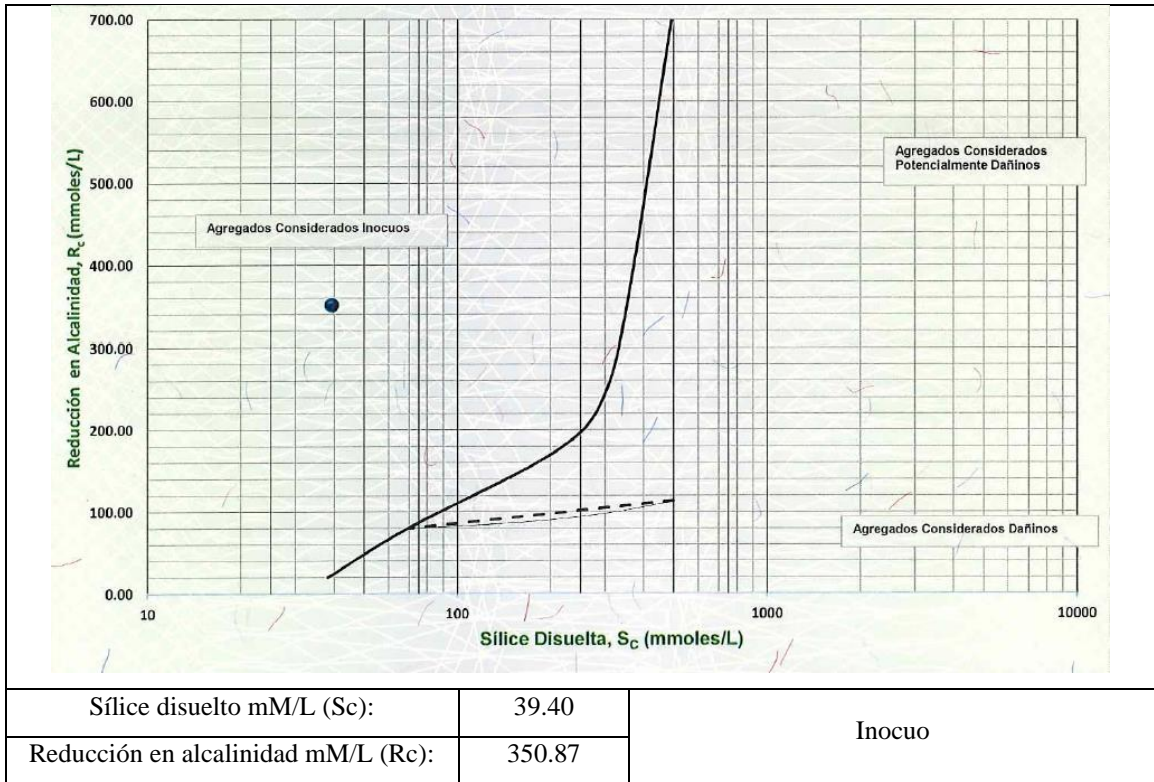


Figura 10. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice del agregado grueso

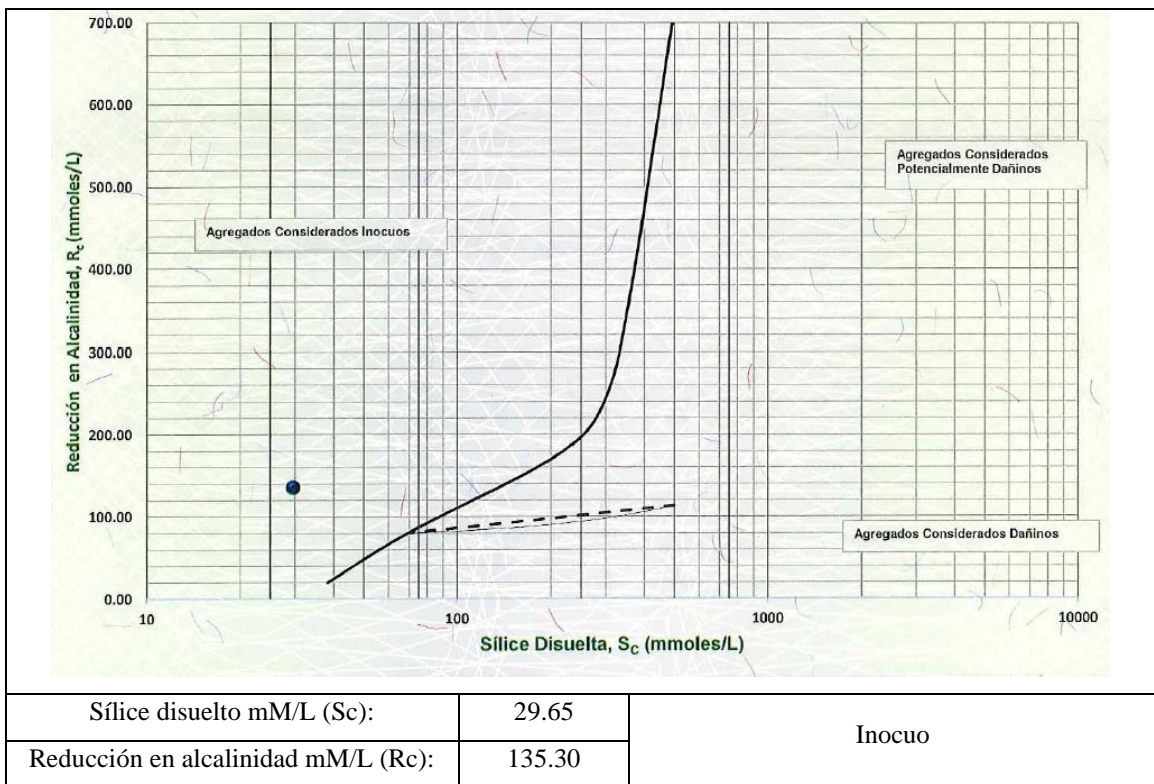




Figura 11. Determinación de la reactividad álcali-carbonato del agregado fino

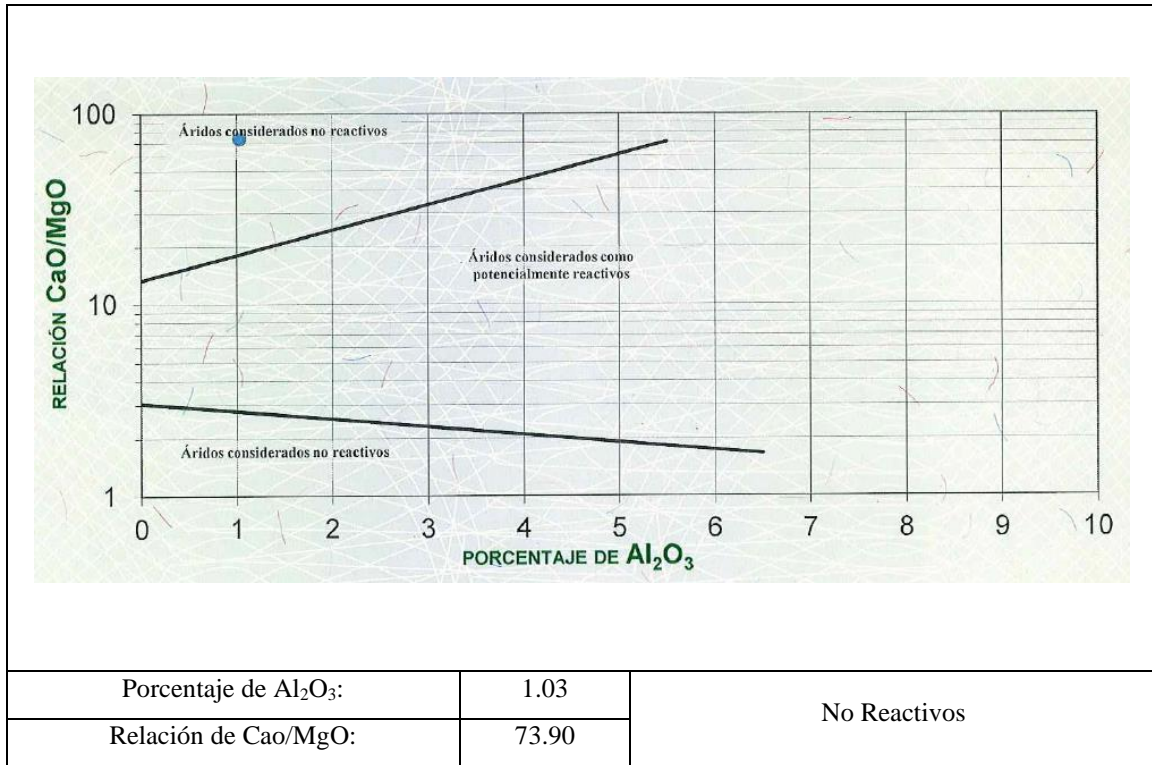
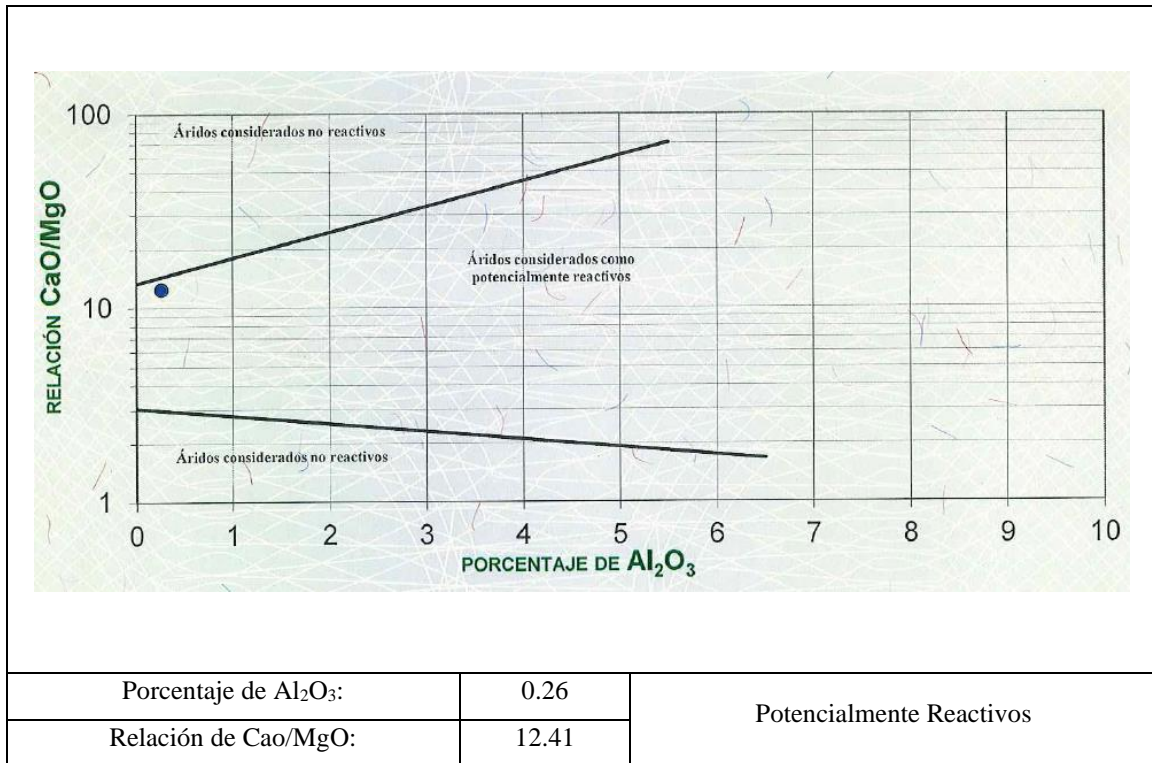


Figura 12. Determinación de la reactividad álcali-carbonato del agregado grueso



Cuadro 17. Porcentaje de flujo de diseños propuestos en estado fresco

No.	Diseño	Flujo (%)
1	Artesanal (Referencia)	108.5 ±0.05
2	Diseño 1	105.0 ±0.05
3	Diseño 2	112.0 ±0.05
4	Diseño 3	110.8 ±0.07
5	Diseño 4	108.0 ±0.05
6	Diseño 5	107.3 ±0.09
7	Diseño 6	113.0 ±0.05
8	Diseño 7	109.5 ±0.07

Cuadro 18. Porcentaje de retención de agua de los diseños propuestos en estado fresco

No.	Diseño	Retención de agua (%)
1	Artesanal (Referencia)	83.0 ±0.05
2	Diseño 1	83.0 ±0.05
3	Diseño 2	82.0 ±0.05
4	Diseño 3	92.5 ±0.07
5	Diseño 4	81.0 ±0.05
6	Diseño 5	79.3 ±0.09
7	Diseño 6	84.0 ±0.05
8	Diseño 7	83.0 ±0.07

Cuadro 19. Masa unitaria húmeda de los diseños propuestos en estado fresco

No.	Diseño	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	Artesanal (Referencia)	1566.0 ±0.05
2	Diseño 1	1634.0 ±0.05
3	Diseño 2	1652.0 ±0.05
4	Diseño 3	1834.5 ±0.07
5	Diseño 4	1640.0 ±0.05
6	Diseño 5	1635.0 ±0.09
7	Diseño 6	1628.0 ±0.05
8	Diseño 7	1651.5 ±0.07

Cuadro 20. Porcentaje de aire en los diseños propuestos en estado fresco

No.	Diseño	Aire (%)
1	Artesanal (Referencia)	4.6 ±0.05
2	Diseño 1	4.5 ±0.05
3	Diseño 2	6.0 ±0.05
4	Diseño 3	3.6 ±0.07
5	Diseño 4	4.4 ±0.05
6	Diseño 5	4.7 ±0.09
7	Diseño 6	4.3 ±0.05
8	Diseño 7	4.0 ±0.07

Cuadro 21. Resistencia a la compresión de los diseños propuestos en estado endurecido

No.	Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)	
		7 Días	28 Días
1	Artesanal (Referencia)	0.1862 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	0.4413 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
2	Diseño 1	0.5033 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.0756 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
3	Diseño 2	0.5171 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.6961 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
4	Diseño 3	1.2135 ±4.875 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.2204 ±4.875 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
5	Diseño 4	0.8136 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.6961 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
6	Diseño 5	0.8343 ±5.971 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.6927 ±5.971 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
7	Diseño 6	1.6547 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	1.8340 ±3.447 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>
8	Diseño 7	1.8995 ±4.875 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>	3.2164 ±4.875 <sub>x10</sub> <sup>-4</sup>

Cuadro 22. Resistencia a la adherencia de los diseños propuestos en estado endurecido

No.	Diseño	Resistencia a la adherencia (MPa)	
		7 Días	28 Días
1	Artesanal (Referencia)	No registró	No registró
2	Diseño 1	$0.0207 \pm 3.447_{x10^{-4}}$	$0.0207 \pm 3.447_{x10^{-4}}$
3	Diseño 2	$0.0276 \pm 3.447_{x10^{-4}}$	$0.0345 \pm 3.447_{x10^{-4}}$
4	Diseño 3	$0.0552 \pm 4.875_{x10^{-4}}$	$0.0862 \pm 4.875_{x10^{-4}}$
5	Diseño 4	$0.0414 \pm 3.447_{x10^{-4}}$	$0.0689 \pm 3.447_{x10^{-4}}$
6	Diseño 5	$0.0483 \pm 5.971_{x10^{-4}}$	$0.0848 \pm 5.971_{x10^{-4}}$
7	Diseño 6	$0.0620 \pm 3.447_{x10^{-4}}$	$0.0965 \pm 3.447_{x10^{-4}}$
8	Diseño 7	$0.0965 \pm 4.875_{x10^{-4}}$	$0.1310 \pm 4.875_{x10^{-4}}$

Cuadro 23. Formulación de mortero de cal para uso en restauración de estructuras prehispánicas mayas

Fórmula	Mortero de pega para unidades de mampostería: Diseño 7.	
Descripción	Mortero a base de cemento-cal, tipo O; según Norma NTG 41050.	
Proporciones	Mezcla seca	
Material	% p/p	Volúmenes
Cal hidratada	21	1
Arena <sup>A</sup>	66	2
Cemento hidráulico (UG)	13	¼
Preparación	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reunir los materiales y establecer un lugar adecuado donde realizar la mezcla (de preferencia una superficie despejada, dura y plana).</li> <li>2. Colocar los materiales en capas, iniciando con la arena, después el cemento y por último la cal; mezclarlos utilizando una pala de manera que los materiales queden distribuidos homogéneamente.</li> <li>3. Formar una pirámide con un hoyo en el centro (formando un volcán).</li> <li>4. Se recomienda utilizar 1 ½ volúmenes de agua por cada volumen de cal; agregar el agua en pequeñas porciones al centro de la pirámide sin que ésta se desborde. Con ayuda de una pala, cubrir el hoyo con la mezcla seca para humedecer los materiales.</li> <li>5. Continuar agregando agua y mezclar hasta que los materiales se hayan incorporado por completo, durante 3 a 5 minutos; añadir agua hasta obtener un mortero de la consistencia adecuada (debe adherirse a una pala sostenida en ángulo recto, pero debe ser suficientemente húmeda para resbalar y poderla mover con facilidad).</li> </ol>	
Consideraciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <sup>A</sup> La arena o agregado fino a utilizar proviene del material reciclado producto de excavaciones e investigación arqueológicas del sitio.</li> <li>• La arena o agregado fino a utilizar, debe cernirse a través de un tamiz de ¼ de pulgada (0.635mm).</li> <li>• Para obtener mejores resultados y eliminar la materia orgánica en los agregados finos, éstos deben lavarse antes de ser utilizados en la mezcla.</li> <li>• Utilizar agua fresca (inodora e incolora), evitar el uso de agua estancada o contaminada con material orgánico.</li> <li>• Limpiar e hidratar la superficie de las unidades de mampostería antes de aplicar el mortero, se sugiere utilizar agua o lechada de cal.</li> <li>• Evitar retemplar el mortero después de 2.5 horas después de haber sido elaborado.</li> </ul>	



Cuadro 24. Costo de premezcla de un mortero cal-arena para restauración de estructuras prehispánicas mayas.

Material	% p/p	Masa (kg)	Volúmenes	Precio (Q/kg)	Costo (Q)
Cal hidratada	25	25.0	25	1.55	39.46
Arena	75	75.0	50	0.23	48.09
Cemento hidráulico (UC)	---	---	---	1.93	---
Total	100	100.0	75	---	87.54

Cuadro 25. Costo de premezcla de mortero propuesto para restauración de estructuras prehispánicas mayas.

Material	% p/p	Masa (kg)	Volúmenes	Precio (Q/kg)	Costo (Q)
Cal hidratada	21	25.0	25	1.55	39.46
Arena	66	78.5	52	0.23	50.36
Cemento hidráulico (UC)	13	15.5	13	1.93	30.09
Total	100	119.0	90	---	119.91



## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El propósito principal del presente trabajo de investigación es la propuesta de un mortero de cal para uso en restauración arqueológica de estructuras mayas del área de las Tierras Bajas. El mortero es un material de construcción que se caracteriza por ser una mezcla constituida por un conglomerante y áridos finos que reaccionan con el agua y que con el tiempo adquiere resistencia. En el caso de los morteros de pega para unidades de mampostería éstos son utilizados para lograr la unión de los mampuestos en un único elemento estructural. Considerando que las estructuras arquitectónicas mayas son elementos estructurales únicos con unidades de mampostería, que en este caso son principalmente bloques de piedra caliza, expuestos a la intemperie, erosión y paso del tiempo; requieren de trabajos restauración y conservación que aseguren su estabilidad estructural para conservar y proteger la estructura de los edificios de los sitios arqueológicos. Es por ello que es de relevancia formular un mortero de pega que proporcione las características físicas y mecánicas adecuadas para prevenir la degradación de las estructuras al brindar características de resistencia adecuadas que coadyuven a la estabilización y consolidación de las estructuras y que se encuentre en concordancia con los criterios en materia de conservación para los materiales destinados para este fin.

Los principales criterios recomendados en convenciones internacionales en materia de conservación, como lo son la Carta de Atenas, Venecia y Cracovia se listan en el Cuadro 55; así como las consideraciones más relevantes respecto a la legislación guatemalteca en materia de conservación y restauración del patrimonio. Considerando estas recomendaciones emanadas de las convenciones internacionales en materia de conservación y las limitaciones establecidas en la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación, se enmarcaron los materiales y características físicas (apariencia) con las que debería cumplir el diseño propuesto para cumplir la función de ser un mortero de pega para elementos de mampostería que sea utilizado en aplicaciones de restauración y conservación arqueológica en sitios arqueológicos mayas en el área de las Tierras Bajas. Por lo anterior, la selección de materiales está basada en los siguientes puntos:

1. Agregados finos (arena). Como se indica en la resolución número 4 de la Carta de Atenas, se debe favorecer la incorporación de elementos originales, y dada la escasez de materiales para la construcción en los sitios arqueológicos mayas en las Tierras Bajas, se considera el uso de arena reciclada producto de excavaciones en el sitio para la incorporación en los diseños propuestos. Adicionalmente, el utilizar los agregados productos de las excavaciones arqueológicas, proporciona los elementos necesarios para disimular y garantizar una armonía en cuanto a color del diseño de mortero propuesto, para cumplir con lo establecido en lo estipulado en los Artículos 6 y 12 de la Carta de Venecia.
2. Cal. Considerando que el Principio 10 de la Carta de Cracovia enfatiza la compatibilidad de los materiales, y que los elementos constitutivos de las edificaciones mayas son principalmente de

piedra caliza y derivados de la cal; por tal motivo este material constituirá el principal elemento del diseño de mortero que se propone.

3. Cemento. Ya que tanto en la resolución número 5 de la Carta de Atenas, el Artículo 10 de la Carta de Venecia y el Principio 10 de la Carta de Cracovia, aprueban el uso de materiales y técnicas modernas probadas con bases científicas cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas para la necesidad de conservación; se utilizó este material para mejorar las características de resistencia del mortero que se propone.

En materia de legislación guatemalteca, el alcance del presente proyecto de investigación se limita a la propuesta y evaluación técnica de un mortero de pega para unidades de mampostería específicamente para uso en trabajos de restauración y conservación arqueológica de sitios arqueológicos mayas de las Tierras Bajas, por lo que no se infringe lo estipulado en el Artículo 16 de la Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación (Ver Cuadro 55), puesto que la aplicación, comparación y control *in situ*, no forman parte de la propuesta de formulación del mortero de las características antes expuestas.

En cuanto a las características deseables del mortero para uso en restauración arqueológica, en el Cuadro 56 se listan aquellas que se buscan para el mortero tanto en estado fresco como endurecido, por lo que se considera que la protección de la intemperie y de la erosión son factores muy importantes en cuanto a materiales de restauración, así como presentar propiedades mecánicas (resistencia) similares a los elementos originales y adicionalmente a las consideraciones estéticas como lo es la armonización de los colores entre elementos originales y materiales modernos. En cuanto a la aplicación del mortero se busca que este cuente con una buena adherencia, con el propósito de unir elementos erosionados y cuyo fraguado garantice la unión entre los elementos constructivos. En resumen, el mortero propuesto debe constituirse de materiales compatibles con los elementos y materiales originales, es por ello que se utilizará una base de cal para el mortero y se utilizarán áridos producto de las propias excavaciones del sitio; la incorporación de cemento hidráulico en la mezcla dependerá de los parámetros técnicos que deban alcanzarse para garantizar la consolidación de las estructuras; y contar con las características físicas que garanticen una buena adherencia, protección contra la erosión y armonización de los colores entre elementos.

Para caracterizar los morteros actuales se llevaron a cabo análisis que tuvieron por objetivo determinar la cantidad de agua retenida por los mismos o humedad, la caracterización química de las fases minerales que los componían, así como la cuantificación de las mismas y determinar, entre otras cosas, la presencia de compuestos orgánicos en los morteros actuales de restauración y las características de los cristales de las fases minerales identificadas. La caracterización fisicoquímica de los morteros actuales permite comprobar la matriz cementante artesanal de los morteros actuales de restauración y los efectos que generan los materiales en las características y comportamiento de los morteros.

A partir de los análisis de humedad libre o higroscópica, se pudo determinar la cantidad de agua que las muestras de materiales pudieron expeler exponiéndose éstas a un secado a peso constante a una temperatura de 110°C durante 2 horas. Ya que los morteros elaborados únicamente con cal y arena tienden a caracterizarse por tener bajas resistencias a la compresión y una alta retención de agua, suelen ser más resistentes a la penetración de agua de lluvia, por lo que fue necesario determinar la humedad de los morteros de restauración actuales y determinar la humedad que éstos logran retener. Como se observa en el Cuadro 7, se analizaron 6 muestras de materiales en diversos estados, siendo las Muestras: 1 y 4 morteros en estado húmedo, 2 y 3 losas fundidas y 5 y 6 cales añejas hidratadas en agua. Se observa que la humedad de las Muestras 1 y 4, varía entre 10 y 42% aproximadamente; siendo la humedad libre de la Muestra 4 (pasta de cal Horcalsa y material reciclado) 4 veces menor que la Muestra 1 (pasta de cal artesanal con material reciclado). En cuanto a las Muestras 2 y 3, existe una variación significativa, ya que la Muestra 3 presentó cuatro veces más humedad que la Muestra 2; siendo la Muestra 3 una losa fundida con materiales fabricados artesanalmente. Por último, se observa que las Muestras 5 y 6 al ser cales añejas en agua presentan porcentajes de humedad libre similares en un rango entre 25 y 30%. Las muestras de mortero fresco (pasta) y endurecido (losa) presentaron una humedad mayor cuando éstas se constituyeron a partir de cal fabricada artesanalmente.

Los análisis de Pérdida al fuego (LOI), permitieron determinar la cantidad de humedad libre junto a agua «hidróxido», dióxido de carbono, dióxido de azufre y productos pirolíticos volátiles que hayan estado presentes en las muestras. En los resultados contenidos en el Cuadro 8 se puede observar que para las Muestras 1 a 4, el porcentaje de pérdida de masa al fuego varía en un rango entre 37 a 41%, aproximadamente. Mientras que las Muestras 5 y 6 presentan un porcentaje de pérdida de masa similar (29.15 y 28.58 respectivamente). Considerando que en este análisis se busca cuantificar cualquier traza de material orgánico que puede estar presente en los materiales, es razonable que las Muestras 5 y 6 cuenten con un porcentaje menor de pérdida al fuego ya que éste parámetro no se ve afectado por materia orgánica como el resto de muestras, puesto que su porcentaje de humedad libre y pérdida al fuego porcentual es similar para ambos casos al tratarse únicamente de cal y agua. Aunque las Muestras 1 a 4 son morteros en diferentes estados, éstos a su vez se constituyeron de pastas de cal y agregados reciclados, por lo que se infiere que el porcentaje de pérdida al fuego es mayor en comparación a las cales añejas por la presencia de material orgánico en los agregados utilizados.

Los análisis termogravimétricos permitieron determinar la presencia de ciertos grupos principales característicos de los morteros, como lo son los hidratos del silicato cálcico, el agua «hidróxido» de la Portlandita y el dióxido de carbono del carbonato de calcio y de la dolomita al éstos descomponerse en un medio con atmósfera y temperatura controlada. Analizando y comparando las muestras según el estado en el que se encontraban puede decirse que: para la Muestra 1 (pasta de cal artesanal con material selecto), como se observa en la Figura 1, son notorias dos pérdidas de masa: una que ocurre a los 441.86°C y otra a los 778.92°C y se dan respectivamente dos cambios en masa de 4.87 y 34.26%. Por lo anterior, se infiere que el

primer cambio de masa corresponde a la descomposición de agua «hidróxido» de la Portlandita y el segundo cambio corresponde a la descomposición de calcita. De manera similar la Muestra 4 (pasta de Horcalsa y material reciclado) presenta un comportamiento similar al de pérdida de masa de la Muestra 1 (ver Figura 4), ya que ocurren cambios de 5.82 y 29.45% de masa a temperaturas de 443.79 y 774.41°C; con una pequeña diferencia ya que se presenta un ligero cambio porcentual de masa a los 200.20°C de 3.29% el cual puede corresponder a los hidratos de silicato de calcio en la muestra.

Por otra parte, las losas fundidas (Muestras 2 y 3) presentaron pérdidas de masa considerables y similares a temperaturas entre 775 y 786°C. Como se observa en la Figura 2, correspondiente a la muestra endurecida fabricada con cal Horcalsa, se presenta una pérdida significativa de masa a los 105.57°C la cual corresponde a agua, pero en cuanto respecta a las fases minerales, hay cambios significativos de masa de 1.20% a los 441°C correspondiente a la descomposición de agua «hidróxido» (OH) propia de la Portlandita y una pérdida mayor de 35.47% de masa a los 775.46°C. Por otra parte, la Muestra 3 (ver Figura 3) presenta un cambio en masa de 2.54% a los 406.11°C el cual corresponde a la descomposición de hidróxido en la Portlandita y por último un cambio considerable de 36.34% a los 786.08°C correspondiente a la descomposición propia de la calcita.

Por último, las Muestras 5 y 6, las cuales eran cal artesanal y cal Horcalsa, respectivamente, presentaron resultados similares en los análisis termogravimétricos practicados. Como se observa en la Figura 5 la Muestra 5 presenta variaciones significativas de masa a los 340.90°C con una disminución de 1.58% correspondiente a la descomposición de brucita, caso similar que se puede observar con la Muestra 6 (ver Figura 6) a los 351.18°C con una pérdida de masa de 1.91%. En cuanto a la descomposición de hidróxido en la Portlandita ambas muestras presentaron pérdidas de masa similar en un rango de 452 a 457°C, donde la Muestra 5 presentó una pérdida de 10.95% y la Muestra 6 ligeramente mayor del 12.77%. Por último, la pérdida de masa ocasionada por la descomposición de dióxido de carbono en la calcita puede observarse que en el caso de la Muestra 5 esta pérdida fue mayor que en la Muestra 6, de 21.91 y 16.55% respectivamente. En general, para todas las muestras pudo identificarse una proporción considerable de carbonatos, ya que la presencia de este grupo fue mayoritaria en todos los casos, en proporciones mayores a 15%. Además, pudo detectarse la presencia de Portlandita en las muestras, lo cual es un fenómeno característico de la calcinación de la caliza a temperaturas elevadas (900 a 1000 °C).

Para determinar la abundancia de las fases minerales se practicaron análisis de difracción de rayos X, lo cual permitió cuantificar las fases minerales presentes en las muestras de morteros y cales. Como se observa en el Cuadro 9, los morteros en estado fresco (Muestras 1 y 4) cuentan con calcita como la fase más abundante, 69.90 y 43.44% respectivamente; también es notorio que en ambas muestras se presentan concentraciones considerables de dolomita (siendo otra forma de carbonato y magnesio, como lo es la calcita), y una concentración variable de Portlandita, de 12.10 y 33.40% respectivamente, en este caso menor

para el mortero preparado con cal artesanal. En cuanto a los morteros endurecidos pudo comprobarse una carbonatación casi completa para ambas muestras, ya que tanto la Muestra 2 se compuso de un 84% de calcita y 15.70% de dolomita; y por otra parte la Muestra 3 (losa fundida hecha con cal artesanal) se compuso en un 100% de dolomita. En cuanto a las cales añejadas en agua, Muestras 5 y 6, se puede observar que éstas se componen principalmente de Portlandita o cal hidratada, 84.60 y 100% respectivamente. Adicionalmente, la Muestra 5 presentó concentraciones bajas de calcita y dolomita, lo cual puede corresponder a la formación de cristales de dichas fases.

Tanto los análisis termogravimétricos como por difracción de rayos X demuestran una alta concentración de carbonatos en los morteros artesanales al igual que en el caso de los morteros preparados con cal Horcalsa, ya que para ambos casos éstos están en proceso de carbonatación, para aquellos en estado fresco (Muestras 1 y 4), y completamente carbonatados para los morteros endurecidos (Muestras 2 y 3). Por último, se demostró la presencia de Portlandita o cal apagada en morteros y cales añejas, siendo ésta en concentraciones mayores en la cal hidratada comercial.

Se realizó un análisis mineralógico por microscopía electrónica de barrido a las Muestras 1, 2 y 5 para identificar los cristales de las fases mineralógicas presentes en las mismas y poder medir el tamaño de las mismas. En el Cuadro 10 se registraron los resultados de éstos análisis, y en todos los casos se detectó calcita, siendo ésta una de las fases más abundantes, y con tamaños promedio de cristales de calcita mayores en la cal artesanal añeja (Muestra 5) y en el mortero endurecido preparado con cal Horcalsa (Muestra 2), aproximadamente el doble que los cristales de calcita en la muestra de pasta de cal artesanal con material selecto (Muestra 1). Considerando que las Muestras 2 y 5 cuentan con aproximadamente la misma antigüedad, puede inferirse que tanto para el periodo de añejamiento como de carbonatación del mortero, se ha favorecido el crecimiento de cristales de calcita. Adicionalmente se observa que en el caso de la Muestra 2 se presentaron otras formas de óxidos de calcio como lo es el óxido de calcio, dióxido de calcio y en la forma  $\text{Ca}_3\text{C}_2\text{O}_3$ .

Como se indicó anteriormente, la reutilización de materiales y elementos originales no solo forma parte de las recomendaciones realizadas por diversas conferencias respecto a criterios de restauración sino también la disponibilidad de materiales en los sitios arqueológicos para preparar los morteros de pega. Es por ello que también se vio la necesidad de caracterizar fisicoquímicamente y determinar el potencial de reacción de los agregados reciclados que son productos de la excavación arqueológica en determinado sitio. Los principales análisis practicados a los áridos fueron encaminados a la caracterización física, determinación y cuantificación de las fases minerales que los constituyen, la granulometría y potencial de reacción con álcalis.

Cuanto respecta a los análisis practicados a los agregados locales del sitio arqueológicos Yaxhá, en Petén se determinó mediante el análisis de pérdida al fuego que el porcentaje de masa perdida tanto por los agregados finos como por los agregados gruesos, se encontraba alrededor de 42%. Como se registra en el

Cuadro 11, los agregados finos tuvieron una pérdida de masa de 42.04% mientras los finos 42.88%; lo cual indica que para ambos casos el contenido de humedad libre, agua hidroxilo, dióxido de carbono y productos pirolíticos volátiles orgánicos son similares.

En cuanto a la identificación y cuantificación de las fases minerales mediante difracción de rayos X se determinó que los agregados se componen principalmente de carbonatos de calcio, y en el caso de los agregados gruesos de carbonatos de calcio-magnesio o dolomita. Como se observa en el Cuadro 12, los agregados finos se componen por un 98.80% de calcita mientras que los agregados gruesos tienen una abundancia de 93.90% de calcita junto a un 4.60% de dolomita. Cabe mencionar que los agregados al contar con proporciones similares de fases carbonatadas tienen también proporciones similares de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), un 1.20 y 1.50% respectivamente para los agregados finos y gruesos. Las altas concentraciones de calcita en los agregados finos se deben a que este es un material que se recicla a partir de las excavaciones arqueológicas por lo que tiende a componerse principalmente de caliza arenizada, restos de morteros de cal y caliza fina. El contenido de sílice y dolomita en los agregados puede indicar la reactividad de este con otros álcalis en los morteros por lo que determinar su reactividad es de importancia para evaluar la continuidad del uso de estos agregados.

Para determinar el contenido aproximado de terrones de arcilla y partículas friables en los agregados, se practicó el análisis para la determinación de este aspecto, el cual demostró que en el caso de los agregados finos presentan una cantidad muy baja de terrones de arcilla y partículas friables (ver Cuadro 13), los agregados únicamente presentaron un 1.2% de arcillas presentes, lo cual concuerda con el origen de estos agregados, ya que se componen de caliza erosionada y restos de morteros de cal. Un bajo contenido de arcillas no afectará al mortero al presentar una baja resistencia a la compresión y cambios en el volumen.

Respecto a la granulometría de los agregados, como se observa en la Figura 7, la caracterización del agregado fino presenta un comportamiento en concordancia a los límites de la norma NTG 41007 para aquellas partículas de tamaño que van desde los 9.5mm hasta los 0.6mm. En el caso de las partículas de 0.3mm de tamaño ésta abundancia se encuentra justo en el límite establecido por la norma COGUANOR NTG 41007 para agregados finos triturados, y para partículas más finas con tamaños de 0.15 y 0.075mm su abundancia es mayor por lo que no cumple con los límites de la norma NTG41007 para agregados finos. La presencia de partículas menores a 0.3mm constituye un 35% del total del material y que a partir de ahí se excede lo establecido por la norma COGUANOR NTG 41007; considerando una alta presencia de materiales finos, esto puede sugerir la necesidad de utilizar los agregados cuyas partículas son mayores a 0.6mm ya que el alto contenido de finos (15%) implica que la trabajabilidad del mortero se verá afectada al hacer una pasta muy pegajosa y densa.



La granulometría de los agregados gruesos, por otra parte, presentó un comportamiento con una tendencia similar a los límites superiores de la Gráfica No. 4 de la norma COGUANOR NTG 41007. Como se observa en la Figura 8, un 49% de las partículas de los agregados gruesos tienen un tamaño superior a 25mm y un 29% se encuentran entre un tamaño de 25 a 19mm; por último, la cantidad de partículas menores a 12.5mm constituye un 9% del total del material. Como se observa en la figura el comportamiento del tamaño de las partículas se encuentra entre el límite superior de la Gráfica 4 y el límite inferior de la Gráfica 467 de la norma COGUANOR NTG 41007, por lo que su caracterización es aceptable y no genera efectos indeseables en la mezcla con morteros.

Los análisis de estabilidad a la disgregación de los agregados mediante sulfato de sodio permitieron evaluar el comportamiento de los mismos cuando están sometidos a una acción de intemperismo. Este análisis se llevó a cabo ya que se buscó determinar el efecto potencial que pudiera presentarse en el mortero endurecido por la fragmentación de los agregados al ser expuestos a la intemperie, como una característica física crítica a nivel estructural del mortero ya que una de las características físicas deseables de este tipo de morteros es evitar el agrietamiento, fisuras o fracturas en el mortero para evitar la filtración de agua hacia los núcleos de las estructuras (ver Cuadro 56). Como se observa en el Cuadro 14 los agregados finos presentaron una disgregación promedio de 35%, siendo las partículas de tamaños entre 4.75 a 0.6mm aquellas que presentaron un promedio ponderado porcentual superior a 9. Por otra parte, como se observa en el Cuadro 15 la estabilidad a la disgregación de los agregados gruesos fue mayor a la de los agregados finos, ya que su porcentaje de disgregación fue de 14%; siendo las partículas entre 37.5 y 19.0mm aquellas con un promedio ponderado porcentual mayor a 9. En cuanto al examen cualitativo de los agregados gruesos (ver Cuadro 16), se observó que las principales acciones generadas por el examen en los agregados gruesos fueron: rotura y desmoronamiento, ocurriendo un 17 y 15 por ciento de las veces. Aunque si bien se presentaron agrietamientos, estos ocurrieron en menor proporción (9%) y no presentándose ninguna escama. Por lo anterior, los agregados finos son más susceptibles a disgregarse por efecto de la intemperie (en comparación a los agregados gruesos), esto se debe al origen de éstos: caliza erosionada, mortero pulverizado, entre otros.

Como se mencionó con anterioridad, el contenido de sílice en los agregados en la forma de cuarzo es un factor que debe analizarse para evaluar la reactividad del mismo con otros álcalis en la mezcla del mortero. La determinación de la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados finos demostró que éstos pueden considerarse como ino cuos ya que como se puede ver en la Figura 9, la reducción en alcalinidad en función de la sílice disuelta para esta muestra se encuentra en la región izquierda de la gráfica, alejada del límite que marca la región de agregados dañinos. De igual manera, se determinó que los agregados gruesos cuentan con una reactividad álcali-sílice baja por lo que como se observa en la Figura 10, la reducción en alcalinidad en función de la sílice disuelta es aún menor y se encuentran en la región de materiales ino cuos.

Para complementar los análisis de reactividad de los agregados, se llevaron a cabo pruebas de la reactividad potencial álcali-carbonato. Estas pruebas se realizaron para determinar la reacción entre los materiales carbonatados como lo son los agregados con otros álcalis en la mezcla del mortero. Ya que las calizas dolomíticas pueden generar expansiones o fisuras anormales en los concretos como producto de la reacción con los álcalis y considerando que los análisis químicos de los agregados gruesos determinaron la presencia de dolomitas éste análisis permitió determinar el grado de reactividad de los agregados. Como se observa en la Figura 11, la relación de CaO/MgO en función del porcentaje de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encuentra en una región de clasificación de materiales no reactivos, por lo que éstos agregados finos constituyen una fuente de agregados inocuos para el mortero. Por otra parte, como se observa en la Figura 12 el resultado de los agregados gruesos indica que estos son potencialmente reactivos, aunque es notorio que el resultado se encuentra muy cercano a la delimitación entre regiones, por lo que su reactividad potencial es baja, lo cual concuerda con un porcentaje de dolomitas inferior a 5% en los agregados gruesos (ver Cuadro 12).

En cuanto a los requisitos técnicos, y considerando que para efectos de la aplicación en campo (trabajos de restauración arqueológica), que la utilización de un mortero está relacionada a la resistencia más baja que se ajusta a los requisitos del trabajo, las propuestas de los morteros estarán en función a las características propias de un mortero tipo O, ya que es de alto contenido de cal y de baja resistencia. Por lo tanto, el diseño de mortero deberá cumplir con las especificaciones para un mortero tipo O como se establece en la Norma Técnica Guatemalteca NTG 41050 (Ver Cuadro 5). Siendo las principales características a cumplir: un porcentaje de flujo de 105 a 115%, una retención de agua mayor a 75% y una resistencia a la compresión mayor a 2.4 MPa o 350 psi.

Considerando los requisitos para los materiales de conservación, específicamente la compatibilidad de materiales y los requisitos técnicos establecidos en la Norma NTG 41050 se llevaron a cabo pruebas de morteros con diferentes proporciones de materiales como se detalla en el Cuadro 6 y se compararon las propiedades obtenidas para cada diseño contra las especificaciones contenidas en el Cuadro 5. Adicionalmente, se sometió un mortero artesanal preparado con agregados del sitio y con pasta de cal artesanal a los ensayos requeridos por la Norma NTG 41050 como referencia para comparar los valores obtenidos con los diseños propuestos.

La primera característica que debe controlarse según la Norma NTG 41050 es el porcentaje de flujo, el cual debe ser de  $110 \pm 5\%$ , el cual busca aproximarse al flujo y propiedades del mortero preparado en obra con la máxima cantidad de agua consistente con la trabajabilidad requerida. Como se observa en el Cuadro 17, tanto el mortero de referencia como los diseños propuestos cumplen con éste parámetro, siendo el Diseño 1 el que presentó el menor porcentaje de flujo (105%) pero que aun así se encuentra dentro de especificación. Considerando que el porcentaje de flujo está relacionado con la trabajabilidad del mortero, se determinó que tanto el mortero de control como los diseños propuestos cuentan con una buena trabajabilidad, ya no se

presentan como morteros sólidos o resistentes al flujo ni morteros fluidos que dificulten la colocación de elementos de mampostería antes que el mortero se endurezca.

En cuanto a la retención porcentual de agua, la Norma NTG 41050 indica que se debe contar con un porcentaje de retención de agua mínimo de 75%. Como se observa en el Cuadro 18, los resultados de los diseños y el mortero de control o referencia cumplen con dicho requisito ya que cuentan con valores superiores al mínimo indicado. Considerando que ésta característica busca determinar la conservación de la trabajabilidad de los morteros después de haber entrado en contacto con un elemento de mampostería de alto grado de absorción o ritmo de endurecimiento, el Diseño 5 mostró contar con la menor retención de agua mientras que el Diseño 3 presentó la mayor retención de agua mientras el resto mostró encontrarse entre un 82 y 83%. Se debe considerar que el Diseño 5 se preparó utilizando agregado fino tamizado sin partículas menores a 0.3mm, por lo que no contó con suficientes polvos finos que absorbieran y retuvieran agua. En el caso del Diseño 3, el cual presentó el mayor porcentaje de retención de agua, cabe resaltar que este fue preparado utilizando agregados finos limpios y tamizados en cumplimiento de la Norma NTG 41007 por lo que es notorio la alta retención de agua. Respecto al resto de diseños y control, se observa que el efecto de los agregados es similar ya que presentaron porcentajes de retención de agua cercanos entre sí. Por lo anterior, el Diseño 5 tenderá a perder agua rápidamente lo cual puede dificultar la colocación de unidades de mampostería, caso contrario con el Diseño 3.

En cuanto a la masa unitaria de los morteros en estado fresco, se determinaron las densidades de los morteros en estado fresco. Como se observa en el Cuadro 19 el mortero artesanal o control presentó ser el de menor densidad en comparación a los diseños propuestos. Por otra parte, se observa que el resto de diseños presentan densidades similares a excepción del Diseño 3, el cual es el más denso de todos. Esta característica para el caso del mortero de referencia puede deberse a que se compone principalmente de pasta de cal artesanal añeja y agregados finos reciclados. Respecto al Diseño 3, este presentó no solo la mayor densidad sino también el mayor porcentaje de retención de agua, derivado de constituirse a su vez por agregados finos en concordancia con la Norma NTG 41007. Respecto a los Diseños 1, 2, 4, 5, 6 y 7, se observa que no existe una diferencia significativa entre sus densidades a pesar de contar con una mayor cantidad de partículas finas menores a 0.3mm aún cuando para el Diseño 5, este se preparó con agregados tamizados sin estas partículas.

El porcentaje de aire de los morteros es también una característica indicadora de la trabajabilidad del mortero, ya que las burbujas de aire en la mezcla están relacionadas con la plasticidad del mortero. Acorde a la Norma NTG 41050 el límite superior de contenido de aire para un mortero de cemento-cal tipo O es de 14% y según los resultados contenidos en el Cuadro 20 se observa que los diseños y el control cumplen con esta especificación. Es notorio que los morteros Control, y diseños preparados con agregados del sitio presentaron porcentajes de contenido de aire similares (4.4 a 4.7%) exceptuando el Diseño 2 (6.0%), el cual si bien fue preparado utilizando agregados reciclados del sitio, también fue preparado con cal hidráulica, lo

cual se caracteriza por brindar a los morteros una mayor elasticidad y trabajabilidad durante un mayor tiempo abierto. Por último, el Diseño 3 presentó el menor contenido de aire, por lo que una de las causas principales de este comportamiento puede deberse a que fue preparado con agregado fino en concordancia con la Norma NTG 41007.

El parámetro de resistencia a la compresión es uno de los requisitos más importantes de la Norma NTG 41050, ya que se establece que un mortero de pega para elementos de mampostería de debe contar con una resistencia a la compresión mínima de 2.4 MPa o 350psi a los 28 días de fraguado. Para la presente aplicación, el uso en restauraciones arqueológicas lo que comprende la restitución de volúmenes al unir elementos como bloques de piedra caliza a la arquitectura de las estructuras mayas originales, se adecúa de mejor manera un mortero cemento-cal tipo O, el cual presenta la menor resistencia, lo cual es deseable en este caso ya que se busca que su resistencia no exceda la resistencia de los elementos de mampostería que son bloques de piedra caliza afectados por la erosión. Como se observa en el Cuadro 21, el mortero que presentó la menor resistencia a la compresión fue el mortero artesanal el cual alcanzó únicamente el 18% de la resistencia mínima establecida por la Norma, por otra parte, el resto de diseños mostraron resistencias a la compresión mayores, lo cual se debe principalmente a la incorporación de cal hidratada con lo cual se obtuvo una resistencia a la compresión mayor a 1 MPa. Se observa que para los diseños 1 al 7 existe un aumento progresivo en el valor de resistencia a la compresión de los diseños propuestos, siendo el Diseño 7 el que superó el requisito mínimo de 2.41 MPa de resistencia a la compresión a 28 días de fraguado (3.2164 MPa). Es importante resaltar que el comportamiento en el aumento a la compresión está asociado también a la adición de cemento hidráulico a los diseños, desde un 0% en los Diseños 1 y 2 hasta un 13% en el Diseño 7.

En cuanto a la resistencia a la adherencia la cual es una característica que, si bien no está normada en la Norma NTG 41050, se determinó para complementar la caracterización de los diseños; ya que este parámetro es de relevancia para los morteros de pega pues la adherencia es una propiedad que se desarrolla entre las unidades de mampostería y el mortero, considerando que en estado fresco el mortero debe fluir sobre la superficie de la unidad de mampostería y llenar la mayor cantidad de cavidades por lo que la adherencia aumenta con la hidratación para que el mortero resista las cargas aplicadas y pueda absorber esfuerzos derivados de cambios volumétricos por efectos de temperatura. En cuanto a la resistencia a la adherencia se puede observar en el Cuadro 22 que el mortero artesanal no registró adherencia a 28 días de fraguado entre unidades de mampostería, en contraparte el Diseño 7 mostró una resistencia a la adherencia de 0.1310 MPa (19psi), siendo este el valor más alto alcanzado por los diseños propuestos. Como se indicó con anterioridad, la adición de cemento hidráulico en la mezcla coadyuva a obtener valores de resistencia a la adherencia mayores por lo que el aumento gradual en la resistencia a la adherencia después de 28 días de fraguado corresponde al aumento en el porcentaje de cemento en la mezcla.

Al realizar una evaluación en el cumplimiento de las características deseables en un mortero de cal para uso en restauración arqueológica de estructuras prehispánicas mayas, partiendo de las premisas listadas en el Cuadro 55 de criterios de conservación y materiales destinados para este fin, es importante mencionar que los diseños propuestos están basados principalmente en cal y agregados calizos del sitio arqueológico, que en este caso es material reciclado producto de la investigación arqueológica y trabajos de restauración y conservación que se llevan a cabo en el Parque Nacional Yaxhá por lo que se cumplen los siguientes criterios establecidos en las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia: el material debe ser compatible con los elementos originales (mortero basado en cementantes de cal y agregados calizos), la integración de elementos originales (se reciclan los materiales erosionados y de excavación como agregados) y los materiales modernos deben ser distinguibles de los originales sin alterar el color de la composición (principalmente la incorporación de material reciclado proporciona una coloración de material similar a los elementos estructurales y arquitectónicos del sitio). En cuanto a laborabilidad y características deseables del mortero en estado fresco se refiere éstas características que se encuentran parametrizadas en la Norma NTG 41050 como parte del porcentaje de flujo, retención de agua y porcentaje de aire en el mortero.

Considerando que el mortero utilizado en la restauración arqueológica destinado para la unión de rocas, bloques de roca o fragmentos de los anteriores, es un mortero de pega para unidades de mampostería los diseños propuestos se basaron en un mortero de cemento-cal tipo O, ya que su requisito de resistencia a la compresión (2.4 MPa) es el menor valor con lo cual se busca que la resistencia y dureza entre el mortero y la unidad de mampostería sea similar para no afectar de manera que se acelere la degradación de los elementos originales. Como se observó con anterioridad, existe una mejora en la resistencia a la compresión de los morteros al agregar cal hidratada, considerando que el mortero de control como el Diseño 1 únicamente se componían de cal y arena, se observa que la resistencia a la compresión a 28 días del Diseño 1 duplica fácilmente la resistencia a la compresión del mortero artesanal de referencia. La adición de cal industrial mejora la resistencia a la compresión del mortero, pero la resistencia a la compresión obtenida por un mortero cal-arena no es suficiente por lo que se vió la necesidad de incorporar cemento hidráulico a la mezcla con el objetivo de lograr un incremento en la resistencia a la compresión, al menos de 2.4 MPa como se establece en la Norma NTG 41050 lo cual también influye de manera colateral en la resistencia a la adherencia, por lo que se observó un aumento significativo de éste parámetro.

Los diseños propuestos para un mortero de pega para unidades de mampostería para uso en restauración arqueológica de estructuras prehispánicas mayas del área de las Tierras Bajas no solamente buscaron cumplir con los criterios de conservación establecidos por las convenciones internacionales en materia de conservación y con la Norma NTG 41050, sino también ser una opción viable para disminuir las prácticas artesanales de calcinación de caliza para la obtención de cal. La calcinación artesanal de caliza no solamente involucra el agotamiento de recurso forestal local del sitio arqueológico, sino que también la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno

(NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV), producidos principalmente en procesos de combustiones ineficientes y no controlados. En comparación a un proceso artesanal de calcinación que puede durar hasta 3 días en hornos de leña, una planta especializada en el procesamiento de cemento y cal es capaz de llevar a cabo procesos de calcinación en condiciones controladas que permiten llevar a cabo combustiones eficientes de los combustibles utilizados, y una recuperación y tratamiento adecuado de gases de combustión; teniendo así un menor impacto ambiental. Es por ello que la utilización de materiales producidos industrialmente con características estandarizadas contribuye no solamente a disminuir el agotamiento de los recursos forestales para la extracción de madera sino también la contaminación al medio ambiente por la generación de gases de efecto invernadero.

Si bien los 7 diseños propuestos cumplen tanto con los criterios de conservación de las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia, la Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación y las características deseables de un mortero para restauración arqueológica, así como los requisitos para la especificación por propiedades de retención de agua mínima, y contenido de aire; los primeros 6 diseños propuestos no cumplen con el criterio de resistencia a la compresión mínima establecido en la Norma NTG 41050, siendo el Diseño 7 el que cumplió con todos los requisitos de especificación así como con los criterios de conservación indicados. Es por ello que el Diseño 7 es una propuesta factible para ser utilizado como un mortero de pega para unidades de mampostería en trabajos de restauración arqueológica en sitios arqueológicos prehispánicos mayas de las Tierras Bajas.

Ya que el Diseño 7 es una formulación factible que permite el cumplimiento de criterios de conservación arqueológica y normativa técnica para morteros de pega, la formulación que se propone para los trabajos de restauración de estructuras prehispánicas mayas es la que corresponde a este diseño. A partir de diversos análisis para identificar y cuantificar las fases minerales, se confirmó que los agregados (finos y gruesos) y morteros utilizados actualmente se componen principalmente de caliza por lo que se propone continuar utilizando cal hidratada para la elaboración de morteros con la adición de una fracción de cemento hidráulico para mejorar las características de resistencia del mortero. Como se observa en el Cuadro 23, las proporciones cal:arena:cemento de este diseño son: 1:2:¼, las cuales aseguran el cumplimiento de los requisitos de: porcentajes de flujo, porcentaje de retención de agua, porcentaje de aire, y resistencia a la compresión ya que se obtuvieron valores de: 109.5%, 83%, 4.0% y 3.2164 MPa, respectivamente. Como se indicó anteriormente, se determinó también la resistencia a la adherencia, la cual fue de 0.1310 MPa; un valor significativo en comparación al mortero artesanal de referencia. Adicionalmente, se considera el uso de los agregados finos reciclados del sitio arqueológico tamizados, que pasan un tamiz de ¼ de pulgada o 0.635mm; y se recomienda el lavado de estos agregados y el uso de agua fresca para evitar la contaminación de los morteros a causa de materia orgánica presente en los mismos como se logró demostrar con los análisis de pérdida al fuego.

Adicionalmente, partiendo del principio de compatibilidad de materiales propuesto por las convenciones internacionales en materia de conservación del patrimonio, y considerando que la matriz cementante maya de las Tierras Bajas se basó en materiales calizos, el Diseño 7 aplica para su utilización en la restauración de estructuras prehispánicas mayas de las Tierras Bajas guatemaltecas, región que comprende el Petén. Ya que los materiales y técnicas constructivas de las Tierras Bajas difieren con los materiales utilizados en las estructuras prehispánicas de las Tierras Altas del altiplano guatemalteco, donde se utilizaron materiales como barro y piedra volcánica o de río, por lo que se alterarían los principios de compatibilidad entre materiales, sino también la armonización del color entre elementos; aunado a que se podría contribuir a la degradación de los elementos originales al existir diferencias entre los valores de resistencia de los materiales.

Por último, como se observa en el Cuadro 25, el costo de fabricación a partir de materiales comerciales en la proporción indicada en la formulación propuesta, es de Q. 119.91 para la preparación de 119kg de la mezcla seca o premezcla, que a su vez constituye un valor de Q. 1.01 por cada kilogramo preparado en el sitio. Este valor (119kg) resulta de la cantidad de premezcla que se puede fabricar por cada saco de 25 kilogramos de cal hidratada, considerando las respectivas proporciones de materiales indicadas en la formulación propuesta. De manera similar un mortero de cal-arena con las proporciones utilizadas en el mortero de referencia (ver Cuadro 24) resulta en un costo de Q. 87.54 para preparar 100 kg de premezcla a partir de 1 saco de 25kg de cal hidratada; es decir Q. 0.88 por kilogramo de premezcla. Aunque esto constituye el valor de fabricación de la premezcla del mortero que se propone utilizar, su valor es cercano a Q. 1.00 por cada kilogramo de premezcla. En comparación con un mortero de cal-arena con proporciones iguales al mortero de referencia, el mortero propuesto tiene un costo 15% mayor por kilogramo. Si bien es notorio un aumento en el costo por kilogramo de premezcla, el costo adicional del mortero propuesto supone una mejora significativa en la resistencia a la compresión y a la adherencia de los morteros de restauración que garantizaría la estabilidad de las estructuras donde se aplicaría y para las que fue diseñado. Los costos indicados se obtuvieron a partir de precios promedio de mercado de los materiales indicados en la formulación propuesta y cuyo objetivo es servir como referencia para la preparación del mortero en el sitio arqueológico donde se va a utilizar.





## IX. CONCLUSIONES

- Se logró determinar las características físicas, composición química y reactividad de los agregados y de los morteros preparados actualmente. Según los resultados obtenidos se pudo confirmar que: los morteros artesanales están basados en cementantes y agregados de origen calizo (calcita y dolomita), los agregados reciclados utilizados cuentan con un contenido considerable de finos (35%) que afectan la trabajabilidad del mortero fresco, y los agregados finos son inocuos (no reaccionan químicamente con otros álcalis en la mezcla) y estables al intemperismo.
- Se compararon las características físicas y mecánicas de los diseños propuestos de morteros de pega tipo O con la norma técnica NTG 41050 y se obtuvo que los morteros que no incorporan cemento hidráulico no logran alcanzar el requisito mínimo de resistencia a la compresión normada. Los diseños propuestos para la formulación de un mortero para la restauración de estructuras mayas cumplen con los criterios de conservación propuestos por las Cartas de Atenas, Venecia y Cracovia ya que son compatibles con los materiales originales, armonizan los colores y no incrementan la erosión de los elementos originales.
- Se propuso una formulación de un mortero de pega para unidades de mampostería de cemento-cal tipo O para uso en restauración de estructuras prehispánicas mayas que cumple con los requisitos de conservación y normativa técnica con una proporción cal:arena:cemento de 1:2: ¼ .
- Se determinó que el costo para preparar un kilogramo de premezcla del mortero propuesto es de Q. 1.01; un 15% mayor en comparación al de un mortero de cal-arena en las mismas proporciones que el mortero artesanal de referencia; pero que se traduce en un aumento significativo en la resistencia a la compresión y a la adherencia.



## X. RECOMENDACIONES

- Realizar las pruebas en campo con el mortero propuesto en acompañamiento de un equipo autorizado para realizar trabajos de restauración en sitios arqueológicos del área de las Tierras Bajas para asegurar la aplicabilidad y cumplimiento de criterios de restauración.
- Determinar el tratamiento adecuado para los agregados finos del sitio para asegurar la inocuidad de los mismos y evitar la contaminación orgánica en los morteros de restauración.
- Determinar el efecto de la contaminación e impurezas orgánicas del agregado fino en la resistencia del mortero según la Norma NTG 41010 h5.
- Determinar la dureza de las unidades de mampostería para comparar el grado de resistencia entre el mortero y las unidades de mampostería.
- Evaluar en campo el desempeño e interacción química (RAS/RAC) que resulte entre el mortero y las unidades de mampostería.



## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Alcina Franch, José. 1999. «Arte Maya». *Historia General de Guatemala*, de F. Rojas Lima (Ed.). Guatemala: Fundación para la Cultura y el Desarrollo. Págs. 581-592.
- Arriola Donis, José Mauricio. 2009. *Diseño de Morteros con Cementos Hidráulicos para la Construcción de Muros con Elementos de Mampostería*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. 120 págs.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. 1999. *Norma española. UNE-EN 1015-7. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco*. Madrid. AENOR. 12 págs.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. 1999. *Norma española experimental. UNE 146507-2 EX. Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 2: Determinación de la reactividad álcali-carbonato*. Madrid. AENOR. 5 págs.
- Calderón Bravo, Ismael. 2016. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas en morteros de restauración a partir de cementos de bajo carbono producidos localmente*. Tesis Universidad Central “Marta Abreu”. 80 págs.
- Coloma Álvarez, Guillermo. 2008. «Tipos de cal». En *La cal: ¡Es un reactivo químico!* Antafagosta: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. págs. 72-73.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2012. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41003 h4. Método de Ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado*. Ministerio de Economía. Guatemala. 26 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2012. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41010 h6. Método de ensayo. Determinación de la estabilidad a la disgregación de los agregados mediante el uso del sulfato de sodio o del sulfato de magnesio*. Ministerio de Economía. Guatemala. 15 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2012. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41010 h10. Método de ensayo. Determinación de terrones de arcilla y de partículas friables (desmenuzables) en los agregados*. Ministerio de Economía. Guatemala. 8 págs.

- Comisión Guatemalteca de Normas. 2012. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41050. Mortero de pega para unidades de mampostería. Especificaciones*. Ministerio de Economía. Guatemala. 35 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2013. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41002. Práctica para la mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*. Ministerio de Economía. Guatemala. 11 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2013. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41003 h313. Método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico*. Ministerio de Economía. Guatemala. 9 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2014. *Norma Técnica Guatemalteca NTG 41051 h7. Método de ensayo. Determinación de la resistencia de adherencia por tracción del mortero de pega y las unidades de mampostería*. Ministerio de Economía. Guatemala. 10 págs.
- Comisión Guatemalteca de Normas. 2019. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41104 h2. Método de ensayo. Determinación de la retención de agua en morteros a base de cemento hidráulico y cernidos*. Ministerio de Economía. Guatemala. 11 págs.
- Construction Material Consultants, Inc. *Thermal Analysis in Mettler Toledo's TGA/DSC1 Unit – CMC*. <https://www.cmc-concrete.com/thermal-analysis> [24 de julio de 2022].
- Delegación de Patrimonio Mundial. 2010. *Lineamientos para la Conservación de Monumentos y Sitios en Guatemala*, de Blanca Niño (Ed.). Guatemala. Ministerio de Cultura y Deportes. 60 págs.
- Días Coutiño, H.; Ramírez de Alba, H. y Pérez Campos, R. 2001. «Aspectos químicos y estructurales de la matriz cementante utilizada en la cultura maya». *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. [México] II (3): 139-146. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2001.02n3.015>
- Knöfer, Dietbert. 1983. «Cement chemistry – cement quality». En *Cement Engineer's Handbook*, de O. Labahn y B. Kohlhaas. Berlin: Bauverlag GMBH. págs. 119-123.
- Larios Villalta, Carlos Rudy. 2003. *Criterios de Restauración Arquitectónica en el Área Maya*. Guatemala: Fundación para el Avance de los Estudios Mesoamericanos. 102 págs.
- Larios Villalta, Carlos Rudy. 2009. *Manual de Criterios de Restauración para la Arquitectura Prehispánica*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. 95 págs.
- Lhoist, S. A. *Todo sobre la cal y los minerales*. <https://www.lhoist.com/es/todo-sobre-la-cal-y-los-minerales>

- Lorenzo Mora, Francisca. 2019. *Los Estucos Mayas. Estudio físico-mecánico de variantes técnicas y su aplicación en la conservación y restauración en el sitio arqueológico La Blanca, Petén, Guatemala*. Tesis Universitat Politècnica de Valencia. 334 págs.
- Lorenzo Mora, F. y Carrascosa Moliner, B. 2015. «Estudio de morteros tradicionales de cal en área maya. Comportamiento de distintos áridos frente a ensayos físico-químicos». *Arché*. (10). págs. 57-65.
- Magaña Juárez, José María. 2010. «Criterios de Conservación». En *Lineamientos de Conservación de Monumentos y Sitios en Guatemala*, de Blanca Niño (Ed.). Guatemala Ministerio de Cultura y Deportes. 60 págs.
- Noriega Girón, R. y Quintana Samayoa, O. 2021. «Conservación y arquitectura maya en Petén, Guatemala». *Revista Gremium*. 8 (15): 65-74. <https://gremium.editorialrestauro.com.mx/index.php/gremium/article/view/148>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2006. *Compendio de leyes sobre la protección del patrimonio cultural guatemalteco*. Guatemala. UNESCO. 208 págs.
- Pérez Robes, Edwin. 2017. *Manual de Conservación Preventiva para superficies de Estuco Modelado Adosado a Arquitectura Maya*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 65 págs.
- Ramírez de Alba, H.; Pérez Campos, R. y Díaz Coutiño, H. 1999. «El Cemento y el Concreto de los Mayas». *Ciencia Ergo Sum*. [México]. 6 (3): 275-284.
- Rodríguez, Daniel. 2020. *¿Qué es la difracción de rayos X (XRD) y por qué es tan importante para la industria?* – Espectrometría. <https://espectrometria.com.mx/que-es-la-difraccion-de-rayos-x-xrd-y-por-que-es-tan-importante-para-la-industria/> [04 de agosto de 2022].
- Rodríguez, Daniel. 2020. *Fundamentos del análisis termogravimétrico* – Espectrometría. <https://espectrometria.com.mx/fundamentos-del-analisis-termogravimetrico/> [04 de agosto de 2022].
- Rodríguez Galbarro, Hermenegildo. 2022. *Pesos específicos y densidades de materiales y elementos constructivos* – Ingemecanica. <https://ingemecanica.com/tutoriales/pesos.html> [10 de septiembre de 2022].
- Sánchez de Guzmán, Diego. *Tecnología del Concreto y del Mortero*. 5ª ed. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. 349 págs.

- Schäfer, Heinz-Ulrich. 1983. «Raw materials». En *Cement Engineers' Handbook*, de O. Labahn y B. Kohlhass. Berlin: Bauverlag GMBH. Págs. 3-5.
- Schneider, H. y Binder, U. 1983. «Manufacture of Cement». En *Cement Engineers' Handbook*, de O. Labahn y B. Kohlhass. Berlin: Bauverlag GMBH. Págs. 179, 214.
- Schuberth, Hermann. 1983. «Quarrying the raw materials». En *Cement Engineers' Handbook*, de O. Labahn y B. Kohlhass. Berlin: Bauverlag GMBH. Págs. 28-30.
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. 2007. *ASTM C289-07. Método de Ensayo Estándar para Reactividad potencial Alcali Silice de Agregados (Método Químico)*. West Conshohocken. ASTM Internacional. 10 págs.
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. 2017. *ASTM C25-11. Estandar Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime*. West Conshohocken. ASTM Internacional. 38 págs.
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. 2019. *ASTM C1178-19ª. Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. West Conshohocken. ASTM Internacional. 11 págs.
- Triviño Vázquez, F. 1985. «Bases para la interpretación de los resultados de la pérdida al fuego, SO<sub>3</sub> y residuo insoluble». *Materiales de Construcción* [España] 35 (198): 3-5.
- Universidad de Burgos. 2020. *Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)* – Parque Científico Tecnológico. <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb> [24 de julio de 2022].



## XII. ANEXOS

### A. Datos originales

Cuadro 26. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 1, mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Wt%							
		O	Ca	Mg	Si	Al	Fe	Te	B
1	1	54.7	42.5	0.7	1.4	0.7	0.0	0.0	0.0
	2	47.7	37.5	2.7	7.2	3.1	1.7	0.0	0.0
	3	42.7	46.6	1.6	2.3	1.1	0.0	5.7	0.0
2	4	56.2	40.2	1.6	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	13	23.7	18.1	0.7	0.5	0.0	0.0	3.3	53.7
	14	52.5	44.1	1.0	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0
	15	56.2	39.8	1.8	1.7	0.5	0.0	0.0	0.0
	16	55.1	41.1	1.5	1.7	0.7	0.0	0.0	0.0
	17	52.0	45.0	1.4	1.0	0.7	0.0	0.0	0.0
	18	51.8	43.8	2.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	19	57.1	42.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Cuadro 27. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 2, mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Wt%								
		O	Ca	Mg	Si	Al	Fe	C	W	Br
1	1	48.6	32.9	0.4	1.4	0.6	0.0	16.2	0.0	0.0
	2	47.9	31.3	0.9	3.3	1.3	0.5	14.8	0.0	0.0
	3	40.5	40.1	0.9	2.8	1.1	0.8	13.9	0.0	0.0
	4	46.3	35.3	0.5	1.8	0.7	0.3	15.1	0.0	0.0
	5	33.4	47.7	0.6	2.9	1.2	0.9	12.6	0.7	0.0
2	6	24.5	61.6	0.0	0.9	0.0	0.0	11.9	0.0	1.1
	7	19.0	72.7	0.0	0.9	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0

Cuadro 28. Porcentaje en peso de elementos en cristales analizados en la Muestra 5, mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Wt%				
		O	Ca	Mg	Si	Al
3	20	50.8	48.1	0.6	0.3	0.2
	21	47.0	51.6	0.9	0.6	0.0
	22	38.8	61.2	0.0	0.0	0.0
	23	32.5	66.5	0.6	0.4	0.0
	24	47.7	50.7	1.2	0.4	0.0
4	25	50.2	49.0	0.8	0.0	0.0
	26	43.3	56.7	0.0	0.0	0.0
	27	53.3	45.8	1.0	0.0	0.0
	28	49.4	48.2	1.7	0.7	0.0
	29	25.2	74.2	0.6	0.0	0.0

Cuadro 29. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 1.

Sitio	Spectrum	Tamaño ( $\pm 0.05 \mu\text{m}$ )
1	1	57.8
	2	44.1
	3	---
2	4	124.0
	13	---
	14	---
	15	---
	16	---
	17	49.5
	18	70.3
19	46.5	

Cuadro 30. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 2.

Sitio	Spectrum	Tamaño ( $\pm 0.05 \mu\text{m}$ )
1	1	75.1
	2	207.0
	3	104.0
	4	77.0
	5	92.4
2	6	26.7
	7	---

Cuadro 31. Tamaño de cristales analizados mediante análisis SEM en la Muestra 5.

Sitio	Spectrum	Tamaño ( $\pm 0.05 \mu\text{m}$ )
3	20	87.0
	21	135.0
	22	89.5
	23	---
	24	---
4	25	86.8
	26	210.0
	27	96.4
	28	---
	29	---

Cuadro 32. Masas y volúmenes de materiales utilizados en la preparación de los morteros propuestos

No.	Mortero	Masa de materiales constitutivos ( $\pm 0.005 \text{ kg}$ )			Volumen de agua ( $\pm 0.005 \text{ L}$ )
		Cal	Arena	Cemento	
1	Diseño 1	1.00	2.70	0.00	1.50
2	Diseño 2	1.40	3.60	0.00	1.68
3	Diseño 3 <sup>A</sup>	1.30	5.30	0.15	1.92
4					1.65
5	Diseño 4	1.00	3.60	0.20	1.93
6	Diseño 5 <sup>B</sup>	1.00	3.10	0.30	1.63
7					1.80
8					2.50
9	Diseño 6	1.00	3.10	0.40	1.53
10	Diseño 7 <sup>A</sup>	1.00	3.10	0.60	1.53
11					1.47
<sup>A</sup> Duplicado <sup>B</sup> Triplicado					

Cuadro 33. Resultados de ensayos de mezcla húmeda de morteros de referencia y propuestos

No.	Muestra	Flujo ( $\pm 0.05\%$ )	Retención de agua ( $\pm 0.05\%$ )	Masa unitaria húmeda ( $\pm 0.05$ kg)	Contenido de aire ( $\pm 0.05\%$ )
1	Referencia	108.5	83.0	1566.0	4.6
2	Diseño 1	105.0	83.0	1634.0	4.5
3	Diseño 2	112.0	82.0	1652.0	6.0
4	Diseño 3 <sup>A</sup>	107.0	87.0	1798.0	---
5		114.5	98.0	1871.0	3.6
6	Diseño 4	108.0	81.0	1640.0	4.4
7	Diseño 5 <sup>B</sup>	109.0	75.0	1628.0	4.6
8		106.0	80.0	1644.0	5.0
9		107.0	83.0	1633.0	4.5
10	Diseño 6	113.0	84.0	1628.0	4.3
11	Diseño 7 <sup>A</sup>	111.0	84.0	1647.0	4.4
12		108.0	82.0	1656.0	3.6
<sup>A</sup> Duplicado <sup>B</sup> Triplicado					

Cuadro 34. Resultados de ensayo de resistencia de morteros endurecidos de referencia y diseños propuestos

No.	Muestra	Resistencia a la compresión ( $\pm 0.05$ psi)		Resistencia a la adherencia ( $\pm 0.05$ psi)	
		7 días	28 días	7 días	28 días
1	Referencia	27.0	64.0	---	---
2	Diseño 1	73.0	156.0	3.0	3.0
3	Diseño 2	75.0	246.0	4.0	5.0
4	Diseño 3 <sup>A</sup>	109.0	68.0	7.0	7.0
5		243.0	286.0	9.0	18.0
6	Diseño 4	118.0	246.0	6.0	10.0
7	Diseño 5 <sup>B</sup>	81.0	166.0	8.0	15.0
8		222.0	246.0	7.0	9.0
9		60.0	245.0	6.0	13.0
10	Diseño 6	240.0	266.0	9.0	14.0
11	Diseño 7 <sup>A</sup>	274.0	438.0	13.0	17.0
12		277.0	495.0	15.0	21.0
<sup>A</sup> Duplicado <sup>B</sup> Triplicado					

Cuadro 35. Precio de mercado de materiales utilizados en la formulación propuesta

Establecimiento	Precio	Presentación
Producto	Cemento UGC 4000 PSI	
Al Arenal	Q. 80.25	Saco 42.5 kg
Construfácil	Q. 81.92	
Ferretería Guatemala	Q. 84.00	
Ferretería El Obrero	Q. 84.51	
Producto	Horcalsa. Cal hidratada refinado tipo especial	
Al Arenal	Q. 36.10	Saco 25 kg
Construfácil	Q. 36.10	
Ferretería Guatemala	Q. 35.00	Saco 20 kg
Ferretería El Obrero	Q. 33.50	
Producto	Arena cernida 3/8 de pulgada	
Al Arenal	Q. 10.19	Saco 5 kg
Construfácil	Q. 270.00	1 m <sup>3</sup>
Ferretería Guatemala	Q. 300.00	
Ferretería El Obrero	Q. 220.00	

## B. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Conversión de porcentaje en peso a moles para elementos presentes en cristales analizados por SEM-EDS.

Se buscó determinar el número de moles de cada elemento presente en los cristales analizados por SEM-EDS a partir del porcentaje en peso de cada elemento. Por medio de estequiometría se realizó el cálculo correspondiente para cada especie según su peso molecular para obtener el número de moles de la especie.

$$Mol_o = 54.7g \left( \frac{1 \text{ mol } O}{15.999g} \right) = 3.4 \text{ mol}_o$$

Cálculo 2. Suma de conversión a moles de elementos identificados en los cristales analizados por SEM-EDS.

Se buscó obtener el número total de moles que componían las moléculas de cristales identificados.

$$\sum \text{mol} = 3.4 \text{ mol}_o + 1.1 \text{ mol}_{Ca} = 4.6 \text{ mol}$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar el número total de moles de cada especie presente en los cristales analizados por SEM-EDS.

Cálculo 3. Determinación de tamaño promedio de cristales de especies detectadas por medio de análisis SEM-EDS.

Se buscó determinar el tamaño promedio de los cristales de la misma especie determinados en cada muestra analizada.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{(578 + 46.5) \mu m}{2} = 52.5 \mu m$$

Se utilizó el mismo cálculo para determinar los valores promedio de los resultados de: % de flujo, % de retención de agua, masa unitaria húmeda, % de aire, resistencia a la compresión, resistencia a la adherencia



y costo unitario de material; donde el valor de n o número de mediciones varió según las muestras fueron analizadas en duplicado o triplicado.

Cálculo 4. Proporción porcentual de materiales que conforman la mezcla seca de los morteros propuestos.

Se buscó determinar el porcentaje en peso de cada material que conforma la mezcla seca de materiales para la preparación de los diseños de morteros propuestos. En el caso de la determinación del porcentaje de cal en el Diseño 1 se realizó de la siguiente manera:

$$\% \frac{p}{p} = \frac{kg \text{ material}}{kg \text{ mezcla seca}} \times 100 = \frac{1.0 \text{ kg cal}}{(1.0 + 2.7 + 0.0)kg} \times 100 = 27\%$$

Se realizó el mismo cálculo para determinar el porcentaje de cal, arena y cemento en cada diseño, a partir de la masa de cada material según la proporción volumétrica de materiales establecida en el Cuadro 6.

Cálculo 5. Prueba Q de Dixon para evaluar datos atípicos de promedio de resistencia a la compresión a 7 días de resultados de muestras de Diseño 5.

Se buscó determinar si el valor de resistencia a la compresión (222.0 psi) a 7 días de fraguado obtenido en la segunda muestra de mortero preparado según el Diseño 5 era un dato atípico del conjunto de datos.

$$Q = \frac{|x_a - x_b|}{R} = \frac{|222 - 80|psi}{(220 - 60)psi} = 0.870$$

Cálculo 6. Evaluación de resultado de la Prueba Q de Dixon para datos atípicos de promedio de resistencia a la compresión a 7 días de resultados de muestras de Diseño 5.

Se buscó determinar para una muestra de 3 datos con un nivel de confianza de 95% (0.970) el rechazo o aceptación de la hipótesis nula ( $H_0$ , el valor máximo no es un dato atípico).

$$Q = 0.870 < 0.970$$

Ya que el resultado obtenido en la prueba Q es menor al valor crítico (0.970) no se rechaza el valor de resistencia a la compresión de 222.0 psi; por lo que se acepta dicho valor. De la misma manera se evaluó el

conjunto de datos obtenidos para la resistencia a la adherencia a 28 días para el Diseño 5, determinándose que el valor de 9.0 psi no es un dato atípico.

Cálculo 7. Prueba Q de Dixon para evaluar datos atípicos de promedio de resistencia a la compresión a 28 días de resultados en triplicado del Diseño 5.

Se buscó determinar si el valor de resistencia a la compresión (166.0 psi) a 28 días de fraguado obtenido en la segunda muestra de mortero preparado según el Diseño 5 era un dato atípico del conjunto de datos.

$$Q = \frac{|x_a - x_b|}{R} = \frac{|166 - 245|psi}{(246 - 166)psi} = 0.988$$

Cálculo 8. Evaluación de resultado de la Prueba Q de Dixon para datos atípicos de promedio de resistencia a la compresión a 28 días de resultados de muestras de Diseño 5.

Se buscó determinar para una muestra de 3 datos con un nivel de confianza de 95% (0.970) el rechazo o aceptación de la hipótesis nula ( $H_0$ , el valor mínimo no es un dato atípico).

$$Q = 0.988 > 0.970$$

Ya que el resultado obtenido en la prueba Q es mayor al valor crítico (0.970) se rechaza el valor de resistencia a la compresión de 166.0 psi; por lo que este es un dato atípico del conjunto.

Cálculo 9. Conversión de unidades de resistencia a la compresión medidas en libras por pulgada cuadrada (psi) a mega pascales (MPa).

Se buscó convertir los valores medidos en libras por pulgada cuadrada lb/pulg<sup>2</sup> o psi a unidades en el sistema internacional en mega pascales (MPa).

$$27.0 \text{ psi} \times \frac{6.894757 \times 10^{-3} \text{ MPa}}{1 \text{ psi}} = 0.186 \text{ MPa}$$

Se aplicó el mismo procedimiento para convertir los valores promedio de las resistencias a la compresión y adherencia determinadas a 7 y 28 días de fraguado medidas en libras por pulgada cuadrada (psi) para convertirlas en unidades en mega pascales (MPa).

Cálculo 10. Determinación de volumen de arena necesaria para preparar un mortero de cal-arena similar a mortero de restauración de referencia.

Se buscó determinó el volumen de arena necesaria para fabricar un mortero de cal-arena con proporciones 1:2 (según Cuadro 6) similar a mortero artesanal de referencia que se puede fabricar a partir de un saco de 25 kilogramos de cal hidratada.

$$25 \text{ kg cal} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ cal}}{1000 \text{ kg}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{2 \text{ vol arena}}{1 \text{ vol cal}} = 50 \text{ l arena}$$

Se utilizaron los pesos específicos medios según Rodríguez Galbarro, 2022.

Cálculo 11. Determinación de masa de arena necesaria para preparar un mortero cal-arena similar a mortero de restauración de referencia.

Se buscó calcular la masa de arena necesaria para preparar una premezcla de cal-arena 1:2 a partir de 25 kg de cal hidratada.

$$50 \text{ l arena} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \times \frac{1500 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3 \text{ arena}} = 75 \text{ kg arena}$$

Se utilizaron los pesos específicos medios según Rodríguez Galbarro, 2022.

Cálculo 12. Determinación de porcentaje másico de cal en mortero cal-arena similar a mortero de restauración de referencia.

$$\% \text{ cal} = \frac{25 \text{ kg cal}}{25 \text{ kg cal} + 75 \text{ kg arena}} \times 100\% = 25\%$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar el porcentaje de arena en la premezcla de mortero similar a mortero de restauración de referencia.

Cálculo 13. Determinación de masa total de mezcla seca (premezcla) de mortero propuesto.

Se determinó la masa de mezcla seca (premezcla) que se puede fabricar a partir de un saco de 25 kilogramos de cal hidratada.

$$25 \text{ kg cal} \times \frac{100\% \text{ masa mezcla seca}}{21\% \text{ masa de cal}} = 119 \text{ kg mezcla seca}$$

Se realizó el mismo cálculo para determinar la masa total del mortero similar al mortero de restauración de referencia.

Cálculo 14. Determinación de material requerido para preparar 119kg de premezcla del mortero propuesto.

Se buscó obtener la masa de arena requerida para fabricar 119 kg de premezcla del mortero propuesto.

$$\text{kg arena} = 119 \text{ kg mezcla seca} \times \frac{66\% \text{ masa arena}}{100\% \text{ masa mezcla seca}} = 78.5 \text{ kg arena}$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar la masa de cemento hidráulico necesario para fabricar 119kg de premezcla a partir de 1 saco de 25 kg de cal hidratada.

Cálculo 15. Cálculo de volumen de material requerido para preparar 119kg de premezcla de mortero propuesto.

Se buscó obtener el volumen de arena requerido para fabricar 119 kg de premezcla del mortero propuesto.

$$78.5 \text{ kg arena} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1500 \text{ kg}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 51 \text{ l}$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar la masa de cal hidratada y cemento hidráulico necesario para fabricar 119kg de premezcla a partir de 1 saco de 25 kg de cal hidratada. Se utilizaron los pesos específicos medios para cada material (Rodríguez Galbarro, 2022).

Cálculo 16. Precio por kilogramo de materiales empleados en la preparación del mortero propuesto.

Se buscó obtener el precio en unidad monetaria (quetzales) por kilogramo de cal hidratada en la formulación del diseño propuesto a partir de precios obtenidos en una consulta de mercado.

$$\frac{Q}{kg} = \frac{Q. 36.10}{1 \text{ sacco}} \times \frac{1 \text{ sacco}}{25 \text{ kg}} = 1.44 \text{ Q/kg}$$

Se aplicó el mismo cálculo para determinar el precio por kilogramo para la arena cernida y el cemento hidráulico. En el caso de la arena cernida se tomó como valor de conversión: 1500 kg por metro cúbico (Rodríguez Galbarro, 2022).

Cálculo 17. Cálculo de costo por kilogramo de material utilizado en la preparación de 119kg de mortero propuesto.

Se buscó obtener el costo en unidad monetaria (quetzales) por kilogramo de cal hidratada requerida para preparar 119 kg de premezcla del mortero propuesto.

$$25.0 \text{ kg cal hidratada} \times \frac{Q. 1.58}{1 \text{ kg}} = Q. 39.46$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar el costo por kilogramo de arena y cemento hidráulico necesario para fabricar 119kg de mezcla seca a partir de 1 sacco de 25 kg de cal hidratada. Se determinó de manera similar el costo por kilogramo de materiales para la preparación de un mortero similar al mortero de restauración de referencia.

Cálculo 18. Costo total de materiales requeridos para la fabricación de 119kg de mezcla seca del mortero propuesto.

Se realizó una sumatoria de los costos en quetzales por la masa de materiales utilizados para preparar 119 kg de premezcla del mortero propuesto, tomando como base 1 sacco de cal hidratada de 25 kg.

$$\sum Q/\text{material} = Q. (39.46 + 50.36 + 30.09) = Q. 119.91$$

Se realizó el mismo cálculo para determinar el costo para la preparación de 100 kg de un mortero similar al mortero de restauración de referencia.

### C. Datos calculados

Cuadro 36. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 5, mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Moles					$\Sigma$ mol
		O	Ca	Mg	Si	Al	
3	20	3.2	1.2	0.0	0.0	0.0	4.4
	21	2.9	1.3	0.0	0.0	0.0	4.3
	22	2.4	1.5	0.0	0.0	0.0	4.0
	23	2.0	1.7	0.0	0.0	0.0	3.7
	24	3.0	1.3	0.0	0.0	0.0	4.3
4	25	3.1	1.2	0.0	0.0	0.0	4.4
	26	2.7	1.4	0.0	0.0	0.0	4.1
	27	3.3	1.1	0.0	0.0	0.0	4.5
	28	3.1	1.2	0.1	0.0	0.0	4.4
	29	1.6	1.9	0.0	0.0	0.0	3.5

Cuadro 37. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 2, mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Mol								$\Sigma$ mol
		O	Ca	Mg	Si	Al	Fe	Te	B	
1	1	3.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6
	2	3.0	0.9	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	4.4
	3	2.7	1.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1
2	4	3.5	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7
	13	1.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	7.0
	14	3.3	1.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
	15	3.5	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7
	16	3.4	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6
	17	3.3	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
	18	3.2	1.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
19	3.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	

Cuadro 38. Cantidad molar de elementos en cristales analizados en la Muestra 5 mediante análisis SEM.

Sitio	Spectrum	Mol									ΣMol
		O	Ca	Mg	Si	Al	Fe	C	W	Br	
1	1	3.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	5.3
	2	3.0	0.8	0.0	0.1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	5.2
	3	2.5	1.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	4.9
	4	2.9	0.9	0.0	0.1	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	5.1
	5	2.1	1.2	0.0	0.1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	4.5
2	6	1.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	4.1
	7	1.2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	3.6

Cuadro 39. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 1.

Sitio	Spectrum	Fórmula semidesarrollada	Fórmula química	Nombre
3	20	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	21	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	22	Ca2O2	2CaO	Óxido de Calcio
	23	Ca2O2	2CaO	Óxido de Calcio
	24	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
4	25	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	26	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	27	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	28	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	29	Ca2O2	2CaO	Óxido de Calcio

Cuadro 40. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 2.

Sitio	Spectrum	Fórmula semidesarrollada	Fórmula química	Nombre
1	1	CaO3.4	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	2	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
	3	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
2	4	CaO3.5	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
	13	Ca0.5O1.5B5	CaB <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	No identificado
	14	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita
	15	CaO3.5	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
	16	CaO3.4	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
	17	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
	18	CaO3	CaO <sub>3</sub>	Calcita/Dolomita
19	CaO3.6	CaO <sub>3</sub>	Calcita	

Cuadro 41. Determinación de fórmulas químicas de cristales analizados mediante SEM en la Muestra 5.

Sitio	Spectrum	Fórmula semidesarrollada	Fórmula química	Nombre
1	1	CaCO3	CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
	2	CaCO3	CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
	3	CaC1.2O2.5	CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
	4	CaCO3	CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
	5	CaCO2	CaCO <sub>2</sub>	No identificado
2	6	Ca1.5CO1.5	Ca <sub>3</sub> C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	No identificado
	7	Ca1.8CO	Ca <sub>2</sub> CO	No identificado



Cuadro 42. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 1.

Especie	Fórmula química	Número de especímenes	Tamaño promedio de cristal (μm)
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	3	52.15 ±0.09
Dolomita	CaMgCO <sub>3</sub>	7	71.98 ±0.13
---	CaB <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	1	---

Cuadro 43. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 2.

Especie	Fórmula química	Número de especímenes	Tamaño promedio de cristal (μm)
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	5	115.8 ±0.11
---	CaCO <sub>2</sub>	1	92.4 ±0.05
---	Ca <sub>3</sub> C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	26.7 ±0.05
---	Ca <sub>2</sub> CO	1	---

Cuadro 44. Recuento de especies minerales y tamaño promedio de cristales analizados por medio de análisis SEM en la Muestra 5.

Especie	Fórmula química	Número de especímenes	Tamaño promedio de cristal (μm)
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	6	123.04 ±0.12
Dolomita	CaMgCO <sub>3</sub>	1	---
Oxido de calcio	CaO	3	89.50 ±0.09

Cuadro 45. Proporción de materiales en la mezcla seca de morteros propuestos.

No.	Mortero	Masa de materiales constitutivos (% p/p)		
		Cal	Arena	Cemento
1	Diseño 1	27	73	0
2	Diseño 2	28	72	0
3	Diseño 3	19	79	2
4	Diseño 4	21	75	4
5	Diseño 5	23	70	7
6	Diseño 6	22	69	9
7	Diseño 7	21	66	13

Cuadro 46. Resultados promedio de ensayos de mezcla húmeda de morteros de referencia y propuestos.

No.	Muestra	Flujo (%)	Retención de agua (%)	Masa unitaria húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de aire (%)
1	Referencia	108.5 ±0.05	83.0 ±0.05	1566.0 ±0.05	4.6 ±0.05
2	Diseño 1	105.0 ±0.05	83.0 ±0.05	1634.0 ±0.05	4.5 ±0.05
3	Diseño 2	112.0 ±0.05	82.0 ±0.05	1652.0 ±0.05	6.0 ±0.05
4	Diseño 3 <sup>A</sup>	110.8 ±0.07	92.5 ±0.07	1834.5 ±0.07	3.6 ±0.07
5	Diseño 4	108.0 ±0.05	81.0 ±0.05	1640.0 ±0.05	4.4 ±0.05
6	Diseño 5 <sup>B</sup>	107.3 ±0.09	79.3 ±0.09	1635.0 ±0.09	4.7 ±0.09
7	Diseño 6	113.0 ±0.05	84.0 ±0.05	1628.0 ±0.05	4.3 ±0.05
8	Diseño 7 <sup>A</sup>	109.5 ±0.07	83.0 ±0.07	1651.5 ±0.07	4.0 ±0.07
<sup>A</sup> Duplicado					
<sup>B</sup> Triplicado					

Cuadro 47. Resistencias promedio a la compresión y adherencia de muestras de diseños de mortero propuestos

No.	Muestra	Resistencia a la compresión (psi)		Resistencia a la adherencia (psi)	
		7 días	28 días	7 días	28 días
1	Referencia	27.0 ±0.05	64.0 ±0.05	---	---
2	Diseño 1	73.0 ±0.05	156.0 ±0.05	3.0 ±0.05	3.0 ±0.05
3	Diseño 2	75.0 ±0.05	246.0 ±0.05	4.0 ±0.05	5.0 ±0.05
4	Diseño 3 <sup>A</sup>	176.0 ±0.07	177.0 ±0.07	8.0 ±0.07	12.5 ±0.07
5	Diseño 4	118.0 ±0.05	246.0 ±0.05	6.0 ±0.05	10.0 ±0.05
6	Diseño 5 <sup>B</sup>	121.0 ±0.09	245.5 ±0.09	7.0 ±0.09	12.3 ±0.09
7	Diseño 6	240.0 ±0.05	266.0 ±0.05	9.0 ±0.05	14.0 ±0.05
8	Diseño 7 <sup>A</sup>	275.5 ±0.07	466.5 ±0.07	14.0 ±0.07	19.0 ±0.07
<sup>A</sup> Duplicado					
<sup>B</sup> Triplicado					

Cuadro 48. Precio por kilogramo de material requerido para la preparación del mortero propuesto

Producto	Establecimiento	Precio por kilogramo (Q/kg)
Cemento UGC 4000 PSI	Al Arenal	1.89
	Construfácil	1.93
	Ferretería Guatemala	1.98
	Ferretería El Obrero	1.99
Promedio		1.95
Horcalsa. Cal Hidratada refinado tipo especial	Al Arenal	1.44
	Construfácil	1.44
	Ferretería Guatemala	1.75
	Ferretería El Obrero	1.68
Promedio		1.58
Arena cernida 3/8 de pulgada	Al Arenal	2.04
	Construfácil	0.18
	Ferretería Guatemala	0.20
	Ferretería El Obrero	0.07
Promedio		0.64

Cuadro 49. Cantidad de materiales y su costo asociado para la preparación de 100kg de premezcla de mortero de cal-arena similar a mortero de referencia.

Material	Masa (kg)	Volumen (l)	Costo (Q)
Cal hidratada	25.0	25	39.46
Arena	75.0	50	48.09

Cuadro 50. Cantidad de materiales y su costo asociado para la preparación de 119kg de premezcla del mortero propuesto.

Material	Masa (kg)	Volumen (l)	Costo (Q)
Cal hidratada	25.0	25	39.46
Arena	78.5	52	50.36
Cemento hidráulico	15.5	13	30.09

## D. Análisis de error

Cálculo 9. Incertidumbre de resistencias a la compresión y adherencia de los diseños de morteros propuestos

Se buscó determinar el valor de la propagación de error del producto de una constante al convertir las medidas en unidades en sistema inglés (psi) a sistema internacional (MPa).

$$\delta q = |A|\delta x = \left| 6.895 \times 10^{-3} \text{ MPa} / \text{psi} \right| * 0.05 \text{ psi} = 3.447 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

Cálculo 10. Incertidumbre de resistencias a la compresión y adherencia promedio de los diseños de morteros propuestos.


Se buscó determinar el valor de la propagación de error de la suma de errores de producto de una constante en la suma de valores de las observaciones en los promedios de las resistencias a la compresión y a la adherencia determinados para los diseños de mortero propuestos.

$$\delta q = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2 + \dots} = \sqrt{3.447 \times 10^{-4} \text{ MPa}^2 + 3.447 \times 10^{-4} \text{ MPa}^2} = 4.875 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

Se utilizó la fórmula para errores independientes y aleatorios para obtener la suma de la cuadratura de los errores de las mediciones. Se aplicó el mismo cálculo para determinar la propagación de la incertidumbre del promedio de las resistencias a la compresión y adherencia de los diseños propuestos de las muestras en duplicados y triplicado.

## E. Informes de ensayos y análisis realizados


Figura 13. Informe de ensayo: determinación de humedad libre de Muestra 1.


 <p>CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 8 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetecc@compro.com</p>		OT	40121
		FECHA	2021-04-20
		PÁGINA	1 DE 1
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CHDY CETEC	Procedencia	YAGUA, PATEN, (LVO)
Dirección	15 av. 18-01 ZONA 8 FINCA LA PEDRERA	Muestra	CAL CON MATERIAL SELECTO PARA RESANE DE ESTUCOS
Contacto	Luis Velásquez/ Marco Carballo/ David Meroquin	Analista(s)	DMORALES
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2021-04-23


**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**  
**DETERMINACIÓN DE HUMEDAD LIBRE**  
ASTM C 25

% Humedad Libre		
No.	Id. De Muestra	%
1	CAL CON MATERIAL SELECTO PARA RESANE DE ESTUCOS	42.23
2		
3		
4		
5		

Determinado a 110 °C durante 2 h.

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio



**OBSERVACIONES**

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@compro.com.

SOL-CT-QC-IE-07/REV 02

**No. 37483 CETEC**

Figura 14. Informe de ensayo: determinación de humedad libre de Muestras 2 a 6.

 <p style="text-align: center;">CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 4 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@compro.com</p>		OT	40384
		FECHA	2021-06-07
		PÁGINA	1 de 1
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CHD CETEC	Procedencia	YAQUA, PETEN, (UVG)
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 4 FINCA LA PEDRERA	Muestra	VARIAS
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	DMORALES
Teléfono	2286-4100	Fecha de Emayo	2021-06-14

**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**  
**DETERMINACIÓN DE HUMEDAD LIBRE**  
*ASTM C 25*

% Humedad Libre		
No.	Id. De Muestra	%
1	JUEGO DE PELOTA, HECHO CON HORCALSA ENTRE MARZO Y MAYO 2019	4.64
2	EDIFICIO, HECHO CON CAL ARTESANAL, FLUIDA ENTRE MARZO-SEPT 2017	21.19
3	MEZCLA HORCALSA Y MATERIAL RECICLADO	10.50
4	CAL ARTESANAL 04/02/2017	24.55
5	CAL HORCALSA ENTRE AGUA- DESDE MARZO 15-21	29.50

Determinado a 110 °C durante 2 h.

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio



**OBSERVACIONES**


Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.  
 Este informe no es un certificado de calidad.  
 Muestra realizada por el cliente.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del (los) ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras priorizadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@cetec@compro.com

SOL-CT-QC-02-07-REV 02

No. 39876 CETEC



Figura 15. Informe de ensayo: pérdida al fuego de Muestra 1.


 <p>CEMENTOS PROGRESO CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 8 La Pedrera Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181 cetec@compro.com</p>	OT	40121
	FECHA	2021-04-20
	PÁGINA	1 de 1
	ÁREA DE LAB.	QC


contacto	CHD CETEC	Procedencia	YAXHA, PETEN (LUVO)
Dirección	15 av. 18-01 ZONA 8 FINCA LA PEDRERA	Muestra	CAL CON MATERIAL SELECTO PARA RESANE DE ESTUCOS
Contacto	Luis Velázquez/ Marco Carballa/ David Marroquin	Analista(s)	OMORALES
Teléfono	2286-4109	Fecha de Ensayo	2021-04-22

**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**  
**PÉRDIDA AL FUEGO**  
*NORMA ASTM C 114*

* LOI (950 °C)		
No.	Id. De Muestra	%
1	CAL CON MATERIAL SELECTO PARA RESANE DE ESTUCOS	40.05
2		
3		
4		
5		

\* Expresada como porcentaje en masa (w/w)

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio/Coordinador


OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga autorización. Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@compro.com

SCL-CT-QC-IE-02/REV2

**No. 37484 CETEC**

Figura 16. Informe de ensayo: pérdida al fuego de Muestras 2 a 6.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864173 Fax: 22864181 cefec@ciempso.com		OT	40384
			FECHA	2021-06-07
			PÁGINA	1 DE 1
			ÁREA DE LAB.	QC
Contacto	CI/D/ CETEC	Procedencia	YAXHA, PETER, (UVG)	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	VARIAS	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	OMCRALES	
Teléfono	2286 4100	Fecha de Ensayo	2021-06-14	


**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**


**PÉRDIDA AL FUEGO**

NORMA ASTM C 114

LOI (950 °C)		
No.	Id. De Muestra	%
1	JUEGO DE PELOTA, HECHO CON HORCALSA ENTRE MARZO Y MAYO 2019	41.05
2	EDIFICIO, HECHO CON CAL ARTESANAL, FLUIDA ENTRE MARZO-SEPT 2017	40.91
3	MEZCLA HORCALSA Y MATERIAL RECICLADO	37.08
4	CAL ARTESANAL 04/02/2021	29.15
5	CAL HORCALSA ENTRE AGUA- DESDE MARZO 15-21	28.58

\* Expresada como porcentaje en masa (w/w)

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio/ Coordinador



**OBSERVACIONES**

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le dan a este informe.  
 Este informe no es un certificado de calidad.  
 Muestra realizada por el cliente.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del (los) ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4173 o al correo laboratoriocefec@ciempso.com.

SOL-CT-QC-E-00REV2

**No. 39875 CETEC**

Figura 17. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 1.

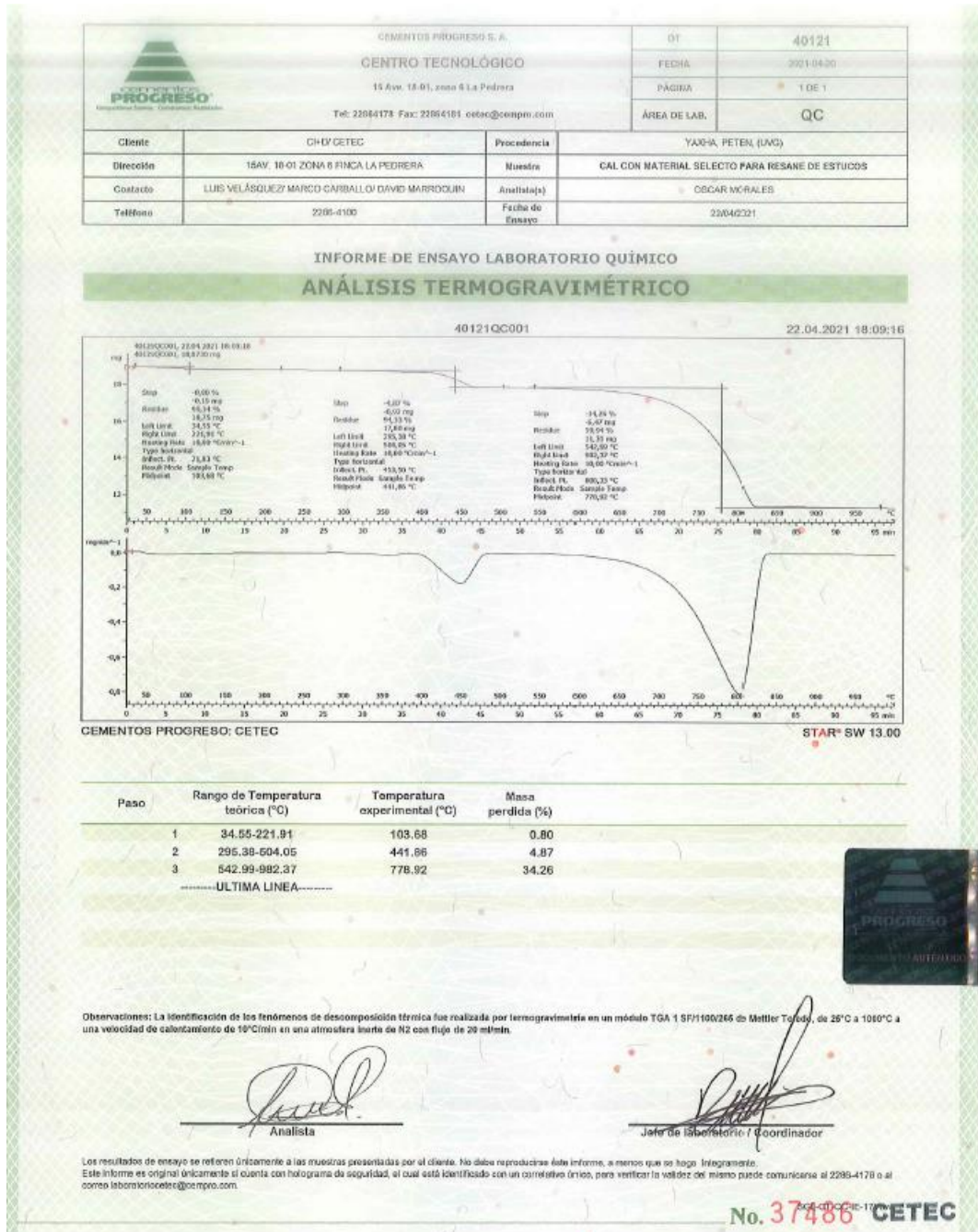
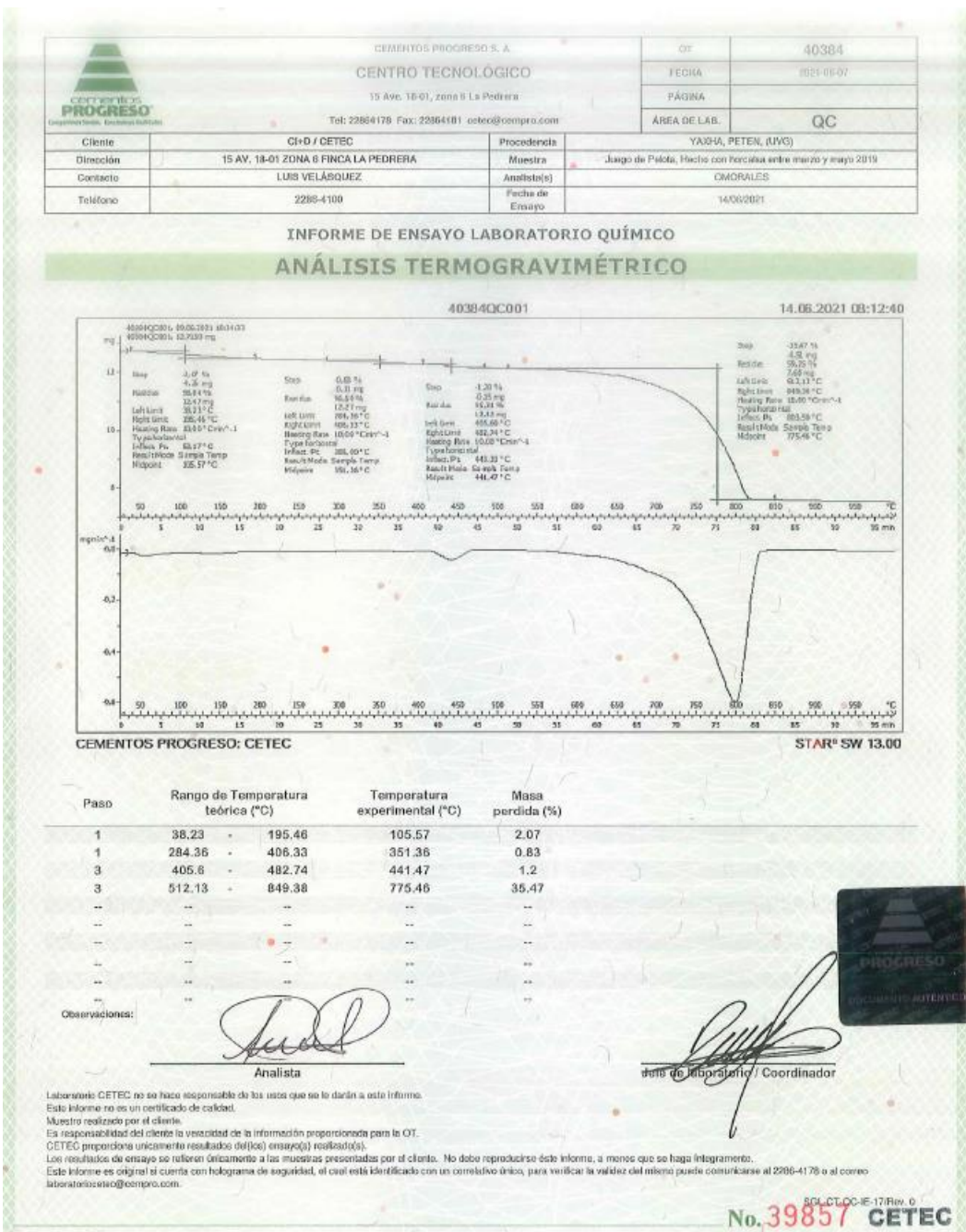




Figura 18. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 2.



**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**  
**ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO**

40384QC001 14.06.2021 08:12:40

40384QC001, 19.05.2021 16:01:03	40384QC001, 12.7939 mg
Step	3.07 %
Initial	4.26 mg
Final	38.94 %
Left Limit	12.57 mg
Right Limit	206.46 °C
Heating Rate	10.00 °C/min
Typical Deviation	0.0000
Initial Pn	63.27 °C
Residual Mode Sample Temp	35.57 °C
Residual Mode	35.57 °C

Step	0.83 %
Initial	0.31 mg
Final	36.54 %
Left Limit	12.27 mg
Right Limit	206.46 °C
Heating Rate	10.00 °C/min
Typical Deviation	0.0000
Initial Pn	63.27 °C
Residual Mode Sample Temp	35.57 °C
Residual Mode	35.57 °C

Step	1.20 %
Initial	0.25 mg
Final	33.34 %
Left Limit	13.43 mg
Right Limit	206.46 °C
Heating Rate	10.00 °C/min
Typical Deviation	0.0000
Initial Pn	63.27 °C
Residual Mode Sample Temp	35.57 °C
Residual Mode	35.57 °C

Step	35.47 %
Initial	4.58 mg
Final	39.25 %
Left Limit	2.65 mg
Right Limit	206.46 °C
Heating Rate	10.00 °C/min
Typical Deviation	0.0000
Initial Pn	63.27 °C
Residual Mode Sample Temp	35.57 °C
Residual Mode	35.57 °C



CEMENTOS PROGRESO: CETEC

STAR® SW 13.00

Observaciones:

  
 Analista

  
 Jefe de Laboratorio / Coordinador



SC/CT-CC-IE-17/Rev. 0  
**No. 39857 CETEC**

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los datos que se le darán a este informe.  
Este informe no es un certificado de calidad.  
Muestra realizada por el cliente.  
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.  
CETEC proporciona únicamente resultados de (los) ensayo(s) solicitados.  
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede contactarse al 2386-4178 o al correo laboratorio@cetecc@compro.com.

Figura 19. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 3.

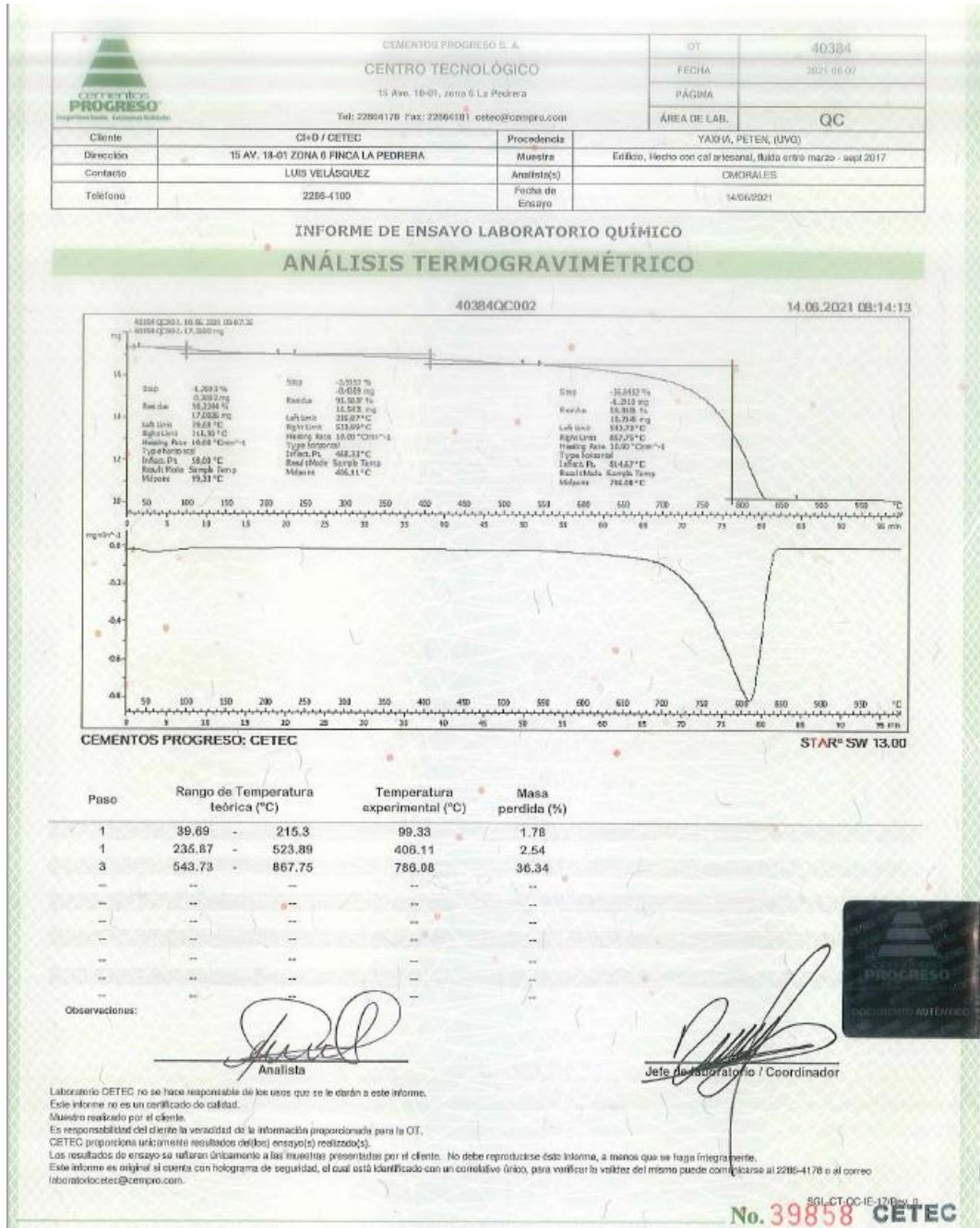


Figura 20. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 4.

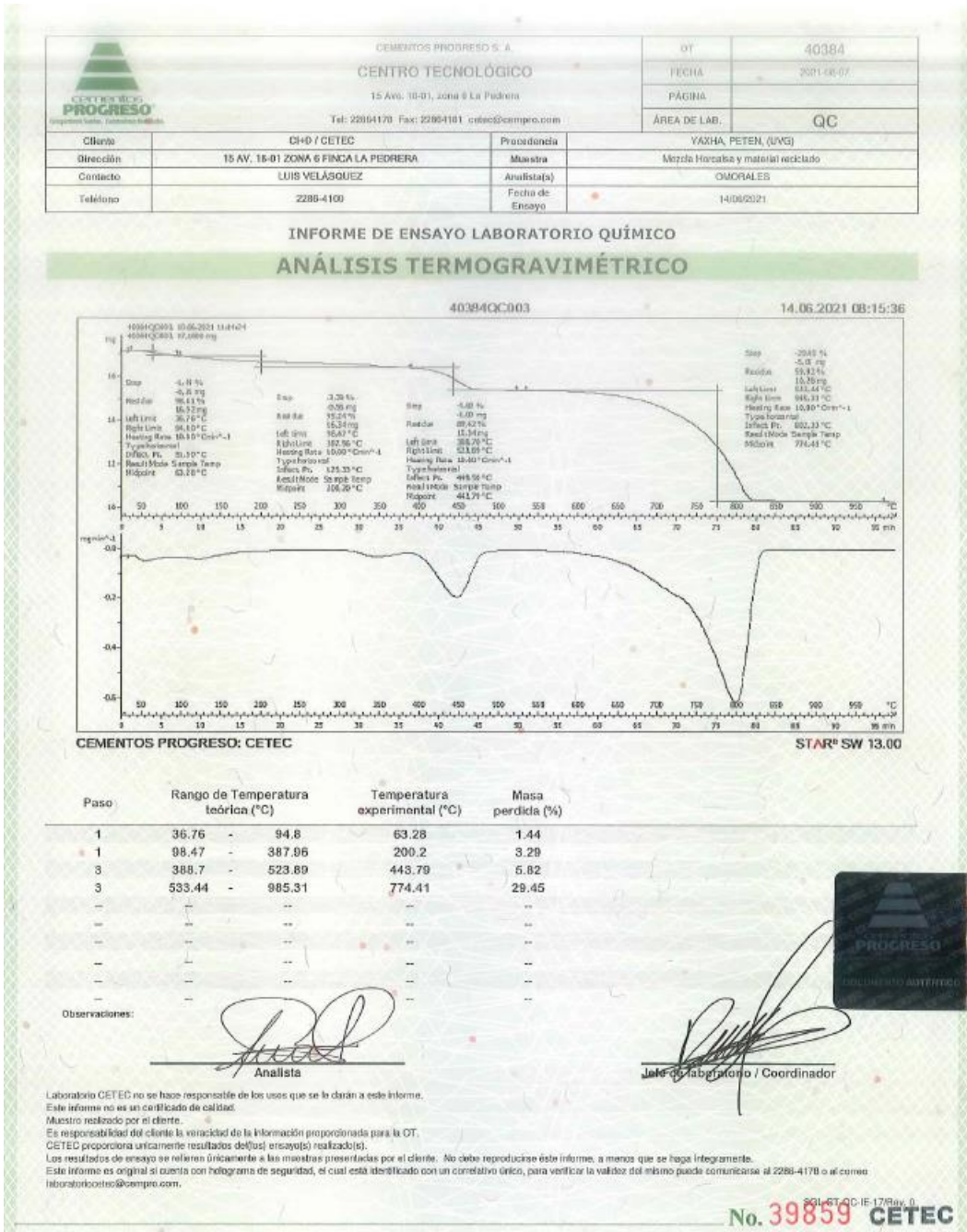




Figura 21. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 5.

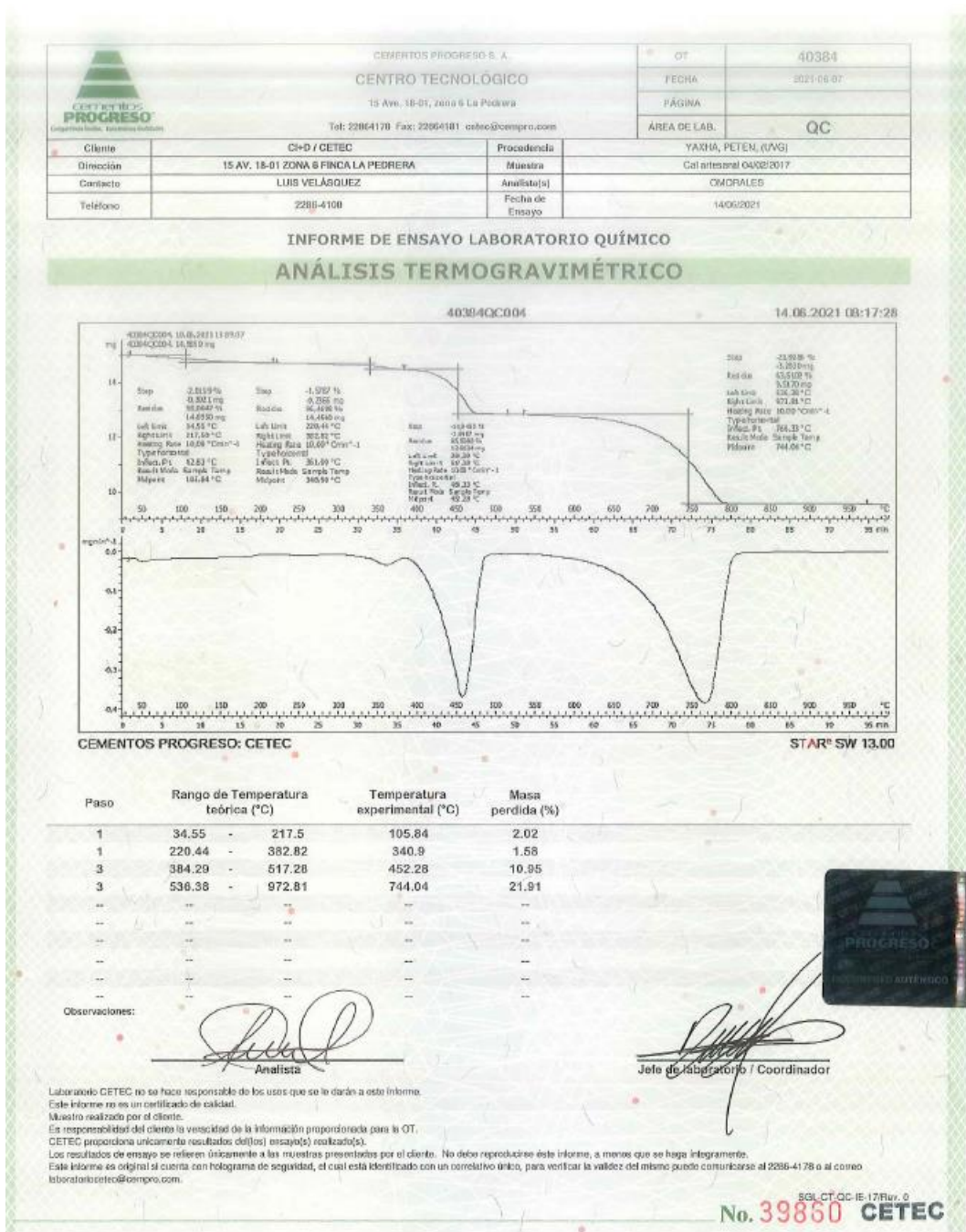


Figura 22. Informe de ensayo: análisis termogravimétrico de Muestra 6.

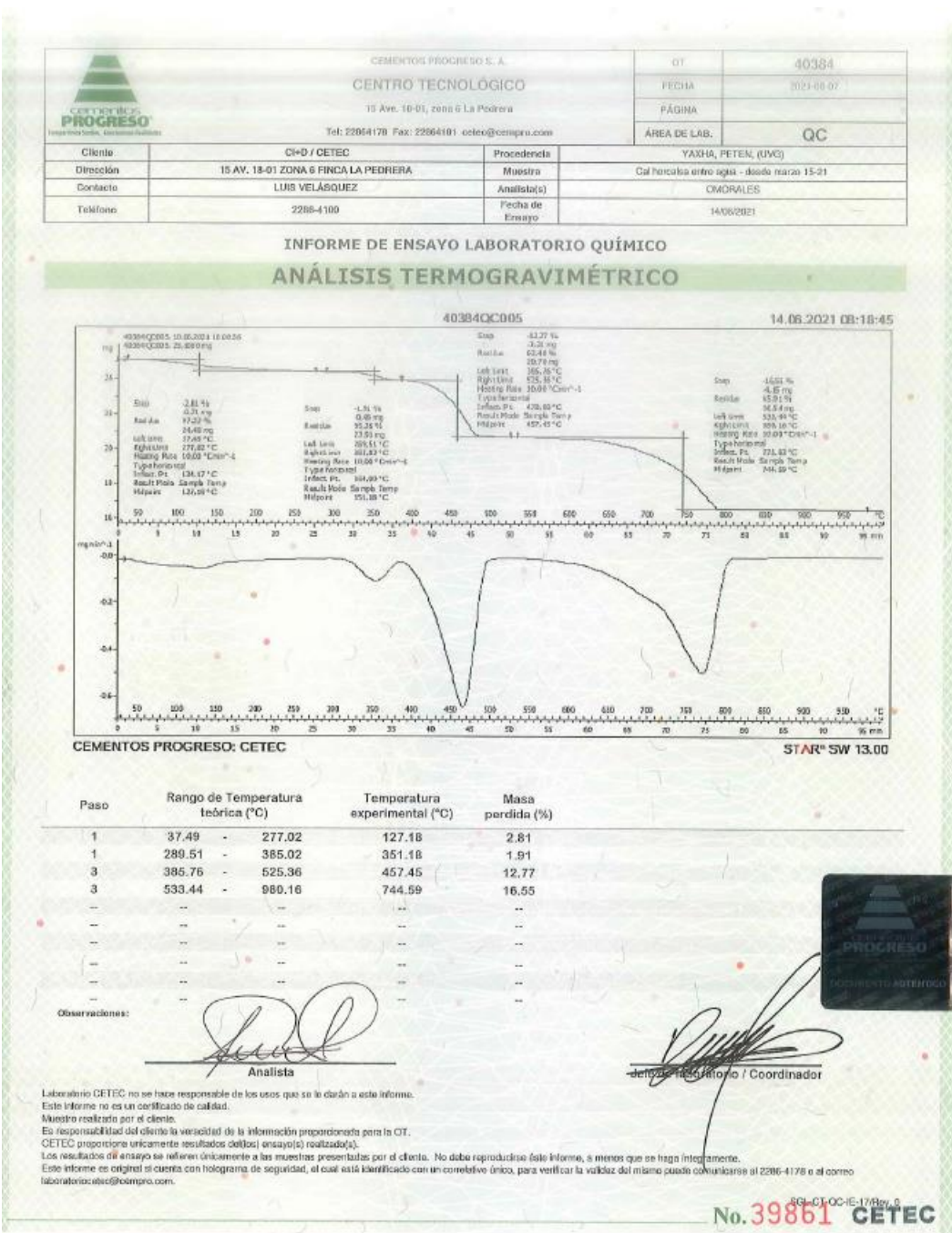




Figura 23. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 1.

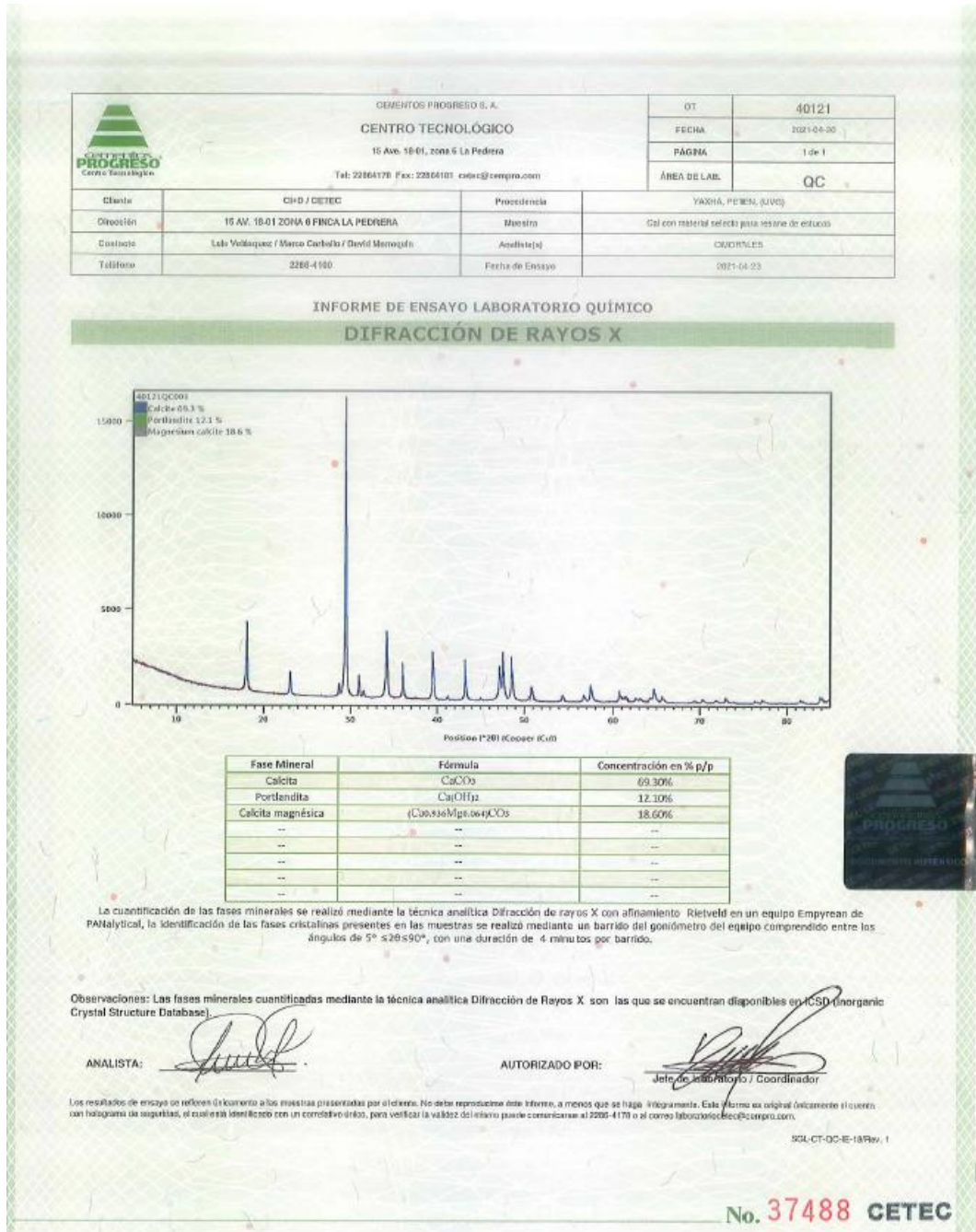


Figura 24. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 2.

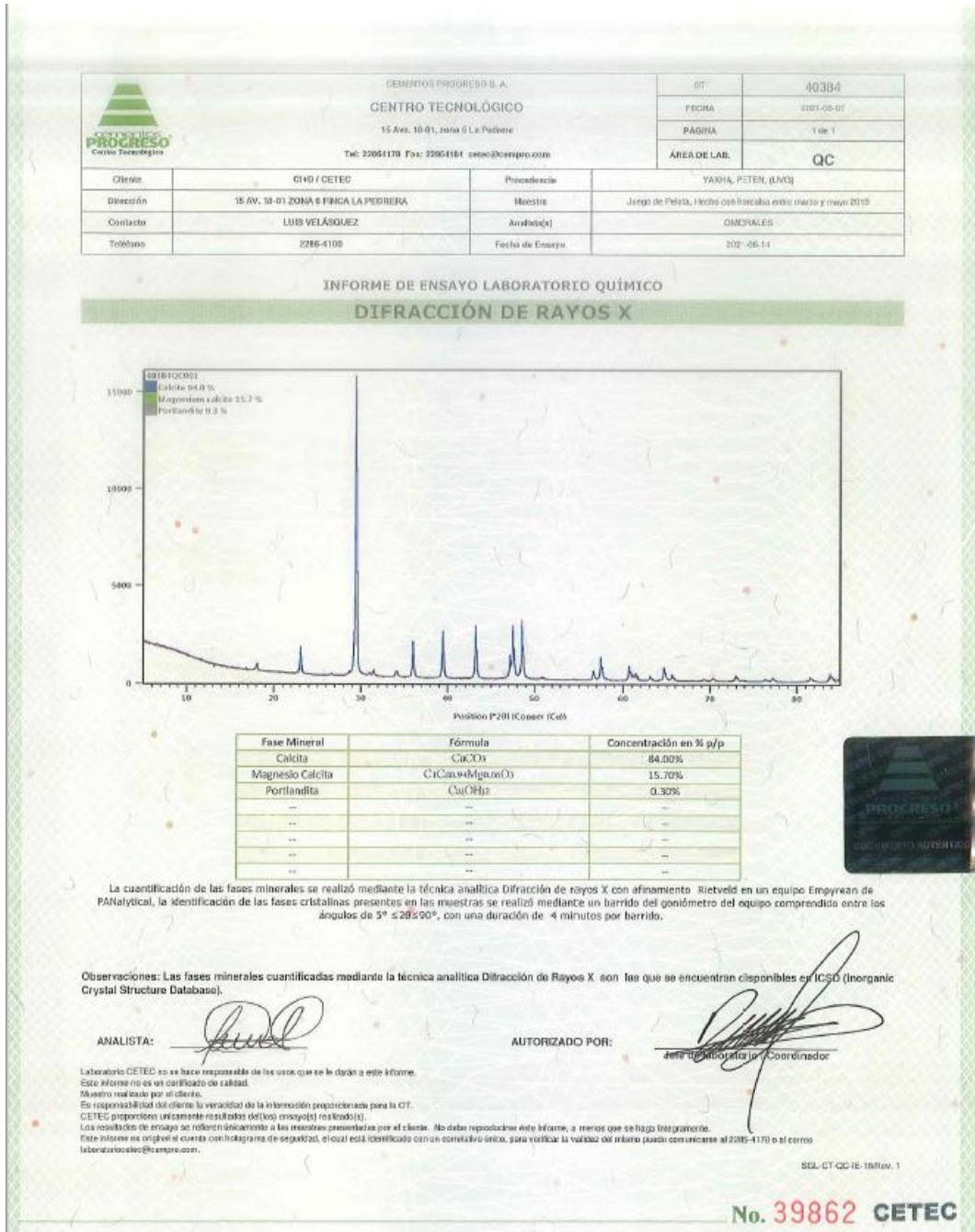


Figura 25. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 3.

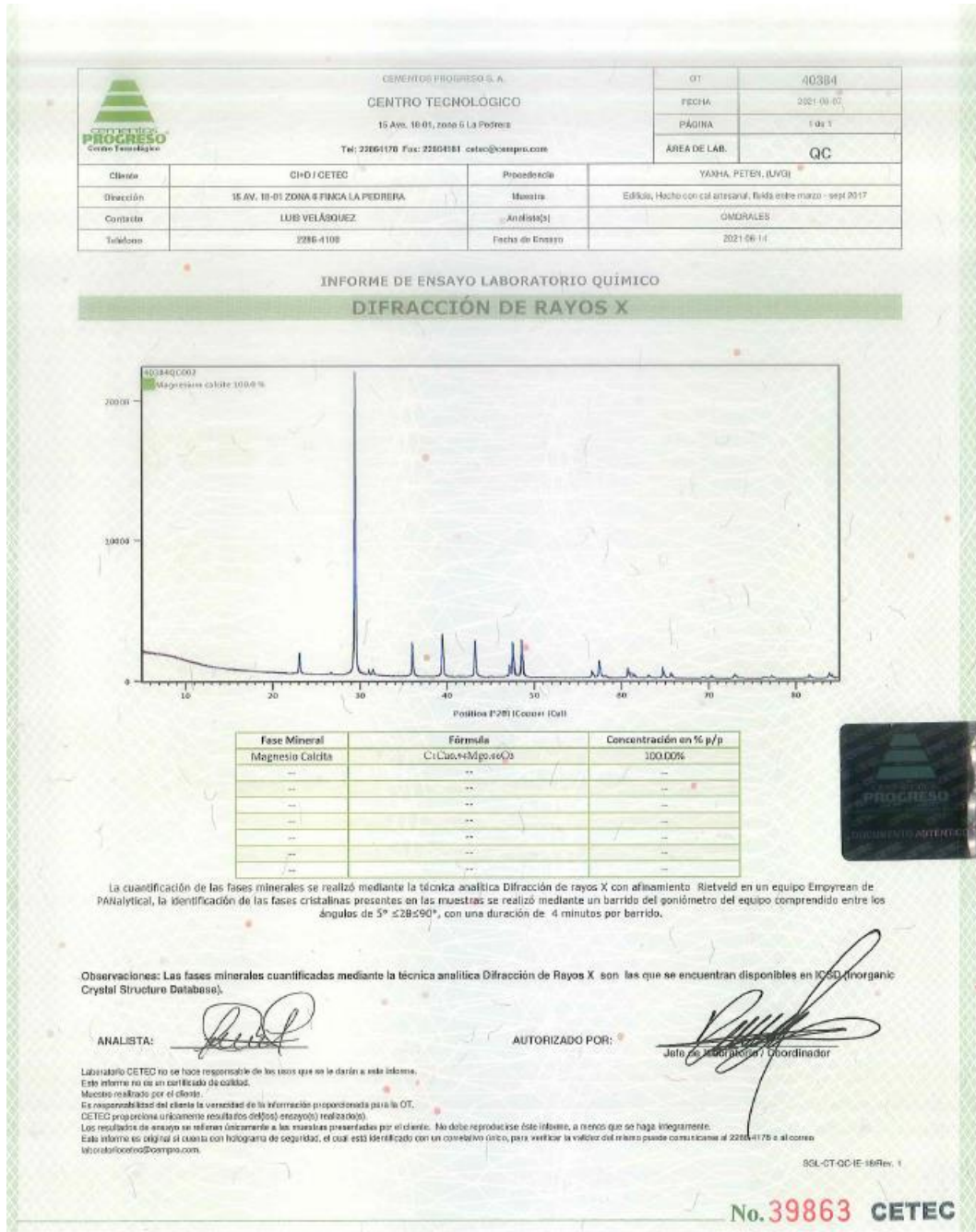




Figura 26. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 4.

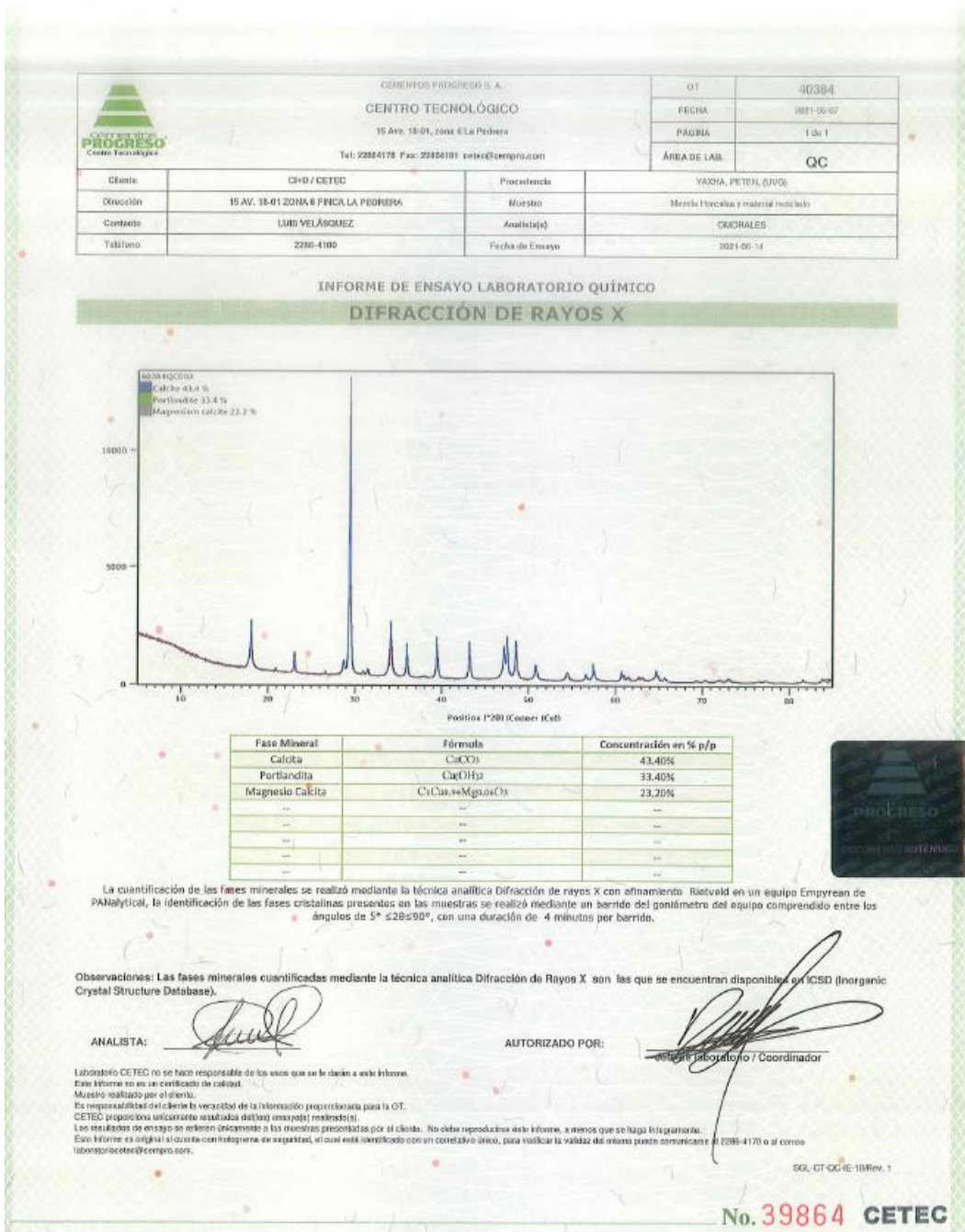


Figura 27. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 5.

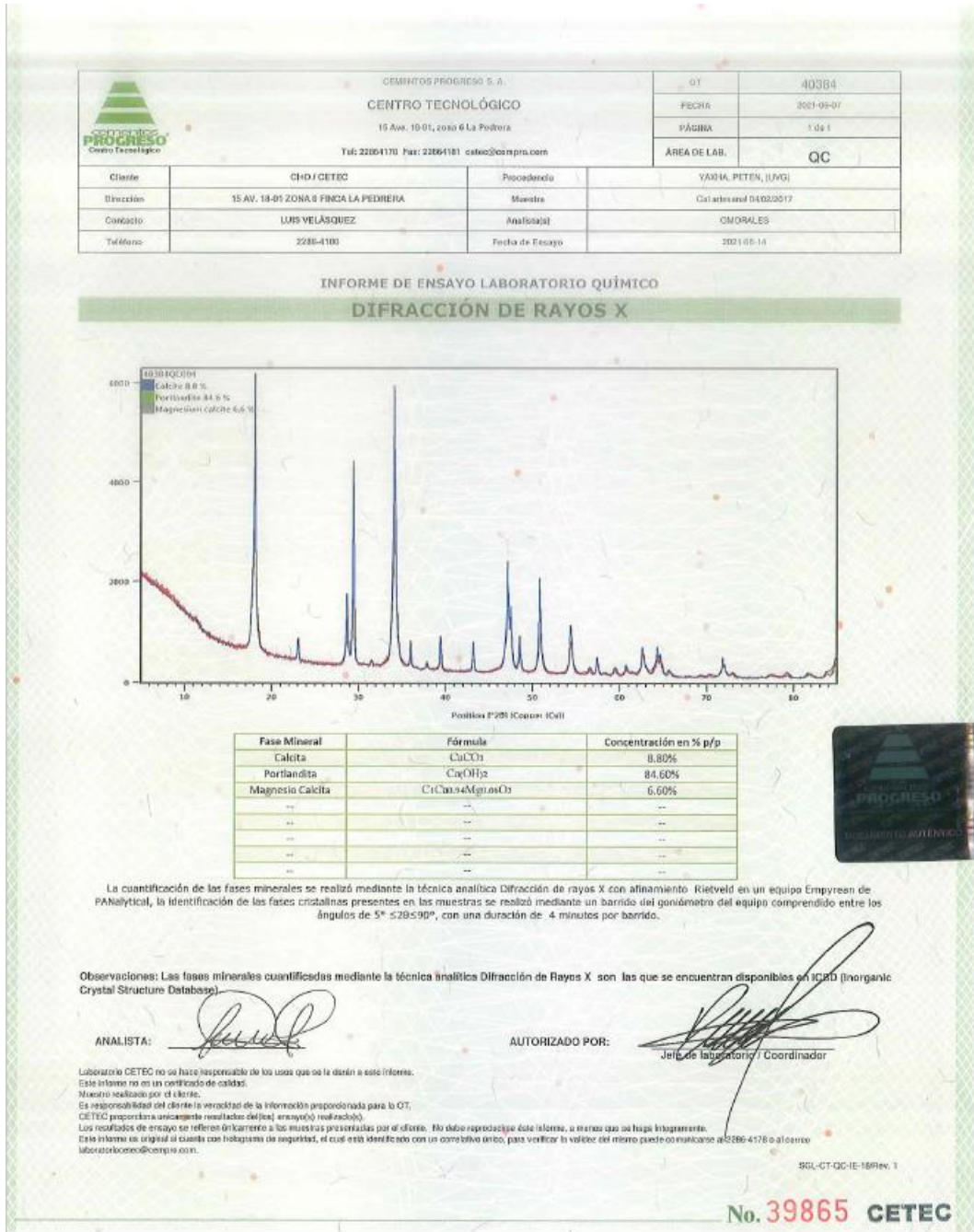


Figura 28. Informe de ensayo: difracción de rayos X de Muestra 6.

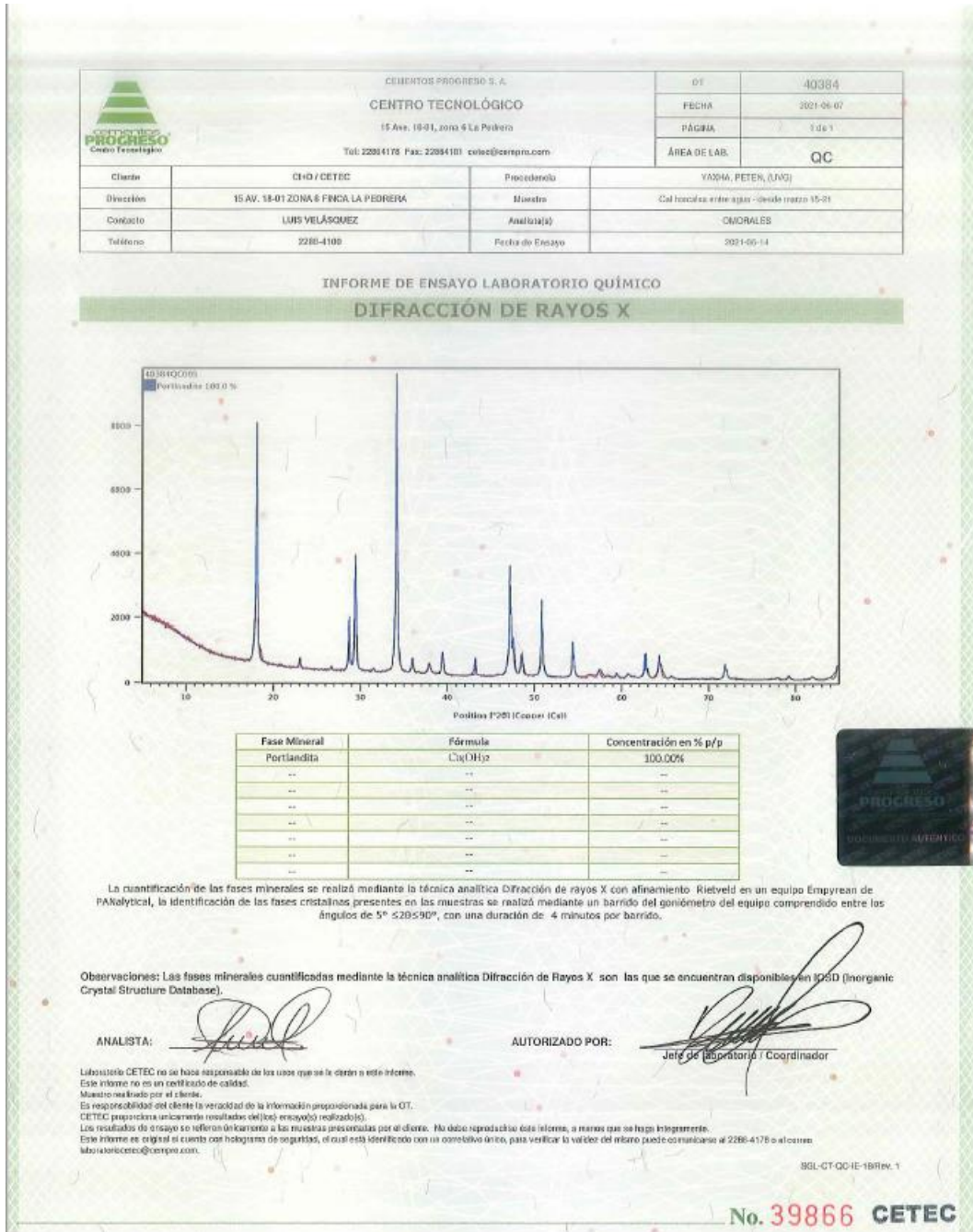




Figura 29. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 1 en la Muestra 1.

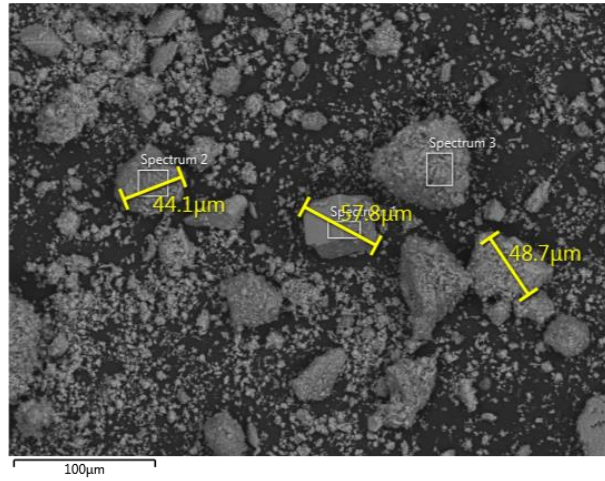


Figura 30. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 1 de la Muestra 1.

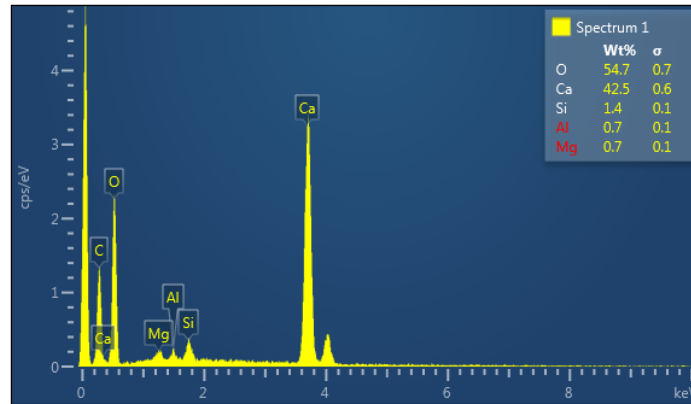


Figura 31. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 2 de la Muestra 1.

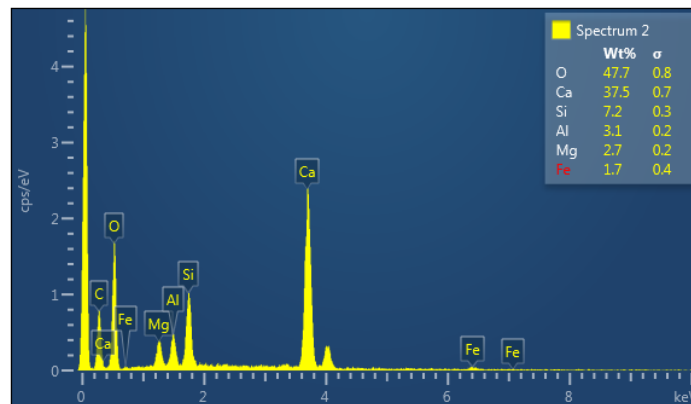


Figura 32. Espectro EDS y datos representativos del spectrum 3 de la Muestra 1.

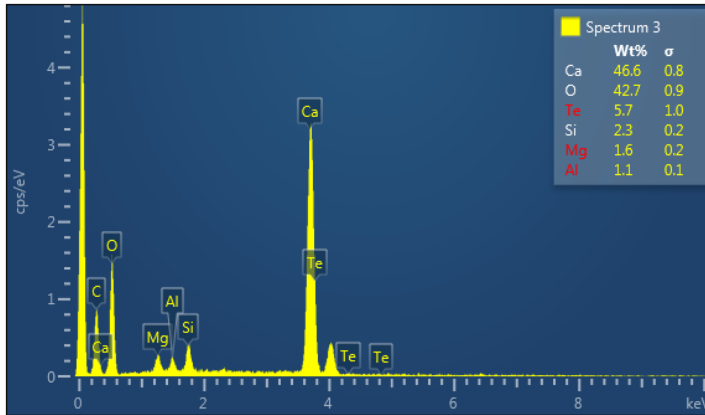


Figura 33. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 2 en la Muestra 1.

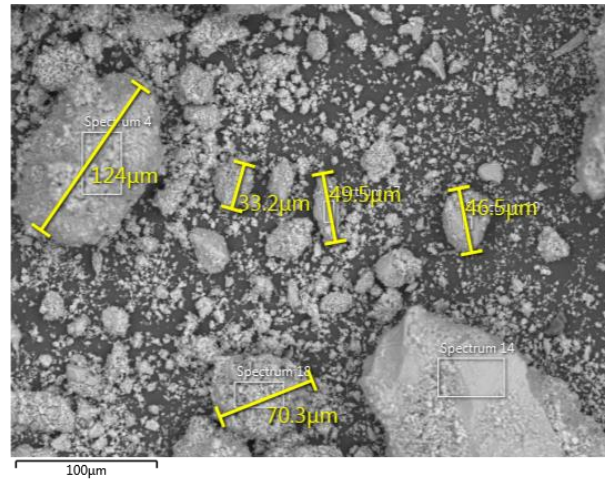


Figura 34. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 4 de la Muestra 1.

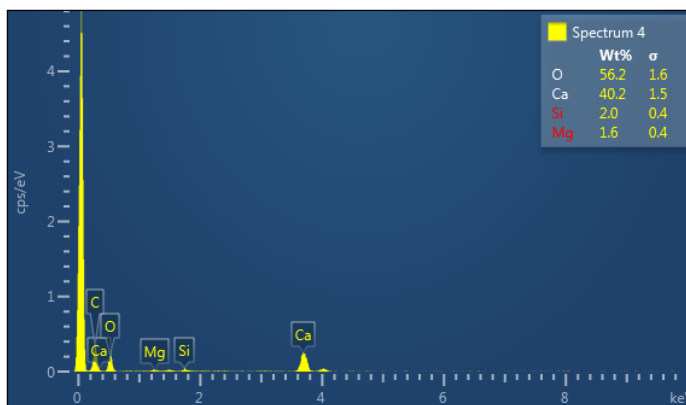




Figura 35. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 13 de la Muestra 1.

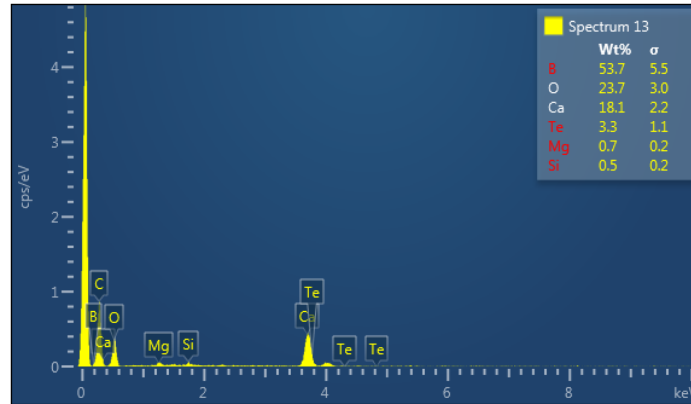


Figura 36. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 14 de la Muestra 1.

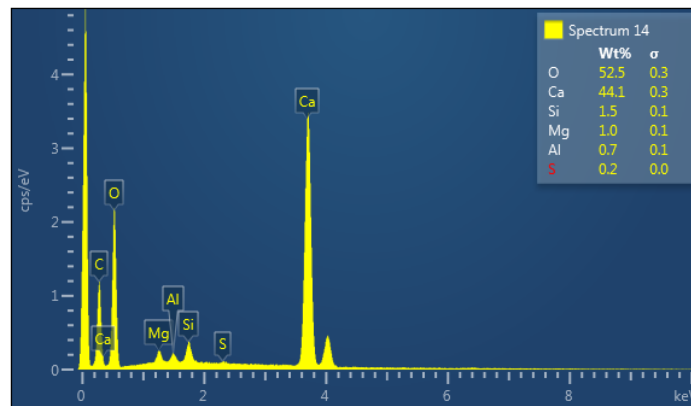


Figura 37. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 15 de la Muestra 1.

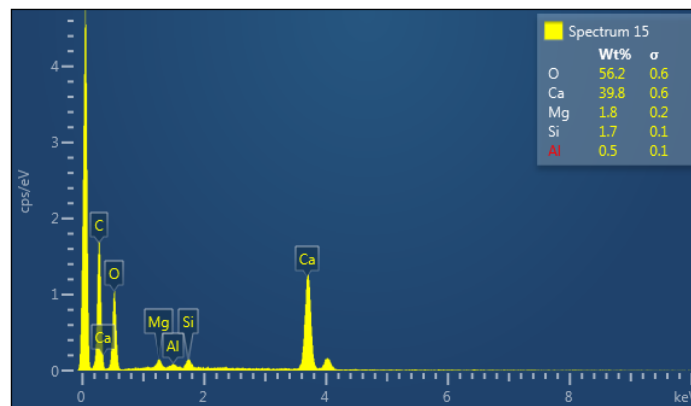


Figura 38. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 16 de la Muestra 1.

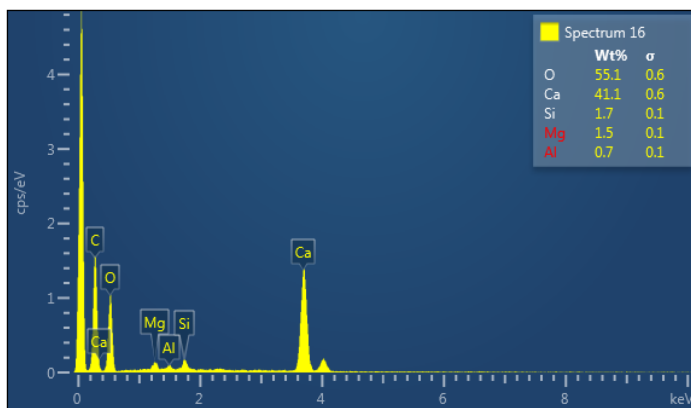


Figura 39. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 17 de la Muestra 1.

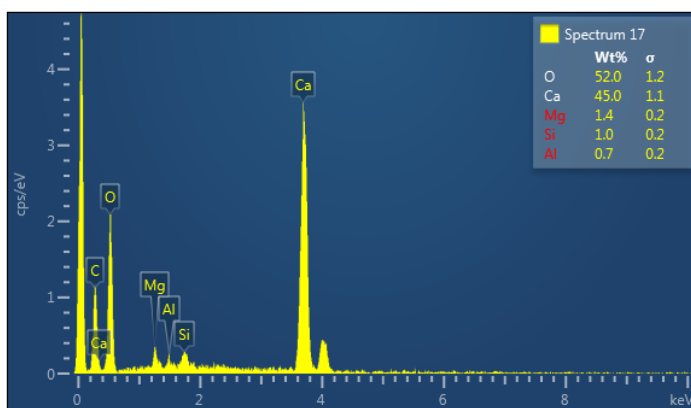


Figura 40. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 18 de la Muestra 1.

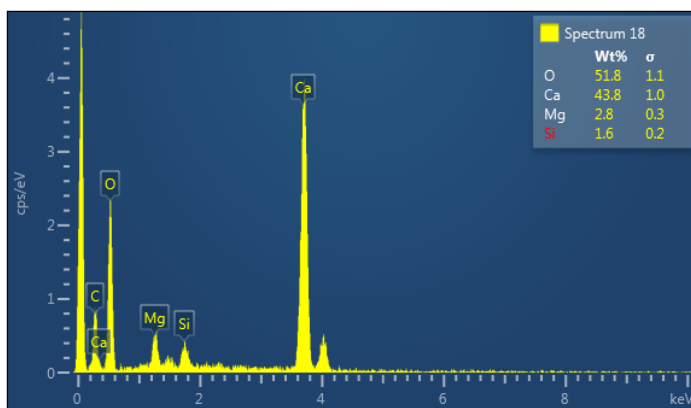


Figura 41. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 19 de la Muestra 1.

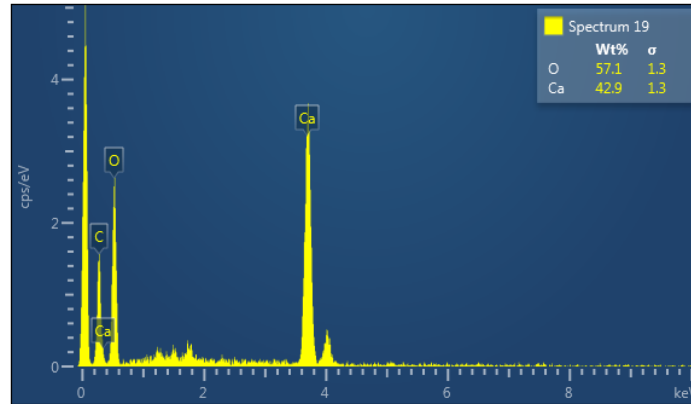


Figura 42. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 1 en la Muestra 2.

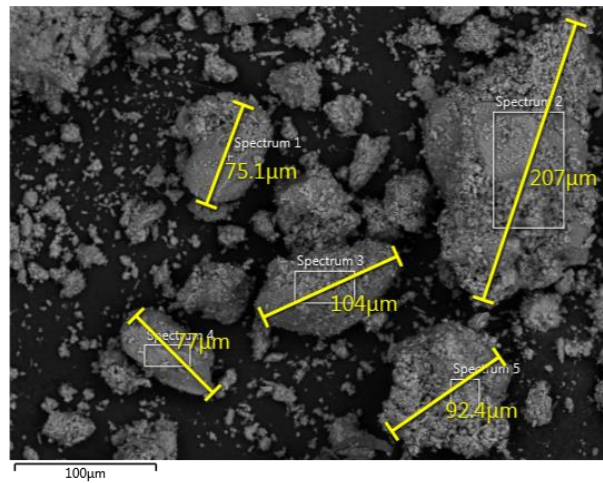


Figura 43. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 1 de la Muestra 2.

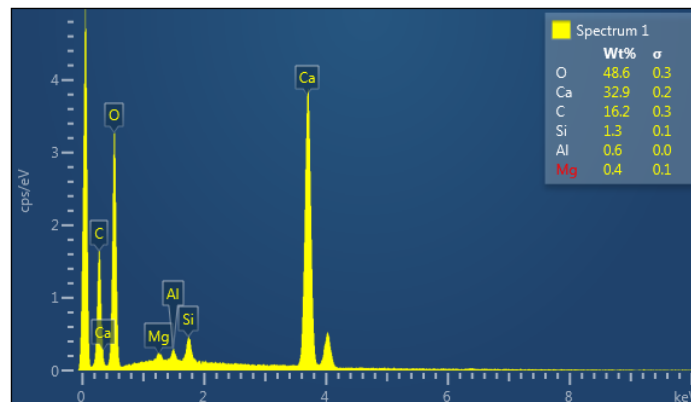


Figura 44. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 2 de la Muestra 2.

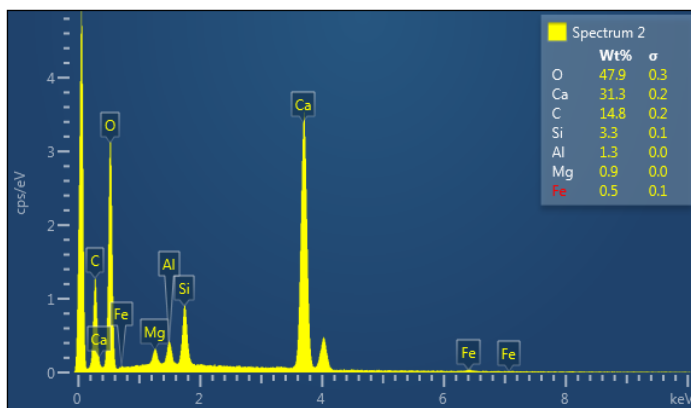


Figura 45. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 3 de la Muestra 2.

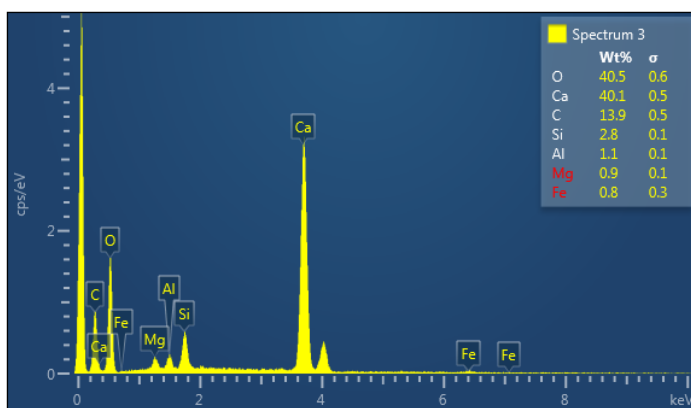


Figura 46. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 4 de la Muestra 2.

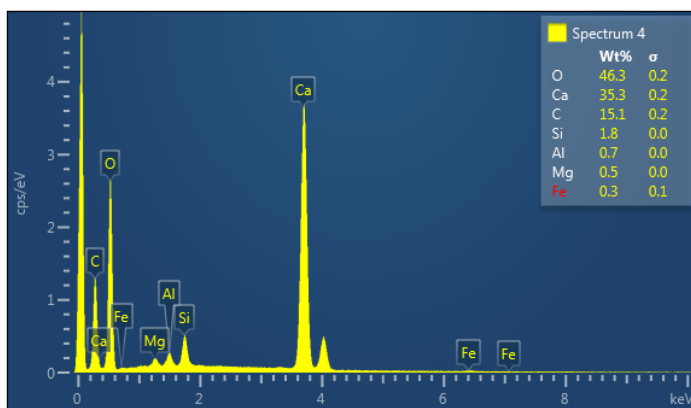


Figura 47. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 5 de la Muestra 2.

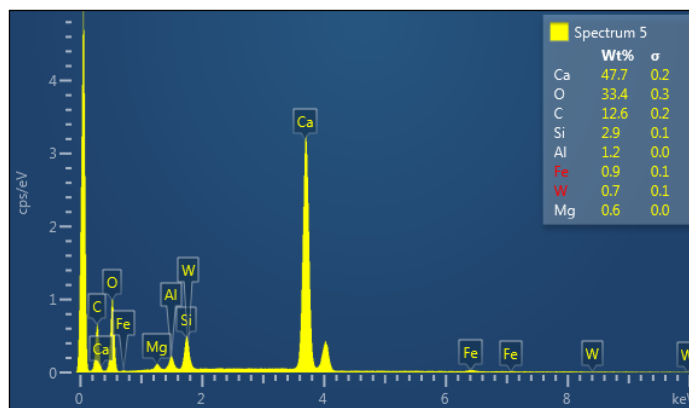


Figura 48. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 2 en la Muestra 2.

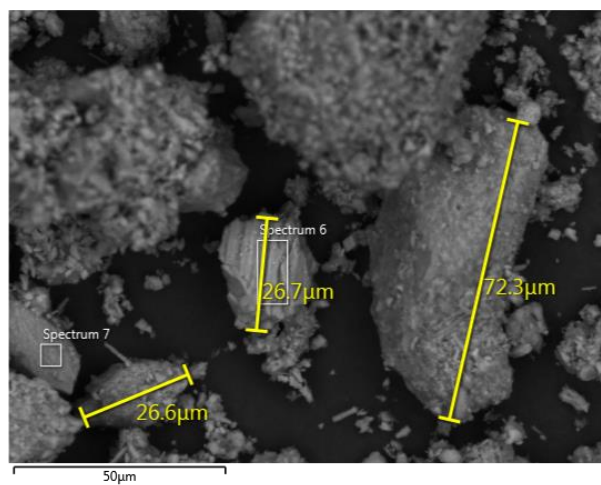


Figura 49. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 6 de la Muestra 2.

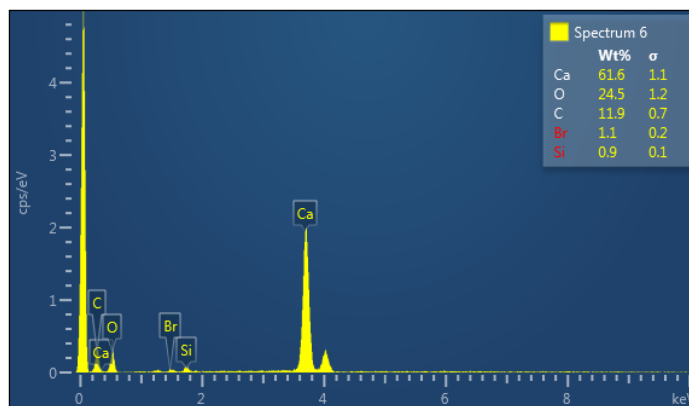


Figura 50. Espectro EDS y datos analíticos representativos del spectrum 7 de la Muestra 2.

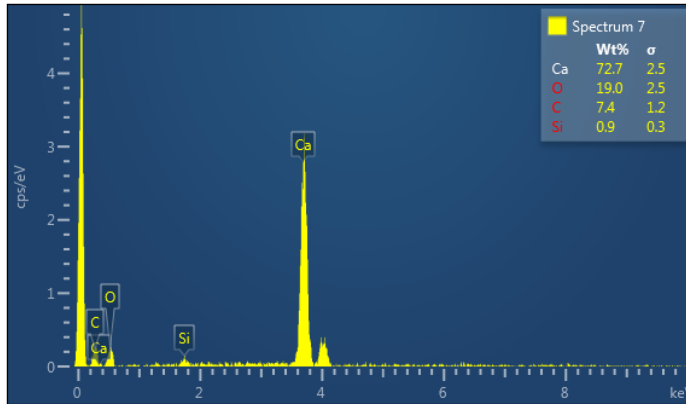


Figura 51. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 3 en la Muestra 5.

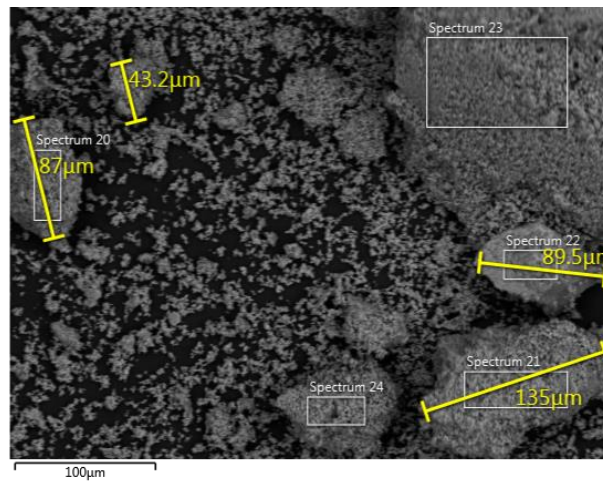


Figura 52. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 20 de la Muestra 5.

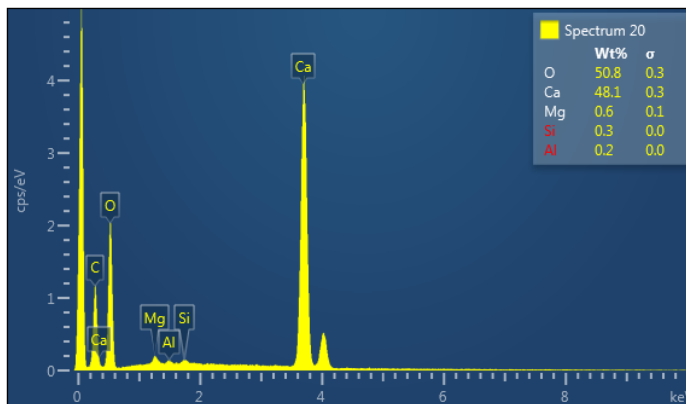


Figura 53. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 21 de la Muestra 5.

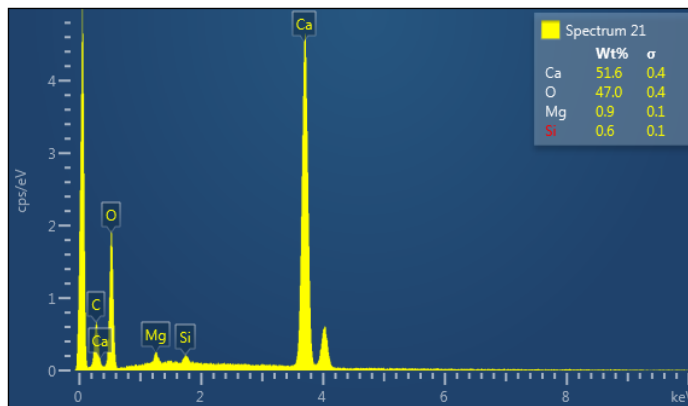


Figura 54. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 22 de la Muestra 5.

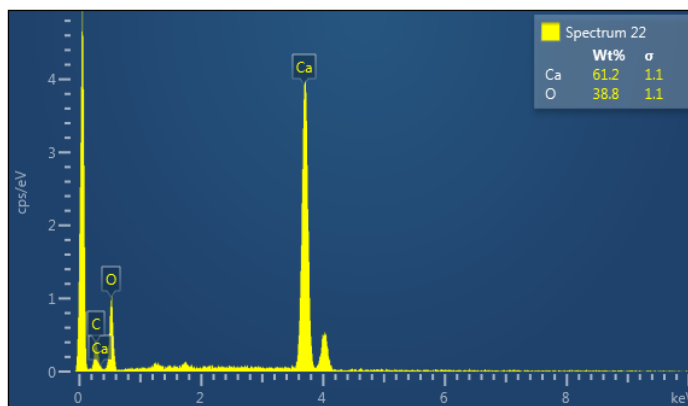


Figura 55. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 23 de la Muestra 5.

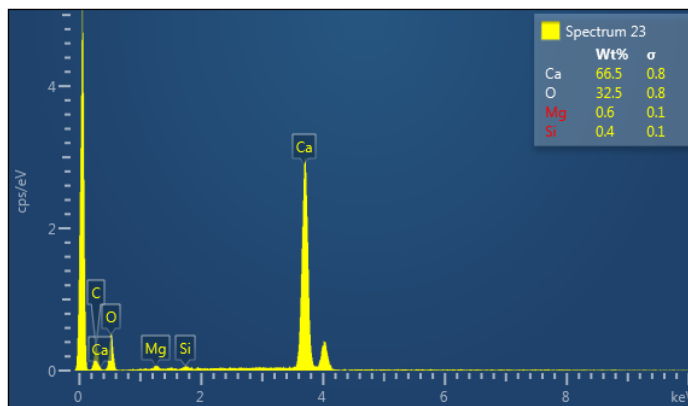


Figura 56. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 24 de la Muestra 5.

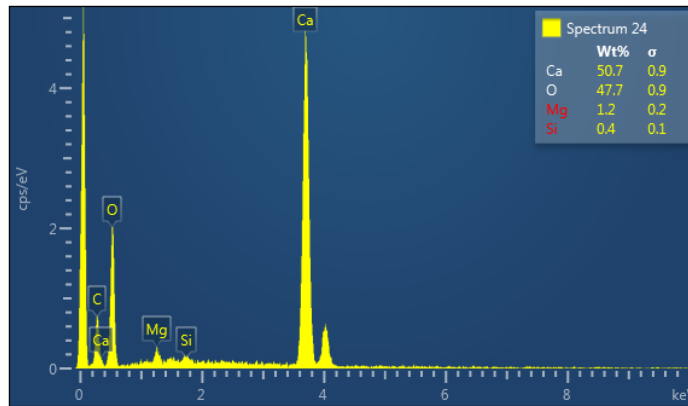


Figura 57. Imagen electrónica por SEM del sitio de análisis 4 en la Muestra 5.

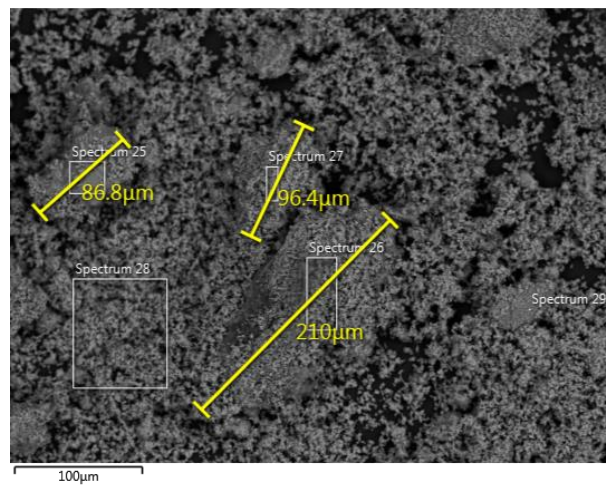


Figura 58. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 25 de la Muestra 5.

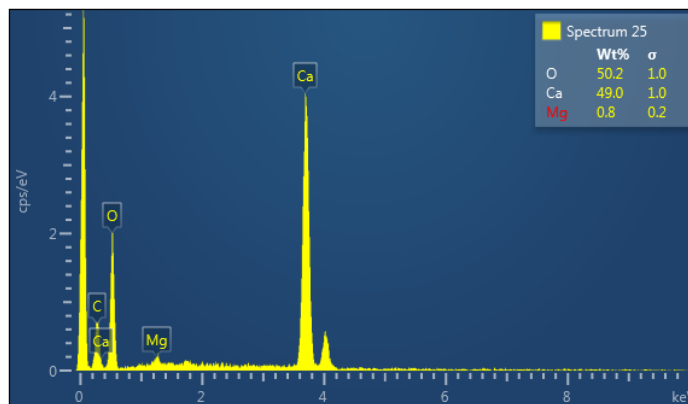




Figura 59. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 26 de la Muestra 5.

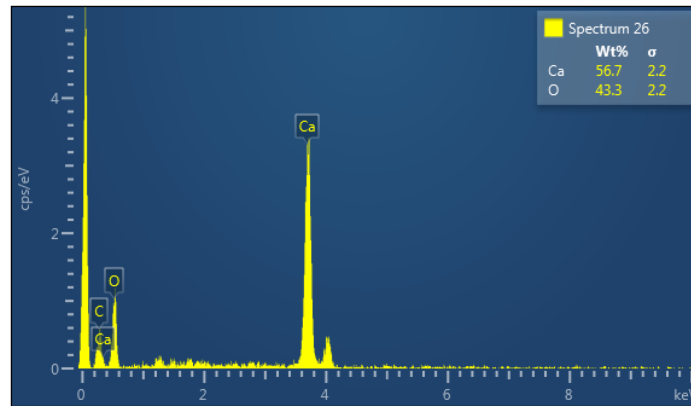


Figura 60. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 27 de la Muestra 5.

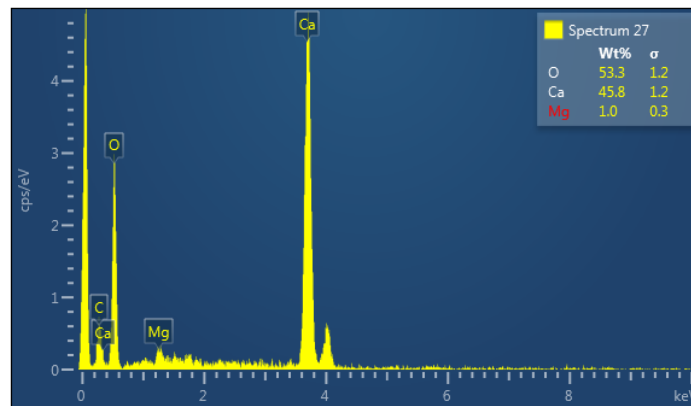


Figura 61. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 28 de la Muestra 5.

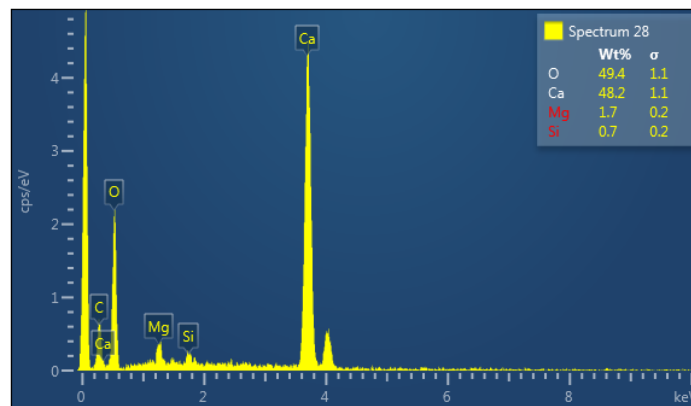


Figura 62. Espectro EDS y datos cualitativos representativos del spectrum 29 de la Muestra 5.

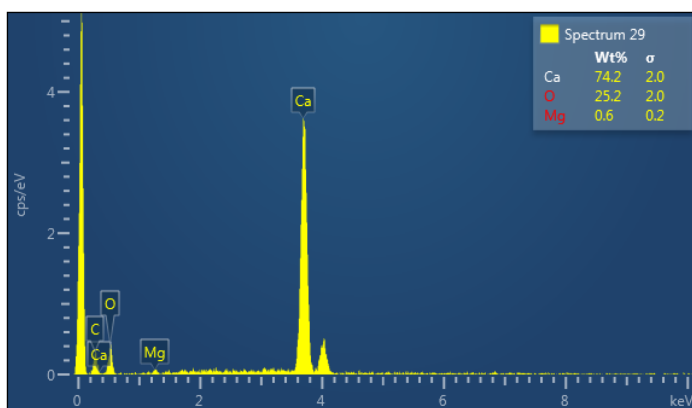




Figura 63. Informe de ensayo: análisis químico (LOI) de agregado fino y grueso.



**CEMENTOS PROGRESO S. A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorio@CETEC@cempro.com



ACREDITADO  
DOI-12-45-J3

OT 41059  
FECHA 2021-10-28  
PÁGINA 1 de 1  
ÁREA DE LAB. QC

Cliente	Cementos Progreso	Procedencia	Sitio arqueológico en Perú.
Dirección / Teléfono	2286 4100	Muestra	Varias
Contacto	Marcia Salguero	Análisis(s)	ETOCAY
Proyecto	Caracterización de muestras de agregados Yachá	Fecha de Ensayo	2021-11-16

**INFORME DE ENSAYO**  
**ANÁLISIS QUÍMICO**  
**MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)														
Muestra	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SiO2	SO3	TiO2	LOI (950 °C)	Total
1. Agregado Fino	1.03	50.25	0.00	0.30	0.07	0.68	0.00	0.00	0.09	0.11	5.30	0.03	42.04	99.80
2. Agregado Grueso	0.26	48.90	0.00	0.11	0.05	3.94	0.00	0.00	0.06	0.19	3.45	0.00	42.88	99.84
---Última Línea---														

\* Expresado como porcentaje en masa (w/w).

Analista

Jefe del Laboratorio (Coordinador)

**OBSERVACIONES (INGRESO ESPECIAL)**

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los datos que se le dan en este informe. Este informe no es un producto de calidad. No se garantiza la exactitud de los datos. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados (datos de ensayo) (resultado). Los resultados de ensayo son válidos únicamente si las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es válido si contiene el código de barras, el código de identificación y el código de barras. Para verificar la validez del informe por favor contactar al 2286-4178 o al correo laboratorio@cempro.com.

952L-OT-OC-IE-003 Rev. 1

Figura 64. Informe de ensayo: difracción de rayos X de agregado fino.

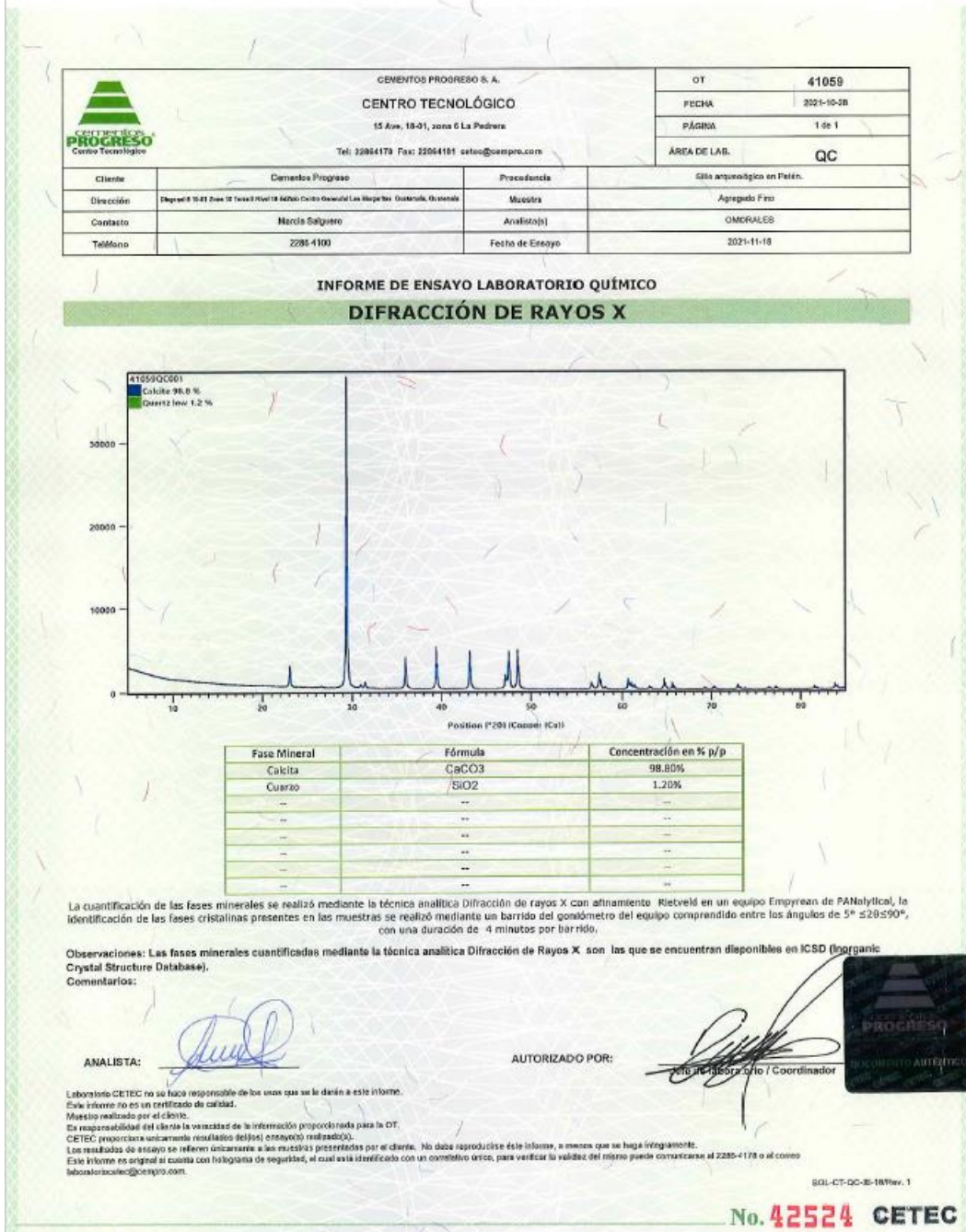




Figura 65. Informe de ensayo: difracción de rayos X de agregado grueso.

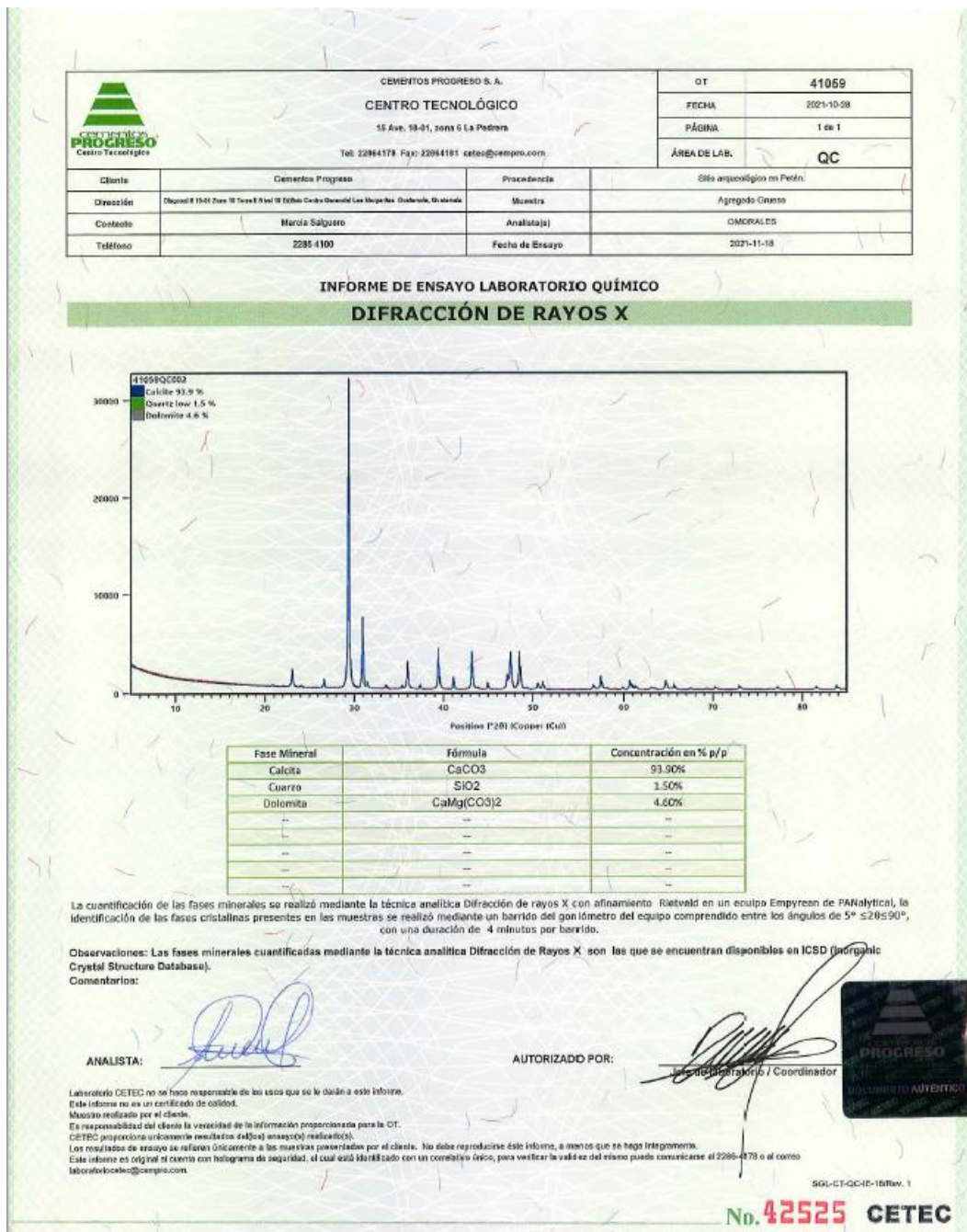


Figura 66. Informe de ensayo: terrones y partículas friables en agregado fino.

 <p><b>CEMENTOS PROGRESO</b> S.A.</p>	CEMENTOS PROGRESO, S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala. Tel: 2286-4178    laboratorioceotec@cempro.com		Orden de Trabajo:	41059-001
			Fecha:	2021-10-28
			Página:	1 De 1
			Impresión:	2021-11-09
Cliente:	Cementos Progreso	Procedencia:	Sitio arqueológico en Petén.	
Dirección:	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	Muestra:	Agregado Fino	
Contacto:	Maicia Bajueso	Proyecto:	Caracterización de muestras de agregados Yaxhá	
Teléfono:	2286 4100	Fecha de Ensayo:	2021-11-09	

**INFORME DE ENSAYO**  
LABORATORIO DE AGREGADOS

**Terrones de arcilla y Partículas friables en los agregados**  
COQUANOR NTG-41010 h10 para agregado fino

Muestra	Perdida %
Agregado Fino	1.2



**EQUINTERO**  
Analista de Laboratorio



Jefe de Laboratorio / Coordinador

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe no es un certificado de calidad.  
 Muestra realizado por el cliente.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.  
 CETEC proporciona únicamente resultados del/los ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorioceotec@cempro.com.

Observaciones:

SGL-OT-AG-IE-10 Rev. 02

**No. 39447** **CETEC**



Figura 67. Informe de ensayo: granulometría de agregado fino.

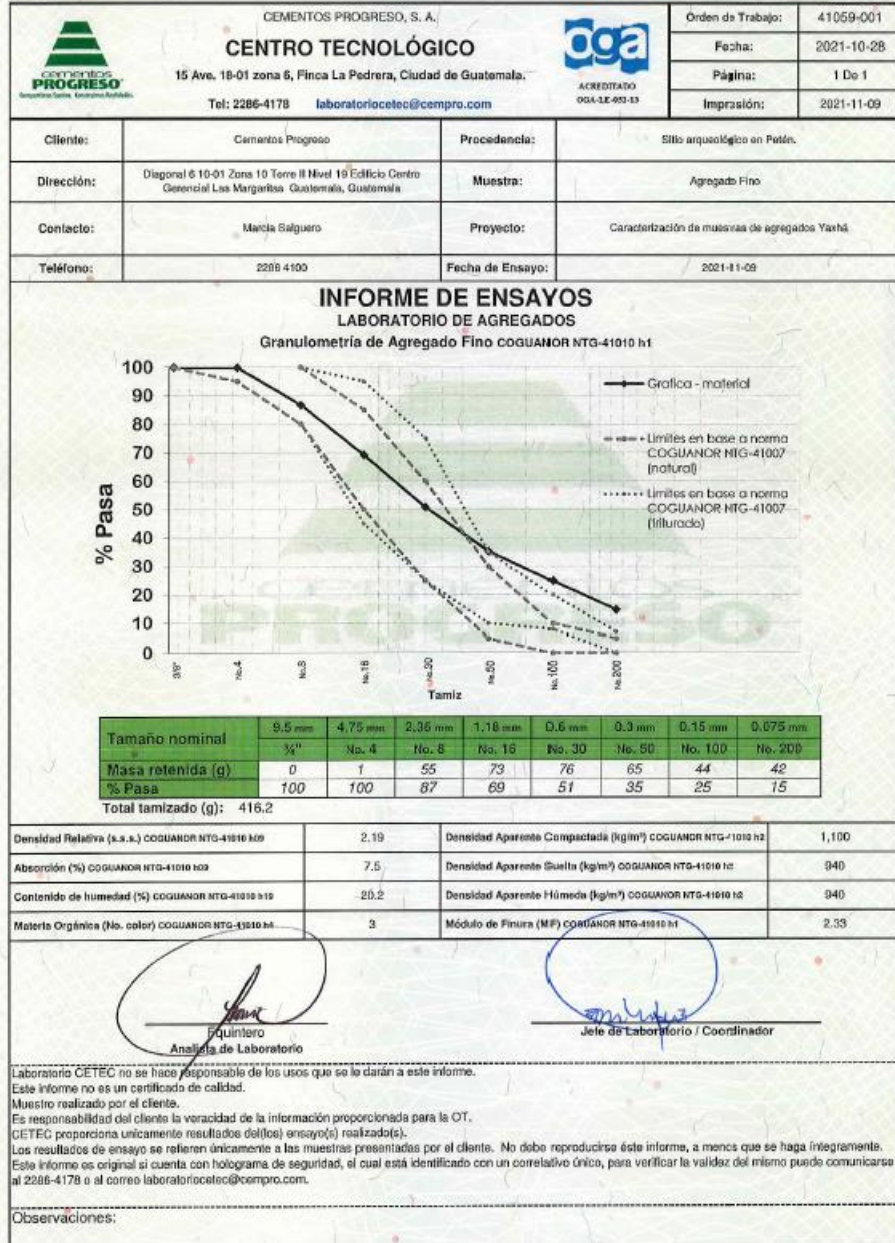


Figura 68. Informe de ensayo: granulometría de agregado grueso.

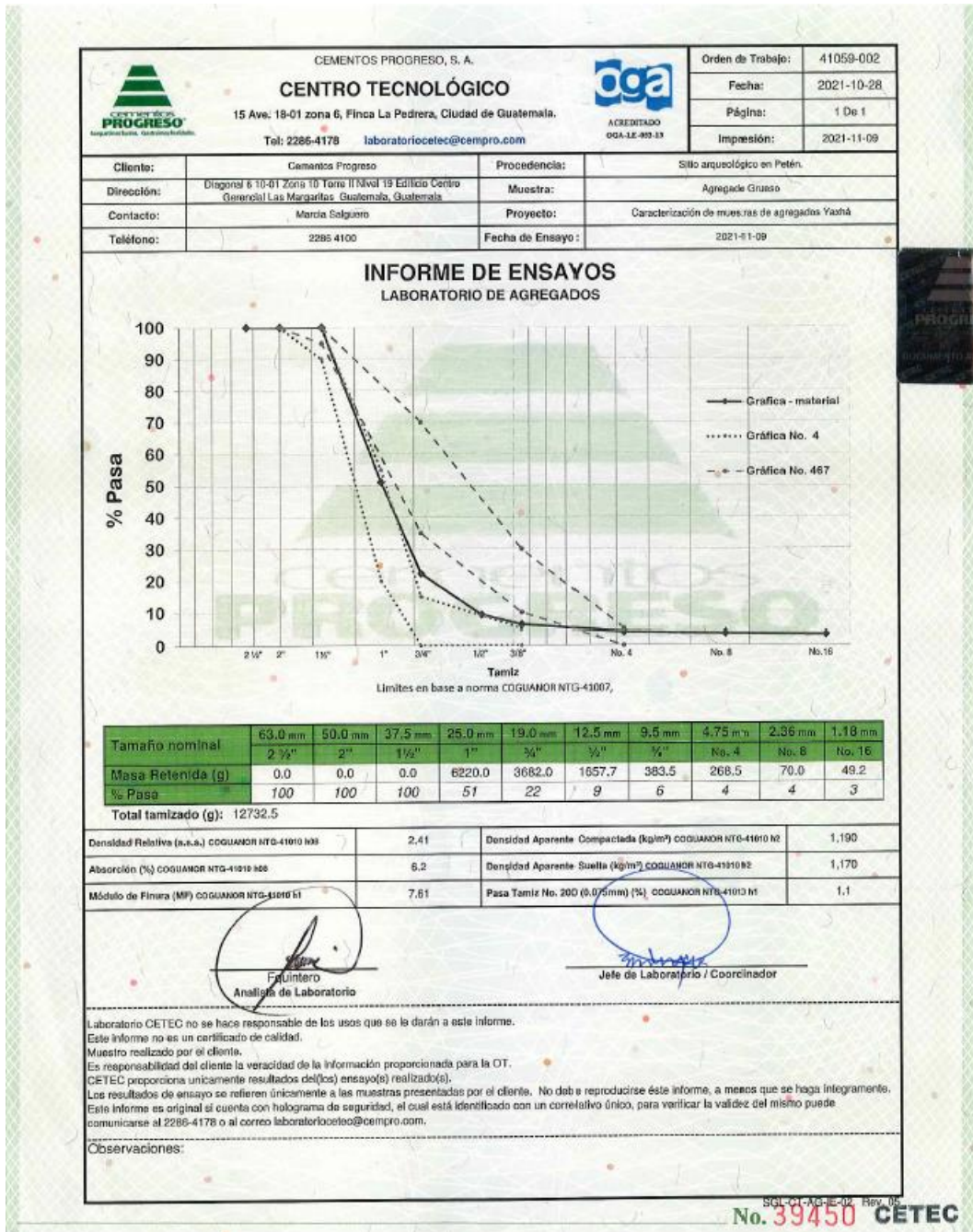




Figura 69. Informe de ensayo: estabilidad a la disgregación de agregado fino.

 <b>CEMENTOS PROGRESO, S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Ave. 16-01 zona 6, Finca La Pañera, Ciudad de Guatemala. Tel: 2286-4178 laboratoriocefec@cempro.com				Orden de Trabajo: 41059-001 Fecha: 2021-10-28 Página: 1 De 1 Impresión: 2021-11-15		
Cliente:	Cementos Progreso		Procedencia:	Sitio arqueológico en Petén.		
Dirección:	Diagonal 8 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala		Muestra:	Agregado Fino		
Contacto:	María Salguero		Proyecto:	Caracterización de masas de agregados Yaxhá		
Teléfono:	2286 4100		Fecha de Ensayo:	2021-11-12		

### INFORME DE ENSAYO

#### LABORATORIO DE AGREGADOS


#### Estabilidad a la Disgregación de los agregados mediante el uso de Sulfato de Sodio

COGUANOR NTG-41010 h6 para agregado fino

Fracciones				Graduación por fracción %	Masa por fracción (g)		Pérdida por fracción %	Promedio ponderado %
Pasa		Retenido			Antes del ensayo	Después del ensayo		
tamiz	mm	tamiz	mm					
1/2"	9.5	No. 4	4.75	0.1	--	--	68.8	0.1
No. 4	4.75	No. 8	2.36	13.2	100.0	31.2	68.8	9.1
No. 8	2.36	No. 16	1.18	17.5	100.0	48.5	51.5	9.0
No. 16	1.18	No. 30	0.60	18.4	100.0	47.2	52.8	9.7
No. 30	0.60	No. 50	0.30	15.5	100.0	55.1	44.9	7.0
No. 50	0.3	No. 100	0.15	10.5	--	--	--	--
FONDO				24.9	--	--	--	--
<b>TOTALES:</b>				<b>100</b>				<b>35</b>

Solución usada: Sulfato de sodio (utilizada previamente)



**FOMINTERO**  
Análisis de Laboratorio




**Jefe de Laboratorio / Coordinador**

---

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.  
 Este informe no es un certificado de calidad.  
 Muestra realizado por el cliente.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.  
 CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratoriocefec@cempro.com.

Observaciones:

Figura 70. Informe de ensayo: estabilidad a la disgregación de agregado grueso.

 <p><b>CEMENTOS PROGRESO, S. A.</b>  <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b>          15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala.          Tel: 2286-4178    laboratoriocetec@cempro.com</p>	Orden de Trabajo:	41059-002
	Fecha:	2021-10-28
	Página:	1 De 1
	Impresión:	2021-11-15

Cliente:	Cementos Progreso	Procedencia:	Sitio arqueológico en Petén.
Dirección:	Diagonal 6 19-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala.	Muestra:	Agregado Grueso
Contacto:	Marcia Salguero	Proyecto:	Caracterización de masas de agregados Yaehá
Teléfono:	2286 4100	Fecha de Ensayo:	2021-11-12

### INFORME DE ENSAYO

#### LABORATORIO DE AGREGADOS


**Estabilidad a la Disgregación de los agregados mediante el uso de Sulfato de Sodio**  
 COGUANOR NTG-41010 h5 para agregado grueso

Fracciones				Graduación por fracción %	Masa por fracción (g)		Pérdida por fracción %	Promedio ponderado %
Pasa		Retenido			Antes del ensayo	Después del ensayo		
tamiz	mm	tamiz	mm					
2 1/2"	63.0	1 1/2"	37.5	0.0	--	--	12.3	0.0
1 1/2"	37.5	3/4"	19.0	77.8	1502.7	1318.1	12.3	9.6
3/4"	19.0	1/2"	9.5	16.0	1003.7	845.2	15.8	2.5
1/2"	9.5	No. 4	4.75	2.1	300.7	229.1	23.8	0.5
FONDO				4.1	--	--	23.8	1.0
<b>TOTALES:</b>				100				<b>14</b>


#### Examen Cualitativo

Fracciones				Acción producida por el ensayo								No. Total de partículas antes del ensayo
Pasa		Retenido		Rotura		Desmenuzamiento		Agregamiento		Escamas		
tamiz	mm	tamiz	mm	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	
2 1/2"	63.0	1 1/2"	37.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1 1/2"	37.5	3/4"	19.0	9	17	8	15	5	9	0	0	54

Solución usada: Sulfato de sodio (utilizada previamente)



**FOMINTERO**  
Analista de Laboratorio



**Jefe de Laboratorio / Coordinador**

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe no es un certificado de calidad. Muestra realizado por el cliente. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com.

Observaciones:

SQL-CT-AQ-IE-09, Rev. 03  
**No. 43305 CETEC**



Figura 71. Informe de ensayo: reactividad potencial álcali sílice de agregado fino.



Figura 72. Informe de ensayo: reactividad potencial álcali sílice de agregado grueso.

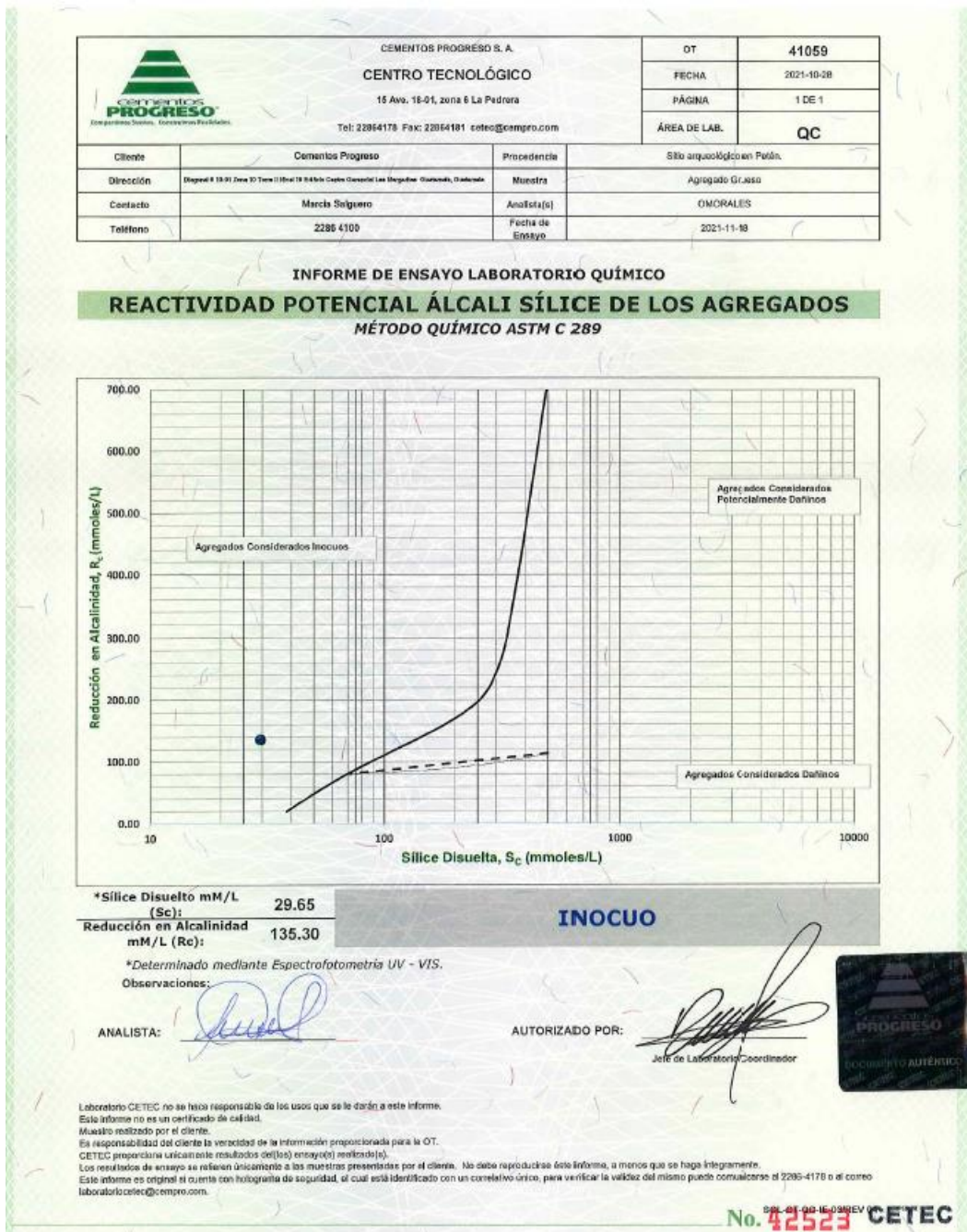





Figura 73. Informe de ensayo: reactividad álcali carbonato de agregado fino.

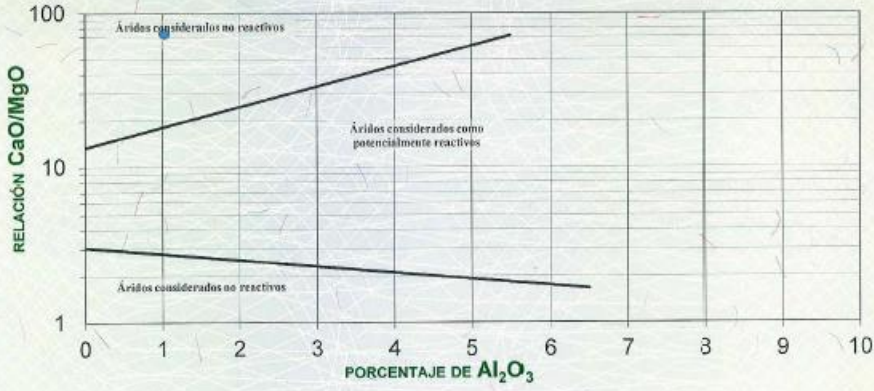
	CEMENTOS PROGRESO S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Ave. 18-01, zona 8 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	41151
			FECHA	2021-11-19
			PÁGINA	1 DE 1
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	Cementos Progreso	Procedencia	Sillo arqueológico en Petén	
Dirección	Edif. 8 10-01 Zona 10 Torre E Nivel 10 E. 8600 Centro Comercial Las Regalias, Guatemala, Guatemala	Muestra	Agregado Fino	
Contacto	Marcia Salguero	Analista(s)	OMORALES	
Teléfono	2286 4100	Fecha de Ensayo	2021-11-22	

**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**

**REACTIVIDAD ÁLCALI-CARBONATO**


**MÉTODO UNE 146507-2 EX**





*Porcentaje de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.03	<b>NO REACTIVOS</b>
*Relación de CaO/MgO	73.90	

*\*Determinado Mediante Fluorescencia de Rayos X.*

OBSERVACIONES:

ANALISTA: 

AUTORIZADO POR:   
Jefe de Laboratorio/Coordinador




Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le disten a este informe.  
 Este informe no es un certificado de calidad.  
 Muestra realizado por el cliente.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.  
 CETEC proporciona únicamente resultados del (los) ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@cempro.com.

SGL-CT-QC-IE-04/Rev.03

No. 42526 CETEC

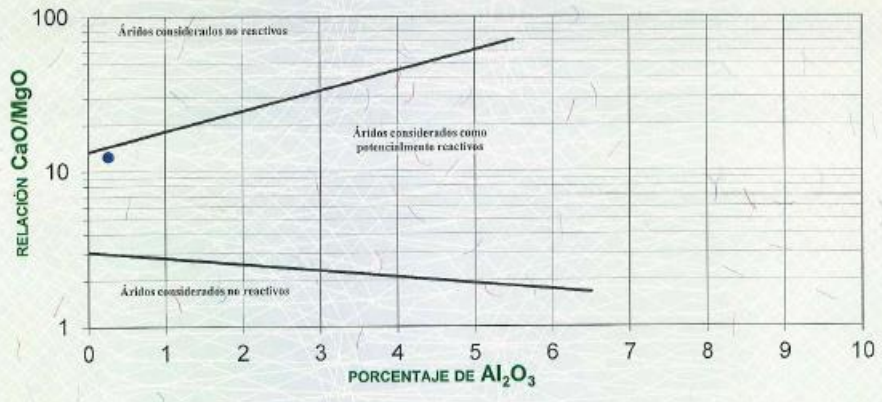
Figura 74. Informe de ensayo: reactividad álcali carbonato de agregado grueso.

 <p>CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cctec@cempro.com</p>		OT	41151
		FECHA	2021-11-19
		PÁGINA	1 DE 1
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	Cementos Progreso	Procedencia	Sitio arqueológico en Petén
Dirección	Diagonal 9-10-01 Zona 10 Torre 9 Nivel 18 Edificio Centro Operacional Las Margaritas, Guaymalán, Guatemala	Muestra	Agregado Grueso
Contacto	Marcia Salguero	Analista(s)	OMORALES
Teléfono	2286 4100	Fecha de Ensayo	2021-11-22

**INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO**

**REACTIVIDAD ÁLCALI-CARBONATO**

**MÉTODO UNE 146507-2 EX**



*Porcentaje de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	<b>POTENCIALMENTE REACTIVOS</b>
*Relación de CaO/MgO	12.41	

\*Determinado Mediante Fluorescencia de Rayos X.

OBSERVACIONES:

ANALISTA: 

AUTORIZADO POR: 

Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe no es un certificado de calidad. Muestra realizada por el cliente. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga el consentimiento. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratorio@cempro.com.

SGL-CT-QC-IE-04/Rev.03

**No. 42527 CETEC**



Figura 75. Informe de ensayos de mezcla de mortero de referencia: Artesanal.




 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>18 Av. 18-61 zona 8, Finca La Peñera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel: 2286-4176    <a href="mailto:ventas@cepro.com">ventas@cepro.com</a></small>				Órden de Trabajo #21	41429
<small>Fecha de emisión</small> 2022-05-02 <small>Página</small> 1 de 1 <small>Área de laboratorio</small> CE <small>Fecha de recepción</small> 2022-02-03					
Información de identificación de cliente	Ciudad	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torro II Nivel 19 Edificio Centro Diferencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Marco Cerebello	Correo electrónico	<a href="mailto:mcerebello@cepro.com">mcerebello@cepro.com</a>	Teléfono 2286-4100
Información de identificación de la muestra	Procedencia	Sitio arqueológico Yashú	Fecha de muestreo	--	
	Lugar de ensayo	--	Fecha de OT	2022-02-03	
	Proyecto	Diseño de mortero para reparación en Yashú			Fecha de ensayo
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>					
MUESTRA		Mortero de pega, referencia		OT	41429
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>					
Norma	Fecha y hora de producción		--		
	NTG 41016 h2	Peso sacco	--		
		Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--		
		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		03/feb/2022		
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flujo (%)	108.5		
		Rel. Agua/Material	--		
	NTG 41050, ASTM C270	Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	1066		
		Retención de Agua (%)	03		
	UNE EN 1915-7	Aire (%)	4.5		
		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
	NTG-41002 h4, ASTM C 199/C 109M	Resist. Comp. 7d (psi)	27		
		Resist. Comp. 28d (psi)	64		
		Resist. Comp. 90d (psi)	--		
	ASTM C 652	Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
Resistencia Adherencia 28d (psi)		--			
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		--		
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flujo (%)	--		
		NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)	--	
	Rel. Agua/Material		--		
	NTG 41051h1, ASTM C700	Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	--		
		Penetración de cono (mm)	--		
		Apariencia	--		
		Trabajabilidad	--		
	NTG-41003 h4, ASTM C 199/C 109M	Aplicación	--		
		Tiempo Abierto (minutos)	--		
		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
		Resist. Comp. 7d (psi)	--		
	ASTM C 652	Resist. Comp. 28d (psi)	--		
		Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
Resistencia Adherencia 28d (psi)	--				
 Analista  Jefe de Laboratorio/Coordinador					
<b>Observaciones:</b> Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos. No se tuvieron resultados de adherencia a 14 y 28.					
<small>CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente.                  CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.                  Este informe NO es un certificado de calidad.                  Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.                  CETEC proporciona únicamente resultados de los ensayos realizados.                  Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.                  Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo <a href="mailto:ceotec@cepro.com">ceotec@cepro.com</a>.</small>					
FOR-401626 <span style="float: right;"><b>No. 46782 CETEC</b></span>					

Figura 76. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 1.





 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Av. 18-01 zona 8, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel 2266-4178 cetec@progreso.com</small>		Orden de Trabajo (OT)	41486	
		Fecha de emisión	2022-05-02	
		Página	1 de 1	
		Área de laboratorio	CE	
		Fecha de recepción	2022-02-17	
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 15 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala
	Contacto	Marco Carballo	Cotero electrónico	mcarballo@compro.com Teléfono 2266 4100
Información de la muestra	Precedencia	SBo arqueológico Yaxhá	Fecha de muestreo	2022-02-10
	Lugar de origen		Muestra realizada por	CLIENTE
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaxhá		Fecha de OT 2022-03-07
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>				
MUESTRA	Mortero de Levantado - 2		OT	41486
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>				
Norma		Fecha y hora de producción	10/Feb/2022	
		Peso sacco	--	
	NTG 41010 h2	Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	10/Feb/2022	
	NTG 41030h1, ASTM C1437	Flow (%)	105	
		Rel. Agua/Material	--	
	NTG 41050, ASTM C270	Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	1634	
		Retención de Agua (%)	83	
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	4.5	
		Resist. Comp. 3d (psi)	--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 7d (psi)	73	
		Resist. Comp. 28d (psi)	156	
		Resist. Comp. 56d (psi)	--	
	ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi)	3	
		Resistencia Adherencia 28d (psi)	3	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	--	
	NTG 41030h1, ASTM C1437	Flow (%)	--	
		NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediana (penetrómetro (psi))	--
	Rel. Agua/Material		--	
	NTG 41051M, ASTM C780	Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Penetración de cono (mm)	--	
		Apariencia	--	
		Trabajabilidad	--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Aplicación	--	
		Tiempo Alísteo (minutos)	--	
		Resist. Comp. 3d (psi)	--	
		Resist. Comp. 7d (psi)	--	
ASTM C 952	Resist. Comp. 28d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--		
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Coordinador		
Observaciones: Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos. En las aplicaciones de los hidratos se usó desmorcamientos y cuarzo.				
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del (los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original al cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2266-4178 o al correo cetec@compro.com.				
FOR-401925		 <b>No. 46783 CETEC</b>		



Figura 77. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 2.




 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Av. 10a Zona 4, Finca La Pedra, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel 2286-4178 cetec@compro.com</small>		Orden de Trabajo #01	41486		
		Fecha de análisis	2022-05-02		
		Página	1 de 1		
		Área de laboratorio	CE		
		Fecha de recepción	2022-02-17		
Información de la muestra	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre B Nivel 18 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Marco Corballo	Correo electrónico	mcorballo@compro.com	
	Procedimiento	Sin ensayo lógico Yaohá	Fecha de muestreo	17/02/2022	
	Lugar de ensayo			Muestra realizada en	CLIENTE
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaohá		Fecha de OT	2022-02-17
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>					
MUESTRA	Mortero de Levantado - 3		OT	41486	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>					
Norma	Fecha y hora de producción		17/02/2022		
	NTG 41010 h2	Peso saco	..		
		Densidad unitaria suelta (kg/m³)	..		
		Densidad unitaria compactada (kg/m³)	..		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		17/Feb/2022		
	NTG 41003h3, ASTM C1437	Flow (%)	112		
		Rel. Agua/Material	..		
	NTG 41050, ASTM C270	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	1852		
		Retención de Agua (%)	82		
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	8		
		Resist. Comp. 3d (psi)	..		
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 100M	Resist. Comp. 7d (psi)	75		
		Resist. Comp. 28d (psi)	245		
		Resist. Comp. 56d (psi)	..		
	ASTM C 302	Resistencia Adherencia 7d (psi)	4		
		Resistencia Adherencia 28d (psi)	5		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		..		
	NTG 41003h3, ASTM C1437	Flow (%)	..		
		NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)	..	
	Rel. Agua/Material		..		
	NTG 41003h4, ASTM C700	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	..		
		Penetración de zona (mm)	..		
		Apariencia	..		
		Trabajabilidad	..		
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 100M	Aplicación	..		
		Tiempo Abierto (minutos)	..		
		Resist. Comp. 3d (psi)	..		
	ASTM C 952	Resist. Comp. 7d (psi)	..		
Resist. Comp. 28d (psi)		..			
	Resistencia Adherencia 7d (psi)	..			
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	..			
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Coordinador			
Observaciones:	Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos.				
CETEC NO es responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente. CETEC NO es responsable de los usos que se le den a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del/los ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a los muestreos prescritos por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@compro.com. <small>FORM-001900</small>					
<b>No. 46784</b>				<b>CETEC</b>	

Figura 78. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 3.





		CEMENTOS PROGRESO S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-41 zona 4, Finca La Pedra, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tels: 2266-4178 <a href="mailto:ventas@cepro.com">ventas@cepro.com</a>		Orden de Trabajo OT:	41486		
				Fecha de emisión:	2022-02-02		
				Página:	1 de 1		
				Área de laboratorio:	CE		
				Fecha de recepción:	2022-02-24		
Información de Inventario de la muestra	Cliente:	Cementos Progreso	Dirección:	Diagonal 6-10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala			
	Contacto:	Marco Carballo	Correo electrónico:	<a href="mailto:mcarballo@cepro.com">mcarballo@cepro.com</a>	Teléfono:	2266 4100	
Información de la muestra	Procedencia:	Silo arqueológico Yashá	Fecha de muestreo:	24/02/2022	Muestra realizada por:	CLIENTE	
	Lugar de ensayo:					Fecha de OT:	2022-02-24
	Proyecto:	Diseño de mortero para restauración en Yashá				Fecha de ensayo:	--
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>							
MUESTRA		Mortero de Levantado - 4		OT:	41486		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>							
Norma	-	Fecha y hora de producción	24/02/2022				
	NTG 41010 h.2	Peso saco	--				
		Densidad unitaria suelta (kg/m³)	--				
		Densidad unitaria compactada (kg/m³)	--				
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>							
Norma	-	Fecha de Ensayo	24Feb2022				
	NTG 41003h3, ASTM C1437	Flow (%)	107				
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material	--				
		Masa Unitaria Humeda (kg/m³)	1798				
	NTG 410402 - ASTM 1506	Retención de Agua (%)	87				
	LANE EN 1015-7	Aire (%)	--				
		Resist. Comp. 7d (psi)	--				
	NTG 41002 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 7d (psi)	100				
		Resist. Comp. 28d (psi)	60				
		Resist. Comp. 60d (psi)	--				
ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi)	7					
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	7					
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>							
Norma	-	Fecha de Ensayo	--				
	NTG 41003h3, ASTM C1437	Flow (%)	--				
	NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediarre Penetrómetro (psi)	--				
		Rel. Agua/Material	--				
	NTG 41051h5, ASTM C780	Masa Unitaria Humeda (kg/m³)	--				
		Penetración de agua (mm)	--				
		Apariencia	--				
		Trabajabilidad	--				
		Aplicación	--				
	NTG 41002 h4, ASTM C 109/C 109M	Tiempo Abierto (minutos)	--				
		Resist. Comp. 3d (psi)	--				
		Resist. Comp. 7d (psi)	--				
		Resist. Comp. 28d (psi)	--				
		Resistencia Adherencia 7d (psi)	--				
ASTM C 952	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--					
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--					
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Coordinador					
Observaciones: Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos. El equipo de contenido de sitio se encuentra en mantenimiento; también se notó fisuras en la aplicación de ladrillo y los cubos estaban porosos.							
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestras definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del/los ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2266-4178 o al correo <a href="mailto:ventas@cepro.com">ventas@cepro.com</a> .							
FOR-861606							
<b>No. 46785 CETEC</b>							

Figura 79. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 3 (duplicado).




		CEMENTOS PROGRESO S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Ave. 10-91 zona 1, Finca La Pedraza, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4176 cetec@compro.com		Orden de Trabajo #01: 41486 Fecha de emisión: 2022-05-02 Página: 1 de 1 Área de laboratorio: CE Fecha de recepción: 2022-03-10	
Información de cliente	Ciudad:	Cementos Progreso	Dirección:	Diagonal 6, 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Geocentral Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto:	Marco Corballo	Correo electrónico:	mcorballo@compro.com	Teléfono: 2286 4100
Información de la muestra	Procedencia:	Sitio arqueológico Yachá	Fecha de muestreo:	2022-10-03	Muestreo realizado por: CLIENTE
	Lugar de ensayo:				Fecha de OT: 2022-03-10
	Proyecto:	Diseño de mortero para restauración en Yachá			
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>					
MUESTRA		Mortero de Levantado - 5	OT	41486	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>					
Norma	-	Fecha y hora de producción	03/Oct/2022		
	NTG 41010 h2	Peso seco	--		
		Densidad unitaria suelta (kg/m³)	--		
		Densidad unitaria compactada (kg/m³)	--		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>					
Norma	-	Fecha de Ensayo	10/Mar/2022		
	NTG 41003h12, ASTM C1437	Flow (%)	114.5		
		Rel. Agua/Material	--		
	NTG 41060, ASTM C270	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	1871		
		Retención de Agua (%)	58		
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	3.6		
		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
	NTG-41003 h4, ASTM C 100/C 109M	Resist. Comp. 7d (psi)	243		
		Resist. Comp. 28d (psi)	286		
		Resist. Comp. 90d (psi)	--		
	ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi)	5		
		Resistencia Adherencia 28d (psi)	18		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>					
Norma	-	Fecha de Ensayo	--		
	NTG 41003h12, ASTM C1437	Flow (%)	--		
		NTG 41060, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Medida por Penetrómetro (psi)	--	
	Rel. Agua/Material		--		
	NTG 41051h1, ASTM C709	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	--		
		Penetración de sismo (mm)	--		
		Apariencia	--		
		Trabajabilidad	--		
		Aplicación	--		
	NTG-41003 h4, ASTM C 100/C 109M	Tiempo Abierto (minutos)	--		
		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
		Resist. Comp. 7d (psi)	--		
	ASTM C 952	Resist. Comp. 28d (psi)	--		
		Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--			
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Cordinador			
Observaciones: Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos.					
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le den a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados de los ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, o menos que se haga integramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4176 o al correo cetec@compro.com.					
FDR-001926		No. <b>46786</b> CETEC			



Figura 80. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 4.





 <b>CEMENTOS PROGRESO E. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Ave. 10-81 zona 6, Finca La Pazera, Ciudad de Guatemala, Guatemala</small> <small>Tel: 2286-4178    correo@compro.com</small>		Orden de Trabajo	41486	
		#01	2022-05-02	
		Página	1 de 1	
		Área de laboratorio	CE	
		Fecha de recepción	2022-03-29	
Información de la muestra	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6-10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala
	Contacto	Marco Carballo	Correo electrónico	mcarballo@compro.com    Teléfono 2286 4100
	Procedencia	Sito arqueológico Yashá	Fecha de muestreo	29/03/2022    Muestra realizada por: CLIENTE
	Lugar de ensayo			Fecha de OT 2022-03-29
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yashá		Fecha de ensayo
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>				
MUESTRA	Mortero de Levantado - 6		OT	41486
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>				
Norma		Fecha y hora de producción	29/03/2022	
		Peso saco	--	
	NTG 41010 h2	Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	29/Mar/2022	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flujo (%)	100	
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material	--	
		Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	1640	
	NTG 41104h2 - ASTM 1506	Retención de Agua (%)	81	
	UNE EN 1916-7	Aire (%)	4.4	
	NTG-41003 h-4, ASTM C 109C 105M	Resist. Comp. 3d (psi)	--	
		Resist. Comp. 7d (psi)	118	
		Resist. Comp. 28d (psi)	246	
		Resist. Comp. 90d (psi)	--	
	ASTM C 862	Resistencia Adherencia 7d (psi)	6	
Resistencia Adherencia 28d (psi)		10		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	--	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flujo (%)	--	
	NTG 41050, ASTM C270	Consistencia inicial del Mortero Mediante Penetración (psi)	--	
		Rel. Agua/Material	--	
		Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Penetración de cono (mm)	--	
	NTG 41061h1, ASTM C780	Apariencia	--	
		Trabajabilidad	--	
		Aplicación	--	
	NTG-41003 h-4, ASTM C 109C 105M	Tiempo Abierto (minutos)	--	
		Resist. Comp. 3d (psi)	--	
		Resist. Comp. 7d (psi)	--	
		Resist. Comp. 28d (psi)	--	
ASTM C 862	Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--		
	Analista			
	Jefe de Laboratorio/Coordinador			
<b>Observaciones:</b> Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos. Vale la pena comentarles que los cubos a 7 días se desmoronaban al ensayarlos, y la aplicación en el ladrillo se encontraba húmeda.				
<small>CETEC NO es responsable de planes de muestreo y muestros de fridos por el cliente.                  CETEC NO es responsable de los usos que se le darán a este informe.                  Este informe NO es un certificado de calidad.                  Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.                  CETEC proporciona únicamente resultados de los ensayos realizados.                  Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.                  Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un controlivo (único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@compro.com.</small>				
 <b>No. 46787 CETEC</b>				

Figura 81. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5.





 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 <a href="mailto:cepro@cepro.com">cepro@cepro.com</a>				Orden de Trabajo (OT)	41858
Fecha de emisión: 2022-09-02 Página: 1 de 1 Área de laboratorio: CE Fecha de recepción: 2022-05-12					
Información de cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala	
	Contacto	Maria de los Angeles Chan	Correo electrónico	<a href="mailto:mchan@cepro.com">mchan@cepro.com</a>	Teléfono: 2286 4100
Información de la muestra	Procedencia	Sitio arqueológico Yaxhá	Fecha de muestreo	2022-05-12	Muestreo realizado por: CLIENTE
	Lugar de ensayo				Fecha de OT: 2022-05-12
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaxhá			Fecha de ensayo: --
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>					
MUESTRA		Mortero de pega, Diseño 5		OT	41858
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>					
Norma	Fecha y hora de producción		12/May/2022		
	NTG 41010 h2	Peso exacto		--	
		Densidad unitaria suelta (kg/m³)		--	
		Densidad unitaria compactada (kg/m³)		--	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		12/May/2022		
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)		109	
	NTG 41050, ASTM C370	Rel. Agua/Material		--	
		Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)		1628	
	NTG 41104h2 - ASTM 1506	Retención de Agua (%)		75	
	UNE EN 1015-7	Aire (%)		4,6	
		Resist. Comp. 3d (psi)		--	
		Resist. Comp. 7d (psi)		81	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 28d (psi)		198	
		Resist. Comp. 56d (psi)		--	
ASTM C 852	Resistencia Adherencia 7d (psi)		8		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)		15		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>					
Norma	Fecha de Ensayo		--		
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)		--	
	NTG 41050, ASTM C370	Consistencia (Inch) del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)		--	
		Rel. Agua/Material		--	
	NTG 41051h1, ASTM C780	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)		--	
		Penetración de cono (mm)		--	
		Apariencia		--	
		Trabajabilidad		--	
		Aplicación		--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Tiempo Abierto (minutos)		--	
		Resist. Comp. 3d (psi)		--	
		Resist. Comp. 7d (psi)		--	
		Resist. Comp. 28d (psi)		--	
ASTM C 852	Resistencia Adherencia 7d (psi)		--		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)		--		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">                   Analista             </div> <div style="text-align: center;">                   Jefe de Laboratorio/Coordinador             </div> </div>					
Observaciones: --					
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreo definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original al cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un consecutivo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo <a href="mailto:cepro@cepro.com">cepro@cepro.com</a> . FDR-001926					
					
No. <b>49131</b> <b>CETEC</b>					

Figura 82. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5 (duplicado).





 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>13 Av. 10-01 Zona 6, Pinar Le Peñero, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel: 2286-4178 cetec@compro.com</small>		Orden de Trabajo (OT)	41858	
		Fecha de emisión	2022-05-02	
		Página	1 de 1	
		Área de laboratorio	CE	
		Fecha de recepción	2022-05-24	
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala
	Contacto	Maria de los Angeles Chan	Correo electrónico	mchan@compro.com
Información de la muestra	Procedencia	Sitio arqueológico Yaxhá	Fecha de muestreo	24/05/2022
	Lugar de ensayo		Muestra realizado por:	CLIENTE
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaxhá	Fecha de OT	2022-05-24
		Fecha de ensayo	-	
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>				
MUESTRA		Mortero de pega, Diseño 7	OT	41858
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>				
Norma		Fecha y hora de producción	24/05/2022	
		Peso sacos	-	
	NTG 41010 h2	Densidad unitaria suelta (kg/m³)	-	
		Densidad unitaria compactada (kg/m³)	-	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	24/May/2022	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	106	
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material	-	
		Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	1664	
	NTG 41104h2 - ASTM 1506	Retención de Agua (%)	80	
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	5	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 3d (psi)	-	
		Resist. Comp. 7d (psi)	222	
		Resist. Comp. 28d (psi)	246	
	ASTM C 952	Resist. Comp. 56d (psi)	-	
Resistencia Adherencia 7d (psi)		7		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	9		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	-	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	-	
	NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)	-	
		Rel. Agua/Material	-	
	NTG 41050h1, ASTM C730	Masa Unitaria Húmeda (kg/m³)	-	
		Penetración de cono (mm)	-	
		Apariencia	-	
		Trabajabilidad	-	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Aplicación	-	
		Tiempo Abierto (minutos)	-	
		Resist. Comp. 3d (psi)	-	
	ASTM C 952	Resist. Comp. 7d (psi)	-	
		Resist. Comp. 28d (psi)	-	
	Resistencia Adherencia 7d (psi)	-		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	-		
<p>Observaciones:</p> <p>CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreo definidos por el cliente.                  CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.                  Este informe NO es un certificado de calidad.                  Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.                  CETEC proporciona únicamente resultados del/los ensayo(s) realizado(s).                  Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.                  (Este informe es original el cual cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@compro.com.</p>				
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Coordinador		
				
PDR-001926		<b>No. 49132 CETEC</b>		



Figura 83. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 5 (triplicado).




		CEMENTOS PROGRESO S. A. <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 19-01 zona 6, Faja La Pedraza, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Tel: 2286-4178 <a href="mailto:caso@cempro.com">caso@cempro.com</a>			Orden de Trabajo (OT)	41858	
		Fecha de emisión	2022-09-02		Página	1 de 1	
Información de información del cliente		Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala		
		Contacto	María de los Angeles Chan	Correo electrónico	<a href="mailto:mchan@cempro.com">mchan@cempro.com</a>	Teléfono	2284 4100
Información de información de la muestra		Procedencia	Sitio arqueológico Yashá	Fecha de muestreo	28/06/2022	Muestreo realizado por:	CLIENTE
		Lugar de ensayo	--			Fecha de OT	2022-06-28
		Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yashá				Fecha de ensayo
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>							
MUESTRA		Mortero de pega, Diseño 8			OT	41858	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>							
Norma	-		Fecha y hora de producción	28/06/2022			
	NTG 41010 H2	-		Peso sacco	--		
		-		Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--		
		-		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>							
Norma	-		Fecha de Ensayo	28/Jun/2022			
	NTG 41003H13, ASTM C1437	-		Flow (%)	107		
		-		Rel. Agua/Material	--		
	NTG 41050, ASTM C270	-		Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	1633		
		-		Retención de Agua (%)	83		
	NTG 41104h2 - ASTM 1506	-		Aire (%)	4.5		
		-		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
	NTG-41003 H4, ASTM C 109/C 109M	-		Resist. Comp. 7d (psi)	60		
		-		Resist. Comp. 28d (psi)	245		
		-		Resist. Comp. 56d (psi)	--		
ASTM C 952	-		Resistencia Adherencia 7d (psi)	6			
	-		Resistencia Adherencia 28d (psi)	13			
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>							
Norma	-		Fecha de Ensayo	--			
	NTG 41003H13, ASTM C1437	-		Flow (%)	--		
		-		Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetración (psi)	--		
	NTG 41050, ASTM C270	-		Rel. Agua/Material	--		
		-		Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	--		
	NTG 41051h1, ASTM C780	-		Penetración de cono (mm)	--		
		-		Apariencia	--		
		-		Trabajabilidad	--		
		-		Aplicación	--		
		-		Tiempo Abierto (minutos)	--		
	NTG-41003 H4, ASTM C 109/C 109M	-		Resist. Comp. 3d (psi)	--		
		-		Resist. Comp. 7d (psi)	--		
		-		Resist. Comp. 28d (psi)	--		
ASTM C 952	-		Resistencia Adherencia 7d (psi)	--			
	-		Resistencia Adherencia 28d (psi)	--			
 Analista		 Jefe de Laboratorio/Coordinador					
Observaciones:    El material se desmorona en las adherencias de 7 días							
CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestras definidos por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste Informe, a menos que se haga unograma. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un consecutivo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo <a href="mailto:caso@cempro.com">caso@cempro.com</a> .							
FDR-001925		No. <b>49133</b> <b>CETEC</b>					

Figura 84. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 6.







 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Av. 19-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel: 2286-4178 cetec@compro.com</small>		Orden de Trabajo (OT)	41858	
		Fecha de emisión	2022-09-02	
		Página	1 de 1	
		Área de laboratorio	CE	
		Fecha de recepción	2022-07-20	
Información del cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala
	Contacto	María de los Ángeles Chan	Correo electrónico	mchan@compro.com
Información de la muestra	Precedencia	Sito arqueológico Yaxhá	Fecha de muestreo	20/07/2022
	Lugar de ensayo		Muestreo realizado por:	CLIENTE
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaxhá		Fecha de ensayo
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>				
MUESTRA	Mortero de pega, Diseño 9	OT	41858	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>				
Norma		Fecha y hora de producción	20/07/2022	
		Peso seco	--	
	NTG 41010 h2	Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	20/JUL/2022	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	113	
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material	--	
		Masa Unitaria Humeda (kg/m <sup>3</sup> )	1623	
	NTG 41104h2 - ASTM 1506	Retención de Agua (%)	34	
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	4.3	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 3d (psi)	--	
		Resist. Comp. 7d (psi)	240	
		Resist. Comp. 28d (psi)	286	
	ASTM C 952	Resist. Comp. 56d (psi)	--	
Resistencia Adherencia 7d (psi)		9		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	14		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	--	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	--	
	NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)	--	
		Rel. Agua/Material	--	
		Masa Unitaria Humeda (kg/m <sup>3</sup> )	--	
	NTG 41051h1, ASTM C780	Penetración de cono (mm)	--	
		Apariencia	--	
		Trabajabilidad	--	
		Aplicación	--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Tiempo Abierto (minutos)	--	
Resist. Comp. 3d (psi)		--		
Resist. Comp. 7d (psi)		--		
ASTM C 952	Resist. Comp. 28d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 7d (psi)	--		
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">               Analista         </div> <div style="text-align: center;">               Jefe de Laboratorio/Coordinador         </div> <div style="text-align: right;">  </div> </div>				
Observaciones: --				
<small>                     CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.                      CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.                      Este informe NO es un certificado de calidad.                      Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.                      CETEC proporciona únicamente resultados de(los) ensayo(s) realizado(s).                      Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.                      Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@compro.com.                 </small>				
No. <b>49134</b> <b>CETEC</b>				




Figura 85. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 7.

 <b>CEMENTOS PROGRESO S.A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Av. 18-01 zona 8, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel: 2286-4178 <a href="mailto:ventas@compro.com">ventas@compro.com</a></small>		Orden de Trabajo (OT)	41858	
		Fecha de emisión	2022-09-02	
		Página	1 de 1	
		Área de laboratorio	CE	
		Fecha de recepción	2022-08-03	
Información de cliente	Cliente	Cementos Progreso	Dirección	Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre 8 Nivel 16 Edificio Centro Gerencial Las Margaritas Guatemala, Guatemala
	Contacto	María de los Angeles Chan	Correo electrónico	mchan@compro.com
Información de la muestra	Procedencia	Sito arqueológico Yaxhá	Fecha de muestreo	2022-08-03
	Lugar de ensayo		Muestra realizada por:	CLIENTE
	Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yaxhá		Fecha de OT
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>				
MUESTRA		Mortero de pega, Diseño 16	OT	41858
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>				
Norma		Fecha y hora de producción	03/Aug/2022	
		Peso saco	--	
	NTG 41010 h2	Densidad unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )	--	
		Densidad unitaria compactada (kg/m <sup>3</sup> )	--	
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	03/Aug/2022	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	111	
		Rel. Agua/Material	--	
	NTG 41050, ASTM C270	Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	1647	
		Retención de Agua (%)	84	
	UNE EN 1015-7	Aire (%)	4.4	
		Resist. Comp. 3d (psi)	--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Resist. Comp. 7d (psi)	274	
		Resist. Comp. 28d (psi)	438	
		Resist. Comp. 56d (psi)	--	
	ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi)	13	
Resistencia Adherencia 28d (psi)		17		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>				
Norma		Fecha de Ensayo	--	
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%)	--	
		Consistencia Inicial del Mortero Mediante Penetrómetro (psi)	--	
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material	--	
		Masa Unitaria Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	--	
	NTG 41051h1, ASTM C780	Penetración de cono (mm)	--	
		Apariencia	--	
		Trabajabilidad	--	
		Aplicación	--	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109/C 109M	Tiempo Abierto (minutos)	--	
		Resist. Comp. 3d (psi)	--	
	ASTM C 952	Resist. Comp. 7d (psi)	--	
		Resist. Comp. 28d (psi)	--	
		Resistencia Adherencia 7d (psi)	--	
	Resistencia Adherencia 28d (psi)	--		


  

  
 Analista

  
 Jefe de laboratorio/Coordinador


Observaciones: La muestra fue proporcionada por el cliente.

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente.  
 CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.  
 Este informe NO es un certificado de calidad.  
 Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para lo OT.  
 CETEC proporciona únicamente resultados del/los ensayo(s) realizado(s).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.  
 Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo [cetec@compro.com](mailto:cetec@compro.com).



**No. 49135 CETEC**

Figura 86. Informe de ensayos de mezcla de mortero propuesto: Diseño 7 (duplicado).

 <b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> <small>15 Av. 18-01 Zona 4, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.</small> <small>Tel: 2286-4170 ceteq@cmpro.com</small>		Orden de Trabajo 41858	
		Fecha de emisión 2022-09-16	
		Página 1 de 1	
		Área de laboratorio CE	
		Fecha de recepción 2022-08-10	
Información de Cliente	Cements Progreso	Dirección Diagonal 6 10-01 Zona 10 Torre II Nivel 19 Edificio Centro Gerencial Los Mercurios Guatemala, Guatemala	
Contacto	María de los Ángeles Chan	Correo electrónico mchan@cmpro.com	Teléfono 2286 4100
Procedencia	Silo arqueológico Yachá	Fecha de muestreo 2022-08-10	Muestra realizada por: CLIENTE
Lugar de ensayo			Fecha de OT 2022-08-10
Proyecto	Diseño de mortero para restauración en Yachá		Fecha de ensayo --
<b>INFORME MEZCLAS DE LEVANTADO</b>			
MUESTRA		Mortero de pega, Diseño 11	OT 41858
<b>ENSAYOS DE MEZCLA SECA</b>			
Norma	Fecha y hora de producción 16/Aug/2022		
	Peso seco --		
	Densidad unitaria suelta (kg/m³) --		
	Densidad unitaria compactada (kg/m³) --		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE LABORATORIO</b>			
Norma	Fecha de Ensayo 10/Aug/2022		
	NTG 41052h13, ASTM C1437	Flow (%) 108	
	NTG 41050, ASTM C270	Rel. Agua/Material --	
		Masa Unitaria Humeda (kg/m³) 1656	
	NTG 4104h2 - ASTM 1508	Retención de Agua (%) 82	
	UNE EN 1915-7	Aire (%) 3.6	
	NTG-41003 h4, ASTM C 109C 109M	Resist. Comp. 3d (psi) --	
		Resist. Comp. 7d (psi) 277	
		Resist. Comp. 28d (psi) 495	
		Resist. Comp. 56d (psi) --	
ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi) 15		
	Resistencia Adherencia 28d (psi) 21		
<b>ENSAYOS DE MEZCLA HUMEDA DE CAMPO</b>			
Norma	Fecha de Ensayo --		
	NTG 41003h13, ASTM C1437	Flow (%) --	
	NTG 41050, ASTM C270	Consistencia Inicial del Mortero Mediano Panstrómetro (psi) --	
		Rel. Agua/Material --	
		Masa Unitaria Humeda (kg/m³) --	
		Penetración de cono (mm) --	
	NTG 41051h1, ASTM C700	Apariencia --	
		Trabajabilidad --	
		Aplicación --	
		Tiempo Abierto (minutos) --	
NTG-41003 h4, ASTM C 109C 109M	Resist. Comp. 3d (psi) --		
	Resist. Comp. 7d (psi) --		
	Resist. Comp. 28d (psi) --		
ASTM C 952	Resistencia Adherencia 7d (psi) --		
	Resistencia Adherencia 28d (psi) --		
Observaciones: Muestra proporcionada por el cliente en estado húmedo para realizar los ensayos			
CETEC NO se hace responsable de planes de muestras y muestras dañadas por el cliente. CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe NO es un certificado de calidad. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados de (los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo ceteq@cmpro.com.			
FOR-481926		No. <b>49165</b> CETEC	

## F. Documentación complementaria

Cuadro 51. Minuta de reunión consultiva con Tomás Barrientos, arqueólogo en la Universidad del Valle de Guatemala.

Lugar	ZoomMeetings	Fecha	01/02/2021
Tipo de reunión	Consultiva/Entrevista		
Responsable	David Marroquín		
Objetivo	Consultar acerca de los criterios de restauración aplicables en los sitios arqueológicos en el Petén y sobre los requisitos de materiales de restauración.		
Nombre	Ocupación	Institución	
David Marroquín	Estudiante	Universidad del Valle de Guatemala	
Tomás Barrientos	Arqueólogo	Universidad del Valle de Guatemala	
Aspectos relevantes			
Existen diversas escuelas de conservación y restauración, por ende, los criterios, alcance y nivel de intervención varía de una a otra; algunas corrientes buscan la menor alteración e intervención otras optan por la reconstrucción basada en supuestos.			
En general en una restauración se busca acercarse a la fábrica original, no se conocen procedimientos estandarizados o «recetas» para conseguirlo.			
La restauración de estructuras está a cargo de arquitectos; la reconstrucción no es sinónimo de consolidación de la estructura.			
No se puede utilizar una sola mezcla para diversas aplicaciones de restauración, ya que los materiales y objetos requieren técnicas especializadas.			
Para estabilizar estructuras se recurre a embono (tipo de relleno fabricado con mezcla cementante y grava).			
Los trabajos de restauración de repellos y estucos son los más complejos y delicados.			
Características de un material destinado para la restauración de estructuras mayas de las Tierras Bajas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impermeable</li> <li>• Duradero y adhesivo</li> <li>• Compatible con los materiales existentes, preferiblemente de cal</li> <li>• Incorporar materiales locales (sascab)</li> </ul>			
Aplicaciones para un material de restauración de estructuras mayas de las Tierras Bajas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos de trabajos: resane, consolidación, restauración.</li> </ul>			

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementos: paredes, pisos, terrazas.</li> <li>• Exposición: interiores o exteriores.</li> <li>• Consideraciones adicionales: temperatura y humedad local; trabajos se desarrollan en temporadas</li> </ul>	
Elaborada por	David Marroquín

Cuadro 52. Minuta de reunión consultiva con Josué Guzmán, arqueólogo en Proyecto El Mirador.

Lugar	Vía telefónica	Fecha	19/02/2021
Tipo de reunión	Consultiva/Entrevista		
Responsable	David Marroquín		
Objetivo	Consultar acerca de los criterios de restauración aplicables para los sitios arqueológicos en el área de Petén, los requisitos de materiales de restauración y experiencia personal en trabajos de restauración		
Nombre	Ocupación	Institución	
David Marroquín	Estudiante	Universidad del Valle de Guatemala	
Josué Guzmán	Arqueólogo	Proyecto El Mirador	
Aspectos relevantes			
Una de las preocupaciones que surgen al momento de utilizar morteros para trabajos de restauración es que en la aplicación se evite la contaminación con partículas o elementos que provoquen fisuras.			
Para los trabajos desarrollados hasta el momento, existe una preferencia por los procesos artesanales sobre procesos industrializados.			
Para las cales artesanales la pudrición es un factor que favorece la calidad, derivado de la hidratación de la misma.			
En proyectos arqueológicos de restauración uno de los rubros más caros es la conservación de la restauración y del sitio en general.			
El IDAEH no obliga a conocer los aspectos arquitectónicos necesarios para rehabilitar una estructura.			
En el área de Petén son escasos los proyectos de restauración.			
Los trabajos de restauración deben ser proyectos multidisciplinarios que involucren no solo arqueólogos y arquitectos, sino también ingenieros civiles, químicos, entre otros para asegurar la adecuada restauración y conservación arqueológica.			
Requisitos para los materiales de restauración en estructuras mayas del área de las Tierras Bajas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La reversibilidad no es un aspecto viable en estructuras arquitectónicas.</li> </ul>			

<ul style="list-style-type: none"> <li>• El material no debe ser distinguible a cierta distancia, pero debe ser reconocible a corta distancia de los elementos originales.</li> <li>• El color de material debe acercarse a los colores originales (recomendable a una escala cromática menor).</li> <li>• La textura del material depende del técnico a cargo de la preparación de la misma y según la necesidad de la labor y aplicación.</li> <li>• Los materiales de recubrimiento deben proteger de los factores ambientales.</li> <li>• El material no debe degradar ni contribuir a la degradación de las estructuras, elementos y materiales originales.</li> <li>• Los módulos de elasticidad deben ser similares y compatibles con los elementos de mampostería y materiales originales.</li> </ul>	
Elaborada por	David Marroquín

Cuadro 53. Minuta de reunión consultiva con Raúl Noriega, arquitecto restaurador en DECORSIAP.

Lugar	Oficinas DECORSIAP	Fecha	23/02/2021
Tipo de reunión	Consultiva/Entrevista		
Responsable	David Marroquín		
Objetivo	Consultar acerca de los criterios de restauración aplicables para los sitios arqueológicos en el área de Petén, requisitos de materiales de restauración y experiencia con materiales y proyectos de restauración en el área de Petén		
Nombre	Ocupación	Institución	
David Marroquín	Estudiante	Universidad del Valle de Guatemala	
Raúl Noriega	Arquitecto Restaurador	Departamento de conservación y rescate de sitios arqueológicos prehispánicos (DECORSIAP), IDAEH	
Aspectos relevantes			
Se recomienda realizar análisis de laboratorio para caracterizar minerales del área y del desempeño de los materiales a aplicar en los trabajos de restauración.			
Materiales utilizados para preparar morteros artesanales de cal para restauración arqueológica: piedra caliza y arena blanca o sascab.			
La preparación de la cal artesanal involucra hasta 48 horas de horneado para calcinar la piedra caliza.			

Características de los morteros artesanales: tienden a secar lento y la variación de volumen por secado sucede paulatinamente.	
Consideraciones acerca del estado de las estructuras a conservar: las áreas cubiertas con musgos y líquenes se conservan mejor que aquellas expuestas a la intemperie.	
Retos en los trabajos de restauración: cómo integrar el relleno de tierra de las estructuras con los materiales de restauración; los sitios arqueológicos se encuentran en áreas protegidas; las fuentes de materiales son escasas (se reciclan los materiales existentes, productos de las excavaciones).	
Para preparar un saco de 40kg de pasta cal artesanal se invierten alrededor de Q. 400.00.	
Para preparar morteros artesanales se prefiere el uso de pastas de cal, que hayan sido apagadas y añejadas cierto tiempo. La hidratación prolongada de la cal viva mejora las características de la pasta de cal.	
La proporción utilizada para la preparación de morteros artesanales requiere una parte de pasta de cal hidratada y 3 partes de arena o sascab.	
Desempeño y características deseables de los morteros de restauración en trabajos de restauración: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se busca que los materiales se integren completamente al fraguar para formar un único bloque.</li> <li>• El mortero debe ser durable, tener buena adherencia con los elementos de mampostería, la integración de color debe ser similar a los materiales originales, la resistencia del material no debe exceder la de los elementos originales, no contribuir con la degradación y proteger de la intemperie, debe permitir el flujo de humedad desde y hacia el interior de la estructura.</li> <li>• Los trabajos de restauración deben asegurar entre 20 y 30 años de estabilidad de las estructuras antes de ser intervenidas nuevamente.</li> <li>• Los trabajos generalmente involucran: consolidación, resane, sellado.</li> </ul>	
Los trabajos de restauración son voluminosos, en trabajos de restauración de pequeña-mediana escala se han utilizado al menos: 32m <sup>3</sup> de mortero.	
Una pileta para hidratación de cal en el Parque Nacional Yaxhá tiene dimensiones de: 13.0x1.5x1.5m. Se ha llegado a producir hasta 1 pileta de cal hidratada cada 3-5 días.	
Se han realizado morteros de restauración con la incorporación de cal comercial (Horcalca), la cual es requerida hasta 18 sacos de cal para producir 1m <sup>3</sup> de pasta de cal. Aunque la cal comercial se encuentra hidratada de igual manera se deja reposar en agua antes de ser utilizada en los trabajos para formar una pasta. El reposo de este tipo de cal en agua produce una «separación» ya que se asienta una parte más densa de la misma al fondo de la pileta.	
Elaborada por	David Marroquín

Cuadro 54. Minuta de reunión consultiva con Raúl Noriega, arquitecto restaurador en DECORSIAP.

Lugar	Parque Nacional Yaxhá	Fecha	14/10/2021
Tipo de reunión	Consultiva/Visita		
Responsable	David Marroquín		
Objetivo	Conocer los procedimientos de preparación de los morteros de restauración, los materiales utilizados y las técnicas de aplicación en los trabajos de restauración que se llevan a cabo en el Parque Nacional Yaxhá.		
Nombre	Ocupación	Institución	
David Marroquín	Estudiante	Universidad del Valle de Guatemala	
Raúl Noriega	Arquitecto Restaurador	Departamento de conservación y rescate de sitios arqueológicos prehispánicos (DECORSIAP), IDAEH	
Aspectos relevantes			
Restauración realizada al Edificio 218 en 2008 presenta muestras de humedad y una separación de los estucos o repellos en los muros. En dicha restauración se utilizó cal artesanal y arena cernida de ¼ de pulgada para preparar el mortero, el cual contaba con las proporciones de 1:2 cal-arena para la unión de elementos de mampostería y 1:3 cal-arena para el relleno de los núcleos.			
La calcinación de caliza requiere 3 días y 3 noches de horneado, con un proceso de enfriamiento de 3 a 4 días y una hidratación de 1 mes.			
Para hidratar la cal (cualquier cal, artesanal o comercial) se deja remojar en agua con un excedente de agua de 2 a 4 dedos de altura sobre la superficie de la cal.			
Según el uso que se le dé a un mortero las proporciones de los materiales varía de la siguiente manera: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación de volúmenes e integración de componentes exteriores: 1 parte de pasta cal y 2 partes de arena.</li> <li>• Relleno de núcleos: 1 parte pasta de cal y 3 de arena.</li> <li>• Reparación de grietas: se utiliza lechada de cal para mejorar la penetración de la cal en los espacios angostos.</li> <li>• Sellado de estucos: pasta de cal artesanal.</li> </ul>			
En el caso de la reintegración de pisos, se preparan concretos preparados en una mezcla de 1 parte de pasta de cal con 2 partes de arena ya agregados gruesos o piedrín.			
Elaborada por		David Marroquín	





## G. Requisitos según convenios internacionales y legislación guatemalteca en materia de conservación del patrimonio

Cuadro 55. Principales de criterios de conservación establecidos por entes nacionales e internacionales en materia de conservación en cuanto a las características recomendadas para materiales de conservación

No.	Ley/Carta	Principio/Artículo
1	Carta de Atenas (Conferencia de Atenas, 1913)	Resolución Número 4. Cuando las condiciones lo permitan es conveniente colocar en su lugar elementos originales que se encuentren (anastilosis): los materiales nuevos necesarios para esta operación deberán ser siempre reconocibles.
2	Carta de Atenas (Conferencia de Atenas, 1913)	Resolución Número 5. Se aprueba el uso juicioso de todos los recursos de la técnica moderna y muy especialmente el del cemento armado. Se expresa la opinión de que normalmente estos medios de refuerzo deban disimularse para no alterar el aspecto y el carácter del edificio por restaurar.
3	Carta de Venecia (Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia 1964)	Artículo 6. La conservación de un monumento implica la de un marco a su escala. Cuando el marco tradicional subsiste, éste será conservado y toda construcción nueva, toda destrucción y cualquier arreglo que pudiera alterar las relaciones entre los volúmenes y los colores, será desechada.
4	Carta de Venecia (Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia 1964)	Artículo 10. Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia.
5	Carta de Venecia (Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia 1964)	Artículo 12. Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.

No.	Ley/Carta	Principio/Artículo
6	Carta de Cracovia (Conferencia internacional sobre Conservación, Cracovia 2000)	Principio 10. La intervención elegida debe respetar la función original y asegurar la compatibilidad con los materiales y las estructuras existentes, así como con los valores arquitectónicos. Cualquier material y tecnología nuevos deben ser probados rigurosamente, comparados y adecuados a la necesidad real de la conservación. Cuando la aplicación “in situ” de nuevas tecnologías puede ser relevante para el mantenimiento de la fábrica original, estas deben ser continuamente controladas teniendo en cuenta los resultados obtenidos, su comportamiento posterior y la posibilidad de una eventual reversibilidad.
7	Ley para la Protección del Patrimonio Cultural de la Nación, Decreto Número 26-97 del Congreso de la República de Guatemala	Artículo 16. Desarrollo de proyectos. Cuando un ente público o una persona natural o jurídica, nacional o extranjera, con capacidad científica y técnica fehacientemente comprobada, pretenda desarrollar proyectos de cualquier índole en inmuebles centros o conjuntos históricos, urbanos o rurales y en zonas o sitios arqueológicos, paleontológicos o históricos, comprendidos en esta ley, deberá en forma previa a su ejecución, someter tales proyectos a la aprobación de la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural, que dispondrá el cumplimiento de las condiciones técnicas requeridas para la mejor protección y conservación de aquellos, bajo su vigilancia y supervisión.

Cuadro 56. Características deseables en los morteros de restauración para trabajos de conservación y restauración en sitios arqueológicos mayas de las Tierras Bajas

No.	Característica	Descripción
1	No contribuir a la degradación del material original	Funcionar como una capa protectora para el material original existente (piedra, mortero, estuco).
2	Proteger de la intemperie	Protección de los fenómenos meteorológicos, sellado de grietas y evitar la formación de filtraciones de agua entre las capas de estuco, piedra, plataformas y suelos; considerando un clima de bosque tropical húmedo y sub-húmedo.
3	Durable	Materiales capaces de resistir periodos de 20 a 30 años entre cada actividad de mantenimiento para los sitios arqueológicos.
4	No perjudicar la presentación estética	Apariencia visual similar, material de restauración no debe ser perceptible en la distancia, pero ser notorio en la cercanía. Preferencia por colores crema, no colores oscuros.
5	Buena adherencia	La pasta húmeda debe ser capaz de incorporarse a superficies afectadas por: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arenización</li> <li>- Excoriaciones</li> <li>- Presencia de musgos/líquenes</li> </ul>
6	Secado lento	La pasta de cal debe ser capaz de adherirse bien al material existente, para formar un único bloque que se seque uniformemente.
7	Propiedades mecánicas no mayores	No se originen grietas ni tensiones a causa del material de restauración. La variación de volumen sea mínima. La dureza del mortero sea similar a la roca.
8	Permeabilidad	Permeable a la humedad, pero impermeable al agua para evitar filtraciones que puedan socavar las bases de tierra y arcilla.
9	Microestructura similar	Resistencia a la cristalización de sales solubles, evitar la formación de microestructuras cristalinas que generen eflorescencias y sub-eflorescencias.

No.	Característica	Descripción
10	Consistencia	Pasta pegajosa, húmeda, densa y firme.

## XIII. GLOSARIO

**Agregado.** Materiales inertes que tienen resistencia propia suficiente y que no intervienen ni afectan las propiedades y características de un mortero, pero son necesarios para garantizar la adherencia con la pasta endurecida de mortero.

**Árido.** Materiales que tienen una resistencia propia suficiente y que no intervienen ni afectan las propiedades y características de un mortero; pero a su vez son necesarios para garantizar la suficiente adherencia con la pasta endurecida de mortero.

**Cal.** Material plastificante y ligador que produce una adherencia entre los diversos componentes de la mezcla; además les proporciona a los morteros plasticidad, laborabilidad y capacidad de retener agua.

**Cemento.** Material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas.

**Cemento hidráulico.** Cemento que fragua, endurece y desarrolla resistencia por reacción química con el agua, tanto en el aire como bajo el agua.

**Cemento Portland.** Cemento hidráulico producido por la pulverización del Clinker, consistente esencialmente de silicatos de calcio cristalinos hidráulicos y que usualmente contiene: agua, sulfato de calcio, hasta un 5% en masa de caliza y otros componentes minerales minoritarios y aditivos de proceso.

**COGUANOR.** Comisión Guatemalteca de Normas.

**Concreto.** Elemento estructural obtenido de porciones equilibradas de cemento, agua y aditivos.

**DECORSIAP.** Departamento de Conservación y Rescate de Sitios Arqueológicos Prehispánicos de Guatemala.

Difracción de rayos X. Herramienta analítica que permite determinar la geometría tridimensional de materiales cristalinos. Implica el uso de radiaciones electromagnéticas para elaborar el espacio interatómico dentro de un cristal.

EDS. Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva. Técnica analítica que permite la caracterización química y realizar un análisis elemental de materiales. En ésta técnica, una muestra excitada por una fuente de energía libera un haz de electrones que proporciona suficiente energía para expulsar los electrones del núcleo y causar la emisión de rayos X.

Flujo. Propiedad que indica el aumento porcentual en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero, cuando este se coloca en una mesa de flujo después de levantarlo 12.7mm y dejarlo caer 25 veces en 15s.

Fraguado. Proceso en el que un mortero se pone rígido a medida que pierde agua y se endurece, disminuyendo así su plasticidad.

Granulometría. Medición y gradación de los granos de una formación sedimentaria o muestra de suelo y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

IDAHE. Instituto de Antropología e Historia de Guatemala.

MCD. Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala.

Microscopía electrónica de barrido (SEM). Técnica que utiliza un microscopio electrónico de barrido (SEM), el cual utiliza un haz de electrones para formar una imagen de alta resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos.

Mortero. Mezcla constituida por un conglomerante y áridos finos que reaccionan con el agua que se adiciona en la mezcla y que con el tiempo adquiere resistencia.

Pérdida al fuego. El ensayo de pérdida al fuego (LOI) es una determinación de la suma de las sustancias que se marchan al calentar un material a 1000°C hasta alcanzar peso constante. Ésta determinación puede ser un índice de la meteorización, por lo cual un material sufre una prehidratación e incluso una carbonatación.

Reacción álcali-carbonato (RAC). Reacción química que se presenta cuando en una estructura de concreto hay presencia de agregados que contienen dolomita. La reacción puede resultar en la fisuración y agrietamiento de los elementos de concreto al ser expuestos a la humedad, por lo que disminuye el tiempo de servicio de una estructura.

Reacción álcali-sílice (RAS). Reacción química que se produce entre la sílice contenida en los agregados y los iones alcalinos; se manifiesta en estructuras de concreto en ambientes con humedad elevada. El efecto más significativo es el aumento de volumen y la fisuración del concreto.

Resistencia a la adherencia. Propiedad física individual de un mortero en estado endurecido, que se compone de tres aspectos: resistencia, grado de adherencia y durabilidad.

Resistencia a la compresión. Criterio para la selección del tipo de mortero, que se relaciona, comúnmente, con propiedades como la resistencia a la tensión y absorción del mortero. Esta propiedad está estrechamente relacionada con el contenido de cemento y la relación agua-cemento

Retención de agua. Medida de la habilidad de un mortero para retener su agua de mezclado. Esta es una propiedad que está relacionada con el tiempo de aplicación disponible antes que éste se endurezca.

SEGEPLAN. Secretaría de General de Planificación y Programación de la Presidencia de Guatemala.

Termogravimetría. Técnica industrial que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de sustancias sometiéndolas a una temperatura elevada. El dispositivo de análisis termogravimétrico (TGA) ayuda a evaluar cambios en la masa con respecto al cambio de temperatura.

Trabajabilidad. Combinación de propiedades de un mortero en estado plástico, que incluyen la plasticidad, consistencia, cohesión y adhesión.

UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Unidad de mampostería. Material que se emplea en obras de mampostería que son colocados y ajustados entre sí, guardando un determinado orden de hiladas o tamaños; los cuales pueden ser ladrillos, bloques de cemento prefabricados, piedras talladas en formas regulares o no, entre otros.