

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Análisis de la relación entre el grado de calcinación y el tamaño de partícula del óxido de calcio y óxido de magnesio en la presencia de pitting y popping en acabados que contienen cal en su formulación.

Trabajo de graduación en modalidad de tesis, presentado por
María José Bran Bonilla
para optar al grado académico de Licenciada en Química

Guatemala
2015

Análisis de la relación entre el grado de calcinación y el tamaño de partícula del óxido de calcio y óxido de magnesio en la presencia de pitting y popping en acabados que contienen cal en su formulación.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Análisis de la relación entre el grado de calcinación y el tamaño de partícula del óxido de calcio y óxido de magnesio en la presencia de pitting y popping en acabados que contienen cal en su formulación.

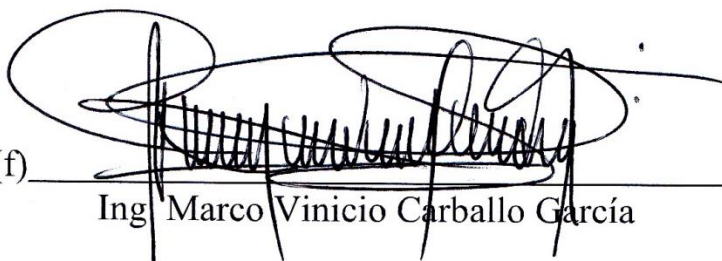
Trabajo de graduación en modalidad de tesis, presentado por
María José Bran Bonilla
para optar al grado académico de Licenciada en Química

Guatemala
2015

Vo. Bo. :

(f) 
Ing. Marco Vinicio Carballo García

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Marco Vinicio Carballo García

(f) 
Lic. Ángel César Ramírez Sandoval

(f) 
Lic. Guillermo Álvarez

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de enero de 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios por otorgarme la vida, sabiduría y la oportunidad de estudiar.

A mis padres, Marco Tulio Bran Paz y Berta Argelia Bonilla Molina, por su apoyo incondicional, su amor, su paciencia, consejos y el esfuerzo en pagar mis estudios. Porque son un ejemplo a seguir.

A mi novio Juan José Aguilar Jagau por su apoyo constante, consejos, paciencia y amor.

A mi hermana Raisa Montserrat Bran Bonilla por su constante apoyo y consejos.

A mi tía Silvia Hamelin quien me apoyó en todo momento para finalizar mi carrera.

A Ángel Ramírez, por su entrega a la carrera y a los estudiantes de la misma. Por su apoyo en los trámites académicos.

A Marco Vinicio Carballo García por su asesoría durante la realización de la tesis, por su paciencia y entrega en brindarme su apoyo. Por apoyarme ante los diversos problemas que se suscitaron.

A Claudia Denise Galindo por su apoyo en la realización de los análisis de las muestras.

A Emanuel Montúfar por su paciencia en enseñarme el manejo de los equipos dentro de laboratorio.

A Raúl Gómez por su apoyo en la realización de análisis de las muestras.

A Luis Velásquez por la oportunidad de realizar mi tesis en Cementos Progreso.

A Cementos Progreso por apoyarme y brindarme la oportunidad de realizar mi tesis por un año dentro de sus instalaciones.

A Leslie García por aconsejarme y apoyarme en los problemas que se suscitaron durante la realización de la tesis.

A Marta Gálvez por apoyarme y levantarme el ánimo cuando lo necesitaba. Por ser una gran amiga de mi madre y una segunda madre para mí.

A todas aquellas personas que con sus consejos me apoyaron y nunca me dejaron darme por vencida.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xxv
ABREVIATURAS UTILIZADAS	xxxi
RESUMEN.....	xxxiii
Capítulos	
I. INTORDUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. MARCO TEÓRICO	5
IV. METODOLOGÍA	43
V. RESULTADOS	53
VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS	127
VII. DISCUSIÓN	131
VIII. CONCLUSIONES	151
IX. RECOMENDACIONES.....	153
X. APÉNDICE.....	155
XI. REFERENCIAS.....	173

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Presión de disociación del CaCO_3 a diferentes temperaturas.	7
2. Tipos y características de los depósitos de piedra caliza.	12
3. Características principales de las calizas útiles	12
4. Solubilidad de la cal cálcica en el agua.	25
5. Requisitos químicos de los tipos de cal utilizados en la construcción.	31
6. Requisitos físicos de los tipos de cal utilizados en la construcción.	32
7. Técnicas de análisis y áreas de aplicación de los rayos X	39
8. Técnicas de aplicación y ejemplos de la difracción de rayos X.	40
9. Clasificación de las variables	44
10. Formato de recolección de los datos obtenidos en el TGA para la temperatura de descomposición óptima de la piedra caliza cálcica y dolomítica.	45
11. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo XRF	45
12. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo PSD.	46
13. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo XRD	46
14. Formato de recolección de los datos obtenidos de las pérdidas al fuego de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.	46
15. Formato de recolección de los datos obtenidos de las finezas de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.	47
16. Formato de recolección de los datos obtenidos del análisis físico de ampolladuras y picaduras de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada	47
17. Análisis de fluorescencia de rayos X para la piedra caliza	53
18. Análisis de fluorescencia de rayos X para la piedra dolomita.	53
19. Análisis de difracción de rayos X para la piedra caliza	53
20. Análisis de difracción de rayos X para la piedra dolomita	54

21. Temperaturas obtenidas del análisis termogravimétrico de la piedra caliza cálcica y dolomita. El análisis se elaboró en triplicado	55
22. Temperaturas promedio obtenidas del análisis termogravimétrico en triplicado de la piedra caliza cálcica y dolomita	55
23. Resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados	59
24. Resultados promedio de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados	59
25. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados	60
26. Resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados	60
27. Resultados promedio de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados	60
28. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados	60
29. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas	61
30. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas	62
31. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C	62
32. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C	62
33. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas	63
34. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas	63
35. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C	64
36. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C	64
37. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas	65

38. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas	65
39. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C	65
40. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C	66
41. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas	66
42. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas	66
43. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C	67
44. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C	67
45. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas	68
46. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas	68
47. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C	69
48. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C	69
49. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas	70
50. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas	70
51. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C	70
52. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C	71
53. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	72
54. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	72

55. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	72
56. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	73
57. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	73
58. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	73
59. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	74
60. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	74
61. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	75
62. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica 887°C	75
63. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	76
64. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	76
65. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	77
66. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	77
67. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	77
68. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	78
69. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	78
70. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1087°C	78
71. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	84

72. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	84
73. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	85
74. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	85
75. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	86
76. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	86
77. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	87
78. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	87
79. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	87
80. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	89
81. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	90
82. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	90
83. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	91
84. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	91
85. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	91
86. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	92
87. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	92
88. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	92

89. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas	95
90. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas	95
91. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas	96
92. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas	96
93. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas	96
94. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas	97
95. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas	97
96. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas	97
97. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas	98
98. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas	98
99. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas	99
100. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas	99
101. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C	100
102. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C	100
103. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C	100
104. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C	101

105. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C	101
106. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C	102
107. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C	102
108. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C	103
109. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C	103
110. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C	104
111. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C	104
112. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C	104
113. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C	105
114. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C	105
115. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C	105
116. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C	106
117. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C	106

118. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C	107
119. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	112
120. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	112
121. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	112
122. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	113
123. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	113
124. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	114
125. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	114
126. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	115
127. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	115
128. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	116
129. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	116
130. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	116
131. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	117
132. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	117
133. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	117

134. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	118
135. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	118
136. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	118
137. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C	122
138. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C	122
139. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C	123
140. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C	124
141. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C	124
142. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C	125
143. Datos obtenidos del análisis físico de ampolladuras y picaduras de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada	126
144. Análisis de varianza para los resultados de ampolladuras y picaduras en los diferentes tratamientos	128
145. Interpretación de los datos estadísticos obtenidos para las ampolladuras y picaduras variando fineza, tipo de piedra caliza y temperatura de calcinación	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Calcinación del carbonato para la obtención de óxidos	6
2. Transformación del óxido a hidróxido mediante la hidratación	6
3. Reacción de disociación del hidróxido del metal	7
4. Reacción de descomposición del carbonato de calcio a óxido de calcio mediante calcinación	7
5. Reacción de formación del carbonato de calcio	8
6. Ciclo de la cal, desde su producción hasta su utilización	8
7. Horno vertical con proceso continuo	9
8. Horno vertical con proceso discontinuo o por batch	9
9. Horno horizontal de proceso continuo con y sin precalcinador	10
10. Diagrama de flujo general, sin el proceso de mina, para fabricación de cal en un horno rotatorio	11
11. Estructura de celda unitaria de la calcita	14
12. Estructura de celda unitaria de la dolomita	14
13. Sistema fundamental del romboedro	15
14. Estructura cristalina de la celda unitaria del óxido de calcio	16
15. Poliedro fundamental, el cubo	16
16. Estructura cristalina de la celda unitaria del hidróxido de calcio	17
17. Estructura de la brucita compuesta de capas paralelas de Mg^{2+} en coordinación octaédrica con OH^- . Se puede observar que el gran espaciado a lo largo del eje c entre capas adyacentes es producido por enlaces residuales débiles.....	18
18. Características físico-químicas de los diferentes tipos de cal apagada	20
19. Características físico-químicas de los diferentes tipos de cal viva	20
20. Reacción química tras la calcinación de dolomita	21
21. Reacción química tras la calcinación de magnesita	21
22. Reacción química tras la calcinación de Calcita	21
23. Reacción química industrial del carbonato de calcio durante la calcinación	22
24. Reacciones químicas de formación de silicatos y aluminatos cálcicos	23

25. Calcinación de caliza en los diferentes tamaños de partículas	23
26. Piedras calizas con distintos tamaños y geometría, siendo sometidas a temperatura y tiempos de estadía constantes en un horno cuando se están calcinando	26
27. Relación entre área superficial y temperatura del horno en el proceso de calcinación	27
28. Reacción química del óxido de calcio para obtener cal apagada	28
29. Reacción química del apagado de cal dolomítica normal	28
30. Reacción química de la hidratación de cal viva dolomítica	28
31. Reacción química de la cal viva con la humedad del ambiente	29
32. Reacción química de la formación del carbonato	29
33. Difractograma obtenido de la muestra de piedra caliza	54
34. Difractograma obtenido de la muestra de piedra dolomita	54
35. Termograma obtenido del análisis de la muestra 1 de piedra caliza cálcica	56
36. Termograma obtenido del análisis de la muestra 2 de piedra caliza cálcica	56
37. Termograma obtenido del análisis de la muestra 3 de piedra caliza cálcica.	56
38. Termograma obtenido del análisis de la muestra 1 de piedra caliza dolomítica	57
39. Termograma obtenido del análisis de la muestra 2 de piedra caliza dolomítica	57
40. Termograma obtenido del análisis de la muestra 3 de piedra caliza dolomítica	57
41. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 94% pasante tamiz 200	79
42. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 85% pasante tamiz 200	80
43. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 75% pasante tamiz 200	80
44. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 94% pasante tamiz 200	81
45. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 85% pasante tamiz 200	81
46. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 75% pasante tamiz 200	82
47. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 94% pasante tamiz 200	82

48. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 85% pasante tamiz 200	83
49. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 75% pasante tamiz 200	83
50. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 900°C	88
51. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 850°C	88
52. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 1100°C	89
53. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 887°C	93
54. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 837°C	93
55. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 1087°C	94
56. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 94% pasante tamiz 200.....	107
57. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 85% pasante tamiz 200.....	108
58. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 75% pasante tamiz 200.....	108
59. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 94% pasante tamiz 200.....	109
60. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 85% pasante tamiz 200.....	109
61. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 75% pasante tamiz 200.....	110
62. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 94% pasante tamiz 200.....	110
63. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 85% pasante tamiz 200.....	111
64. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 75% pasante tamiz 200.....	111

65. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 900°C	119
66. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 850°C	119
67. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 1100°C	120
68. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 887°C	120
69. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 837°C	121
70. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 1087°C	121
71. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	155
72. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	155
73. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	156
74. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	156
75. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	157
76. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C	157
77. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	158
78. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	158
79. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	159
80. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	159
81. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	160

82. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C	160
83. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	161
84. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	161
85. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	162
86. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	162
87. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	163
88. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C	163
89. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.....	164
90. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.....	164
91. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C	165
92. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C	165
93. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C	166
94. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C	166
95. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	167
96. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	167
97. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	168
98. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	168

99. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	169
100. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C	169
101. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	170
102. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	170
103. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	171
104. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	171
105. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	172
106. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C	172

ABREVIATURAS UTILIZADAS

ANOVA	Análisis de varianza
CaO	óxido de calcio
Ca(OH) ₂	hidróxido de calcio
CETEC	Centro Tecnológico (en Cementos Progreso)
°C	grados Celcius
FeO	óxido de hierro
g	gramos
MgO	óxido de magnesio
Mg(OH) ₂	hidróxido de magnesio
µm	Micrómetro
PSD	Distribución del tamaño de partícula, por sus siglas en inglés.
TGA	Análisis termogravimétrico
XRD	Difracción de rayos X
XRF	Fluorescencia de rayos X

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en determinar los posibles factores que provoquen el apareamiento de ampolladuras y picaduras en acabados que utilizan cal en su formulación. Para ello se varió tres factores diferentes (fineza, tipo de caliza y temperatura de calcinación) en distintos niveles, observando mediante un análisis físico basado en la norma ASTM C-110 la presencia o ausencia de ampolladuras y picaduras.

Para ello se realizó experimentaciones en los equipos de difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos (XRF), distribución de tamaño de partícula (PSD) y el análisis físico en duplicado para posteriormente elaborar un análisis estadístico concluyente acerca del efecto que poseen los factores sobre la variable respuesta. Los factores que poseen significancia estadística consisten en la fineza, tipo de caliza y temperatura de calcinación; así como las interacciones entre fineza y temperatura de calcinación; y tipo de caliza y temperatura de calcinación. Mediante el análisis químico y estadístico se logró determinar que la sobrecalcinación de cal cálcica y dolomítica con fineza 75% y 85% pasante tamiz 200, así como la presencia de óxido de magnesio en cal dolomítica con fineza de 75% pasante tamiz 200, provocan el apareamiento de ampolladuras y picaduras. Las variables escogidas como independientes (fineza, tipo de piedra y temperatura de calcinación) resultaron ser adecuadas para determinar la presencia o ausencia de la variable dependiente (ampolladuras y picaduras). Sin embargo, es recomendable analizar otras variables como tiempo de calcinación y porcentaje de hidratación, para ver su influencia en el apareamiento de dicho fenómeno.

Palabras clave: fineza, temperatura de calcinación, tipo de piedra caliza, sobrecalcinación, semicalcinación, hidratación, cal, óxido de calcio, óxido de magnesio, hidróxido de magnesio, hidróxido de calcio.

I. INTRODUCCIÓN

La cal es uno de los materiales más antiguos que el ser humano ha conocido. Su uso data desde mucho antes del desarrollo de la industria química y minera del siglo XX. Un ejemplo de ello es su amplio uso en la agricultura y construcción por los sirios, egipcios, babilonios y mesopotámicos (Sabá, 2006: XXI, Coloma, 2008:26). Para el caso de Guatemala puede observarse cal en las construcciones de la cultura Maya (300-900d. C.), principalmente en la construcción de sus centros ceremoniales como Copán, Chichéntza, Palenque, etc. (Coloma, 2008:28). Como puede observarse, su uso ha sido muy amplio lo que ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas en la utilización de la misma. Además, esto ha dado lugar al desarrollo de nuevos productos basados en el óxido de calcio (CaO) (Coloma, 2008, 27-28).

La técnica de utilización de la cal fue perfeccionada con el transcurso del tiempo. Esto dio origen al mortero de cal apagada, que consiste en la hidratación del óxido de calcio para obtener el hidróxido de calcio. El primer uso de este nuevo compuesto fue durante el siglo X a. C. Posteriormente, se añadió a la cal diferentes aditivos que le concebían diversas características (Coloma, 2008: 28).

Sin embargo, a pesar de los avances en la utilización de la cal, poco se sabía del proceso químico al calcinar la caliza. El primer esclarecimiento fue establecido por el químico inglés Joseph Black en una serie de experimentos. En sus observaciones logró distinguir un gas obtenido a partir de piedras calizas durante la calcinación, el cual fue identificado posteriormente como dióxido de carbono (CO₂). Además de esto, logró observar que la dureza de los morteros de cal apagada [Ca(OH)₂] aumentaba al estar expuestos al aire, pues se endurecían paulatinamente ya que absorbían CO₂ y perdían agua. (Coloma, 2008:29).

Con el esclarecimiento químico de la producción de la cal, sus usos se ampliaron aún más, e incluso dio origen a los diferentes tipos de cal que en la actualidad se conocen. Además, se inició con el uso de los morteros, los cuales consisten en mezclas de uno o diversos conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y en algunas ocasiones, de aditivos (AFAM, 2009: 8). Existen dos tipos, los morteros de juntas y los de recubrimiento. Los primeros se usan con el fin de enlazar materiales de construcción. En tanto, que los de recubrimiento se utilizan para acabados, repellos de muros y techos; y aplanados (Grupo Calidra, 2012: 1). Para este tipo de morteros se utiliza cal pues mejora las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, ya que mejora la retención del agua por parte del mortero conservando de mejor manera la consistencia desde su preparación hasta su aplicación. Además, mejora la capacidad del mortero a incorporar arena en la mezcla, otorgando mayor fluidez al mismo en estado fresco (Sabá, 2006: 8, 9).

Es por ello que muchas empresas se dedican a la realización de morteros como productos pre-dosificados utilizando cal como uno de los componentes. Estos productos principalmente se utilizan con fines de morteros de recubrimiento (acabados, aplanados, etc.). Una de las empresas guatemaltecas que

elabora este tipo de productos es *Cementos Progreso*, que por más de 115 años se ha dedicado a la producción cal. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un incremento en reclamos debido a la presencia de ampolladuras y picaduras en morteros de recubrimiento que poseen cal en su formulación. Una de las posibles causas es la hidratación de los óxidos de calcio y óxido de magnesio, pues generan pequeñas explosiones que afectan al mortero física y químicamente.

El fenómeno ha sido poco estudiado y no existe una norma que explique químicamente a que se debe, únicamente se trabaja con la norma ASTM C-110 que lo observa físicamente. Por consiguiente, la presente investigación pretende analizar las posibles causas químicas de la aparición de ampolladuras y picaduras utilizando cal cálcica y dolomítica y analizando las cales obtenidas en los equipos de difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos x (XRF) y en el analizador de tamaño de partícula (PSD).

II. OBJETIVOS

A. Objetivo central.

Analizar la relación entre el grado de calcinación y el tamaño de partícula de la cal cálcica y dolomítica semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada como causantes de ampolladuras y picaduras (pitting y popping) en acabados que contiene cal en su formulación en *Cementos Progreso, S. A.*

B. Objetivos específicos.

1. Determinar la influencia del grado de calcinación de la cal cálcica y dolomítica en la presencia de ampolladuras y picaduras (pitting y popping) en acabados que contienen cal en su formulación en *Cementos Progreso, S. A.*

2. Evaluar la influencia del tamaño promedio de partícula de cal cálcica y dolomítica semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada como causa de ampolladuras y picaduras (pitting y popping) en acabados que contienen cal en su formulación en *Cementos Progreso, S. A.*

III. MARCO TEÓRICO

A. Reseña histórica de la cal

La cal es uno de los productos más antiguos que ha conocido la humanidad. Su nombre deriva del latín *calx calcis*, de lo cual surgen los términos calcinar, caliza, calcáreo, etc. (Coloma, 2008:26).

La utilidad de la cal, químicamente óxido de calcio (CaO), data desde antes del surgimiento y desarrollo de la industria química y minera en el siglo XX. Un ejemplo de ello fue su amplio uso en la agricultura y construcción (Coloma, 2008:26).

En la construcción, se utilizaba cal con impurezas en suelos, pinturas y muros en la época del Neolítico. Incluso, se han observado evidencias del uso de cal en las cisternas de la cultura Jericó (6,000-7,000 a. C.). El primer horno de cal se observó en la cultura Mesopotámica (2,500 a. C.), la cual a su vez era mezclada con arena para utilizarse como recubrimiento. Esto último, puede observarse en el Palacio Asirio de Til Barsib que data del siglo XVIII a. C. (Coloma, 2008:26).

En el año 1,500 a. C., mediante la cultura griega, los europeos iniciaron a utilizar cal mezclada con tierras Santorin como recubrimientos de interiores y suelos. En Thera se utilizó la mezcla de cal, arena y arena volcánica de tierra Santorin, lo que otorgó morteros estables a agua y con propiedades semejantes a las observadas en morteros modernos que utilizan aglomerantes hidráulicos (Coloma, 2008:27).

Posteriormente, con el transcurso del tiempo la técnica de utilización de cal fue perfeccionada, dando origen al mortero de cal apagada, químicamente hidróxido de calcio [Ca(OH)_2]. El primer uso de este nuevo compuesto data del siglo X a. C., como material de construcción en las Cisternas de Jerusalén y posteriormente en construcciones de Creta (Coloma, 2008:27).

En las construcciones de la cultura Maya (300-900 d. C.) se utilizó cal, principalmente en centros ceremoniales como Chichén Itzá, Copán, Palenque, entre otros. De igual manera, fue utilizada por Toltecas en Tula y por Aztecas (Coloma, 2008:28).

En la época del Renacimiento, principalmente en el Barroco (s. XV-XVIII d. C.), la cal se mezcló con marmolina y pigmentos, con el fin de utilizarla en morteros y decoración de la Capilla Sixtina (Coloma, 2008:28).

Ya en el siglo XVIII se inició la fabricación de aglomerantes hidráulicos, lo que produjo mezclas capaces de endurecerse en el agua. Con estos nuevos aditivos, durante la revolución industrial europea (s.

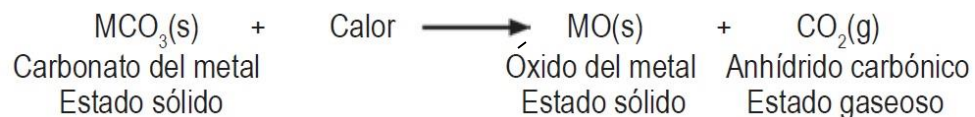
XVIII y XIX), se inició la fabricación de cales hidráulicas que fueron utilizadas para fabricar morteros y confeccionar hormigones (Coloma, 2008:28).

A pesar de los avances en la utilización de la cal, poco se sabía del proceso químico al calcinar la caliza. Los conocimientos de los cambios químicos durante la calcinación de la caliza fueron escasos para los romanos y griegos. El primer esclarecimiento moderno fue establecido por el químico inglés Joseph Black en una serie de experimentos. En sus observaciones logró distinguir un gas obtenido a partir de piedras calizas durante la calcinación, el cual fue identificado posteriormente como dióxido de carbono (CO_2). Además de esto, logró observar que la dureza de los morteros de cal apagada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] aumentaba al estar expuestos al aire, pues se endurecían paulatinamente ya que absorbían CO_2 y perdían agua. Con estas observaciones, Black concluyó que el mortero endurecido era similar a la caliza original (Coloma, 2008:29).

B. Fabricación de cal.

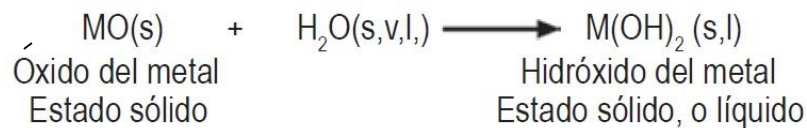
1. Generalidades. La cal es un compuesto obtenido a partir de la descomposición del carbonato presente en las calizas, dolomías y magnesitas mediante la calcinación de las mismas, tal y como se observa en la reacción de la Figura 1. De esta calcinación se obtiene el óxido del metal del carbonato, el cual al añadirle agua o dejarlo expuesto al medioambiente da lugar al hidróxido del metal, como se observa en la reacción de la Figura 2. La cantidad de agua que se requiere debe ser la adecuada para observar un polvo químico seco. Si se añade más agua de la necesaria, puede producirse una disociación del catión (M^{2+}) y aniones (OH^-), como se observa en la reacción de la Figura 3. El elemento metálico M, mostrado en las Figuras 1 a 3 principalmente puede ser calcio (Ca) o magnesio (Mg), entre otros (Coloma, 2008:31).

Figura 1. Calcinación del carbonato para la obtención de óxidos.



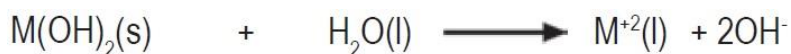
(Coloma, 2008:31).

Figura 2. Transformación del óxido a hidróxido mediante la hidratación.



(Coloma, 2008:31).

Figura 3. Reacción de disociación del hidróxido del metal.



(Coloma, 2008:31).

Como puede observarse en las Figuras anteriormente mostradas, la materia prima para la fabricación de la cal es el carbonato presente en las rocas sedimentarias de calizas. Estas rocas pueden encontrarse en forma de magnesita, calcita y dolomita mineral. Sin importar que forma posea la caliza, para obtener cal viva se necesita rebasar la presión de disociación ejercida por el carbonato del metal, lográndose a través de una reacción endotérmica, la calcinación, con lo que se libera el anhídrido carbónico (CO₂), obteniéndose así el monóxido del metal. Comúnmente para este fin se utiliza el carbonato de calcio, obteniéndose cal viva de óxido de calcio (Coloma, 2008:31).

a. Carbonato de calcio. Una de las formas de cal más utilizadas, es la proveniente del carbonato de calcio. La presión de disociación del carbonato de calcio es un factor importante para obtener el óxido de calcio, por lo que debe considerarse la presión de disociación a las diferentes temperaturas del CaCO₃, como se muestra en el Cuadro 1 (Coloma, 2008:32). El proceso de producción del óxido de calcio inicia con la molienda de la piedra caliza, para posteriormente calcinarla a elevadas temperaturas de lo que se obtiene cal viva, (CaO), como puede observarse en la Figura 4. Esta cal viva, se muele nuevamente y se añade al proceso de apagado con agua, como se muestra en la Figura 2. Con el apagado se obtiene el hidróxido de calcio [Ca(OH)₂], el cual puede utilizarse para elaborar morteros (Cañón, 2012: 6, 7).

Figura 4. Reacción de descomposición del carbonato de calcio a óxido de calcio mediante calcinación.



(Coloma, 2008:32).

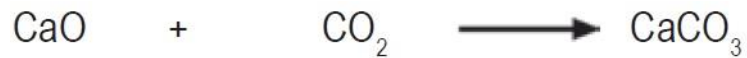
Cuadro 1. Presión de disociación del CaCO₃ a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Presión (mm Hg)
200	7.8×10 ⁻⁹
400	0.3×10 ⁻³
500	0.15
600	2.98
700	31.2
800	208
882	760
900	784

(Coloma, 2008:32).

Si se calienta carbonato de calcio a una temperatura un poco mayor de 500°C no se observará disociación, pero por encima de los 550°C se observa que inicia a perder CO₂, en tanto que encima de 882°C se observa una descomposición total a cal viva (CaO), pero debe considerarse que el CO₂ tenga una presión definida. Es decir, si la presión parcial, en la atmósfera, del dióxido de carbono es superior que la presión de equilibrio, se observará la reacción de la Figura 5, y de manera eventual el óxido de calcio (cal viva) puede transformarse totalmente en el carbonato (Coloma, 2008:32). Esto último, sucede generalmente en los morteros de cal utilizados en la construcción (Cañón, 2012: 8).

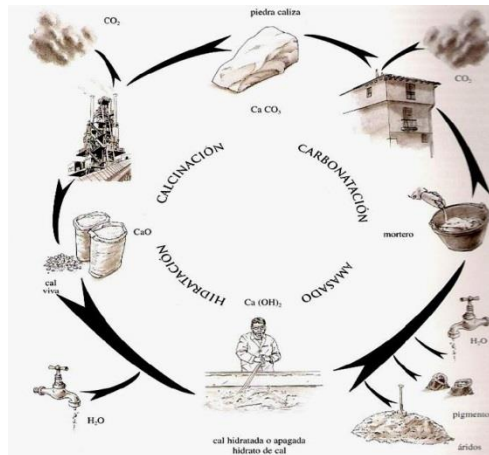
Figura 5. Reacción de formación del carbonato de calcio.



(Coloma, 2008:32)

Con el proceso de carbonización de la cal, para producir nuevamente carbonato de calcio se cierra el ciclo de la cal, desde su producción hasta su endurecimiento como se muestra en la Figura 6. Este ciclo inicia y termina con el carbonato de calcio (Cañón, 2012: 8).

Figura 6. Ciclo de la cal, desde su producción hasta su utilización.



(Cañón, 2012: 8).

A pesar de poder descomponer el carbonato de calcio a temperaturas de 900°C, la velocidad de descomposición es muy lenta, por lo que industrialmente se realizan calcinaciones a temperaturas entre 1,100°C a 1,200°C. Este tipo de calcinación se realiza comúnmente en diferentes tipos de hornos (Coloma, 2008:33).

2. Hornos para calcinación de caliza y resumen del proceso de fabricación de cal.
Generalmente se utilizan hornos verticales u horizontales. Para elegir correctamente el tipo de

horno es necesario conocer la composición mineralógica, dureza y nivel de impurezas de la materia prima (Coloma, 2008:33).

En cuanto a los hornos verticales, existen dos tipos uno con proceso continuo y otro con proceso discontinuo como se muestran en las Figuras 7 y 8 (Coloma, 2008:33).

Figura 7. Horno vertical con proceso continuo.



(Coloma, 2008:34).

Figura 8. Horno vertical con proceso discontinuo o por batch.



(Coloma, 2008:34).

En tanto que los hornos horizontales pueden ser hornos continuos cortos con precalcinador o largos sin precalcinador, como se muestra en la Figura 9 (Coloma, 2008:35).

Figura 9. Horno horizontal de proceso continuo con y sin precalcinador.



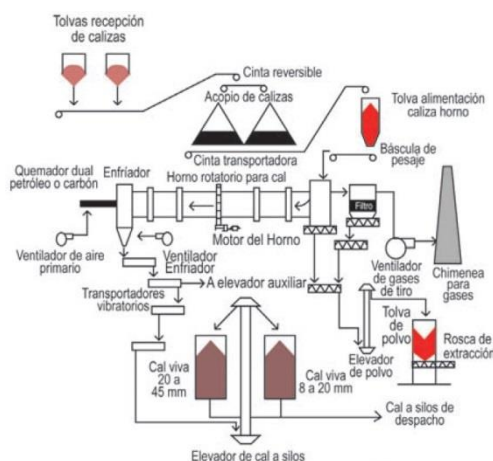
(Coloma, 2008:35).

Cabe mencionar que los hornos para la producción de cal funcionan como intercambiadores de calor y transportadores. El calor se transmite de la llama y gases calientes hasta la cama mineral de caliza, mientras que el material avanza desde la entrada hasta llegar a la descarga (Coloma, 2008:35).

A grandes rasgos, para la fabricación de cal se llevan a cabo 4 operaciones unitarias, representadas tres de ellas en la Figura 10 (Coloma, 2008:36).

- a. **Mina.** Se refiere a la exploración y explotación de calizas en un área minera y la reducción de tamaño de las mismas (Coloma, 2008:36).
- b. **Horno.** El horno se alimenta con caliza y se produce una separación de finos. Se produce, posteriormente, la calcinación y el enfriamiento del material (Coloma, 2008:36).
- c. **Envasado.** El material se transporta al silo y se realizan descargas del mismo (Coloma, 2008:36).
- d. **Despacho.** Finalmente se despacha el producto a granel o envasado en sacos (Coloma, 2008:36).

Figura 10. Diagrama de flujo general, sin el proceso de mina, para fabricación de cal en un horno rotatorio.



(Coloma, 2008:38).

3. **Materias primas.** El carbonato presente en calizas, aparece en estas rocas sedimentarias como calcita, magnesita y dolomita mineral. Estos tres tipos de calizas se obtienen gracias a diferentes procesos (Coloma, 2008:38).

a. **Procesos químicos.** Estos procesos permiten obtener los carbonatos mediante la precipitación utilizando soluciones con temperatura, concentración y presión adecuadas (Coloma, 2008:38).

b. **Procesos biológicos.** Los carbonatos pueden obtenerse mediante organismos animales o vegetales que posean células aptas para absorber carbonatos de una disolución, para posteriormente concentrarlo y depositarlo como concha o esqueleto (Coloma, 2008:38).

c. **Procesos clásticos.** Este proceso utiliza la destrucción física de sedimentos de piedra caliza que se han formado a través de procesos biológicos y/o químicos. Estos sedimentos fueron redepositados en determinado lugar mediante descongelamiento, congelamiento, erosión, entre otros. Cuando los carbonatos ya han sido producidos o depositados, han estado expuestos a transformaciones. Es decir, los carbonatos se acomodaron, comprimieron y compactaron gracias a la presión. Además, estos son expuestos a altas temperaturas lo que produce modificaciones en la estructura de los depósitos, para posteriormente producirse una recristalización obteniéndose un depósito con una amplia gama de calizas, como los que se muestran en el Cuadro 2 (Coloma, 2008:39).

Cuadro 2. Tipos y características de los depósitos de piedra caliza.

Depósitos calizos	Tipos de material
Calcáreos	Impuros, contienen arcilla o pizarras
Arcillosos	Con altos contenidos de arcillas
Carbonáceos	Contienen material orgánico o carbón.
Estalactitas y estalagmitas	Obtenidas por precipitación química en cavernas.
Mármoles	Granos grandes que aceptan pequeños polímeros, generalmente contienen impurezas que producen su aspecto particular. Es muy pobre para cal.
Travertinos	Densas, muy metamorfoseadas y en ocasiones impura, parecida al mármol.
Horstenos	Contienen cristales separados de horsteno, el cual es una variedad amorfa de cuarzo (sílice).
Pisolíticos	Parecidas a horsteno pero con granos mayores.
Tizas	Suaves y blancas.
Espato de Islandia	Tiene la forma más pura de carbonato de calcio, altamente cristalino, en ocasiones transparente y normalmente usada en instrumentos ópticos.
Corales y rocas coralinas	Normalmente conchas de locos, ostiones, etc.
Densas masivas	Origen biológico frecuentemente de grano fino, siendo la principal materia prima para la fabricación de cal.

(Coloma, 2008:39).

Mineralógicamente hablando, los carbonatos útiles en la fabricación de los diferentes tipos de cal son: la aragonita, calcita, dolomita y magnesita. Siendo la más escasa la aragonita, pues se obtiene a través de un proceso químico de precipitación en caliente. Sus propiedades fisicoquímicas pueden observarse en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características principales de las calizas útiles.

Nombre mineralógico	Fórmula química	Peso molecular (g/mol)	Peso espec. (g/cc)	Dureza (escala de Mohs)	Forma de los cristales
Dolomita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184.4	2.84	3.5-4.0	Romboédrica
Aragonita	CaCO_3	100.1	2.94	3.5-4.0	Ortorrómica
Calcita	CaCO_3	100.1	2.72	3.0	Romboédrica
Magnesita	MgCO_3	84.3	3.00	3.5-4.5	Romboédrica

(Coloma, 2008:40).

C. Propiedades físicas de la caliza y la cal.

1. Propiedades físicas de la caliza. Debido a las propiedades físicas que poseen los minerales de carbonato, no es fácil distinguirlos entre sí. Propiedades como la gravedad, forma cristalina, color, entre otras sirven para identificar de qué tipo de material está compuesta una roca. Además, propiedades como la densidad, textura, dureza y porosidad; sumado a las impurezas como óxido férrico, alúmina y sílice varían en gran medida en una misma cantera. Para las impurezas existen dos consideraciones muy importantes, cómo se encuentra distribuida y en qué cantidad (Ochaeta, 2004: 25, 26).

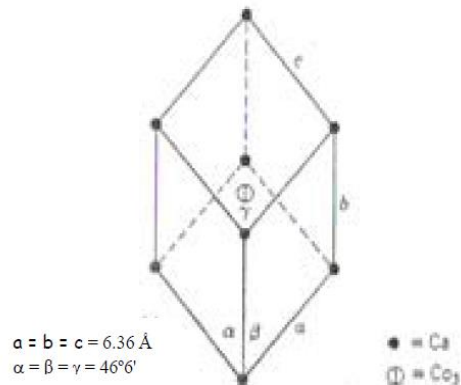
La calcita (CaCO_3) se encuentra en magníficos cristales implantados, ricos en facetas, formando más de mil combinaciones, comúnmente con hábito romboédrico, aunque algunas veces escalenoédrico. Sin embargo, también puede encontrarse en forma de cristales de aspecto lenticular y de prismas (Ochaeta, 2004: 26).

Su aspecto comúnmente es incoloro a blanco, con un característico brillo vítreo. Puede ser opaco en las diversidades de espato calizo. Además, es relativamente blando, pues puede rayarse fácilmente utilizando una navaja pero no con la uña. Su descomposición oscila entre los 900°C , liberándose el CO_2 y formándose CaO , como se mencionó en el inciso anterior (Ochaeta, 2004: 26).

a. Estructura cristalina de la caliza. Los análisis por difracción de rayos X han revelado que la calcita y la dolomita cuentan con una estructura cristalina romboédrica. A pesar de ello, se observan diferencias leves en cuanto a las dimensiones de sus ángulos en las celdas unitarias. Existe una reducción en las dimensiones de las aristas en la estructura de la dolomita debido a la inserción del pequeño átomo de magnesio. La longitud de la arista de la celda de la dolomita pasa de 6.36\AA en la calcita a 6.02\AA , y el ángulo en la celda de 47.6° a 46.6° . La magnesita, (MgCO_3) posee una longitud en la arista aún menor, siendo de 5.61\AA , pero posee un ángulo mayor de 48.12° . Eso puede observarse en las Figuras 11 y 12 (Ochaeta, 2004: 27).

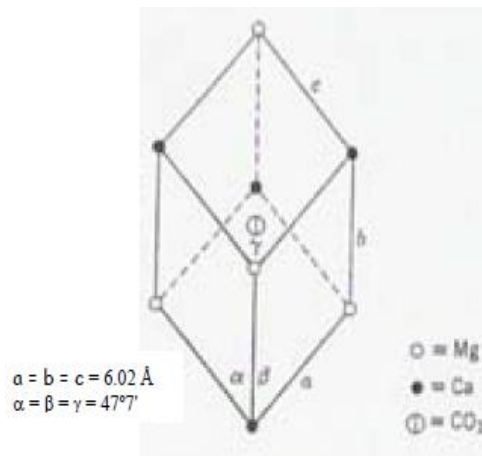
Los minerales calizos como la calcita (CaCO_3), magnesita (MgCO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) son denominados minerales miscibles pues son un ejemplo de isomorfismo (Ochaeta, 2004: 28).

Figura 11. Estructura de celda unitaria de la calcita.



(Ochaeta, 2004: 27).

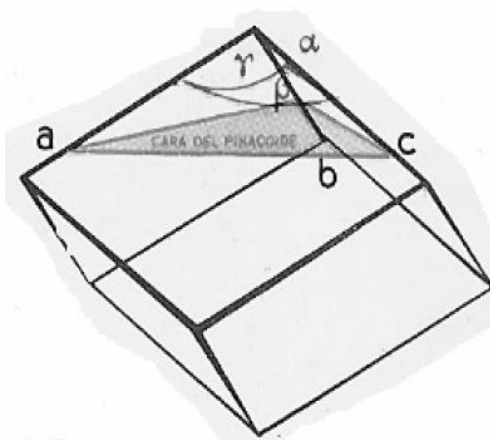
Figura 12. Estructura de celda unitaria de la dolomita.



(Ochaeta, 2004: 28).

1) Sistema romboédrico. La forma fundamental del sistema es el romboedro, el cual puede considerarse como un derivado del cubo cuando éste último es deformado de manera homogénea. Se encuentra integrado por seis caras, rombos y doce aristas, de las cuales seis son culminantes tres a tres con los vértices inferior y superior. Los ejes que se consideran cristalográficos racionales dentro del sistema son las 3 aristas culminantes del romboedro, las cuales forman ángulos iguales entre ellas y diferentes de 90° ($\alpha = \beta = \gamma \neq 90^{\circ}$), tal y como se observa en la Figura 13 (Ochaeta, 2004: 29).

Figura 13. Sistema fundamental del romboedro.



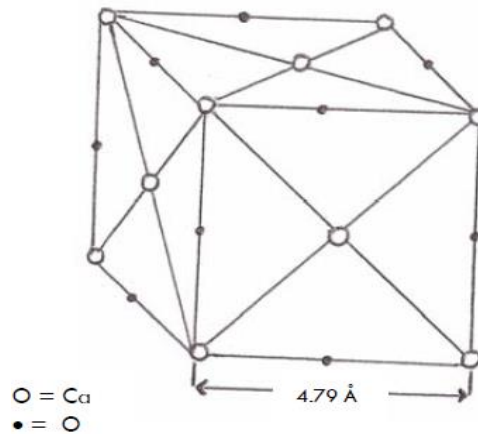
(Ochaeta, 2004: 29).

2. **Propiedades físicas de la cal.** Comúnmente la cal posee un color blanco en diversos grados de intensidad, lo cual depende de la pureza química de la misma. Las cales más puras poseen un color blanco, en tanto que las menos puras o mal calcinadas poseen pequeñas trazas de color amarillento o gris (Ochaeta, 2004: 30).

En cuanto a la densidad de la cales puede mencionarse que se encuentra estrechamente ligada con la estructura, origen y porosidad que tenga el material, y esto depende principalmente de la temperatura de calcinación. Es decir, cuánto más alta sea la temperatura de calcinación, mayor será la densidad de la cal viva obtenida. Como consecuencia, la densidad de la dolomita sobrequemada será mayor que la que posee la cal viva dolomítica, variando entre 3.4 y 3.8Kg/dm^3 (Ochaeta, 2004: 30).

a. **Estructura cristalina de la cal viva.** Los análisis por difracción de rayos X han revelado que el óxido de calcio puro es capaz de cristalizar en un sistema cúbico, tal y como se muestra en la Figura 14. La longitud que poseen sus aristas es 4.794Å , en la cual los átomos de calcio se encuentran en medio de cada una de las mismas. En el caso del óxido de magnesio se cuenta también con un sistema cúbico al igual que el óxido de calcio. La diferencia entre ambos compuestos es que el cristal del óxido de magnesio es ligeramente más pequeño y denso, con sus longitudes de arista igual a 4.203Å . Esto explica la densidad ligeramente mayor y el tiempo de hidratación tardío que posee la cal dolomítica (Ochaeta, 2004: 30, 31).

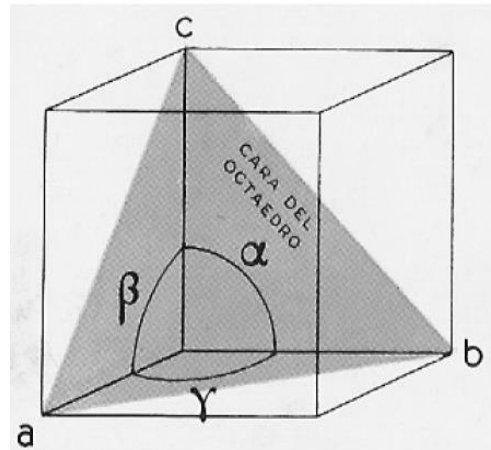
Figura 14. Estructura cristalina de la celda unitaria del óxido de calcio.



(Ochaeta, 2004: 31).

1) Sistema cúbico. El poliedro fundamental del sistema es el cubo. Éste es una forma cerrada y sencilla que se encuentra compuesta por seis caras equivalentes y normales a los ejes cuaternarios. Las aristas son consideradas como los ejes cristalográficos que posee el sistema, los cuales forman tres ángulos rectos ($\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$), tal y como se muestra en la Figura 15 (Ochaeta, 2004: 31).

Figura 15. Poliedro fundamental, el cubo.



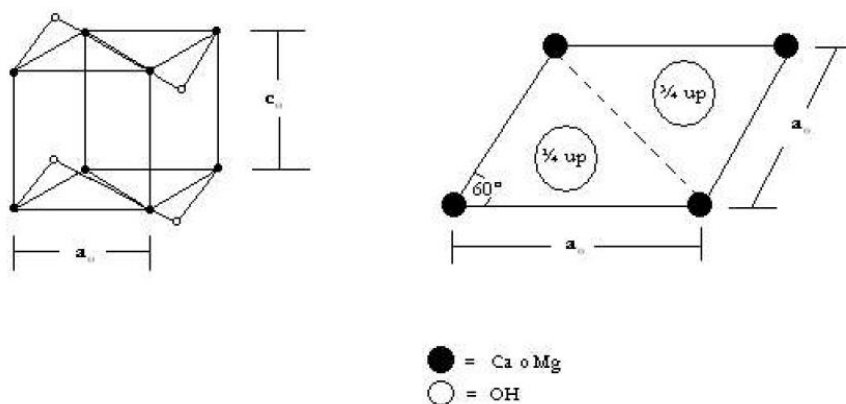
(Ochaeta, 2004: 31).

b. Estructura cristalina de la cal hidratada. Mediante análisis de difracción de rayos X se ha observado que el hidróxido de calcio puro, siendo principalmente el mineral portlandita, es capaz de cristalizar en un sistema cúbico, como el mostrado en la Figura 16. El cristal consiste en un plato hexagonal o con forma de prisma con una perfecta división basal. Sin embargo, la partícula varía físicamente su tamaño, pues pueden existir cristales macroscópicos aglomerados en varios

grados. Los cristales en estado sólido forman lo que se denomina escalenoedro ditrigonal de un sistema romboedro-hexagonal (Samayoa, 2005: 27).

La longitud de sus aristas en la extensión de la base es de 3.5844\AA en tanto que la de la altura para los átomos de calcio es de 4.8962\AA . El número de posiciones coordinadas o de átomos enlazados es 6 de calcio y 3 de hidroxilos respecto a un átomo central. El ángulo agudo que posee la base es 60° (Samayoa, 2005: 27).

Figura 16. Estructura cristalina de la celda unitaria del hidróxido de calcio.



(Samayoa, 2005: 27)

La estructura del hidróxido de magnesio, mineralógicamente conocido como brucita, posee átomos de Magnesio Mg^{2+} coordinado de manera octaédrica con el ion hidroxilo (OH^-); en el cual los octaedros comparten las aristas, que forman una capa. Además, las capas que posee la estructura de la brucita están unidas únicamente mediante enlaces residuales débiles. El tipo de estructura que posee la brucita es llamado trioctaédrico, ya que cada grupo OH^- se encuentra rodeado por tres posiciones ocupadas de manera octaédrica. Eso puede observarse en la Figura 17 (Cornelis y Cornelius, 2003: 434).

Figura 17. Estructura de la brucita compuesta de capas paralelas de Mg^{2+} en coordinación octaédrica con OH^- . Se puede observar que el gran espaciado a lo largo del eje c entre capas adyacentes es producido por enlaces residuales débiles.



(Cornelis y Cornelius, 2003: 434).

D. Propiedades químicas de la caliza y la cal.

1. **Composición y propiedades químicas de la caliza.** La caliza cálcica es una roca que cuando se encuentra pura está compuesta por carbonato de calcio. Constando de 55-56 partes en peso de óxido de calcio (CaO) y de 43-44% de dióxido de carbono (CO_2), estos porcentajes pueden variar debido a la presencia de impurezas. A pesar de ello, comúnmente la caliza se considera como una roca calcárea estratificada cuya composición es principalmente el mineral calcita, que al calcinarse se convierte en la cal viva comercial. Las calizas comerciales poseen diversas cantidades de carbonato de magnesio. Cuando éste se encuentra en cantidades inferiores a 5%, se denomina a la roca como caliza rica en calcio, si la cantidad es mayor al 5% se denomina a la roca como magnesiana. Cuando la caliza contiene entre 30% y 45% de carbonato de magnesio es clasificada como dolomítica. La caliza dolomítica está compuesta por el mineral dolomita, el cual es un carbonato doble de magnesio y calcio ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). La caliza dolomítica pura posee 54.3% de $CaCO_3$ y 45.7 $MgCO_3$, o bien 30.4% de CaO , 21.8% de MgO y 47.8% de CO_2 . En tanto, las calizas ricas en calcio de alta calidad poseen de 97-99% de $CaCO_3$ y las dolomíticas 40-43% de $MgCO_3$, con una cantidad de $CaCO_3$ ligeramente mayor que el teórico, con 1-3% de impurezas (Ochaeta, 2004: 32).

Los carbonatos no son tan reactivos comparados con los óxidos e hidróxidos de calcio o magnesio, por lo que hablar acerca de sus propiedades físicas es mucho más significativo que de sus características químicas. La propiedad química más predominante es su capacidad en descomponerse térmicamente en cal. Sin embargo, las calizas dolomíticas y las altas en calcio están consideradas entre los minerales más estables químicamente. Por ello, su descomposición no sucede a temperaturas ordinarias, de hecho, desde el $0^\circ C$ hasta $600^\circ C$, permanecen estables (Ochaeta, 2004: 33).

2. Propiedades químicas de la cal. La cal viva y la cal hidratada son sustancias estables, aunque muchos menos en comparación con la caliza de la que provienen. La cal viva es vulnerable al agua, incluyendo a la humedad del aire, ya que produce un efecto desestabilizante. Es capaz de reaccionar químicamente con ácidos, elementos químicos y otros compuestos (Ochaeta, 2004: 33).

En cuanto a las cales dolomíticas se observa una mayor estabilidad en comparación con cales altas en calcio, ya que no absorben humedad rápidamente. Las cales dolomíticas quemadas son completamente estables bajo gran parte de las condiciones, exceptuando su reactividad lenta con ácidos concentrados y fuertes (Ochaeta, 2004: 33).

La cal viva posee una capacidad de absorción de la humedad de por lo menos 24.3% de su peso. El porcentaje de absorción va a variar en gran manera, pues depende de su reactividad química y de la cantidad de agua o vapor de agua. El porcentaje de capacidad de absorción de agua en cuanto a la cal dolomítica es menor (Ochaeta, 2004: 34).

En cuanto a la adsorción del CO₂, puede mencionarse que la cal viva a temperatura ambiente ordinaria no reacciona con el CO₂ seco, pero cuando la temperatura se incrementa se produce una recarbonatación lenta. Esta recarbonatación inicia aproximadamente a 290°C, sin embargo, no ocurre una adsorción significativa hasta cerca de los 400°C. Ya a los 600°C se observa la afinidad que posee la cal por el CO₂, en este caso la adsorción es bien pronunciada y la reacción es rápida. A pesar de esto, la recarbonatación completa no ocurre debido a que la adsorción es un fenómeno únicamente superficial en el que una costra de carbonato de calcio se forma de manera gradual alrededor de las partículas de óxido de calcio. Los porcentajes que se observen de recarbonatación van a depender del tamaño de la partícula, teniendo mayor adsorción las partículas pequeñas. En las cales dolomíticas se observa únicamente recarbonatación del óxido de calcio (Ochaeta, 2004: 34).

E. Características físico-químicas de la cal.

Las características físico-químicas se muestran en las Figuras 18 y 19 para los diferentes tipos de cal, tanto viva como apagada.

Figura 18. Características físico-químicas de los diferentes tipos de cal apagada.

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica		Magnesiana
			N	S	
Nombre químico		Hidróxido de Ca	Hidróxido de Ca- Óxido de Mg	Hidróxido de Ca- Óxido de Mg	Hidróxido de Mg
Formula química		Ca (OH) ₂	Ca (OH) ₂ ·MgO	Ca (OH) ₂ ·Mg(OH) ₂	Mg(OH) ₂
Peso molecular	g/mol	74,096	114,4	132,4	58,336
Punto descompresión	°C	580			345
Índice de refracción		1,574 y 1,545			1,559 y 1,580
Calor de solución	kcal	+ 2,79			
Formación cristalina		Hexagonal			Hexagonal
Solubilidad a 0°C	g/l	1,85			0,0098
Solubilidad a 100°C	g/l	0,71			0,0042
Peso específico		2,3-2,4	2,7-2,9	2,4-2,6	2,4
Densidad en grana	g/l	400-560	400-560	480-640	
Calor específico a 10°F	BTU/lb	0,29	0,29	0,29	
Ángulo de reposo		15°-80	15°-80	15°-80	70°
		Generalmente 70°			
Calor de hidratación	cal/mol	15,3			8.000 a 10.000
Calor Formación ΔH a 25°C	kcal/mol	-235,58			
Energía Libre ΔG 25°C	kcal/mol	-213,9			
Porcentaje de CaO puro	%	75,69	49,01	42,35	
Porcentaje de MgO puro	%		35,24	30,44	69,12
Porcentaje de agua	%	24,31	15,75	27,21	30,88

(Coloma, 2008:69, 76).

Figura 19. Características físico-químicas de los diferentes tipos de cal viva.

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana
Nombre químico		Óxido de Ca	Óxido doble Ca-Mg	Óxido de Mg
Formula química		CaO	CaO·MgO	MgO
Peso molecular	g/mol	56,08	96,40	40,32
Punto de fusión	°C	2.57		2.80
Índice de refracción		1.838		1.736
Calor de solución	kcal.	+18,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0°C	g/l	1,40		0,0068
Solubilidad a 100°C	g/l	0,54		0,0030
Peso específico		3,2-3-4	3,2-3-4	3,65
Densidad en grana	g/l	881-961	881-961	
Calor específico a 100°F	BTU/lb	0,19	0,21	
Ángulo de reposo			50-55°	50-55°
Calor de hidratación	cal/mol	43,3		28,9
Calor Formación ΔH a 25°C	kcal/mol	-151,7		-235,58
Energía Libre ΔG 25°C	kcal/mol	-144,3		
Porcentaje de CaO puro	%	100	58,17	
Porcentaje de MgO puro	%		41,83	100

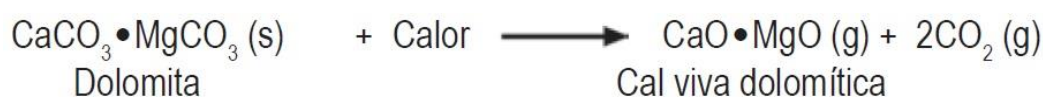
(Coloma, 2008:69, 77).

F. Clasificación de la cal.

Su clasificación está basada según el compuesto mineralógico que se utilice para fabricar el óxido, pudiendo ser dolomita, magnesita y calcita (Coloma, 2008:41).

1. **Dolomita.** Este compuesto es denominado carbonato doble, pues está compuesto de carbonatos de calcio y magnesio. Cuando se produce la calcinación de este compuesto se obtiene el óxido de calcio-magnesio ($\text{CaO}\cdot\text{MgO}$), según la reacción química mostrada en la Figura 20. Este compuesto, generalmente posee entre 35% a 40% del óxido de magnesio, MgO (Coloma, 2008:41).

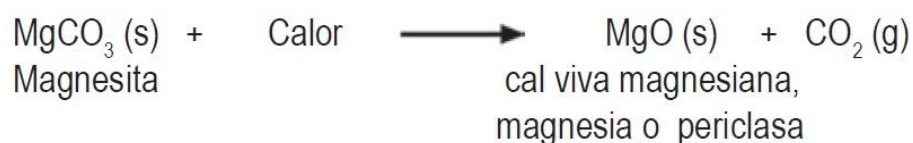
Figura 20. Reacción química tras la calcinación de dolomita.



(Coloma, 2008:41).

2. **Magnesita.** Es carbonato de magnesio que al calcinarlo se obtiene óxido de magnesio, según la reacción mostrada en la Figura 21. El producto obtenido posee una solubilidad de $6.8 \times 10^{-3} \text{ g/L}$ a 0°C y $3.0 \times 10^{-3} \text{ g/L}$ a 100°C . (Coloma, 2008:41).

Figura 21. Reacción química tras la calcinación de magnesita.



(Coloma, 2008:41).

3. **Calcita.** Está compuesta de carbonato de calcio obteniéndose, tras la calcinación, al óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), según la reacción química de la Figura 22. Sin embargo, también se puede encontrar un contenido de óxido de magnesio fluctuante de 0.5% a 5.0%. Si el carbonato posee cantidades sustanciales de alúmina, sílice y hierro, al llevar a cabo la calcinación se obtendrá cal viva hidráulica (Coloma, 2008:41).

Figura 22. Reacción química tras la calcinación de Calcita.

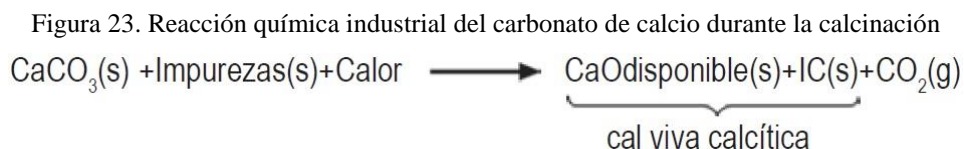


(Coloma, 2008:41).

Según el grado de calcinación y los fundentes que posea la materia prima se obtendrá cal viva calcítica de alta, mediana o baja reactividad. Esto último permite medir el tiempo que debe residir la cal dentro del proceso de hidratación. Con esto se obtienen diferentes tipos de cal que se dirigen a las diferentes ramas de la industria (Coloma, 2008:41).

El proceso de producción de cal, provoca la descarbonatación del carbonato. A grandes rasgos, esto quiere decir que cuando el calor tiene contacto con el mineral de carbonato de calcio se inicia una descomposición del mismo generando óxido de calcio provocando que en la superficie se lleven a cabo reacciones que dan lugar al requemado del óxido lo que produce el óxido de calcio combinado (Coloma, 2008:41).

Es por lo antes expuesto que el grado calcinación dependerá de diversos factores. Entre estos se encuentran el tamaño granulométrico que posea la materia prima, la cantidad de calor que absorba cada partícula para conseguir la disociación, impurezas enlazadas al calcio, tipo de horno que se utiliza, entre otros. Para el caso del tamaño granulométrico de la materia prima, es permitido una relación entre el tamaño mayor y menor de 1:3 para las diferentes rocas obtenidas de la explotación de calizas con el fin de tener una calcinación adecuada. Sin embargo, dentro de un horno el calor suele no ser constante, lo que indica que la disociación de CaO y CO₂ es distinta para los diferentes tamaños de partícula. Si se toma en cuenta las impurezas asociadas a la piedra caliza, la reacción química industrial es la mostrada en la Figura 23 (Coloma, 2008:42).



(Coloma, 2008:42).

En la Figura 23, puede observarse la cal disponible o total (CaO) la cual está conformada por CaO útil + CaO requemado + CaO crudo y finalmente, por el IC que son todas las impurezas concentradas. La cal útil es aquel CaO libre que ha sido generado por la calcinación y con un pH natural de 12.6. En tanto, que el CaO requemado se localiza en la capa superficial de la partícula. Comúnmente, el CaO requemado es la parte superficial de partículas grandes, y la totalidad de las pequeñas, como se muestra en la Figura 16. Este CaO se ha mezclado durante la calcinación, por el exceso de calor, con sílice, hierro o alúmina presentes en calizas y con pH natural entre 12.6 a 12.8, o más. Según la química del cemento, es la formación de aluminatos y silicatos cálcicos y se representa por las reacciones mostradas en la Figura 24 (Coloma, 2008:42). Por último, el CaO crudo corresponde al CaCO₃ que no logró disociarse en el proceso de calcinación, debido a la falta de calor. Es por ello que se observa en el centro de partículas más grandes (Figura 16), y poseen un pH natural igual al de la caliza de 8.2 (Coloma, 2008:60).

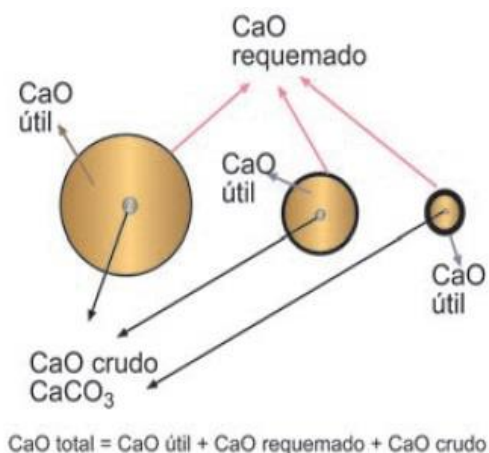
Figura 24. Reacciones químicas de formación de silicatos y aluminatos cálcicos.



(Coloma, 2008:42).

La formación de estos compuestos ha sido ampliamente estudiada. En un estudio elaborado por Coloma, 2008:49, al reaccionar cal a diferentes tiempos con el agua se logró detectar e identificar compuestos aluminosilicatos (CA) y ferroaluminosilicatos de calcio tras un análisis con Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Estos compuestos se observan de manera proporcional en una cantidad mayor mientras incrementa el tiempo de hidrólisis. Esto es pues, desde el punto de vista de la química cinética, el primer compuesto que reacciona con agua es el óxido de calcio útil, para después reaccionar los silicatos cálcicos presentes en la cal combinada. (Coloma, 2008:49).

Figura 25. Calcinación de caliza en los diferentes tamaños de partículas.



(Coloma, 2008:60).

G. Impurezas en la cal.

La cantidad de impurezas que hay en los diferentes tipos de cal, dependerá de las que existan en la materia prima utilizada. Entre las más encontradas están: silicio, aluminio, azufre, metales alcalinos, hierro, magnesio, entre otras. En ciertas ocasiones se han encontrado trazas de pigmentos y fundentes, como: flúor y manganeso. Esto último, hace que el producto tenga diferentes tonalidades de color, observándose

blanco, beige o negro, siendo la última una propiedad física únicamente que no altera las propiedades alcalinizantes ni su calidad en la capacidad o valor alcalinizante. La existencia de estas impurezas, puede llegar a ser muy importante en ciertos usos o aplicaciones de cal, en donde el manganeso y flúor afectan el proceso en el cual la cal se añade, o quedan asociados en el producto final que se obtenga (Coloma, 2008:61).

H. Tipos de cal.

El tipo de cal que más se utiliza en el ámbito de la construcción es la cal apagada, sin embargo, en otros ámbitos industriales se utilizan las diferentes formas existentes. Los diferentes tipos de cal dependerán principalmente del nivel de pureza de la piedra caliza que se utiliza para la fabricación. Las piedras calizas no contienen únicamente calcita, sino que en su estructura existen materiales como óxido de hierro, arcilla, óxido de magnesio y materiales orgánicos. Estas impurezas provocan que el material obtenido tenga diferentes propiedades (Cañón, 2012: 9).

1. **Cal viva.** A grandes rasgos, es la piedra caliza o dolomita calcinada. Está conformada principalmente por el óxido de calcio o bien óxido de calcio unido con óxido de magnesio. Esta cal puede hidratarse con agua. Hay dos tipos, por un lado, la cal viva de alto calcio con una solubilidad de 1.4g/L a 0°C y 0.54g/L a 100°C (ver Cuadro 4), y por el otro lado está la cal dolomítica (Coloma, 2008:62).

a. **Solubilidad de cal en agua.** La solubilidad que posee la cal es inversamente proporcional a la temperatura. Esto quiere decir, que cuando se alcanza una mayor temperatura existirá menor solubilidad y viceversa. Y ya que la cal al mezclarse con agua genera una reacción exotérmica, se ve afectada la concentración de sólidos en una lechada de cal. En el Cuadro 4 puede observarse el comportamiento de la solubilidad de la cal cálcica a diferentes temperaturas.

La solubilidad de cal industrial en el agua, no es más allá de un 7% en relación con la solubilidad que posee la cal teóricamente pura. Esta pequeña diferencia es debido a la existencia de trazas de hidróxido de potasio y sodio. Que exista presencia de carbonatos, magnesio y sílice no posee ningún efecto en la solubilidad de la cal, sin embargo, pueden afectar la razón de solución y generación de alcalinidad (Coloma, 2008:62).

La solubilidad también se ve afectada por el tamaño de las partículas de la cal. La cal que acaba de ser apagada, con un tamaño de partícula pequeño, tiene una influencia de alrededor del 10% en aumento en la solubilidad, en tanto que las partículas grandes de cal apagada y vieja poseen menor solubilidad. Este tipo de efecto es debido al crecimiento de partículas secas de la cal cuando envejecen (Coloma, 2008:62).

Cuadro 4. Solubilidad de la cal cálcica en el agua.

g/100g solución saturada		
Temperatura (°C)	CaO	Ca(OH) ₂
0	0.140	0.185
10	0.133	0.176
20	0.125	0.165
25	0.120	0.159
30	0.116	0.153
40	0.106	0.140
50	0.097	0.128
60	0.088	0.116
70	0.079	0.104
80	0.070	0.092
90	0.061	0.081
100	0.054	0.071

(Coloma, 2008:63).

b. **Hidratación de la cal viva.** Además de la contribución de basicidad o de su capacidad alcalinizante, también existe gran interés por su capacidad de hidratarse en el agua, debido a que puede formar un polvo fino y seco. Es claro que, para llevar a cabo el proceso de hidratación con una elevada velocidad de reacción, y obtener el producto deseado, es necesario que la cal tenga su máxima reactividad en agua. Eso incluso a pesar de una posible sobrecalcinación. (Coloma, 2008:64).

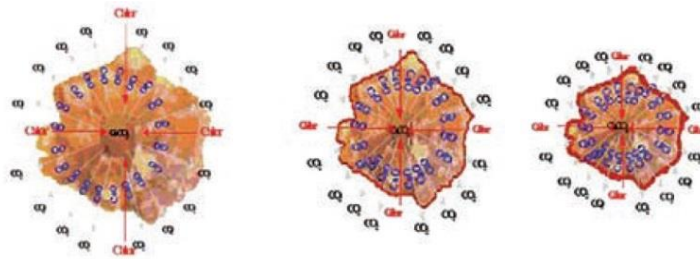
El óxido de calcio obtenido a través de la calcinación a una temperatura superior a la apropiada y necesaria, se enlaza con impurezas presentes en las calizas para formar las denominadas escorias. A este tipo de cal suele denominarse cal requemada, y su tendencia a la hidratación cuando se le añade agua es parecida al óxido de calcio útil, obteniéndose valores de pH de 12.5 a 12.8. Por otro lado, el CaO útil aporta basicidad por encima de 12.5 de pH, y puede hidratarse fácilmente cuando se hace reaccionar con agua. El CaO útil puede hidratarse al estar en contacto con humedad relativa del ambiente (Coloma, 2008:65). Por último, la cal cruda no posee reactividad en presencia de agua por lo que se hidroliza muy poco. Sin embargo, en un medio ácido posee una alta capacidad neutralizadora (Coloma, 2008:68).

c. **Factores que afectan la calidad de la cal industrial.** Los factores que se mencionan a continuación son los de mayor importancia en cuanto a la calidad de la cal producida (Coloma, 2008:69).

1) Control de la composición química de la piedra caliza y el tamaño de piedra a utilizar. La composición química que posea la caliza no puede controlarse sin tener un elevado impacto en los costos de fabricación de cal viva. Por ello, se trabaja y aceptan las diferentes variaciones en composición. Para obtener una cal de calidad es necesario, calentar de manera uniforme la caliza dentro del horno controlando la temperatura de calcinación constantemente, el tamaño de la partícula debe ser lo más uniforme posible y debe evitarse los tiempos largos de estadía de la cal dentro del horno. En cuanto al tamaño de la partícula de caliza, éste debe ser pequeño alrededor de 1.5". Sin embargo, generalmente se trabaja con tamaños desde 1.5" a 2", dependiendo de la molienda (Coloma, 2008:69).

A pesar de que el tiempo de estadía y la temperatura que posea el horno son constantes, la penetración de calor al interior de las partículas de piedra caliza es distinta debido a la variación en el tamaño de éstas. Como se observa en la Figura 25, el calor no penetra de manera total al centro de partículas grandes por lo que se obtiene CaO crudo (CaCO_3); mientras que la parte superficial se convierte en CaO quemado. Para las partículas de un tamaño medio, el calor penetra con mayor totalidad convirtiéndose gran parte de éste en CaO quemado y útil. Por último, para las partículas pequeñas el calor penetra velozmente al centro y existe una mayor sobrecalcinación en el exterior (Coloma, 2008:69, 70).

Figura 26. Piedras calizas con distintos tamaños y geometría, siendo sometidas a temperatura y tiempos de estadía constantes en un horno cuando se están calcinando.



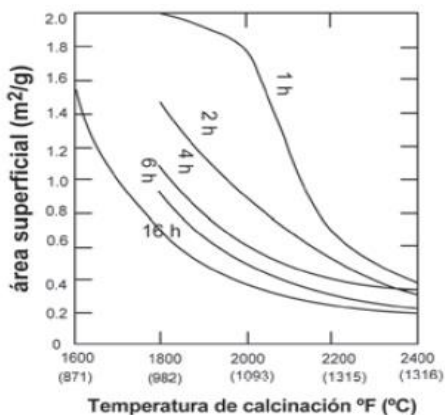
(Coloma, 2008:69, 70).

Según la Figura 26, los productos que se obtiene con partículas grandes y medianas son muy reactivos, pues es una cal viva quemada suave, en tanto que para partículas con menor tamaño se obtiene cal viva quemada dura que posee una reactividad media y a veces baja si se calcinan a muerte. La reactividad, es a grandes rasgos, el tiempo que se tarda una disolución al 25% en peso de cal en llegar a una diferencia en la temperatura de 40°C (Coloma, 2008: 70).

2) Temperatura dentro del horno durante la calcinación. Este es un factor importante que tiene efectos en la calidad del óxido obtenido, y por lo tanto en la calidad del hidróxido resultante del apagado de la cal viva. El producto deseable para el óxido de calcio y el óxido de magnesio consiste en tamaños de partículas bastante pequeñas con una superficie específica

grande. En la Figura 27 se puede observar la influencia que posee la temperatura del horno en el tamaño de la partícula, la cual se expresa en área superficial de partículas, como polvo seco y fino (Coloma, 2008: 71).

Figura 27. Relación entre área superficial y temperatura del horno en el proceso de calcinación.



(Coloma, 2008:69, 71).

3) Tiempo de estadía de la cal dentro del horno. Durante la calcinación, el tiempo de estadía dentro del horno de la piedra caliza con impurezas es bastante crítico. Es de vital importancia que el tiempo de estadía sea el menor posible. Pero debe ser el suficiente para que el calor logre penetrar a las partículas de caliza para que se libere el dióxido de carbono, CO_2 (Coloma, 2008: 72).

4) Concentración del dióxido de carbono en la atmósfera del horno, CO_2 residual. La atmósfera en el interior del horno es un factor que influye en la calidad de la cal producida. Cuando se aumenta la temperatura en la piedra caliza o dolomita, el gas de dióxido de carbono liberado debe tener un escape hacia afuera del horno. Esto influye pues el óxido de calcio y el óxido de magnesio tienen afinidad por el dióxido de carbono y la humedad, obteniéndose nuevamente el carbonato correspondiente. Esta conversión se observa más en partículas pequeñas del CaO y MgO ya que poseen más superficie específica (Coloma, 2008: 72).

2. Cal apagada o hidratada. Este tipo de cal se obtiene al mezclar la cal viva con agua suficiente con el fin de obtener la hidratación necesaria. Con esto se obtiene un polvo fino y seco. Existen tres tipos de cal apagada (Coloma, 2008: 72).

a. Cal apagada de elevado calcio. Es un tipo de cal apagada con una solubilidad de 1.85g/L a 0°C y 0.71g/L a 100°C . En la Figura 28, se muestra la reacción química de la

hidratación la cual produce 15,300 calorías/mol con una cinética incrementada hasta alrededor de 100°C. De los 100°C hasta aproximadamente 540°C la velocidad de la reacción se reduce y por encima de los 549°C se observa la inversión de la reacción (Coloma, 2008: 72, 73).

Figura 28. Reacción química del óxido de calcio para obtener cal apagada.



(Coloma, 2008:69, 72).

b. Cal apagada dolomítica normal. Se produce mediante hidratación en condiciones ambientales normales. Con esto se forma el hidróxido del óxido de calcio y el óxido de magnesio queda inalterable, como se observa en la Figura 29 (Coloma, 2008: 73).

Figura 29. Reacción química del apagado de cal dolomítica normal.



(Coloma, 2008:69, 73).

c. Cal apagada dolomítica especial. Se produce al hidratar los óxidos presentes en la cal viva dolomítica, en condiciones especiales y controladas de temperatura y presión. Con esto se obtiene la hidratación del óxido del calcio pero también del óxido de magnesio, como puede observarse en la reacción química de la Figura 30 (Coloma, 2008: 73).

Figura 30. Reacción química de la hidratación de cal viva dolomítica.



(Coloma, 2008:69, 73).

3. Cal apagada hidráulica. Este tipo de cal es una mezcla de la cal apagada con elevado calcio y ceniza volante, puzolana, arcilla o cualquier compuesto que posea alúmina y sílice activa libre. Esto permite que durante la hidratación se formen de manera natural aluminatos y silicatos cálcicos. Estos nuevos compuestos otorgan características de conglomerante hidráulico, es decir que endurece en aire y bajo agua. Este comportamiento es debido a que en la combinación la cal funciona como catalizador, pues el abatimiento de alúmina produce desplazamiento de iones Na^+ , K^+ y H^+ de los materiales arcillosos, lo que acelera la reacción que se da entre el calcio y el óxido de silicio libre. Esto permite un enlace químico dando lugar a los silicatos y aluminatos cálcicos. Con este proceso se observa un crecimiento cristalino de partículas coloidales y finas, con lo que se cubre a las partículas gruesas, agrupándolas entre sí, funcionando como ligante (Coloma, 2008: 73).

4. **Cal área.** Es cuando se hidrata la cal viva a la intemperie, obteniéndose una mezcla de cal apagada, cal viva y cal recarbonatada (Coloma, 2008: 74). Este tipo de cal es más fina y fácil para trabajar, pero posee menor resistencia. Por ello, en lugares húmedos permanece blanda y en agua se disuelve. Este tipo de cal puede ser la cal cálcica y dolomítica (Cañón, 2012: 9).

5. **Cal refractaria.** Comúnmente es cal viva dolomítica, pero que ha sido altamente calcinada y tiene una pequeña o ninguna probabilidad de convertirse en hidróxido (Coloma, 2008: 74).

I. Estabilidad de la cal en el tiempo.

La cal viva es un compuesto deseoso de agua con una alta afinidad por la misma. Es por ello que puede absorberla a una velocidad muy alta, con lo que expande su tamaño 2.5 veces lo que produce la rotura de la partícula en diversas partículas con menor tamaño en un tiempo según el nivel de reactividad de la cal. Por esto es que se debe proteger de la humedad presente en el ambiente, de lo contrario ocurrirá la reacción química mostrada en la Figura 31. La hidratación es más rápida y completa, mientras la partícula tenga menor tamaño (Coloma, 2008: 81).

Figura 31. Reacción química de la cal viva con la humedad del ambiente.



(Coloma, 2008:69, 81).

La existencia de vapor o agua beneficia la reacción, pues se forma el hidrato que puede transformarse fácilmente en el carbonato. Esto último se debe a que la presión del dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera es mayor que la presión de disociación del carbonato, dando lugar a la reacción de la Figura 32 (Coloma, 2008: 81).

Figura 32. Reacción química de la formación del carbonato.



(Coloma, 2008:69, 81).

De manera general, la reactividad de la cal se ve afectada por la densidad aparente de la misma y por las impurezas presentes en el agua utilizada. Además, si la cal viva ya absorbió humedad o dióxido de carbono del ambiente su reactividad disminuye. Las cales vivas con cantidades pequeñas de apagado aéreo disminuyen la reactividad significativamente. Si hay inexistencia de cal hidratada o apagada, la cal viva

únicamente reacciona con dióxido de carbono a temperaturas por encima de 300°C y por debajo de 800°C (Coloma, 2008: 82, 83).

J. Aplicaciones de la cal en distintos procesos.

La cal viva puede utilizarse en diferentes procesos químicos, metalúrgicos, industriales y mineros en sus diferentes formas, como cal viva molida, granulada, apagada, lechada y otras formas (Coloma, 2008: 88).

1. **Cal viva.** La cal viva granulada puede ser aplicada en faenas o industrias en las cuales se establece un tiempo de residencia, más allá de los 12 minutos para lograr que la cal tenga una hidratación apropiada. Esto con el fin para que después pueda liberar todos los grupos hidroxilo e iones calcio, entregando el calor de hidratación o modificando la reología de la pulpa. Por otro lado, la cal viva molida se puede aplicar en las faenas o industrias en las cuales el tiempo de estadía durante el proceso es inferior a 12 minutos (Coloma, 2008: 88).

2. **Cal apagada o hidratada.** Debido a que este tipo de cal ya se encuentra hidratada solo resta la liberación y mezcla de cationes calcio y grupos hidroxilo. Esto indica que el tiempo de estadía es mucho menor que el tiempo para los casos mencionados para la cal viva. Se agrega aproximadamente 32% más del material, ya que el valor alcalinizante se degrada en una proporción igual que la cantidad de agua añadida (Coloma, 2008: 88).

3. **Lechada de cal.** Las formas más comunes de añadir la cal en los distintos procesos en los cuales se utiliza, es agregarla en suspensión, disolución o pulpa, en la cual es combinada con agua. Su uso se debe a que su sedimentación es más lenta, comparada con la cal que se agrega directamente, además la velocidad de reacción es casi dos veces mayor. La lechada se prepara disolviendo cal viva o apagada con 10 o más partes de agua (que la cantidad teórica). Esto se realiza para obtener un elevado contenido de sólidos en la suspensión, pues esto previene los diversos problemas de incrustación originados por mala preparación o por mal manejo de la lechada (Coloma, 2008: 88, 89).

K. Clasificación y designación de la cal utilizada para la construcción.

1. **Clasificación.** La cal principalmente utilizada en los procesos de construcción es la cal hidratada. La cal hidratada se clasifica entonces en cuatro diferentes tipos (COGUANOR, 1982: 2).

- a. Tipo normal (Tipo N). Cal hidratada normal para propósitos de acabado (COGUANOR, 1982: 2)
- b. Tipo especial (Tipo S). Cal hidratada especial para propósitos de acabado (COGUANOR, 1982: 2)
- c. Tipo normal con incorporador de aire (Tipo NA) (COGUANOR, 1982: 2)
- d. Tipo especial con incorporador de aire (Tipo SA) (COGUANOR, 1982: 2)

Los tipos de cal hidratada especial se diferencian de los tipos normales por su alta retención de agua desde el inicio, por su capacidad de desarrollar una elevada plasticidad y su límite en el contenido de óxido no hidratado (COGUANOR, 1982: 2)

2. Requisitos químicos de la cal en la construcción. La cal hidratada que se utiliza para la construcción debe cumplir determinados requisitos químicos mostrados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Requisitos químicos de los tipos de cal utilizados en la construcción.

Requisitos	Tipos			
	Normal (%)	Normal con inc. Aire (%)	Especial (%)	Especial con inc. Aire. (%)
Óxido de calcio y magnesio (en base no volátil) en porcentaje mínimo.	90	90	90	90
Dióxido de carbono (en base tal como se recibe), en porcentaje máximo.				
a) Muestra tomada en el lugar de fabricación	5	5	5	5
b) Muestra tomada en otro lugar	7	7	7	7
Óxidos no hidratados (como se reciben) en porcentaje máximo	Sin límite	Sin límite	8	8

(COGUANOR, 1982: 2)

3. Requisitos físicos de la cal en la construcción. La cal que se utilice para la construcción tendrá que cumplir con los requisitos físicos mostrados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Requisitos físicos de los tipos de cal utilizados en la construcción.

Requisitos	Tipos			
	Normal	Normal con inc. Aire	Especial	Especial con inc. Aire.
Residuo retenido en tamiz No. 200 (75 μ m) en porcentaje máximo	15	15	15	15
Residuo retenido en tamiz No. 30 (600 μ m), en porcentaje máximo.	0.5	0.5	0.5	0.5
Ampolladuras y picaduras, si el residuo en tamiz No. 30 (600 μ m) es mayor que 0.5%	0	0	0	0
Retención de agua del mortero, después de succión por 60s, en porcentaje mínimo.	75	75	85	85
Plasticidad:				
a) Dentro de 30min después de mezclar la pasta con agua, mínimo	-	-	200	200
b) Dentro de un período no menor a 16h ni mayor de 24h de mezclar la pasta con agua, mínimo.	200	-	-	-

(COGUANOR, 1982: 2)

L. Usos de la cal en la construcción.

La cal puede utilizarse en diversos procesos. Entre los cuales se encuentran los usos industriales, en la construcción, agricultura, en minería metálica y en otras diferentes aplicaciones. En cuanto a la

construcción existen diversas aplicaciones, a grandes rasgos mostradas a continuación (Coloma, 2008: 142).

1. Ladrillos silíceos. Se utiliza la cal como un agente enlazante (Coloma, 2008: 160).
2. Ladrillos ligeros. Al igual que con los ladrillos silíceos funciona como agente enlazante (Coloma, 2008: 160).
3. Hormigón liviano. Se usa como un agente reaccionante (Coloma, 2008: 160).
4. Pavimentos asfálticos. Se utiliza ampliamente como agente impermeabilizante, estabilizante y antidisgregante (Coloma, 2008: 160).
5. Estabilización de suelo. La cal es utilizada como un aglomerante y desplazante (Coloma, 2008: 160).
6. Revestimientos protectores. Puede utilizarse como pintura (Coloma, 2008: 160).
7. Morteros. La cal actúa como un plastificante, desplazante y recubrimientos (Coloma, 2008: 160).

a. Generalidades del mortero. Es una mezcla constituida de uno o diversos conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y en algunas ocasiones, de aditivos. La mezcla a utilizarse debe ser homogénea por lo que sus componentes deberán ser añadidos en proporciones determinadas, según el uso del mortero (AFAM, 2009: 8). Los morteros pueden utilizarse para enlazar materiales de construcción como ladrillos, tabicones, bloques, tejas, losetas, entre otros. Además, pueden ser utilizados como recubrimientos interiores y exteriores de techos y muros, acabados o revoques (Grupo Calidra, 2012: 1, Sabá, 2006: 1). El mortero adquiere diferentes propiedades físicas, químicas y mecánicas al endurecerse, las cuales son parecidas a las que posee el concreto (Sabá, 2006: 1).

b. Tipos de mortero. Los diferentes morteros van a recibir su nombre dependiendo del aglomerante por el que estén compuestos (Cañón, 2012: 5).

- 1) Morteros de cemento (Grupo Calidra, 2012: 1).

- 2) Morteros de cemento-cal (Grupo Calidra, 2012: 1).
- 3) Morteros de cemento de albañilería (Grupo Calidra, 2012: 1).
- 4) Morteros de yeso (Cañón, 2012: 5).
- 5) Morteros de cal. Este tipo de mortero ha sido ampliamente utilizado desde las civilizaciones antiguas, como los romanos, hasta nuestros días. Gran parte del patrimonio arquitectónico de la humanidad fue construido utilizando morteros de cal. Es por ello que se ha logrado observar que con el paso del tiempo este tipo de mortero es de alta calidad y durabilidad (Cañón, 2012: 4).

Existen dos tipos, los morteros de juntas y los de recubrimiento. Los primeros se usan con el fin de enlazar materiales de construcción. En tanto, que los de recubrimiento se utilizan para enjarres, repellos de muros y techos; y aplanados. (Grupo Calidra, 2012: 1).

a) Propiedades físicas de la cal hidratada en morteros. Las propiedades que posee la cal en el mortero son diferentes dependiendo de la fase en la que se encuentre el mortero. Dichas fases pueden ser plástica o estado fresco y seca o estado endurecido, siendo ambas fases muy importantes para el desempeño del mortero. Por un lado, el mortero en estado fresco debe poseer una adecuada consistencia para su colocación, en tanto que en el estado endurecido debe tener características que permitan mantener unidos a las piezas como ladrillos, además deben soportar agua, temperaturas extremas y cargas. Por ello se definen diferentes propiedades físicas a continuación. (Sabá, 2006: 7).

i. Finura. Ya que posee una finura elevada permite alcanzar resistencias mecánicas de 3MPa cuando existe un secamiento simple. La fineza que posea la cal influye en la cohesión, retención de agua y fluidez del mortero. Por ello, se recomienda un tamaño de 0.05 a 5.00mm (Sabá, 2006:8)

ii. Estabilidad. Cuando se ha llevado a cabo un mal apagado de la cal viva, puede observarse presencia de partículas de óxido de calcio (CaO), tomadas como impurezas. Los morteros preparados a partir de este material suelen sufrir problemas cuando se encuentran en presencia de humedad, pues el óxido de calcio se transforma en el hidróxido de calcio incrementando significativamente su volumen. Este problema puede provocar protuberancias, ampolladuras

(popping), picaduras (pitting) o cavidades. Esto también puede deberse a la presencia de óxido de magnesio en el caso de las cales dolomíticas o magnésicas (Sabá, 2006: 8).

iii. Plasticidad. Esta propiedad influye en la cohesión, retención de agua y la fluidez que posea el mortero. Por ello debe evaluarse cuidadosamente, pues de estas tres características depende en gran parte la calidad del mortero (Sabá, 2006: 8).

iv. Retención de agua. Esta propiedad de la cal posibilita que el mortero conserve su consistencia desde que se prepara hasta su aplicación. Esto quiere decir que el mortero se mantendrá húmedo y con poca retracción debido al secado hasta que alcanza la resistencia adecuada (Sabá, 2006: 8).

v. Capacidad de incorporar arena. La cantidad elevada y el pequeño tamaño de partícula que posee la cal permiten que cada partícula de arena sea cubierta. Esto otorga mayor fluidez en los morteros frescos, pues podrá agregarse mayor cantidad de arena (Sabá, 2006: 9).

c. Propiedades de los morteros.

1) En estado fresco. Cuando el mortero se encuentra en estado fresco posee diversas propiedades, que no solo regulan su comportamiento sino que influyen en las características cuando pasa a su estado endurecido (Sabá, 2006: 29).

a) Trabajabilidad. Es una de las propiedades más importantes de un mortero fresco, pues posee influencia sobre otras propiedades. La trabajabilidad está definida como el grado de fluidez que posee un mortero fresco, la cual depende principalmente de la fase líquida, características y contenido de los compuestos sólidos. Entre las propiedades que se ven influenciadas por la trabajabilidad está la fluidez, tiempo de fraguado, consistencia y capacidad de retener agua (Sabá, 2006: 29).

Se dice que un mortero es trabajable cuando se extiende fácilmente sobre los elementos de mampostería, se adhiere a superficies verticales, puede introducirse con facilidad en las juntas, soporta la presión suministrada por el trabajador para lograr el alineamiento de los elementos y si permite colocar los elementos sin que se produzcan cambios posteriores debido a su propio peso (Sabá, 2006: 29).

Los principales factores que afectan la trabajabilidad de un mortero pueden ser las características que posea la arena (tamaño y forma de partícula), contenido del cemento usado, contenido de la cal utilizada,

cantidad de aire, cantidad de agua que se adiciona, utilización de aditivos, tiempo de mezclado e intensidad (Sabá, 2006: 30).

b) **Retención de agua.** Esta propiedad se define como la capacidad que posee el mortero para retener agua de amasado ante las sollicitaciones externas de succión o absorción producidas por los elementos de la construcción. Esta propiedad posibilita que el mortero conserve su plasticidad para que los elementos pueden alinearse y nivelarse adecuadamente sin romper el enlace. La retención mínima de agua definida bajo la norma ASTM C-1506 es de 72-88% (Sabá, 2006: 30).

c) **Contenido de aire.** El aire que posee un mortero puede ser producido por efectos mecánicos o a través de la aplicación de aditivos que incorporan aire. Mientras mayor contenido de aire posea el mortero, mejor será la trabajabilidad y resistencia en los ciclos hielo-deshielo, pero disminuye la adherencia, resistencia mecánica e impermeabilidad (Sabá, 2006: 31).

d) **Masa unitaria.** También denominada densidad del material. Esta propiedad es utilizada como indicador de la resistencia que posee el material. Si el mortero es muy denso existe probabilidad que la resistencia sea elevada. Además, se utiliza como parámetro para determinar el contenido de aire atrapado dentro del mortero (Sabá, 2006: 31).

2) En estado endurecido.

a) **Resistencia a la compresión.** Esta propiedad es utilizada como uno de los criterios principales para elegir el tipo de mortero que se utilizará en el trabajo de mampostería, pues es fácilmente medible y puede ser relacionada con propiedades como la durabilidad y adherencia (Sabá, 2006: 33).

b) **Adherencia.** Esta propiedad es la más importante en los morteros en estado endurecido, pero también es la más impredecible e inconstante. El mortero debe ser capaz de desarrollar adherencia suficiente con los elementos de mampostería para ser resistente a esfuerzos de tracción provocados por cargas de estructura, terreno, viento y sísmicas, además de los cambios en el volumen de los elementos y cambios en la temperatura (Sabá, 2006: 33).

La adherencia depende fundamentalmente de factores como la interacción hídrica entre el elemento y el mortero, la trabajabilidad del mortero, la retención de agua, componentes que posea el mortero, características de los elementos de construcción, calidad del proceso constructivo, condiciones de curado y durabilidad (Sabá, 2006: 33, 34).

c) **Variaciones de volumen.** El mortero generalmente experimenta dilataciones o contracciones a lo largo de su vida útil debido a orígenes físico-químicos. La magnitud y tipo de las variaciones depende de las condiciones ambientales. Pueden distinguirse tres tipos de variaciones en el volumen del mortero. Por un lado, está la retracción hidráulica derivada de las condiciones de humedad. Por otro lado, se encuentra la retracción térmica, que como su nombre indica se debe a los cambios en la temperatura. Por último, la retracción que es ocasionada por los componentes de la atmósfera, principalmente por el dióxido de carbono. Esta última se observa debido a reacciones químicas de hidratación de la mezcla (Sabá, 2006: 34).

d) **Resistencia a la tensión.** Los morteros comúnmente poseen baja resistencia a la tensión, sin embargo, es útil conocerla ya que en diversas situaciones la mampostería es sometida a tensiones diagonales y a diferentes combinaciones de esfuerzos. Situaciones como estas pueden ser provocadas por hundimientos diferenciales, efectos sísmicos o bajo la acción de cargas gravitacionales (Sabá, 2006: 35).

e) **Permeabilidad.** Es una propiedad que otorga el paso del agua u otro fluido, entre la estructura interna del mortero. Sin embargo, en gran parte de los casos el mortero es impermeable. Esto si se compara con la permeabilidad producida en algunos elementos de construcción y en la interfase mortero-elemento. Por ello esta propiedad se estudia para el conjunto mortero-elemento (Sabá, 2006: 36).

f) **Durabilidad.** Propiedad que se refiere a la capacidad del mortero en mantener las características originales que posibilitan su uso. Características como resistencia, solidez, y apariencia inicial. Los factores principales que afectan la durabilidad son las eflorescencias, permeabilidad y el efecto de congelación (Sabá, 2006: 37).

M. Normas utilizadas para el uso de cal en la construcción.

1. ASTM C206-03 (Reapproved 2009). Standard specification for finishing hydrated lime.
2. ASTM C207-06 (Reapproved 2011). Standard specification for hydrated lime for masonry purposes.
3. COGUANOR NGO 41 018. Cal hidratada, especificaciones.

N. Ampolladuras y picaduras (pitting y popping) en elementos de construcción a base de cal.

Las ampolladuras y picaduras (pops y pits) se cree que se producen debido a la expansión de partículas gruesas de cal no hidratada provocado por la hidratación de las mismas, o bien a causa de los productos de reacción de las impurezas en cales hidratadas. El nivel de aparición de las ampolladuras y picaduras en la muestra es un indicativo del potencial de aparición de los defectos en la superficie en las aplicaciones de recubrimiento (ASTM International, 2011: 9).

1. Norma utilizada para analizar la presencia de ampolladuras y picaduras.
 - a. ASTM C110-11. Standard methods for physical testing of quicklime, hydrated lime and limestone.
 - b. COGUANOR NGO 41 020 h1. Cal hidratada, determinación de ampolladuras y picaduras.

O. Difractómetro de rayos X (XRD).

1. Historia de la difracción de rayos X. Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por el científico alemán Wilhelm Conrad Röntgen. Utilizando un tubo de rayos catódicos (CRT, por sus siglas en inglés) en un cuarto oscuro, él descubrió una mancha blanca en un film fotográfico después de revelarlo. Como Wilhelm no sabía qué clase de rayos eran emitidos por el tubo de rayos catódicos, los denominó rayos X. Debido a este importante descubrimiento fue premiado con el primer premio Nobel de física (Philips Analytical: 1-4).

La investigación de los rayos X siguió su curso y para 1912 los principios físicos de la difracción y del espacio recíproco fueron desarrollados por Röntgen, von Laue, Ewald, Sommerfeld y Brentano en Múnich, Alemania. Para el año 1914 los ingleses Bragg, padre e hijo, introdujeron la cristalografía. Fue entonces, que en el año 1916 los principios de la difracción en polvo fueron descritos por Debye y Sherrer. Desde 1917 hasta 1919 Brantó desarrolló en Zúrich, Suiza las ideas del monocromador curvado y de la óptica de enfoque, pero solo en 1947 el primer equipo de difracción fue introducido por Philips en USA, después de desarrollos por parte de Le Galley, Friedman y Parrish y Gordon (Philips Analytical: 1-4).

Posteriormente, el desarrollo de máquinas de cálculo y computadoras en los años 1950 y 1960 llevó a explotar todo el potencial de la aplicación de la difracción en polvo y cristalografía. Además, en los años 1980 y 1990 fueron desarrolladas nuevas ópticas de rayos X como colimadores de rayos paralelos,

monocromadores multi-cristal, espejos graduados y lentes capilares, permitiendo un rango más amplio de aplicaciones (Philips Analytical: 1-4).

2. **Áreas de aplicación de los rayos X.** Los rayos x son actualmente utilizados en un rango amplio de áreas como la medicina, economía y científica, como se muestra en el Cuadro 7 (Philips Analytical: 1-5).

Cuadro 7. Técnicas de análisis y áreas de aplicación de los rayos X.

Técnica de análisis	Áreas de aplicación		
	Medicina	Economía	Científica
Radiología	Radiografías, scans CAT o CT, Radioterapia	Radiografías, escaneo	Radiografías
Difracción de rayos X	Articulaciones artificiales, cálculos renales	Propiedades estructurales de los materiales	Propiedades estructurales de los materiales.
Fluorescencia de rayos X	Composición elemental	Composición elemental	Composición elemental

(Philips Analytical: 1-5).

a. Radiología.

- 1) Radiografía. Comúnmente denominada fotografía de rayos X muestra las diferencias en la absorción que posee la materia, dependiendo de la composición elemental y la densidad. De esta manera, un hueso quebrado puede observarse, pues el hueso posee una mayor absorción que los tejidos blandos del cuerpo (Philips Analytical: 1-5).

- 2) Escaneado. En la actualidad los diagnósticos médicos se realizan por computadora utilizando el escaneado de tomografía (CAT o CT) para obtener imágenes en tercera dimensión. Por ejemplo, se utiliza para la seguridad en aeropuertos pues se escanea el equipaje y puede detectarse el producto de contrabando. Incluso se puede detectar si las joyas son auténticas o no (Philips Analytical: 1-5).

- 3) Radioterapia. Los rayos X se utilizan para tratar cáncer exponiendo los tumores a estos de manera que mata selectivamente a las células cancerosas (Philips Analytical: 1-5).

b. Difracción de rayos X (XRD). Debido a que un material cristalino exhibe arreglos de átomos regulares, los rayos X van a reflejar bajo circunstancias específicas. Esto permite

el análisis de casi cualquier propiedad del material que dependa de la estructura cristalina del mismo. Incluso materiales sin una estructura cristalina estricta pueden ser investigados mientras una pequeña o larga gama de orden exista. Las técnicas de aplicación pueden observarse en el Cuadro 8 (Philips Analytical: 1-5).

Cuadro 8. Técnicas de aplicación y ejemplos de la difracción de rayos X.

Técnicas de aplicación	Ejemplos
Identificación de fases	Identificación de minerales en muestras geológicas de estudios geológicos y minería. Identificación de fases en cálculos renales para determinar las prescripciones dietéticas para pacientes.
Análisis cuantitativo	Determinación de Austenita en acero para control de calidad. Determinación de Rutila y Anatasa en pigmentos y porcelana para control de calidad.

(Philips Analytical: 1-5).

La difracción de rayos X es actualmente utilizada en muchas áreas de búsqueda de materiales, desarrollo y producción como geología, minería, farmacéutica, polímeros, metales, pigmentos, catalizadores, químicos, materiales cerámicos semiconductores, vidrio, cemento, fundiciones de aluminio, fibras, análisis ambiental, análisis forense, diagnósticos médicos, etc. (Philips Analytical: 1-6).

d. Fluorescencia de rayos X (XRF). Si un material se excita con un haz de rayos X de menor longitud de onda que la longitud de onda de la radiación característica de los elementos de los que está conformado el material, entonces estos elementos emitirán rayos X con esa longitud de onda característica. Por ello, la composición elemental (no H ni He) (cualitativa y cuantitativamente) de materiales (líquidos y/o sólidos) puede determinarse y en algunas ocasiones incluso diferentes iones, del mismo elemento, pueden distinguirse (Philips Analytical: 1-6).

3. Métodos para análisis cuantitativo en XRD. Para el análisis cuantitativo en el XRD, la preparación de la muestra debe ser reproducible. Si se lleva a cabo este análisis se debe tomar en cuenta que las intensidades difractadas son dependientes en el porcentaje en peso de las fases (Philips Analytical: 8-9).

a. Análisis de Rietveld. Es una técnica de análisis con el fin de refinar las estructuras cristalinas. Fue diseñado inicialmente con el fin de analizar patrones de difracción de

neutrones, sin embargo, con el paso del tiempo se ha usado en los patrones de difracción de rayos X con excelentes resultados (Ramón, 2007:1).

El método se basa en ajustar el modelo teórico a un patrón obtenido experimentalmente de difracción de rayos X. Para este fin se utiliza el método de mínimos cuadrados, hasta que se obtiene el mejor ajuste entre el patrón y el modelo teórico. El patrón obtenido de la difracción de rayos X calculado está basado en un modelo que abarca aspectos estructurales (átomos en la unidad asimétrica, factores térmicos, grupo espacial, etc.), microestructurales (tamaño de cristal, microdeformaciones, concentración), e instrumentales. La función que debe minimizarse utilizando el método de mínimos cuadrados es denominada residuo y puede calcularse como se muestra a continuación (Ramón, 2007: 6).

$$S_y = \sum_i W_i (y_{i(obs)} - y_{i(calc)})^2$$

(Ramón, 2007: 6)

En la función, S_y define la función minimizada por mínimos cuadrados, $y_{i(obs)}$ y $y_{i(calc)}$ son la intensidades experimentales y calculadas en un punto i del patrón de difracción; respectivamente. W_i es el peso dado a dichas intensidades, y la sumatoria indica que existe una suma en todos los puntos del patrón de difracción (Ramón, 2007: 6).

El valor que se obtiene de S_y corresponde a una función compleja pues engloba a todos los parámetros que otorgan el patrón de difracción. La utilización de este método consiste en encontrar valores óptimos de los parámetros en los que S_y tenga un valor mínimo posible (Ramón, 2007: 6).

El método de Rietveld se encuentra basado en la idea que la escala global de una fase es proporcional a su abundancia en una mezcla de fases. La relación entre las intensidades de picos en un patrón de difracción está gobernada por la estructura cristalina de cada fase presente en la mezcla. Por ello, como se mencionó anteriormente es recomendable utilizar el método de mínimos cuadrados, pues toma en cuenta a todo el patrón de difracción. Este método es el único para el análisis de mezclas complejas de varias fases cristalinas pues muestra los traslapes de picos. Además, alcanza resultados relativamente precisos, suficientes para verificar algún cambio o mantener un status quo (Meier, *et al.*, 2012: 150, 151).

P. Analizador de tamaño y forma de partícula (PSD).

Por muchos años, los analizadores del tamaño de partícula han otorgado resultados con la suposición que todas las partículas medidas son esféricas. Sin embargo, en muchas aplicaciones, la forma de las partículas puede afectar tanto el rendimiento como la fluidez en la fabricación. Por ello, es necesario

utilizar un equipo que permita observar la forma de la partícula pues otorga mayor sensibilidad. El equipo a utilizar, Partible Insight, emplea dos formas importantes para determinar el tamaño de partícula, la orientación aleatoria y una recirculación de la muestra. Estas dos formas ayudan a asegurar una representación real de la muestra, así como resultados precisos (Micromeritics, 2010: 1).

IV. METODOLOGÍA

A. Enfoque de la investigación.

Esta investigación es cuantitativa

B. Tipo de investigación.

La investigación realizada es de tipo exploratorio y correlacional.

C. Diseño de investigación.

El diseño de la investigación es experimental, específicamente cuasi experimental, no posee grupo control, existe manipulación de variables y reducción de muestra con base en la norma ASTM C702M-11. Se asumió variabilidad en los grupos pues la piedra se obtiene destrozada y mezclada.

D. Contexto de la investigación, tiempo y lugar.

La presente investigación se enfocó en la industria de la construcción, específicamente en el área de cal y su aplicación como morteros de recubrimiento. Esta investigación se llevó a cabo en la empresa *Cementos Progreso, S. A.*, en la planta La Pedrera ubicada en la zona 6 de la ciudad de Guatemala. Se inició en el año 2015 y su duración fue de 7 meses.

E. Tipo de muestreo, muestra y población.

Debido a que la investigación se realizará en *Cementos Progreso, S. A.*, el muestreo inicial se llevó a cabo por parte de los analistas en planta San Miguel, para posteriormente reducir la muestra utilizando la norma ASTM C702 M-11. Por último, el tamaño de muestra fue el otorgado por los analistas de la planta San Miguel. De los análisis elaborados a las muestras se realizó réplicas para mayor reproducibilidad.

F. Criterios de inclusión y exclusión de sujetos al estudio.

El sujeto de estudio fueron piedras calizas y dolomitas otorgadas por planta San Miguel de *Cementos Progreso, S. A.* y cantera *El Rodeo*, pues fueron analizadas y eran especiales para fabricar cal. Por ello los criterios de inclusión y exclusión no aplican al estudio.

G. Variables.

Cuadro 9. Clasificación de las variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Naturaleza	Relación	Indicador	Nivel de medición	Escala	
Tipo de material	Tipo de material calizo utilizado para la producción de cal	Piedra cálcica con presencia de CaO y piedra dolomítica con presencia de CaO y MgO.	Cualitativa	Independiente	CaCO ₃ , CaO, MgCO ₃ , MgO, Mg(OH) ₂ , Ca(OH) ₂ .	Nominal	Presencia o ausencia	
Temperatura de calcinación	Temperatura a la cual se calcina la piedra caliza y dolomita.	Análisis termogravimétrico (TGA). Temperatura de la mufla utilizada, termómetro interno.	Cualitativa	Independiente	Temperatura de descomposición de la piedra mediante TGA.	Ordinal	Cálcica 850°C 900°C 1100°C	Dolomita 837°C 887°C 1087°C
Fineza del material	Tamaño promedio de la partícula en la cal producida. Porcentaje de material que pasa tamiz 200.	Análisis del tamaño de partícula en el equipo PSD y mediante el porcentaje que pasa tamiz 200.	Cuantitativa	Independiente	Porcentaje que pasa tamiz 200. Análisis en analizador de partículas (PSD).	De razón De intervalo	<ul style="list-style-type: none"> • 94% pasa tamiz 200. • 85% pasa tamiz 200. • 75% pasa tamiz 200. 	
Ampolladuras y picaduras	Observación del número de ampolladuras y picaduras presentes en el mortero de recubrimiento.	Cuantificación del número de ampolladuras y picaduras en una placa de vidrio de 10cm.	Cuantitativa	Dependiente	Presencia de ampolladuras y picaduras en el mortero de recubrimiento.	De razón De proporción	Ausencia= 0 Presencia > 0 Cuantificación si existe presencia.	

NOTA: Descomposición de caliza cálcica a 900°C y de dolomita a 887°C determinada por TGA, tomada como temperatura óptima.

H. Hipótesis.

1. La composición química de la cal cálcica y dolomítica sobrecalcinada provoca la presencia de ampolladuras y picaduras debido a la poca hidratación de los óxidos de calcio y magnesio en acabados que contienen cal en su formulación.
2. El tamaño que posean las partículas de cal cálcica y dolomítica puede influir en la presencia de ampolladuras y picaduras en acabados que contienen cal en su formulación.

I. Descripción de la presentación de resultados

Cuadro 10. Formato de recolección de los datos obtenidos en el TGA para la temperatura de descomposición óptima de la piedra caliza cálcica y dolomítica.

Tipo de piedra caliza	Mx	Temperatura punto de inflexión (°C)	Temperatura final (°C) (óptima)	Temperatura en el punto medio (°C)
Cálcica	1			
	2			
	3			
Dolomítica	1			
	2			
	3			

En donde Mx= muestra.

Cuadro 11. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo XRF.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)	P.F. (%)	Total (%)
1	94										
	85										
	75										
2	94										
	85										
	75										

En donde Mx= muestra, P. F = pérdida al fuego.

NOTA: Se elabora para cada temperatura trabajada, tanto para cal cálcica y dolomítica viva e hidratada.

Cuadro 12. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo PSD.

Mx	Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
1	94						
	85						
	75						
2	94						
	85						
	75						

En donde Mx= muestra, 50%= indica el 50% de muestra, 90%= indica el 90% de muestra, Min= tamaño mínimo de partícula, Max= tamaño máximo de partícula.

NOTA: Se elabora para cada temperatura trabajada, tanto para cal cálcica y dolomítica viva e hidratada.

Cuadro 13. Formato de recolección de los datos obtenidos a partir del análisis de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo XRD.

Mx	Fineza (%)	Componente 1 (%)	Componente 2 (%)	Componente 3 (%)
1	94			
	85			
	75			
2	94			
	85			
	75			

Cuadro 14. Formato de recolección de los datos obtenidos de las pérdidas al fuego de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)
1	94	
	85	
	75	
2	94	
	85	
	75	

Cuadro 15. Formato de recolección de los datos obtenidos de las finezas de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.

Mx	Fineza (%)	Fineza real (%)
1	94	
	85	
	75	
2	94	
	85	
	75	

NOTA: Las finezas mostradas en los Cuadros, son las finezas teóricas que pasan tamiz 200.

Cuadro 16. Formato de recolección de los datos obtenidos del análisis físico de ampolladuras y picaduras de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.

Finezas	Semicalcinada (γ_1)		Calcinada (γ_2)		Sobrecalcinada (γ_3)	
	Caliza (β_1)	Dolomita(β_2)	Caliza(β_1)	Dolomita(β_2)	Caliza(β_1)	Dolomita(β_2)
75% (τ_1)	$y_{1111} =$	$y_{1211} =$	$y_{1121} =$	$y_{1221} =$	$y_{1131} =$	$y_{1231} =$
	$y_{1112} =$	$y_{1212} =$	$y_{1122} =$	$y_{1222} =$	$y_{1132} =$	$y_{1232} =$
85% (τ_2)	$y_{2111} =$	$y_{2211} =$	$y_{2121} =$	$y_{2221} =$	$y_{2131} =$	$y_{2231} =$
	$y_{2112} =$	$y_{2212} =$	$y_{2122} =$	$y_{2222} =$	$y_{2132} =$	$y_{2232} =$
94% (τ_3)	$y_{3111} =$	$y_{3211} =$	$y_{3121} =$	$y_{3221} =$	$y_{3131} =$	$y_{3231} =$
	$y_{3112} =$	$y_{3212} =$	$y_{3122} =$	$y_{3222} =$	$y_{3132} =$	$y_{3232} =$

J. Procedimiento.

1. Obtención y preparación de la muestra.

- a. Se obtuvo la muestra de carbonato de calcio de la empresa *Cementos Progreso, S. A.*, planta San Miguel ubicada en Sanarate, El Progreso.
- b. Se obtuvo la muestra de carbonato de calcio y magnesio de la empresa “*El Rodeo*” ubicada en San Rafael zona 18 de la ciudad de Guatemala.
- c. Se obtuvo una reducción de la muestra para separarla en los diferentes grupos según la norma ASTM C702 M-11 método A.

2. Trituración de la piedra caliza cálcica y dolomítica.
 - a. Se trituró la piedra caliza (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) en una trituradora de quijada. El tamaño utilizado para las piedras son aquellas retenidas en tamices de $\frac{1}{4}$ ”, $\frac{3}{8}$ ” y $\frac{1}{2}$ ” decidido en base a los crisoles que pueden ser colocados dentro de la mufla para la calcinación y basados en estudios experimentales en Maerz Ofenbau AG (líder mundial para hornos de cal).

3. Tamizaje de la piedra caliza cálcica y dolomítica tras la trituración.
 - a. Se llevó a cabo el tamizado de la roca, tras su trituración, utilizando tamices $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{1}{2}$ ”, $\frac{3}{8}$ ” y $\frac{1}{4}$ ”. Para esto se agregó la piedra ya triturada y se tamizó manualmente. Se recolectó las rocas retenidas en los tamices $\frac{1}{2}$ ”, $\frac{3}{8}$ ” y $\frac{1}{4}$ ”.

4. Determinación de la descomposición en función de la temperatura de la piedra caliza cálcica y dolomítica.
 - a. Se añadió una cantidad pequeña del material ya triturado y molido al crisol del equipo de análisis termogravimétrico marca Mettler Toledo.
 - b. Se analizó la muestra desde una temperatura de 25°C hasta 1000°C .
 - c. Se analizó la curva obtenida para el material utilizando el software del equipo.
 - d. En base al análisis de la curva, se determinó la temperatura óptima de descomposición del material.
 - e. Se trabajó en triplicado y se obtendrá un promedio.

5. Determinación del tiempo de calcinación óptimo a la temperatura de calcinación óptima para los diferentes tipos de piedra.
 - a. Se calcinó aproximadamente 10g de cada tipo de piedra en crisoles de platino a la temperatura óptima de descomposición de cada material.
 - b. Se tomó el peso inicial del crisol y el peso cada 30 minutos, o según se observó la pérdida del material. Se realizó el cálculo de pérdida entre cada peso y el peso inicial. Cuando se observó que la pérdida no varió considerablemente se tomó el tiempo total. Este tiempo será tomado como el tiempo óptimo de calcinación de cada material.
 - c. Se trabajó en duplicado.

6. Determinación del tamaño de piedra utilizada, para ambos tipos de materiales con base en análisis químicos.
 - a. Se elaborará análisis en el equipo de fluorescencia de rayos X (XRF) de las muestras calcinadas para determinar el tiempo óptimo de calcinación, según cada tamaño de

piedra. Se escogió el tamaño que contenía un mayor porcentaje de CaO y MgO indicando una calcinación más completa.

7. Calcinación de la piedra caliza y dolomita a tres diferentes temperaturas.

- a. Se llevó a cabo la calcinación de los dos tipos de piedra tomando en cuenta la temperatura óptima obtenida del análisis termogravimétrico y el tiempo óptimo de calcinación.
- b. Se calcinó a tres diferentes temperaturas, cada tipo de piedra, para obtener productos semicalcinados, calcinados óptimamente y sobrecalcinados.
- c. Se utilizó, para las tres diferentes temperaturas, el tiempo óptimo de calcinación obtenido en 5.
- d. Se trabajó en duplicado para cada temperatura.

8. Molienda del producto obtenido de la calcinación de la piedra caliza y dolomita.

- a. El material ya calcinado se molió en un molino de anillos a tres diferentes tiempos para obtener tres finezas de cada muestra, 75%, 85% y 94% que pasen tamiz 200. El tiempo al que se molió el material dependerá del nivel de calcinación que tenga la piedra. Esto indica que se llevó a cabo pruebas con cada muestra para obtener las finezas antes mencionadas.
- b. Se molió aproximadamente 230g para cada fineza.

9. Análisis de la cal viva cálcica y dolomítica semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo de fluorescencia de rayos X (XRF).

- a. Se elaboró la pérdida al fuego para cada muestra ingresando 1g de la muestra en un crisol de platino a la mufla a 950°C durante 30 minutos.
- b. Se tomó el peso inicial que incluye muestra y crisol y el peso final. Mediante el cálculo de la diferencia se obtendrá porcentualmente la pérdida al fuego. Con la pérdida al fuego se calculó la masa de muestra que debía utilizarse para elaborar la pastilla fundida que se ingresó al equipo. Se añadió la masa calculada y 7.7g del fundente de borato a un crisol de platino-oro especial para utilizar en el equipo Claisen para fundición. Se colocó el crisol en el equipo, teniendo cuidado de sujetarlo correctamente; así como el molde para colocar la muestra fundida. Para la fundición, se trabajó con el programa 1 estipulado en el Laboratorio CETEC de Cementos Progreso, S. A., el cual indica que la muestra podría tener alto contenido de sílice.
- c. La pastilla fundida se colocó en el porta-muestra del equipo XRF y se programó para llevar a cabo un análisis de óxidos. Con lo cual se obtiene el porcentaje de óxidos en la muestra.

10. Análisis de tamaño de partícula de la cal viva cálcica y dolomítica en el equipo PSD.

- a. Se tamizó la muestra con tamiz 170. La muestra que pase el tamiz fue la que se utilizó.
- b. Se pesó 0.5g de la muestra y se añadió 10ml de alcohol isopropílico. La mezcla se agitó y se colocó durante 5 minutos en un baño ultrasónico.
- c. Se añadió la solución que contiene la muestra en el recipiente del equipo y se inició el análisis. Se obtuvo el tamaño promedio y la circularidad de las partículas en la muestra.

11. Hidratación de la cal viva cálcica y dolomítica semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.

- a. Se hidrató las diferentes muestras añadiendo determinada cantidad de agua con una probeta. Al añadir el agua se mezcló el material hasta obtener un polvo homogéneo, con la menor cantidad de grumos posible. Posteriormente se llevó a cabo la pérdida al fuego de la muestra. La pérdida de la cal hidratada debe estar en el rango de 23—25%, por lo que se añadió agua hasta obtener dicha pérdida.

12. Análisis en los equipos XRF y PSD de los diferentes tipos de cal hidratada.

- a. Se llevó a cabo los análisis en los equipos XRD, XRF y PSD como se describió en los incisos nueve y diez.

13. Análisis de la cal hidratada cálcica y dolomítica semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada en el equipo de difracción de rayos X (XRD).

- a. Las muestras fueron analizadas en el equipo de difracción de rayos X (XRD) marca Panalytical, basándose en la fineza, temperatura de calcinación y tipo de piedra utilizada.
- b. Para realizar el análisis se utilizó una corriente de 40 y tensión de 45.
- c. Las muestras fueron molidas para obtener una fineza de 94% que pase tamiz 325. El tiempo dependió de cada muestra a analizar.
- d. Se preparó la pastilla en el porta-muestras y se colocó en el equipo.
- e. Se obtuvo el difractograma de cada muestra, el cual se comparó con la biblioteca que acompaña al equipo y se realizó el análisis de Rietveld, con ayuda del software, para obtener un análisis cuantitativo de las fases cristalinas en cada muestra.

14. Evaluación de las ampolladuras y picaduras según la norma ASTM C-110.

- a. Se llevó a cabo la prueba de análisis físico según la norma ASTM C-110: Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone.

- b. Se cuantificó la cantidad de ampolladuras y picaduras en un trozo de vidrio de 10cm×10cm con ayuda de un estereoscopio.

15. Modelo estadístico.

- a. Se llevó a cabo un diseño factorial de tres factores, utilizando análisis de ANOVA y prueba F con $\alpha=0.05$ y nivel de confianza de 95% para las pruebas de hipótesis del modelo.

V. RESULTADOS

A. Análisis de materia prima.

1. Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF). El análisis elaborado en el equipo de fluorescencia de rayos X para la materia prima nos permite observar el porcentaje de óxido de calcio y de óxido de magnesio presente tanto en caliza como en dolomita. Esto permite determinar la calidad de la materia prima utilizada, ya que la caliza debe contener un porcentaje no menor de 50% de óxido de calcio y menor a 5% de óxido de magnesio y la dolomita un porcentaje de óxido de calcio no menor de 30% y de óxido de magnesio mayor a 20%. A continuación, se muestra los resultados para ambos tipos de piedra utilizada.

Cuadro 17. Análisis de fluorescencia de rayos X para la piedra caliza.

SiO₂ (±0.01%)	Al₂O₃ (±0.01%)	Fe₂O₃ (±0.01%)	CaO (±0.01%)	MgO (±0.01%)	SO₃ (±0.01%)	K₂O (±0.01%)	NaO₂ (±0.01%)	P.F. (%)	Total (%)
1.61	0.25	0.00	55.42	1.00	0.60	0.05	0.00	42.12	101.05

Cuadro 18. Análisis de fluorescencia de rayos X para la piedra dolomita.

SiO₂ (±0.01%)	Al₂O₃ (±0.01%)	Fe₂O₃ (±0.01%)	CaO (±0.01%)	MgO (±0.01%)	SO₃ (±0.01%)	K₂O (±0.01%)	NaO₂ (±0.01%)	P.F. (±0.01%)	Total (±0.01%)
0.00	0.14	0.22	31.23	20.03	0.02	0.00	0.00	47.70	99.34

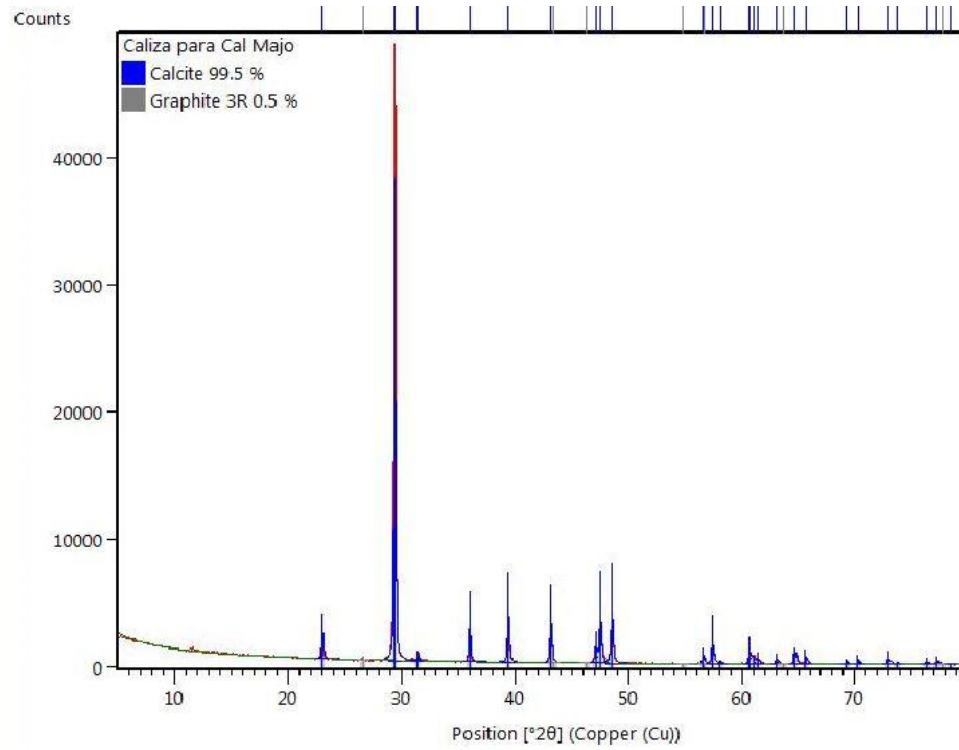
Como se observa en los Cuadros 17 y 18, los porcentajes de óxido de calcio y de magnesio se encuentran dentro del mínimo o máximo aceptado para considerar la materia prima apta para la producción de cal. Además, puede observarse que el porcentaje de óxidos de silicio, aluminio y hierro se encuentran en cantidades pequeñas por lo que no se producen cales hidráulicas, lo cual no es el objetivo del estudio.

2. Análisis de difracción de rayos X (XRD). El análisis en el equipo de difracción de rayos X permite observar las fases cristalinas que conforman a las rocas utilizadas. Es decir, permite observar y cuantificar el porcentaje de fase cristalina calcita y dolomita presente en la piedra caliza y dolomita; respectivamente. A continuación, se presenta los resultados obtenidos.

Cuadro 19. Análisis de difracción de rayos X para la piedra caliza.

Calcita (±0.1%)	Grafito 3R (±0.1%)
99.5	0.5

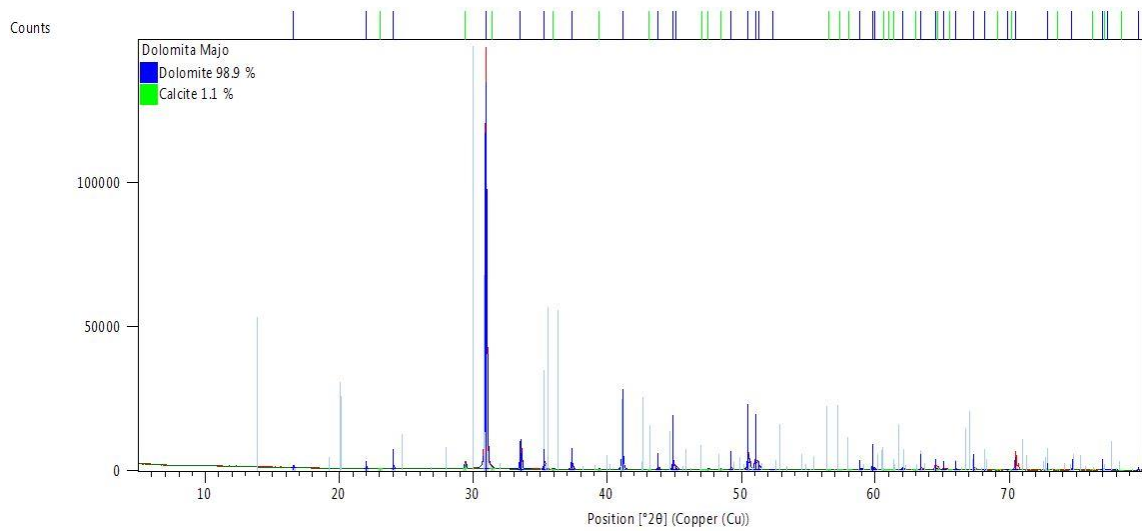
Figura 33. Difractograma obtenido de la muestra de piedra caliza.



Cuadro 20. Análisis de difracción de rayos X para la piedra dolomita.

Dolomita ($\pm 0.1\%$)	Calcita ($\pm 0.1\%$)
98.9	1.1

Figura 34. Difractograma obtenido de la muestra de piedra dolomita.



El Cuadro 19 muestra el resultado obtenido para la piedra caliza cuya fase cristalina principal es la calcita, la cual es el mineral más estable de carbonato de calcio y es el principal componente de la piedra caliza. Además, puede observarse contaminación por grafito 3R. Al observar la Figura 33 puede observar el difractograma obtenido, el cual pertenece principalmente a la fase cristalina calcita. Por otro lado, en el Cuadro 20 se observa un porcentaje elevado de dolomita, el cual es el mineral compuesto de carbonato de calcio-magnesio, denotando que se trata de piedra dolomita. Se identificó presencia de calcita pues forma parte de la composición química de la dolomita. En la Figura 34 se muestra el difractograma obtenido para la piedra dolomita.

3. **Análisis termogravimétrico (TGA).** El análisis elaborado en el equipo de análisis termogravimétrico permite observar el cambio de peso en función de la temperatura que posee la muestra. Con base en esto, se obtiene los termogramas, que permiten observar las curvas de descomposición de cada una de las piedras utilizadas. Es decir, muestran la temperatura a la cual la piedra caliza y dolomita se descompone en CaO y CO₂ y de esta manera determinar una temperatura óptima para el proceso de calcinación. Los resultados y los termogramas se muestran a continuación.

Cuadro 21. Temperaturas obtenidas del análisis termogravimétrico de la piedra caliza cálcica y dolomita. El análisis se elaboró en triplicado.

Tipo de piedra caliza	Mx	Temperatura punto de inflexión ($\pm 0.01^\circ\text{C}$)	Temperatura final ($\pm 0.01^\circ\text{C}$) (óptima)	Temperatura en el punto medio ($\pm 0.01^\circ\text{C}$)
Cálcica	1	878.33	894.66	849.50
	2	889.50	902.51	859.06
	3	887.50	901.32	857.69
Dolomítica	1	867.33	886.04	837.55
	2	870.17	886.89	838.80
	3	872.33	886.79	840.73

Cuadro 22. Temperaturas promedio obtenidas del análisis termogravimétrico en triplicado de la piedra caliza cálcica y dolomita.

Tipo de piedra caliza	Temperatura punto de inflexión ($\pm 0.01^\circ\text{C}$)	Desviación estándar	Temperatura final ($\pm 0.01^\circ\text{C}$) (óptima)	Desviación estándar	Temperatura en el punto medio ($\pm 0.01^\circ\text{C}$)	Desviación estándar
Cálcica	885.11	5.96	899.50	4.23	855.42	5.17
Dolomítica	869.94	2.51	886.57	0.46	839.03	1.60

Figura 35. Termograma obtenido del análisis de la muestra 1 de piedra caliza cálcica.

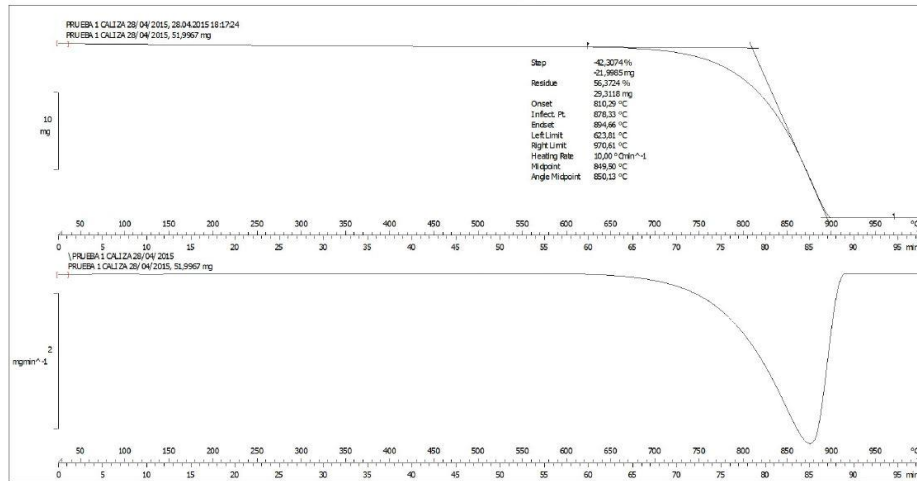


Figura 36. Termograma obtenido del análisis de la muestra 2 de piedra caliza cálcica.

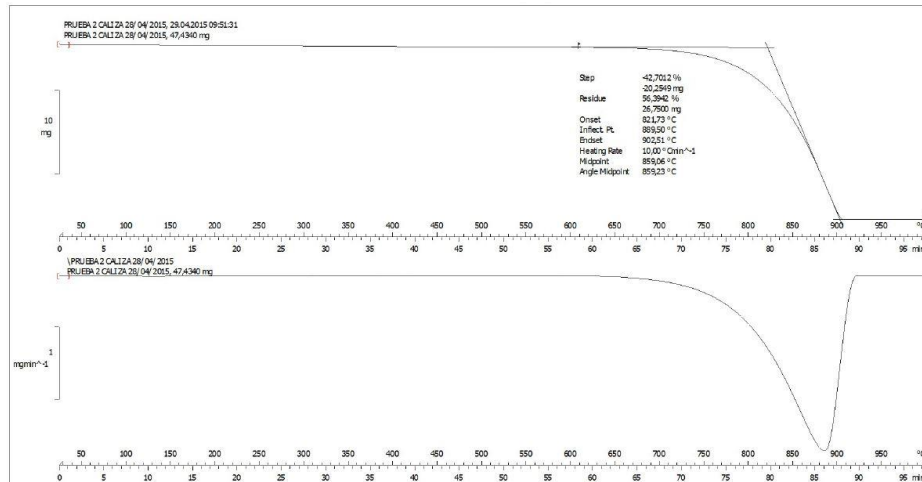


Figura 37. Termograma obtenido del análisis de la muestra 3 de piedra caliza cálcica.

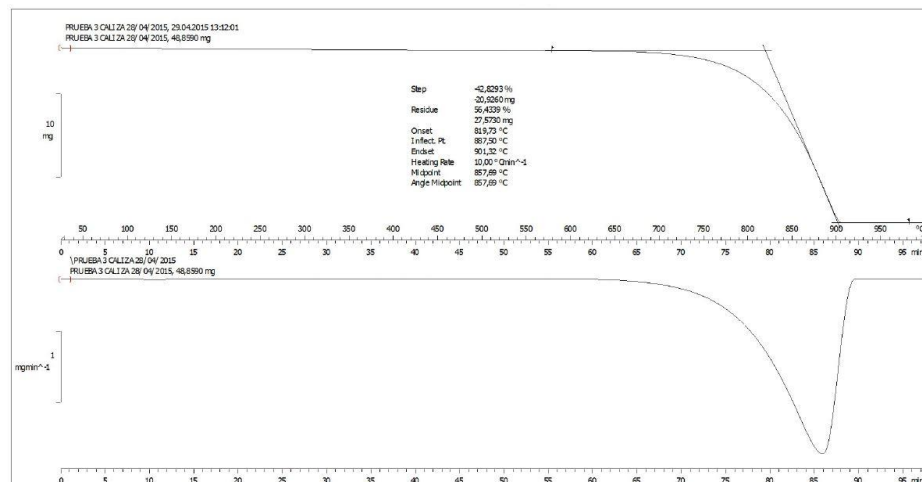


Figura 38. Termograma obtenido del análisis de la muestra 1 de piedra caliza dolomítica.

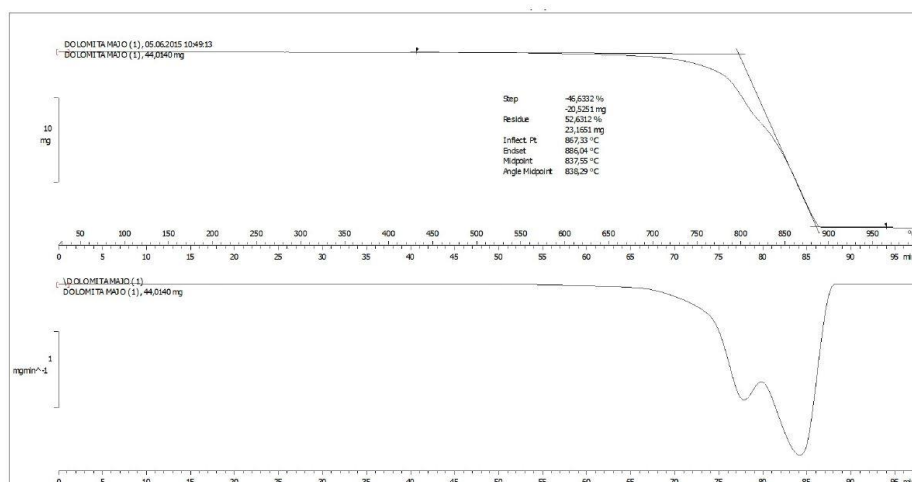


Figura 39. Termograma obtenido del análisis de la muestra 2 de piedra caliza dolomítica.

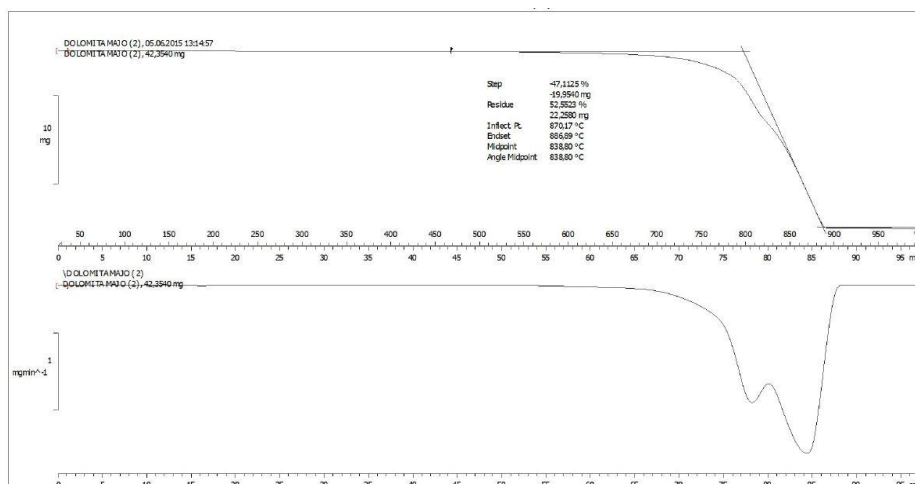
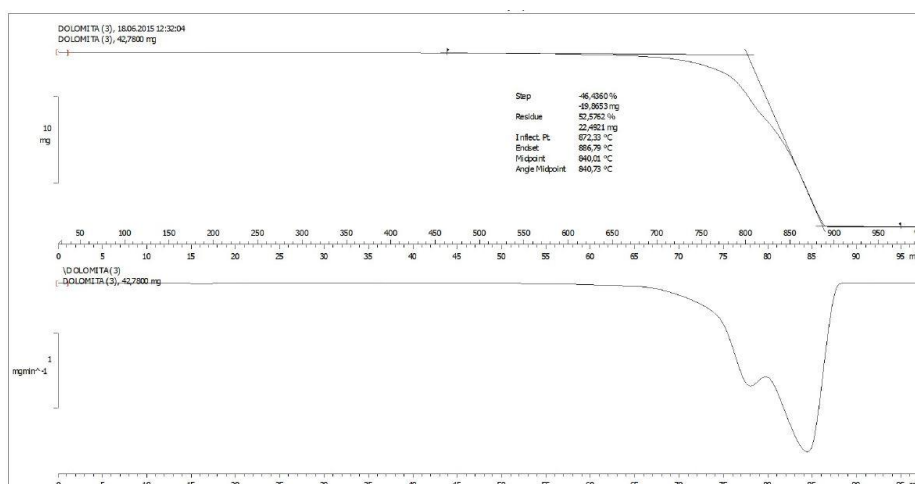


Figura 40. Termograma obtenido del análisis de la muestra 3 de piedra caliza dolomítica.



Los análisis mostrados en el Cuadro 21 muestran las diferentes temperaturas en las que la piedra sufre cambios. Por un lado, la temperatura de inflexión permite observar la temperatura a la cual la piedra tiene una pérdida de peso crítica, antes de llegar a la temperatura final. Esta última, es la temperatura en la cual la piedra ha sufrido la pérdida completa de CO_2 y por lo tanto es la temperatura de descomposición óptima, es decir la temperatura óptima de calcinación. Por último, la temperatura del punto medio, indica la temperatura en la cual la piedra ha perdido el 50% del peso total a perder, la cual fue considerada la temperatura a utilizar para las piedras a semicalcinar. Al observar los resultados de estas temperaturas para las muestras de caliza y dolomita, se observa que no existe mayor diferencia entre cada temperatura según la piedra y para el caso de la temperatura final de descomposición se acercan a las teóricas mencionadas en el marco teórico.

Al hacer el triplicado se hace necesario realizar un promedio de cada muestra trabajada, siendo los resultados los mostrados en el Cuadro 22. Las temperaturas óptimas de calcinación fueron tomadas del promedio de la temperatura final, aproximándola al entero más cercano. Es decir, para la piedra caliza cálcica la temperatura óptima fue $900.00 \pm 4.23^\circ\text{C}$ observando una desviación estándar pequeña, y para la piedra dolomita la temperatura óptima fue $887.00 \pm 0.46^\circ\text{C}$, siendo su desviación estándar aún más pequeña y aceptable. Las temperaturas de punto medio, tomadas para la semicalcinación de las piedras fueron 850°C y 837°C , tomando una distancia de igual magnitud para ambos tipos de piedra en relación con su temperatura óptima.

En cuanto a los termogramas obtenidos, para el caso de la caliza en las Figuras 35 a 37 se observa en el gráfico inferior el pico único de la descomposición del CaCO_3 a CaO y desprendimiento de CO_2 . En tanto que para las Figuras 38 a 40, se observan dos picos cada uno representando la descomposición de ambos carbonatos que forman parte de la dolomita (CaCO_3 y MgCO_3). Por último, es importante mencionar que del gráfico anterior se obtiene la primera derivada y con ello es factible determinar las temperaturas óptimas y de semicalcinación para cada tipo de piedra.

4. Determinación del tiempo óptimo de calcinación, pérdida al fuego y fluorescencia de rayos X (XRF). Con el fin de obtener el tiempo óptimo de calcinación se elaboró análisis de pérdida al fuego para ambos tipos de piedra utilizando la misma masa para los tres diferentes tamaños, $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ ".

Para el caso de la piedra caliza cálcica se añadió 10g de la misma a los crisoles de platino y se calculó la pérdida cada 30 minutos al inicio y posteriormente cada 15 minutos. Se determinó para la piedra de $\frac{1}{2}$ " un tiempo aproximado de 135.00 ± 5.00 min de calcinación con una pérdida total de $43.7998 \pm 0.0002\%$ para la muestra 1 y de $43.7786 \pm 0.0002\%$. Para el tamaño de piedra $\frac{1}{4}$ " el tiempo de calcinación fue de 105.00 ± 5.00 min con una pérdida total para la muestra 1 de $43.7549 \pm 0.0002\%$ y para la muestra 2 de

43.9503±0.0002%. Por último, para el tamaño de piedra de 3/8" el tiempo fue de 120.00±5.00min con una pérdida total para la muestra 1 de 43.8606±0.0002% y para la muestra 2 de 43.6736±0.0002%.

Por otro lado, para el caso la piedra caliza dolomítica se añadió 20g a los crisoles de platino para los tamaños ½" y 3/8" y 15g para el tamaño de ¼" y se obtuvo la pérdida de la misma manera que para la piedra caliza cálcica. Se determinó que el tiempo aproximado de calcinación para la piedra de ½" era de 180.00±5.00min con una pérdida total para la muestra 1 de 46.4690±0.0002% y para la muestra 2 de 46.4071±0.0002%. En tanto que para la piedra de ¼" el tiempo fue de 150.00±5.00min con una pérdida total de 47.1144±0.0002% para la muestra 1 y para la muestra 2 de 46.9455±0.0002%. Por último, para el tamaño de piedra 3/8" el tiempo de calcinación total fue de 195.00±5.00min con una pérdida total para la muestra 1 de 45.2396±0.0002% y para la muestra 2 de 46.4128±0.0002%.

Mediante análisis en fluorescencia de rayos X se determinó que tamaño de piedra caliza cálcica y dolomítica era el óptimo para utilizar en la calcinación. Como se mencionó en el análisis de fluorescencia de rayos X para la materia prima, el porcentaje de óxidos es importante para observar la calidad de la cal obtenida. Al calcinar la piedra correspondiente el porcentaje de óxidos tiende a aumentar y la piedra que mostró un porcentaje mayor de conversión del carbonato al óxido, fue elegida como el tamaño adecuado para calcinar dentro de la mufla. Los resultados en el equipo XRF se muestran a continuación.

Cuadro 23. Resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados.

Mx	Tamaño (")	SiO ₂ (±0.01%)	Al ₂ O ₃ (±0.01%)	Fe ₂ O ₃ (±0.01%)	CaO (±0.01%)	MgO (±0.01%)	SO ₃ (±0.01%)	K ₂ O (±0.01%)	NaO ₂ (±0.01%)	P.F. (±0.01%)	Total (±0.01%)
1	½	0.44	0.18	0.00	94.26	1.85	0.11	0.01	0.04	3.65	100.54
2	½	1.50	0.80	0.00	94.33	1.86	0.07	0.00	0.06	2.75	101.37
1	¼	0.49	0.07	0.00	92.30	1.75	0.20	0.00	0.00	6.53	101.34
2	¼	0.45	0.07	0.00	90.49	1.60	0.14	0.00	0.00	7.07	99.82
1	3/8	0.81	0.40	0.00	89.04	1.53	0.20	0.01	0.03	5.46	97.48
2	3/8	0.94	0.45	0.00	90.66	1.51	0.14	0.02	0.01	4.50	98.23

Cuadro 24. Resultados promedio de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados.

Tamaño (")	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
½	0.97	0.49	0.00	94.30	1.86	0.09	0.01	0.05
¼	0.57	0.20	0.00	91.40	1.68	0.21	0.02	0.01
3/8	0.74	0.19	0.00	89.85	1.60	0.18	0.00	0.01

Cuadro 25. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza cálcica calcinados.

Tamaño (“)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
½	0.75	0.44	0.00	0.05	0.01	0.03	0.01	0.01
¼	0.03	0.00	0.00	1.28	0.11	0.04	0.00	0.00
3/8	0.09	0.04	0.00	1.15	0.01	0.04	0.01	0.01

Cuadro 26. Resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados.

Mx	Tamaño (“)	SiO ₂ (±0.01%)	Al ₂ O ₃ (±0.01%)	Fe ₂ O ₃ (±0.01%)	CaO (±0.01%)	MgO (±0.01%)	SO ₃ (±0.01%)	K ₂ O (±0.01%)	NaO ₂ (±0.01%)	P.F. (±0.01%)	Total (±0.01%)
1	½	0.20	0.09	0.00	60.13	35.90	0.15	0.00	0.29	4.74	101.50
2	½	0.22	0.10	0.00	61.19	35.25	0.14	0.00	0.24	4.36	101.50
1	¼	0.33	0.01	0.00	59.39	35.86	0.15	0.00	0.20	5.25	101.19
2	¼	0.34	0.02	0.00	59.97	35.29	0.14	0.00	0.18	5.45	101.39
1	3/8	0.35	0.19	0.00	58.48	36.54	0.17	0.00	0.28	5.48	101.49
2	3/8	0.34	0.11	0.00	57.69	36.60	0.15	0.00	0.32	6.02	101.23

Cuadro 27. Resultados promedio de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados.

Tamaño (“)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
½	0.21	0.10	0.00	60.66	35.58	0.15	0.00	0.27
¼	0.34	0.02	0.00	59.68	35.58	0.15	0.00	0.19
3/8	0.35	0.15	0.00	58.09	36.57	0.04	0.00	0.30

Cuadro 28. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X obtenidos para los diferentes tamaños de piedra caliza dolomítica calcinados.

Tamaño (“)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
½	0.01	0.01	0.00	0.75	0.46	0.01	0.00	0.04
¼	0.01	0.01	0.00	0.41	0.40	0.01	0.00	0.01
3/8	0.01	0.06	0.00	0.56	0.04	0.01	0.00	0.03

En los Cuadros del 23 al 28 se muestra los resultados para cada muestra según el tamaño de piedra utilizado, así como su promedio y desviación estándar. Al observar los porcentajes de óxidos producidos se puede determinar que la piedra ½” es la adecuada para la calcinación de piedra caliza cálcica y dolomítica.

B. Análisis de cales vivas cálcicas y dolomíticas obtenidas a diferentes temperaturas y finezas.

1. Pérdida al fuego y fineza del material. El análisis de pérdida al fuego y de la fineza que posee el material tras su molienda son importantes como control de calidad del mismo. Mediante la pérdida al fuego es posible observar el porcentaje de carbonato que no logró transformarse en óxido y el porcentaje de humedad que posee la cal viva; es decir el porcentaje de óxido que se hidrató y se transformó en hidróxido. En tanto que con el análisis de fineza se logró obtener los diferentes porcentajes del material que pasaban tamiz 200, siendo el óptimo un porcentaje cercano a 94%. Con base en el porcentaje óptimo se designó dos porcentajes más, siendo éstos 75% y 85%. Cabe mencionar que para obtener las finezas reales de cada muestra, se molió 230g aproximadamente a diferentes tiempos con el fin de lograr obtener las tres finezas mencionadas. Los resultados tanto de fineza como de pérdida al fuego para las diferentes muestras trabajadas a distintas temperaturas se muestran a continuación.

a. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. Para el caso de las muestras de cal viva cálcicas obtenidas mediante la calcinación a la temperatura óptima de 900°C, designada mediante el análisis de TGA antes mencionados, la pérdida al fuego debe ser muy pequeña. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 29. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	3.45
	85	2.27
	75	2.05
2	94	2.51
	85	1.83
	75	1.10

Cuadro 30. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	2.98	0.66
85	2.05	0.31
75	1.58	0.67

Como puede observarse en los Cuadros 29 y 30, los porcentajes de pérdida al fuego son pequeños. Lo que indica que la calcinación de la piedra caliza cálcica fue efectiva, lo que podrá comprobarse mediante los análisis en los diferentes equipos trabajados.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se utilizó el tamiz 200, para el cual teóricamente (ver marco teórico) una cal por norma debe tener una fineza en la cual el 94% de la muestra pase dicho tamiz. Ésta fue la fineza tomada como óptima, y con base en ella se designó dos finezas más siendo éstas 75% y 85% de la muestra que pasen tamiz 200. El análisis se elaboró utilizando el equipo tamizador. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 31. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	93.386
	85	85.268
	75	75.088
2	94	94.312
	85	85.156
	75	75.896

Cuadro 32. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 900°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	93.849	0.655
85	85.212	0.079
75	75.492	0.571

Cabe resaltar que las finezas colocadas en los análisis son las finezas esperadas, no las finezas reales obtenidas. Esto se observará en los Cuadros para los diferentes resultados a mostrar.

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio.

b. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Para el caso de las muestras de cal viva cálcicas que fueron obtenidas a través de la calcinación a una temperatura de 850°C, considerada como la temperatura de semicalcinación, la pérdida al fuego se observó elevada indicando una mala calcinación. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 33. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	24.64
	85	24.49
	75	24.35
2	94	24.55
	85	24.53
	75	24.49

Cuadro 34. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	24.60	0.06
85	24.51	0.03
75	24.42	0.10

Como puede observarse en los Cuadros 33 y 34, los porcentajes de pérdida al fuego son altos. Lo que indica una mala calcinación de la piedra caliza cálcica pues existe alto contenido de dióxido de carbono, lo que podrá comprobarse mediante los análisis en los diferentes equipos en los cuales se trabajó.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se trabajó de la misma manera que para las muestras de cal viva cálcica obtenida por calcinación a 900°C. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 35. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	94.472
	85	83.992
	75	76.318
2	94	93.700
	85	85.120
	75	75.172

Cuadro 36. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 850°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	94.086	0.546
85	84.556	0.798
75	75.745	0.810

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio. Esto debido a que como se mencionó se utilizó los tiempos adecuados para obtener la fineza deseada.

c. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Para las muestras de cal viva cálcicas obtenidas mediante la calcinación de la piedra caliza a una temperatura de 1100°C, considerada como temperatura de sobrecalcinación, la pérdida al fuego se observó pequeña, incluso menor a las obtenidas para las muestras obtenidas a 900°C. Esto indica una excelente conversión de carbonato a óxido. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 37. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	2.48
	85	2.29
	75	1.62
2	94	2.96
	85	2.20
	75	2.01

Cuadro 38. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	2.72	0.34
85	2.25	0.06
75	1.82	0.28

Como puede observarse en los Cuadros 37 y 38, los porcentajes de pérdida al fuego son bastante pequeños. Lo que indica que casi toda la piedra caliza cálcica pasó del carbonato al óxido, lo que podrá comprobarse mediante los análisis en los diferentes equipos en los cuales se trabajó.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se trabajó de la misma manera que para las muestras de cal viva cálcica obtenida por calcinación a 900°C. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 39. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	93.156
	85	84.422
	75	75.646
2	94	94.144
	85	83.636
	75	74.712

Cuadro 40. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	93.650	0.699
85	84.029	0.556
75	75.179	0.660

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio.

d. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. Para las muestras de cal viva dolomítica obtenidas a través de la calcinación de la piedra caliza dolomítica a una temperatura de 887°C, considerada como temperatura óptima, la pérdida al fuego obtenida fue pequeña, sin embargo, al compararla con la cal viva cálcica óptimamente obtenida. Sin embargo, esto indica que se produjo una excelente transformación de los carbonatos a los óxidos correspondientes. Los resultados obtenidos del duplicado trabajado y el promedio se muestran a continuación.

Cuadro 41. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	3.65
	85	2.65
	75	2.54
2	94	3.07
	85	2.85
	75	2.24

Cuadro 42. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	3.36	0.41
85	2.75	0.14
75	2.39	0.21

Como puede observarse en los Cuadros 41 y 42, los porcentajes de pérdida al fuego son bastante pequeños. Lo que indica que casi toda la piedra caliza dolomítica pasó de los carbonatos a los óxidos

correspondientes, lo que podrá comprobarse mediante los análisis en los diferentes equipos en los cuales se trabajó. Sin embargo, los valores según cada fineza son mayores comparados con los obtenidos para la cal viva cálcica calcinada óptimamente.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se trabajó de la misma manera que para las muestras de cal viva cálcica. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 43. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	93.848
	85	85.858
	75	75.776
2	94	94.526
	85	84.730
	75	76.256

Cuadro 44. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	94.187	0.479
85	85.294	0.798
75	76.016	0.339

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio.

e. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Para las muestras de cal viva dolomítica obtenidas mediante la calcinación de la piedra caliza dolomítica a una temperatura de 837°C, considerada como temperatura de semicalcinación, la pérdida al fuego obtenida muestra valores no tan elevados. Muy cercanos a los valores obtenidos para la cal calcinada óptimamente, aunque existe mayor pérdida. Esto demuestra que no se calcinó por completo a los carbonatos como en el caso de las muestras a temperatura óptima. Los resultados obtenidos del duplicado trabajado y el promedio se muestran a continuación.

Cuadro 45. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	5.12
	85	4.26
	75	3.46
2	94	4.41
	85	3.03
	75	2.99

Cuadro 46. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	4.77	0.50
85	3.65	0.87
75	3.23	0.33

Como puede observarse en los Cuadros 45 y 46, los porcentajes de pérdida al fuego son pequeños, pero no más que los obtenidos para la piedra calcinada a temperatura óptima. Esto indica que gran parte de los carbonatos se transformó en los óxidos, aunque siempre existe una pequeña cantidad en forma de carbonato. Esto se podrá comprobar mediante los análisis en los diferentes equipos en los cuales se trabajó. Al comprar las pérdidas de la cal viva cálcica con estos valores, se observa una gran diferencia, lo que se discutirá más adelante.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se trabajó de la misma manera que para las muestras de cal viva cálcica. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 47. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	93.874
	85	86.062
	75	76.870
2	94	93.004
	85	86.446
	75	74.050

Cuadro 48. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	93.439	0.615
85	86.254	0.272
75	75.460	1.994

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio.

f. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Para las muestras de cal viva dolomítica obtenidas debido a la calcinación a 1087°C de la piedra caliza dolomítica, la cual es considerada como la temperatura de sobrecalcinación, las pérdidas al fuego obtenidas muestran valores bastante pequeños. Estos valores se encuentran muy cercanos a los valores obtenidos para las cales óptimamente calcinadas. Incluso son menores para las tres finezas. Esto demuestra que la transformación de los carbonatos a los óxidos se llevó a cabo casi por completo. Los resultados obtenidos del duplicado trabajado y el promedio se muestran a continuación.

Cuadro 49. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.0002\%$)
1	94	2.32
	85	1.63
	75	1.51
2	94	2.39
	85	1.76
	75	1.50

Cuadro 50. Pérdida al fuego promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	2.36	0.05
85	1.70	0.09
75	1.51	0.01

Como puede observarse en los Cuadros 49 y 50, los porcentajes de pérdida al fuego son bastante pequeños incluso más que los obtenidos para la piedra calcinada a temperatura óptima. Esto indica que los carbonatos se transformaron casi por completo en los óxidos. Esto se podrá comprobar mediante el análisis en los diferentes equipos en los cuales se trabajó. Al comparar las pérdidas de la cal viva cálcica con estos valores, se observa una misma tendencia, lo que se discutirá más adelante.

Para los análisis de las finezas del material después de ser molido se trabajó de la misma manera que para las muestras de cal viva cálcica. Los resultados obtenidos para la fineza del material se muestran a continuación.

Cuadro 51. Fineza real obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	Fineza real ($\pm 0.001\%$)
1	94	94.752
	85	86.674
	75	76.396
2	94	93.796
	85	86.542
	75	76.482

Cuadro 52. Fineza real promedio obtenida para las muestras de cal viva dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C.

Fineza (%)	Fineza real (%)	Desviación estándar (%)
94	94.274	0.676
85	86.608	0.093
75	76.439	0.061

Las finezas obtenidas se encuentran cercanas a las estipuladas para ser los valores de la variable fineza que decidió estudiarse. Las desviaciones estándar son pequeñas comparadas a los datos de la fineza real promedio.

2. **Análisis de las muestras en fluorescencia de rayos X (XRF).** Los análisis elaborados en el equipo de fluorescencia de rayos X muestran los porcentajes de los principales óxidos en muestras de cales utilizadas en la construcción. El software que acompaña al equipo cuenta con un programa elaborado dentro de Cementos Progreso para el análisis de óxidos en materiales como la cal.

El análisis fue utilizado como control para observar cómo se lleva a cabo la calcinación de la piedra caliza y dolomita, principalmente para las muestras calcinadas a una temperatura óptima. El análisis nos permite monitorear tanto cales hidratadas como cales vivas de cada una de las réplicas trabajadas, con el fin de observar su comportamiento sobre la variable respuesta (número de ampolladuras y picaduras). Además, se logra observar entre los porcentajes obtenidos para las diferentes temperaturas a las cuales se calcinó las piedras caliza cálcica y dolomítica, y con ello determinar el grado de transformación del carbonato al óxido.

Debido a que se trabajó en duplicado, se obtiene resultados promedios con su desviación estándar para cada temperatura. A continuación, se muestra los resultados para cada muestra y los resultados promedios de las réplicas.

a. **Muestras de cal viva cálcica** obtenidas a una temperatura de 900°C. Para estas muestras, el análisis de fluorescencia de rayos X nos permite monitorear la calcinación óptima observando el porcentaje de óxido de calcio obtenido. Además de ello, nos permite determinar el tipo de cal que se obtiene utilizando el porcentaje de óxidos de silicio, de hierro y aluminio, así como el porcentaje de óxido de magnesio. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 53 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 54 y 55.

Cuadro 53. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.59	0.22	0.00	96.47	1.63	0.13	0.00	0.29	3.45	99.3
	85	0.55	0.19	0.00	98.12	1.83	0.13	0.00	0.21	2.27	101.03
	75	0.71	0.22	0.00	97.71	1.72	0.14	0.00	0.25	2.69	100.75
2	94	0.62	0.17	0.00	95.71	1.43	0.15	0.00	0.22	2.51	98.30
	85	0.58	0.20	0.00	98.80	1.53	0.16	0.01	0.19	1.83	101.47
	75	0.76	0.16	0.00	98.90	1.47	0.14	0.01	0.15	1.10	101.59

Cuadro 54. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.58	0.20	0.00	95.59	1.43	0.14	0.00	0.23
85	0.57	0.20	0.00	96.82	1.51	0.15	0.01	0.20
75	0.57	0.19	0.00	97.32	1.50	0.14	0.01	0.18

Cuadro 55. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO₂ (%)	Desv. Std. Al₂O₃ (%)	Desv. Std. Fe₂O₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO₃ (%)	Desv. Std. K₂O (%)	Desv. Std. NaO₂ (%)
94	0.06	0.04	0.00	0.17	0.00	0.01	0.00	0.01
85	0.02	0.01	0.00	0.41	0.04	0.02	0.01	0.01
75	0.08	0.04	0.00	0.67	0.04	0.00	0.01	0.04

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 53 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 900°C la piedra caliza. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura óptima, las cuales, como se observa, contienen altos porcentajes de óxido de calcio. Esto indica una calcinación muy buena y refleja la calidad de la piedra caliza en cuanto a su porcentaje de óxido de calcio inicial (ver Cuadro 20). En cuanto a los resultados mostrados en los Cuadros 54 y 55, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. La desviación estándar es pequeña comparada con el valor promedio lo que indica que no existe mayor dispersión de los resultados en relación a la media aritmética.

b. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Las muestras obtenidas a la temperatura de semicalcinación requieren del análisis de fluorescencia de rayos X para monitorear el porcentaje obtenido de óxido de calcio. Dicho porcentaje no debe ser inferior a 55.42±0.01% que contiene la piedra caliza cálcica. Incluso debe ser mayor a aproximadamente 73% para que la pérdida al fuego sea inferior a 24%. Además de ello, nos permite determinar el tipo de cal que se obtiene utilizando el porcentaje de óxidos de silicio, de hierro y aluminio, así como el porcentaje de óxido de magnesio. Los resultados pueden observar en el Cuadro 56 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 57 y 58.

Cuadro 56. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	NaO ₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.43	0.09	0.00	75.23	0.95	0.11	0.01	0.01	24.64	101.47
	85	0.42	0.07	0.00	75.44	0.91	0.10	0.00	0.05	24.49	101.48
	75	0.42	0.09	0.00	75.54	0.93	0.12	0.00	0.00	24.35	101.45
2	94	0.68	0.00	0.00	74.25	1.17	0.11	0.01	0.03	24.55	100.80
	85	0.44	0.00	0.00	75.15	1.18	0.13	0.01	0.01	24.53	101.45
	75	0.43	0.00	0.00	75.49	0.93	0.10	0.01	0.02	24.49	101.47

Cuadro 57. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
94	0.56	0.05	0.00	74.74	1.06	0.11	0.01	0.02
85	0.43	0.04	0.00	75.30	1.05	0.12	0.01	0.03
75	0.43	0.05	0.00	75.52	0.93	0.11	0.01	0.01

Cuadro 58. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
94	0.18	0.06	0.00	0.69	0.16	0.00	0.00	0.01
85	0.01	0.05	0.00	0.21	0.19	0.02	0.01	0.03
75	0.01	0.06	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 56 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 850°C la piedra caliza. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura de semicalcinación, las cuales contienen bajos porcentajes de óxido de calcio. Esto indica una calcinación mala, pues del porcentaje inicial de la piedra caliza (ver Cuadro 20) y sólo se obtuvo aproximadamente 20% más de óxido de calcio. Los resultados mostrados en los Cuadros 57 y 58, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

c. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Los análisis de fluorescencia de rayos X fueron realizados para las muestras que fueron obtenidas a la temperatura de sobrecalcinación con el fin de cuantificar el óxido de calcio obtenido y con ello compararlo con el obtenido por cales obtenidas en procesos de calcinación óptima. Los resultados pueden observar en el Cuadro 59 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 60 y 61.

Cuadro 59. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.57	0.24	0.00	96.33	1.57	0.17	0.00	0.11	2.48	101.47
	85	0.59	0.15	0.00	96.59	1.56	0.14	0.00	0.17	2.29	101.49
	75	0.60	0.17	0.00	97.22	1.59	0.15	0.00	0.14	1.62	101.49
2	94	0.45	0.34	0.00	96.56	0.87	0.00	0.01	0.16	2.96	101.35
	85	0.53	0.25	0.01	97.22	0.78	0.00	0.02	0.34	2.20	101.35
	75	0.56	0.32	0.01	97.48	0.80	0.00	0.03	0.25	2.01	101.46

Cuadro 60. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.51	0.29	0.00	96.45	1.22	0.09	0.01	0.14
85	0.56	0.20	0.01	96.91	1.17	0.07	0.01	0.26
75	0.58	0.25	0.01	97.35	1.20	0.08	0.02	0.20

Cuadro 61. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. Na ₂ O (%)
94	0.08	0.07	0.00	0.16	0.49	0.12	0.01	0.04
85	0.04	0.07	0.01	0.45	0.55	0.10	0.01	0.12
75	0.03	0.11	0.01	0.18	0.56	0.11	0.02	0.08

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 59 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 1100°C la piedra caliza. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura de sobrecalcinación, las cuales contienen altos porcentajes de óxido de calcio. Esto indica una conversión del carbonato al óxido muy alta, sin embargo, esto no indica que exista una buena calcinación. Los resultados mostrados en los Cuadros 60 y 61, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

d. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. Para estas muestras, los análisis de fluorescencia de rayos X permiten monitorear la calcinación óptima del material al observar el porcentaje de óxido de calcio y magnesio. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 62 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 63 y 64.

Cuadro 62. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica 887°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	Na ₂ O (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.05	0.18	0.02	60.36	35.89	0.00	0.03	0.36	3.65	100.54
	85	0.06	0.00	0.00	61.39	36.08	0.15	0.00	0.39	2.65	100.72
	75	0.00	0.25	0.00	61.47	36.80	0.00	0.02	0.34	2.54	101.42
2	94	0.12	0.14	0.01	61.32	35.82	0.01	0.01	0.34	3.07	100.84
	85	0.10	0.02	0.00	61.35	36.12	0.07	0.02	0.36	2.85	100.89
	75	0.11	0.18	0.00	61.32	36.83	0.00	0.01	0.33	2.24	101.02

Cuadro 63. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.09	0.16	0.02	60.84	35.85	0.01	0.02	0.35
85	0.28	0.01	0.00	61.37	36.10	0.11	0.01	0.38
75	0.06	0.22	0.00	61.40	36.82	0.00	0.02	0.34

Cuadro 64. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO₂ (%)	Desv. Std. Al₂O₃ (%)	Desv. Std. Fe₂O₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO₃ (%)	Desv. Std. K₂O (%)	Desv. Std. NaO₂ (%)
94	0.05	0.16	0.01	0.68	0.05	0.01	0.01	0.01
85	0.25	0.01	0.00	0.03	0.03	0.06	0.01	0.02
75	0.08	0.22	0.00	0.11	0.02	0.00	0.02	0.01

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 62 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 887°C la piedra caliza dolomítica. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura óptima, las cuales contienen altos porcentajes de óxido de calcio y magnesio. Esto indica una conversión del carbonato al óxido muy alta. Los resultados mostrados en los Cuadros 63 y 64, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

e. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Las muestras obtenidas a la temperatura de semicalcinación requieren del análisis de fluorescencia de rayos X con el objetivo de verificar y controlar el porcentaje obtenido de óxido de calcio y magnesio. Los resultados pueden observar en el Cuadro 65 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 66 y 67.

Cuadro 65. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.20	0.12	0.01	58.28	35.36	0.00	0.02	0.37	5.12	99.48
	85	0.09	0.19	0.01	58.50	35.57	0.00	0.03	0.85	4.26	99.50
	75	0.04	0.19	0.00	59.44	36.08	0.04	0.02	0.27	3.46	99.54
2	94	0.03	0.00	0.11	59.50	35.23	0.52	0.00	0.02	4.41	99.82
	85	0.08	0.00	0.14	59.95	36.05	0.54	0.00	0.02	3.03	99.81
	75	0.00	0.00	0.11	60.10	36.18	0.48	0.00	0.02	2.99	99.88

Cuadro 66. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.12	0.06	0.06	58.89	35.30	0.26	0.01	0.20
85	0.09	0.10	0.08	59.23	35.81	0.27	0.02	0.44
75	0.02	0.10	0.06	59.77	36.13	0.26	0.01	0.15

Cuadro 67. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO₂ (%)	Desv. Std. Al₂O₃ (%)	Desv. Std. Fe₂O₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO₃ (%)	Desv. Std. K₂O (%)	Desv. Std. NaO₂ (%)
94	0.12	0.08	0.07	0.86	0.09	0.37	0.01	0.25
85	0.01	0.13	0.09	1.03	0.34	0.38	0.02	0.59
75	0.03	0.13	0.08	0.49	0.07	0.31	0.01	0.18

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 65 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 837°C la piedra caliza dolomítica. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura de semicalcinación, las cuales contienen menores porcentajes de óxido de calcio y magnesio en relación con las cales óptimamente calcinadas y las sobrecalcinadas. Esto indica un porcentaje mayor de carbonatos remanentes sin descomposición, pero que al compararlo con los resultados de la semicalcinación de la caliza es inferior. Los resultados mostrados en los Cuadros 66 y 67, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

f. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Los análisis de fluorescencia de rayos X fueron realizados para las muestras que fueron obtenidas a la temperatura de sobrecalcinación con el fin de cuantificar el óxido de calcio y magnesio obtenido y con ello compararlo con los obtenidos por cales obtenidas en procesos de calcinación óptima. Los resultados pueden observar en el Cuadro 68 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 69 y 70.

Cuadro 68. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	NaO ₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.02	0.10	0.03	61.32	37.63	0.00	0.02	0.00	2.32	101.44
	85	0.00	0.02	0.02	61.85	37.72	0.00	0.02	0.00	1.63	101.26
	75	0.04	0.05	0.03	61.98	37.86	0.00	0.02	0.00	1.51	101.49
2	94	0.05	0.12	0.03	61.42	37.46	0.00	0.02	0.00	2.39	101.49
	85	0.04	0.08	0.02	61.56	37.97	0.00	0.01	0.00	1.76	101.44
	75	0.04	0.02	0.04	61.71	38.09	0.00	0.02	0.00	1.50	101.42

Cuadro 69. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Fineza (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
94	0.04	0.11	0.03	61.37	37.55	0.00	0.02	0.00
85	0.02	0.05	0.02	61.71	37.85	0.00	0.02	0.00
75	0.04	0.04	0.04	61.85	37.98	0.00	0.02	0.00

Cuadro 70. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1087°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
94	0.02	0.01	0.00	0.07	0.12	0.00	0.00	0.00
85	0.03	0.04	0.00	0.21	0.18	0.00	0.01	0.00
75	0.00	0.02	0.01	0.19	0.16	0.00	0.00	0.00

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 68 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 1087°C la piedra caliza dolomítica. Estas muestras representan la cal viva obtenida a partir de una temperatura de sobrecalcinación, las cuales contienen altos porcentajes de óxido de calcio y magnesio. Esto indica una conversión del carbonato al óxido muy alta, sin embargo, esto no indica que exista una buena calcinación. Los resultados mostrados en los Cuadros 69 y 70, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

g. Gráficos de comparación de porcentaje de óxidos versus temperatura de calcinación para cada fineza trabajada. Las gráficas mostradas permiten observar de una mejor manera la diferencia entre los porcentajes de óxidos producidos debido a una calcinación óptima, semicalcinación y sobrecalcinación de ambos tipos de piedra caliza.

Figura 41. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 94% pasante tamiz 200.

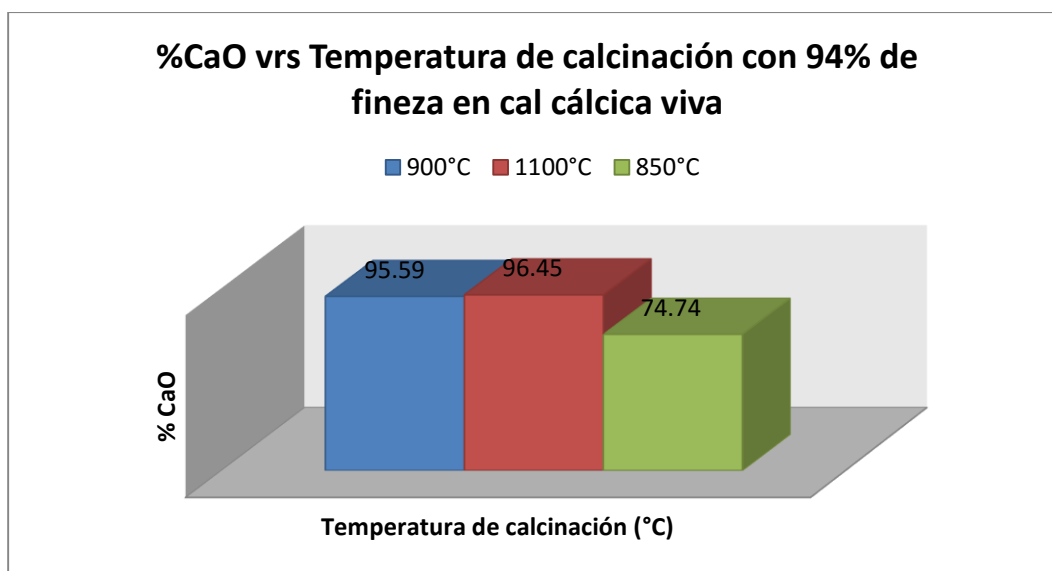


Figura 42. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 85% pasante tamiz 200.

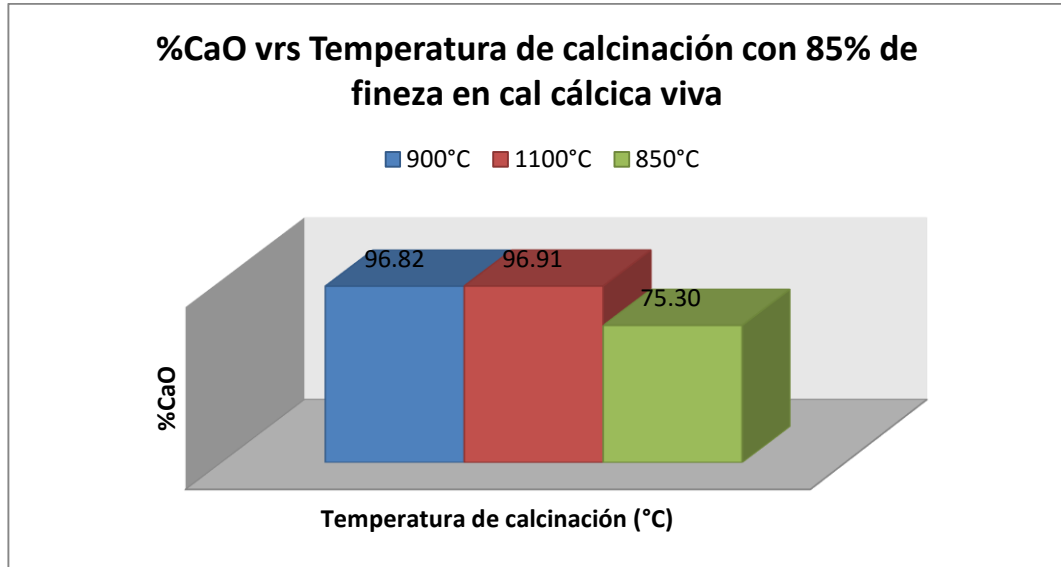


Figura 43. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva cálcica con 75% pasante tamiz 200.

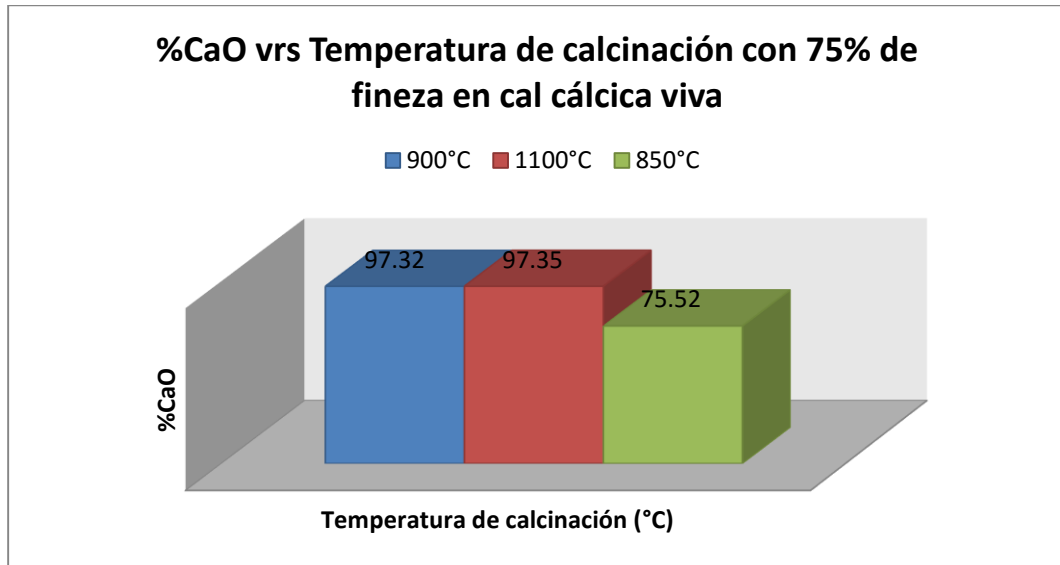


Figura 44. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 94% pasante tamiz 200.

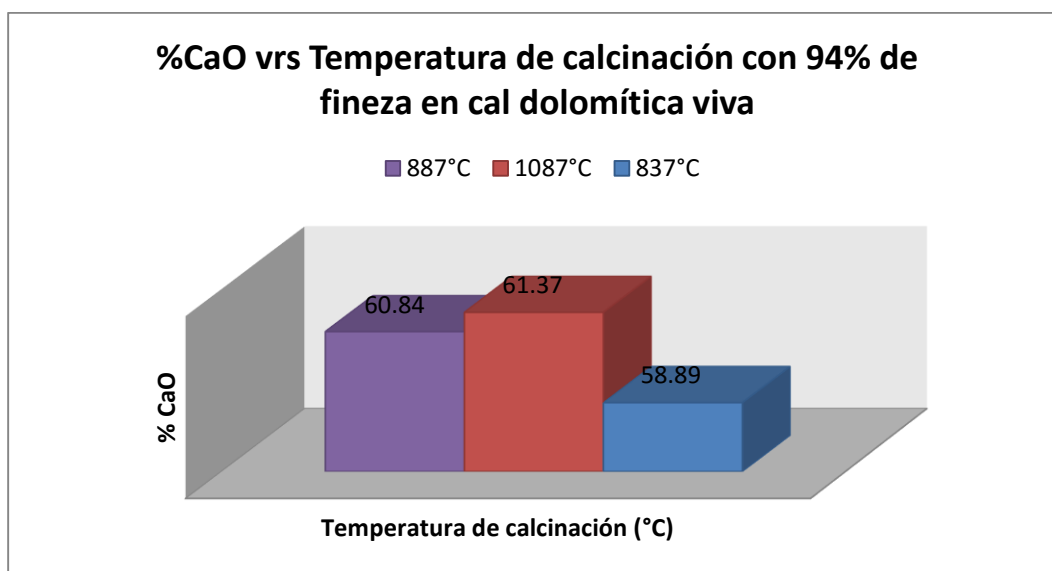


Figura 45. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 85% pasante tamiz 200.

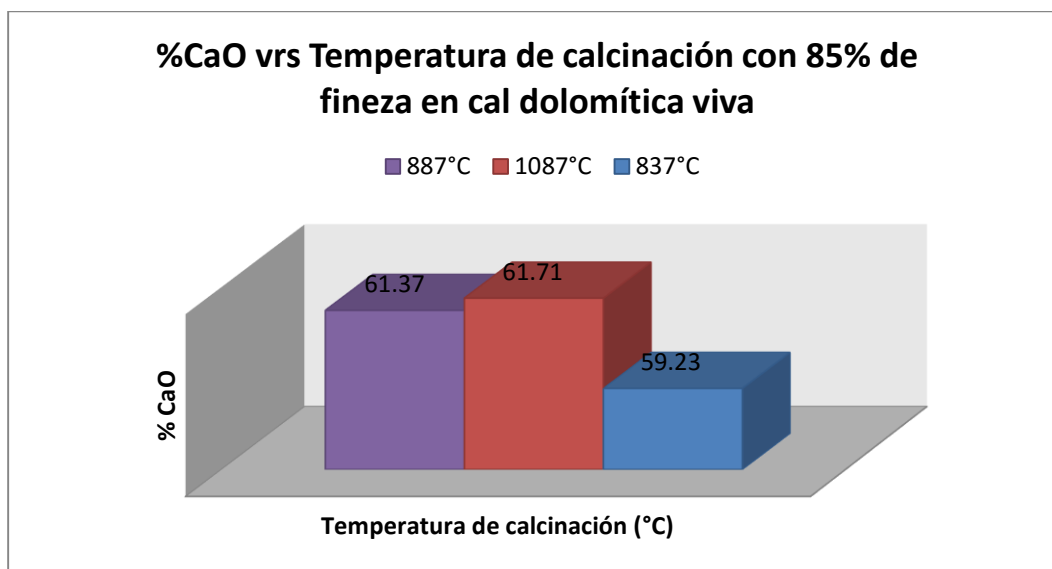


Figura 46. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 75% pasante tamiz 200.

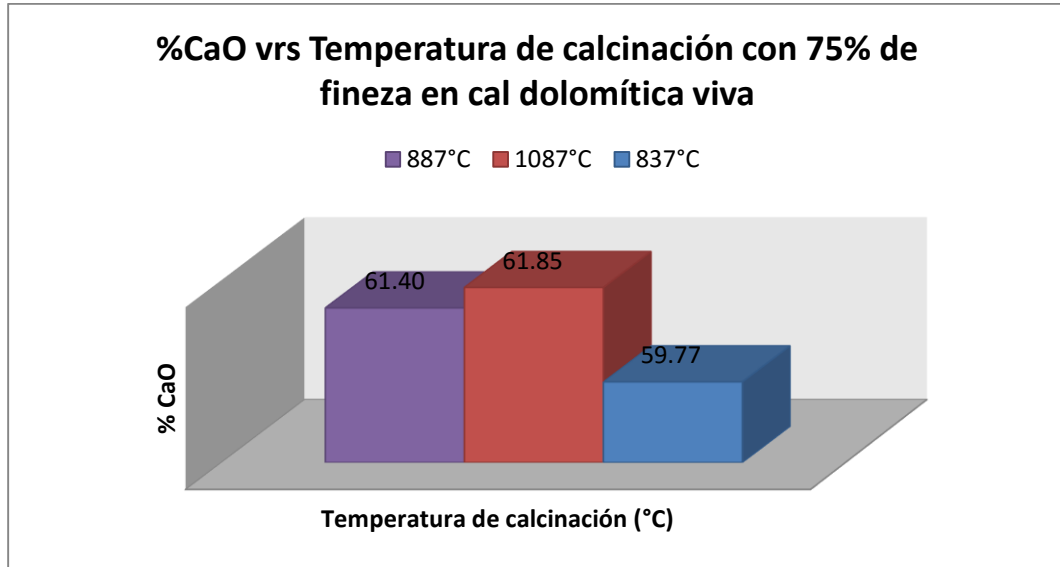


Figura 47. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 94% pasante tamiz 200.

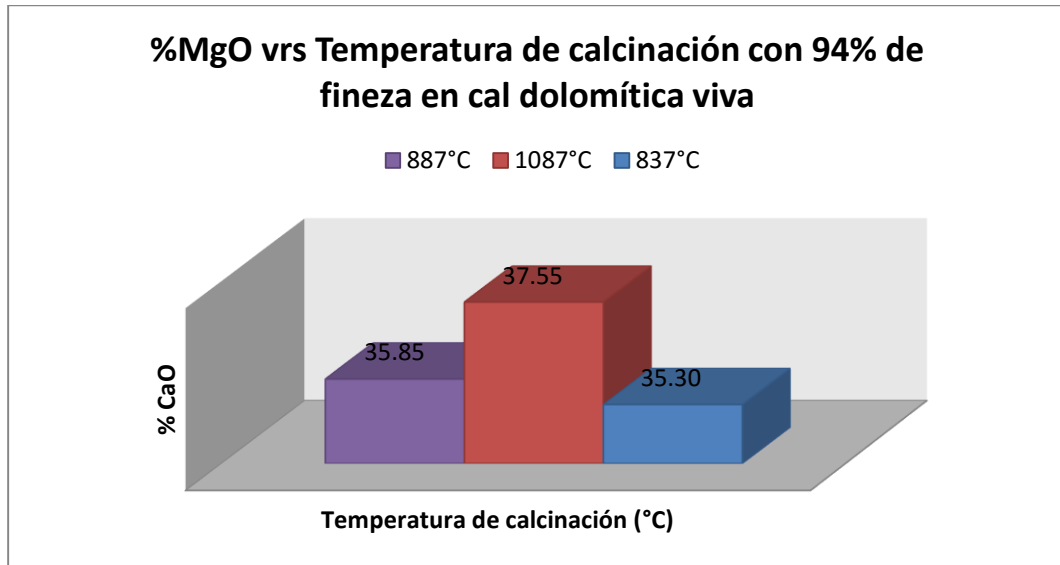


Figura 48. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 85% pasante tamiz 200.

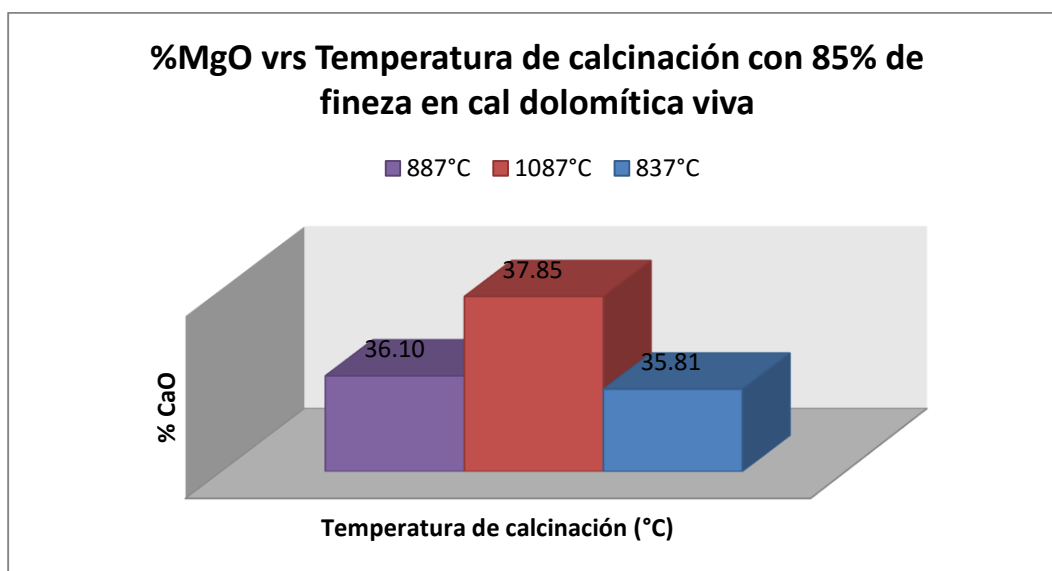
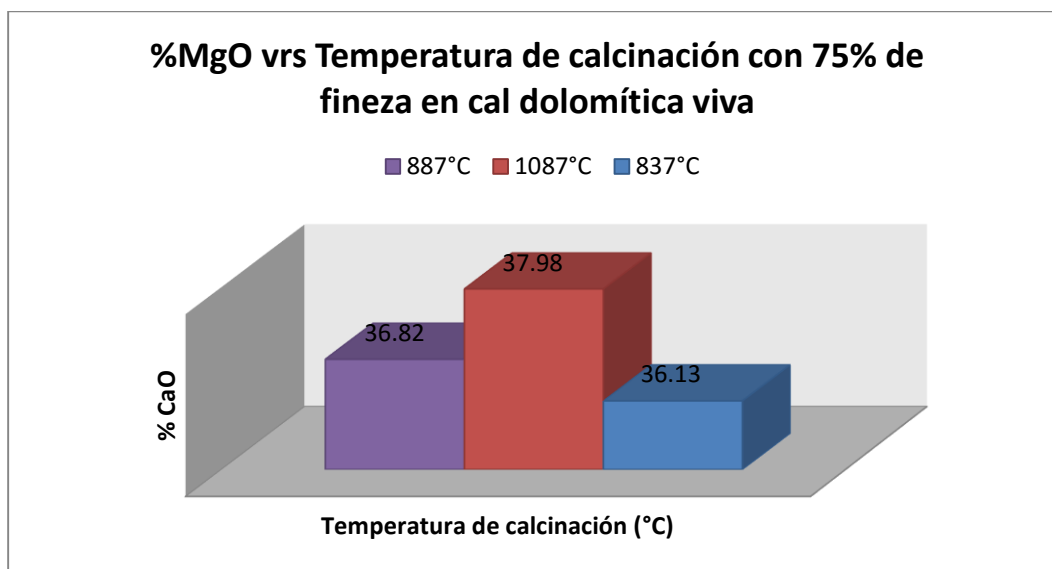


Figura 49. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal viva dolomítica con 75% pasante tamiz 200.



3. Análisis del tamaño de partícula en el equipo de distribución de tamaño de partícula (PSD). Los análisis elaborados en el equipo de distribución de tamaño de partícula muestran un listado de valores que definen la cantidad relativa, típicamente por masa, de partículas según a su tamaño. Esto nos permite observar las diferencias en el tamaño de partícula según los

diferentes valores escogidos para la variable fineza, así como el cambio en el tamaño de la partícula tras su hidratación.

El análisis ha sido utilizado con el fin de observar las diferencias en la distribución del tamaño de las partículas en las muestras trabajadas. Pues como ya se mencionó se utilizó como variable la fineza que posee la cal a las diferentes temperaturas, finezas que inicialmente se monitorearon mediante el análisis utilizando tamiz 200 y posteriormente con el equipo PSD.

Debido a que se trabajó en duplicado, se obtiene resultados promedios con su desviación estándar para cada temperatura. A continuación, se muestra los resultados para cada muestra y los resultados promedios de las réplicas.

- a. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. El análisis de la distribución de las partículas en la muestra nos permite determinar el tamaño promedio de las partículas y con ello comparar los datos con los de las otras cales obtenidas a otras temperaturas. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 71 para ambas muestras, y sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 72 y 73.

Cuadro 71. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	44.2	5.3	4.0	4.2	10.4
	85	1.0	76.8	6.3	5.7	4.7	12.5
	75	1.0	84.8	7.2	8.1	5.1	15.6
2	94	1.0	49.8	5.9	4.7	4.6	11.8
	85	1.0	85.0	6.5	5.7	4.9	13.1
	75	1.0	87.2	6.9	5.9	5.3	15.1

Cuadro 72. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	47.0	5.6	4.4	4.4	11.1
85	1.0	80.9	6.4	5.7	4.8	12.8
75	1.0	86.0	7.1	7.0	5.2	15.4

Cuadro 73. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	4.0	0.4	0.5	0.3	1.0
85	0.00	5.8	0.1	0.0	0.1	0.4
75	0.00	1.7	0.2	1.6	0.1	0.4

En el Cuadro 71 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 900°C la piedra caliza cálcica. El Cuadro muestra el tamaño mínimo y máximo encontrado en la muestra, así como el promedio y desviación del tamaño de partícula. Además de ello, muestran que el 50% de la muestra analizada posee un tamaño menor o igual al número indicado, de la misma manera se interpreta que para el 90% la muestra analizada posee un tamaño menor o igual al resultado obtenido. Los resultados mostrados en los Cuadros 72 y 73, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

b. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. El análisis de tamaño de partícula permite monitorear la fineza del material a trabajar, debido a que esta es una de las variables independientes del estudio. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 74 en el caso del duplicado, para lo cual su promedio y desviación estándar se muestra en los Cuadros 75 y 76.

Cuadro 74. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	43.5	5.4	4.4	4.4	11.0
	85	1.0	74.3	5.8	5.9	4.8	13.3
	75	1.0	79.7	6.3	4.7	5.5	14.7
2	94	1.0	43.0	4.8	3.9	3.8	10.4
	85	1.0	73.0	5.2	5.8	4.3	12.5
	75	1.0	70.3	5.6	4.9	4.2	14.4

Cuadro 75. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	43.3	5.1	4.2	4.1	10.7
85	1.0	73.7	5.5	5.9	4.6	12.9
75	1.0	75.0	6.0	4.8	4.9	14.6

Cuadro 76. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
85	0.00	0.9	0.4	0.1	0.4	0.6
75	0.00	6.6	0.5	0.1	0.9	0.2

En el Cuadro 74 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 850°C la piedra caliza cálcica. Acá se puede observar similitud en el tamaño de partícula entre las cales de la calcinación óptima y las cales semicalcinadas, tanto en los máximos, promedios, 50% como en el 90%. Los resultados mostrados en los Cuadros 75 y 76, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

c. Muestras de cal viva cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. El análisis de tamaño de partícula permite observar los diferentes tamaños de partícula en una muestra con diferente fineza que pasa tamiz 200. Para el caso de la sobrecalcinación la muestra se encuentra más densa lo que lleva a obtener partículas de mayor tamaño comparado con muestras semicalcinadas o calcinadas óptimamente. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 77 en el caso del duplicado, para lo cual su promedio y desviación estándar se muestra en los Cuadros 78 y 79.

Cuadro 77. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	85.7	6.2	8.9	4.4	11.4
	85	1.0	95.8	7.0	9.1	4.7	12.3
	75	1.0	98.8	7.8	5.8	5.0	13.5
2	94	1.0	76.2	6.0	7.0	4.3	11.3
	85	1.0	89.0	6.6	6.3	4.6	12.5
	75	1.0	97.0	7.4	4.8	4.8	13.2

Cuadro 78. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	81.0	6.1	8.0	4.4	11.4
85	1.0	92.4	6.8	7.7	4.7	12.4
75	1.0	97.9	7.6	5.3	4.9	13.4

Cuadro 79. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	6.7	0.1	1.3	0.1	0.1
85	0.00	4.8	0.3	2.0	0.1	0.1
75	0.00	1.3	0.3	0.7	0.1	0.2

En el Cuadro 77 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 1100°C la piedra caliza cálcica. Acá se puede observar una leve diferencia en el tamaño de partícula entre las cales sobrecalcinadas, de la calcinación óptima y de la semicalcinación, en los datos obtenidos en los máximos y promedios. Los resultados mostrados en los Cuadros 78 y 79, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

- d. Gráficos de comparación del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 en las cales vivas cálcicas.

Figura 50. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 900°C.

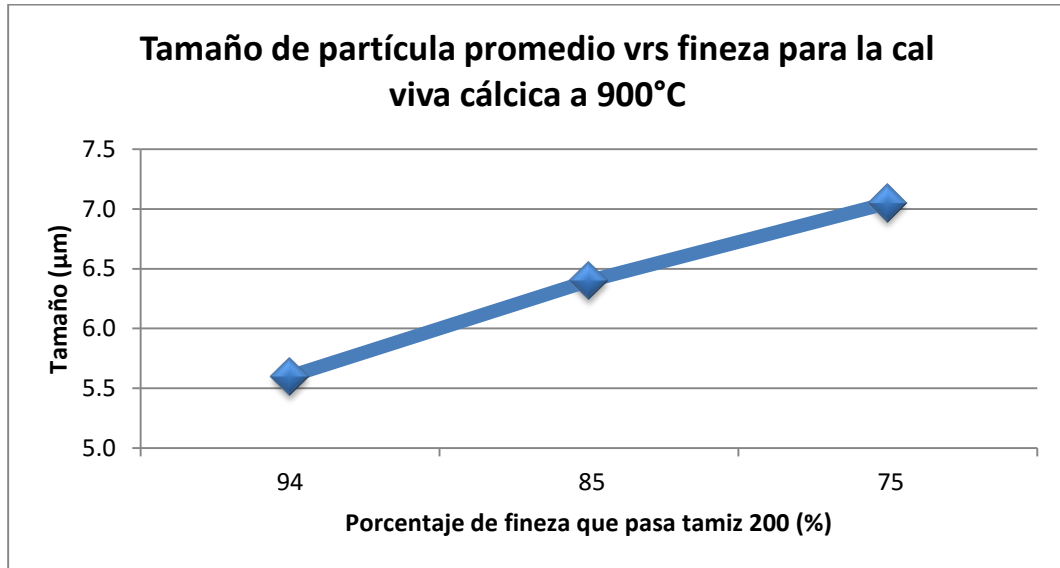


Figura 51. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 850°C.

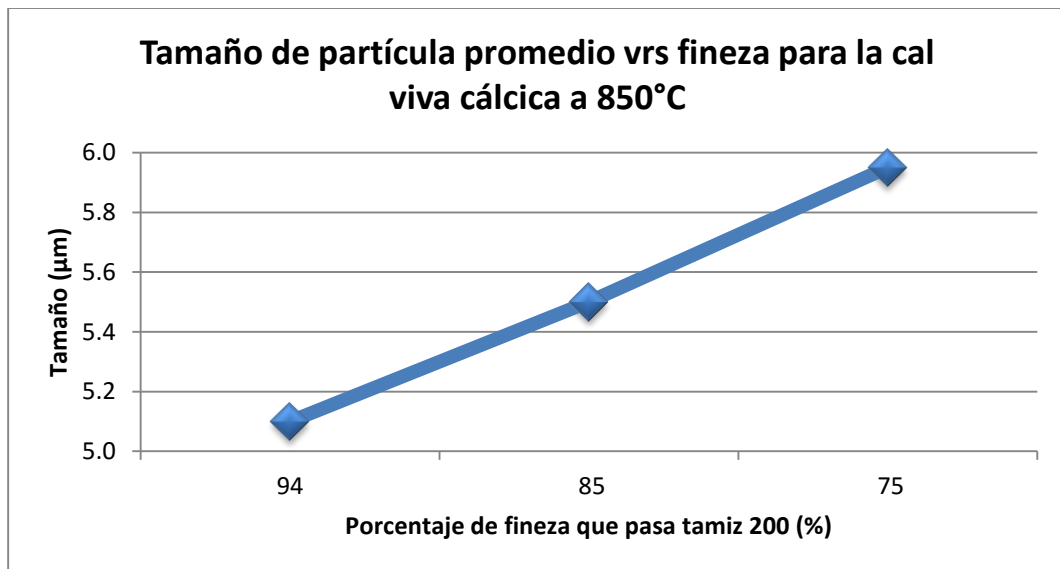
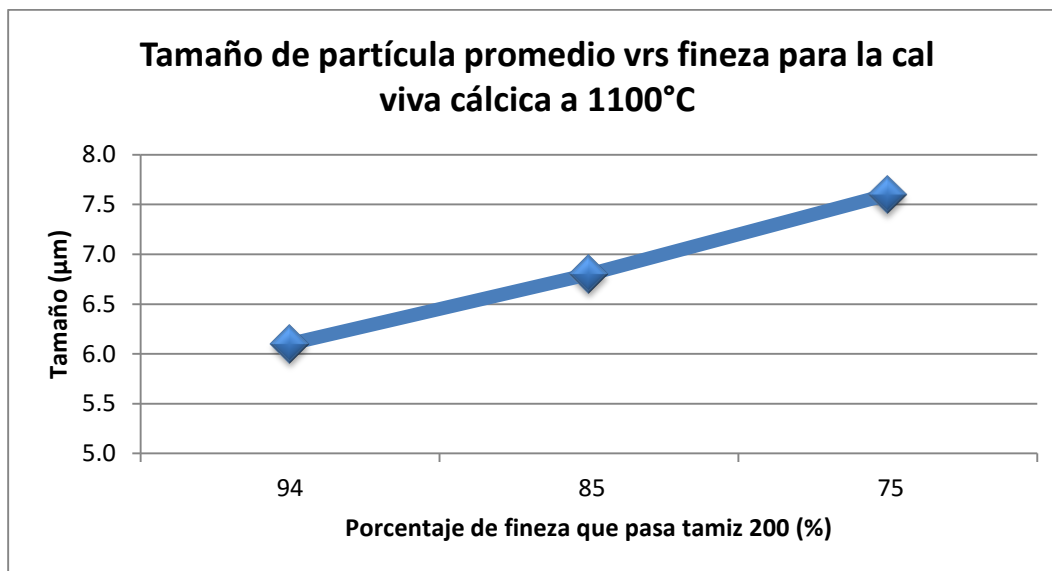


Figura 52. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva cálcica a 1100°C.



e. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. El análisis permite determinar el tamaño de las partículas con el fin de monitorear la fineza de cada muestra y poder comparar los resultados obtenidos con los obtenidos por las cales obtenidas a otras temperaturas. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 80 en el caso del duplicado, para lo cual su promedio y desviación estándar se muestra en los Cuadros 81 y 82.

Cuadro 80. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	53.8	5.3	5.4	4.5	10.5
	85	1.0	60.5	5.8	4.2	4.7	11.4
	75	1.0	83.8	6.0	4.4	4.9	12.7
2	94	1.0	63.1	6.3	5.7	4.7	12.3
	85	1.0	68.9	6.7	6.4	5.0	13.6
	75	1.0	89.7	6.9	6.6	5.2	14.0

Cuadro 81. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	58.5	5.8	5.6	4.6	11.4
85	1.0	64.7	6.3	5.3	4.9	12.5
75	1.0	86.8	6.5	5.5	5.1	13.4

Cuadro 82. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	6.6	0.7	0.2	0.1	1.3
85	0.00	5.9	0.6	1.6	0.2	1.6
75	0.00	4.2	0.6	1.6	0.2	0.9

En el Cuadro 80 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 887°C la piedra caliza dolomítica. En el Cuadro puede observarse el tamaño máximo determinado por el equipo, además del promedio y desviación en el tamaño de partícula. Acá puede observarse tamaños similares a los obtenidos para cales a 900°C de la caliza cálcica. Los resultados mostrados en los Cuadros 81 y 82, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

f. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Con el fin de monitorear la fineza del material se muestran los resultados en el Cuadro 83 en el caso del duplicado, para lo cual su promedio y desviación estándar se muestra en los Cuadros 84 y 85.

Cuadro 83. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	55.3	5.4	4.5	4.1	10.9
	85	1.0	63.3	5.6	4.7	4.5	11.6
	75	1.0	88.0	5.8	4.7	4.9	12.5
2	94	1.0	74.3	6.0	5.1	4.6	11.7
	85	1.0	87.0	6.9	6.7	5.0	14.3
	75	1.0	96.8	7.9	10.2	5.6	17.7

Cuadro 84. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	64.8	5.7	4.8	4.4	11.3
85	1.0	75.2	6.3	5.7	4.8	13.0
75	1.0	92.4	6.9	7.5	5.3	15.1

Cuadro 85. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	13.4	0.4	0.4	0.4	0.6
85	0.00	16.8	0.9	1.4	0.4	1.9
75	0.00	6.2	1.5	3.9	0.5	3.7

En el Cuadro 83 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 837°C la piedra caliza dolomítica. Aquí puede observarse similitudes en el tamaño de partícula entre cales óptimamente calcinadas y semicalcinadas, con pequeños incrementos en semicalcinadas en el análisis del 90% de la muestra. Los resultados mostrados en los Cuadros 84 y 85, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

- g. Muestras de cal viva dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Para el caso de muestras sobrecalcinadas nos permite observar las diferencias de tamaño, no solo

entre finezas sino entre temperaturas. Para el caso de la sobrecalcinación la muestra se encuentra más densa lo que lleva a obtener partículas de mayor tamaño comparado con muestras semicalcinadas o calcinadas óptimamente. Los resultados pueden ser observados en el Cuadro 86 en el caso del duplicado, el promedio y desviación estándar en los Cuadros 87 y 88.

Cuadro 86. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	76.6	6.3	6.7	4.5	13.2
	85	1.0	82.9	6.7	6.1	4.7	13.5
	75	1.0	91.4	7.4	7.0	5.2	16.0
2	94	1.0	78.5	6.5	6.6	4.6	13.1
	85	1.0	86.1	7.2	7.7	5.0	15.6
	75	1.0	95.1	7.5	6.9	5.3	15.8

Cuadro 87. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	77.6	6.4	6.7	4.6	13.2
85	1.0	84.5	7.0	6.9	4.9	14.6
75	1.0	93.3	7.5	7.0	5.3	15.9

Cuadro 88. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal viva obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1
85	0.00	2.3	0.4	1.1	0.2	1.5
75	0.00	2.6	0.1	0.1	0.1	0.1

En el Cuadro 86 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal viva obtenida al calcinar a 1087°C la piedra caliza dolomítica. Acá se observa una ligera diferencia en el tamaño de partícula en relación a las obtenidas para cales dolomíticas semicalcinadas y calcinadas óptimamente, especialmente en

los resultados de los máximos. Los resultados mostrados en los Cuadros 87 y 88, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material.

- h. Gráficos de comparación del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 en las cales vivas dolomíticas.

Figura 53. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 887°C.

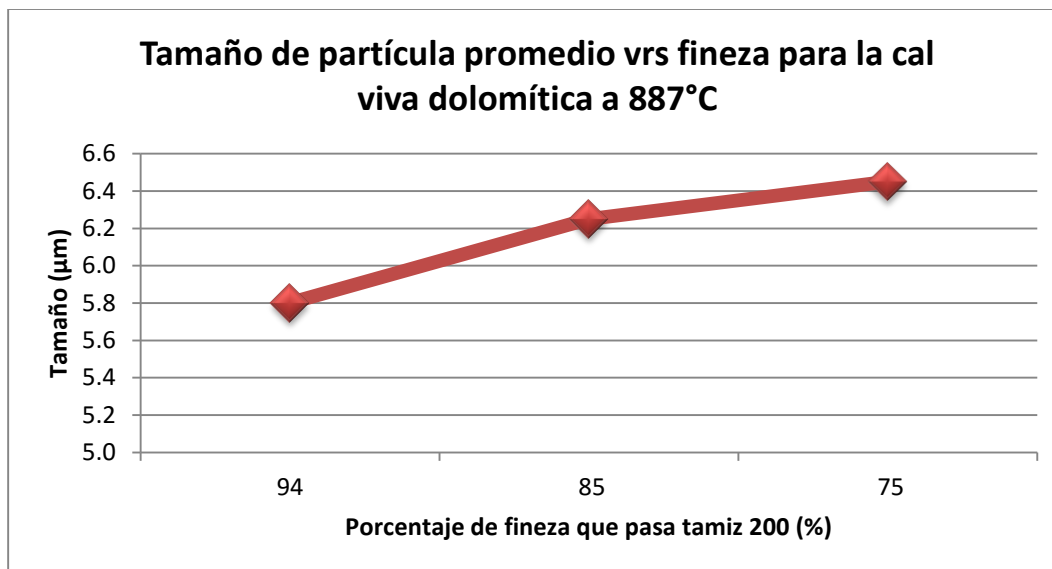


Figura 54. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 837°C.

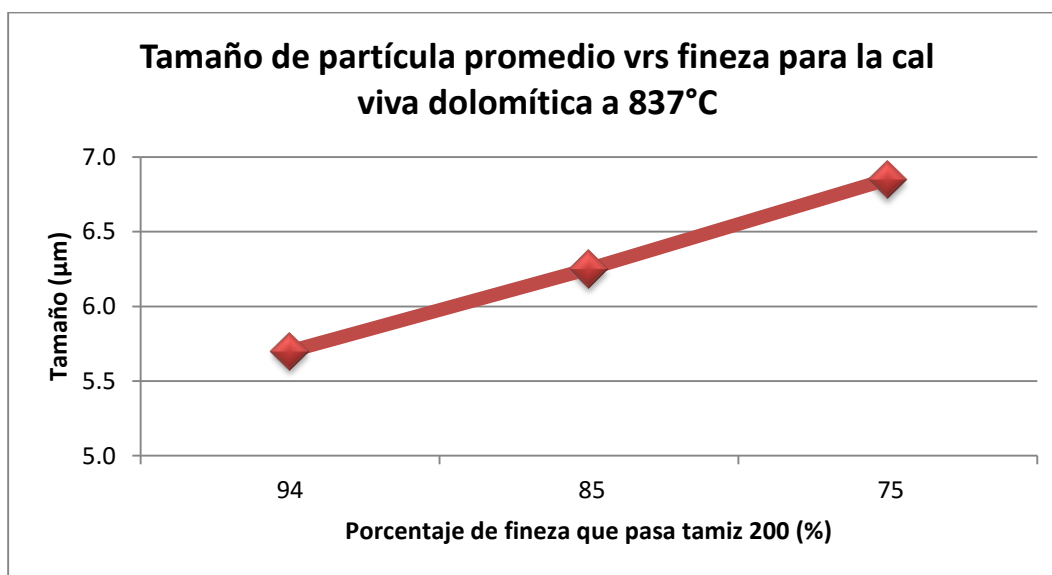
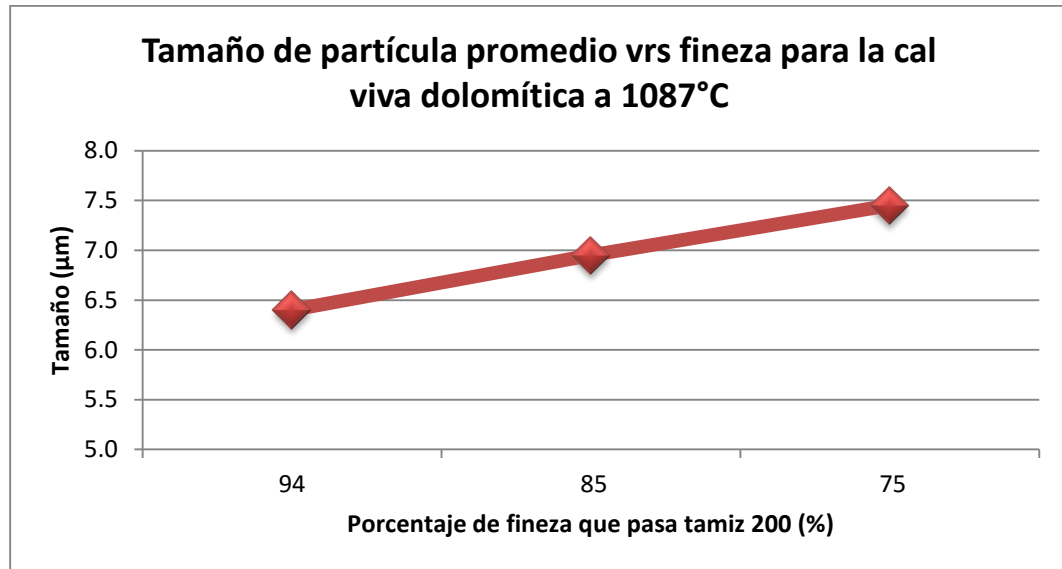


Figura 55. Gráfica del tamaño de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva dolomítica a 1087°C.



C. Análisis de cales hidratadas cálcicas y dolomíticas obtenidas a partir de la hidratación de cales vivas.

1. Pérdida al fuego. El análisis de pérdida al fuego que posee el material tras su hidratación es importante como control de calidad del mismo. Mediante el análisis de pérdida al fuego es posible observar el porcentaje de carbonato que no se transformó a óxido y para el caso de cales hidratadas, el porcentaje de óxido de calcio y/o magnesio que logró hidratarse. Con ello, puede llevarse un control de la cantidad de agua que debe ser añadida para producir cales hidratadas con un porcentaje de pérdida en el rango de 23% a 25%. Los resultados de pérdida al fuego para las distintas muestras se muestran a continuación.

Para producir cales hidratadas se añadió el agua suficiente para alcanzar un valor dentro del rango antes mencionado. Añadiendo con ayuda de una probeta pequeñas cantidades y obteniendo la pérdida al fuego hasta lograr una cal hidratada. Al igual que el tiempo de calcinación, la cantidad de agua y la pérdida al fuego para cales hidratadas son variables que deben controlarse y mantenerse constantes, pues no son parte de las variables de esta investigación.

- a. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. Para el caso de las muestras de cal viva cálcicas obtenidas mediante la calcinación a la

temperatura óptima de 900°C, designada mediante el análisis de TGA antes mencionados, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 89. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.96
	85	24.19
	75	23.22
2	94	23.77
	85	23.18
	75	24.54

Cuadro 90. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 900°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	24.37	0.84
85	23.69	0.71
75	23.88	0.93

Como puede observarse en los Cuadros 89 y 90, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra, lo que podrá comprobarse mediante los análisis en los diferentes equipos trabajados.

b. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Para el caso de las muestras de cal viva cálcicas obtenidas mediante la calcinación a la temperatura de semicalcinación igual a 850°C, designada mediante el análisis de TGA antes mencionados, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 91. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.84
	85	24.98
	75	24.82
2	94	24.70
	85	24.95
	75	24.65

Cuadro 92. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 850°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	24.77	0.32
85	24.97	0.02
75	24.74	0.12

Como puede observarse en los Cuadros 91 y 92, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra.

c. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Para el caso de las muestras de cal viva cálcicas obtenidas mediante la calcinación a la temperatura de sobrecalcinación igual a 1100°C, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 93. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.34
	85	23.58
	75	24.21
2	94	24.70
	85	23.57
	75	24.02

Cuadro 94. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada cálcica provenientes de la calcinación a 1100°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	24.52	0.25
85	23.58	0.01
75	24.12	0.13

Como puede observarse en los Cuadros 93 y 94, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra.

d. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C.

Para el caso de las muestras de cal viva dolomíticas obtenidas mediante la calcinación a la temperatura óptima de 887°C, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 95. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.06
	85	24.81
	75	24.46
2	94	23.13
	85	24.73
	75	23.35

Cuadro 96. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 887°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	23.60	0.66
85	24.77	0.06
75	23.91	0.78

Como puede observarse en los Cuadros 95 y 96, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra.

e. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C.

Para el caso de las muestras de cal viva dolomíticas obtenidas mediante la temperatura de semicalcinación igual a 887°C, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 97. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.32
	85	24.79
	75	23.82
2	94	23.49
	85	24.52
	75	23.19

Cuadro 98. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 837°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	23.91	0.59
85	24.66	0.19
75	23.51	0.45

Como puede observarse en los Cuadros 97 y 98, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra.

f. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C.

Para el caso de las muestras de cal viva dolomíticas obtenidas mediante la temperatura de sobrecalcinación igual a 1087°C, la pérdida al fuego tras la hidratación debe estar en el rango entre 23% y 25%. Los resultados obtenidos para el duplicado trabajado y su promedio se muestran a continuación.

Cuadro 99. Pérdida al fuego obtenida para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas.

Mx	Fineza (%)	Pérdida al fuego ($\pm 0.02\%$)
1	94	24.37
	85	23.56
	75	23.42
2	94	23.83
	85	24.13
	75	25.00

Cuadro 100. Pérdida al fuego promedio y desviación estándar obtenidas para las muestras de cal hidratada dolomítica provenientes de la calcinación a 1087°C para sus tres finezas.

Fineza (%)	Pérdida al fuego (%)	Desviación estándar (%)
94	24.10	0.38
85	23.85	0.40
75	24.21	1.12

Como puede observarse en los Cuadros 99 y 100, los porcentajes de pérdida al fuego son altos y se encuentran dentro del rango establecido. Esto indica que se llevó a cabo una buena hidratación de la muestra.

2. **Análisis de cales hidratadas por fluorescencia de rayos X (XRF).** Los análisis realizados en el equipo de fluorescencia de rayos X, al igual que para las cales vivas y la materia prima, nos permite monitorear el porcentaje de óxidos presentes tras la hidratación de las cales vivas. Nos permite observar diferencias entre los porcentajes obtenidos para cales vivas e hidratadas, pues gran parte del óxido es convertido al hidróxido correspondiente. El programa utilizado para el análisis es el mismo que se utilizó para el análisis de cales vivas.

Este análisis permite observar las diferencias entre cales hidratadas vivas a las diferentes temperaturas, mostrando porcentajes basados en el rango escogido de pérdida al fuego, como se mencionó con anterioridad. Además de ello, nos permite monitorear los porcentajes de óxidos lo que tendrá repercusión sobre la variable respuesta.

Debido a que se trabajó en duplicado, se muestra a continuación los resultados para muestra en cada temperatura; así como su promedio y desviación estándar.

a. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. Con este análisis se puede observar las diferencias obtenidas en los óxidos para cales vivas e hidratadas, y como el gado de hidratación afecta la composición de las cales. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 101, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 102 y 103.

Cuadro 101. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	NaO ₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.42	0.08	0.00	74.80	1.02	0.12	0.01	0.08	24.96	101.49
	85	0.40	0.05	0.00	75.44	1.15	0.11	0.01	0.08	24.19	101.43
	75	0.48	0.09	0.00	75.95	1.11	0.11	0.00	0.08	23.22	101.04
2	94	0.34	0.04	0.00	75.41	1.02	0.12	0.00	0.00	23.77	100.70
	85	0.39	0.07	0.00	76.26	1.11	0.11	0.00	0.04	23.18	101.16
	75	0.42	0.10	0.00	75.17	1.09	0.12	0.01	0.03	24.54	101.48

Cuadro 102. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C.

Fineza (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
94	0.42	0.09	0.00	75.59	0.99	0.12	0.01	0.03
85	0.38	0.08	0.00	75.79	1.13	0.12	0.00	0.07
75	0.47	0.10	0.00	75.20	1.07	0.12	0.00	0.05

Cuadro 103. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 900°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
94	0.06	0.04	0.00	0.17	0.00	0.01	0.00	0.01
85	0.02	0.01	0.00	0.41	0.04	0.02	0.01	0.01
75	0.08	0.04	0.00	0.67	0.04	0.00	0.01	0.04

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 101 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una calcinación óptima. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, pues se observa una gran diferencia en el porcentaje de óxido de calcio e

inclusive en el porcentaje de óxido de magnesio. Aunque éste último este en un porcentaje muy pequeño. Incluso se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 102 y 103 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones son pequeñas para algunos datos, lo que indica poca dispersión en cuanto a ese compuesto, sin embargo, para algunos es elevado debido a la ausencia del compuesto en una muestra y en otra no, lo que demuestra gran dispersión.

b. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Las muestras obtenidas del proceso de hidratación de muestras semicalcinadas permiten distinguir las diferencias de los porcentajes al hidratar los óxidos. Las diferencias para estas muestras no deben ser grandes ya que las cales vivas poseen porcentajes bajos de óxido de calcio. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 104, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 105 y 106.

Cuadro 104. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.43	0.00	0.00	75.13	0.90	0.11	0.00	0.02	24.84	101.43
	85	0.40	0.00	0.00	74.93	0.85	0.12	0.00	0.03	24.98	101.31
	75	0.41	0.00	0.00	75.07	0.89	0.11	0.00	0.00	24.82	101.30
2	94	0.51	0.00	0.00	75.12	0.98	0.08	0.00	0.01	24.70	101.40
	85	0.40	0.00	0.00	75.02	1.02	0.10	0.00	0.00	24.95	101.49
	75	0.50	0.01	0.00	75.21	0.88	0.10	0.00	0.01	24.65	101.36

Cuadro 105. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.47	0.00	0.00	75.13	0.94	0.10	0.00	0.02
85	0.40	0.00	0.00	74.98	0.94	0.11	0.00	0.02
75	0.46	0.01	0.00	75.14	0.89	0.11	0.00	0.01

Cuadro 106. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 850°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. Na ₂ O (%)
94	0.06	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.00	0.01
85	0.00	0.00	0.00	0.06	0.12	0.01	0.00	0.02
75	0.06	0.01	0.00	0.10	0.01	0.01	0.00	0.01

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 104 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una semicalcinación. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, pues se observa una leve diferencia en el porcentaje de óxido de calcio e inclusive en el porcentaje de óxido de magnesio. Aunque éste último se encuentre en pequeñas cantidades en ambos tipos de cal. Incluso se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 105 y 106 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones para algunos datos son menores, en especial aquellas presentes en ambas muestras; en tanto que para algunos son iguales o mayores a los datos que representan debido a la ausencia en una de las muestras.

c. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Las muestras obtenidas del proceso de hidratación de muestras sobrecalcinadas permiten distinguir las diferencias de los porcentajes al hidratar los óxidos. Las diferencias para estas muestras deben ser similares a las obtenidas para las muestras de cales del proceso de calcinación óptimo. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 107, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 108 y 109.

Cuadro 107. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	Na ₂ O (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.38	0.00	0.00	75.33	1.36	0.08	0.00	0.00	24.34	101.49
	85	0.41	0.00	0.00	75.77	1.30	0.12	0.00	0.00	23.58	101.18
	75	0.56	0.00	0.00	75.38	1.35	0.11	0.00	0.00	24.10	101.50
2	94	0.37	0.00	0.00	75.23	1.14	0.06	0.00	0.00	24.70	101.50
	85	0.43	0.00	0.00	75.94	1.25	0.11	0.00	0.00	23.57	101.30
	75	0.51	0.00	0.00	75.47	1.32	0.12	0.00	0.05	24.02	101.49

Cuadro 108. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.38	0.00	0.00	75.28	1.25	0.07	0.00	0.00
85	0.42	0.00	0.00	75.86	1.28	0.12	0.00	0.00
75	0.54	0.00	0.00	75.43	1.34	0.12	0.00	0.03

Cuadro 109. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva cálcica proveniente del proceso a 1100°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO₂ (%)	Desv. Std. Al₂O₃ (%)	Desv. Std. Fe₂O₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO₃ (%)	Desv. Std. K₂O (%)	Desv. Std. NaO₂ (%)
94	0.01	0.00	0.00	0.07	0.16	0.01	0.00	0.00
85	0.01	0.00	0.00	0.12	0.04	0.01	0.00	0.00
75	0.04	0.00	0.00	0.06	0.02	0.01	0.00	0.04

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 107 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una sobrecalcinación. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, en donde se observa una diferencia significativa en el porcentaje de óxido de calcio. Incluso se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 108 y 109 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones para algunos datos son menores, en especial aquellos presentes en ambas muestras; en tanto que para algunos son iguales o mayores a los datos que representan debido a la ausencia en una de las muestras.

d. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. Las muestras obtenidas del proceso de hidratación de muestras calcinadas óptimamente de calizas dolomíticas permiten distinguir entre los diferentes porcentajes cuando se transforma el óxido de hidróxido. Las diferencias entre estas muestras serán elevadas, al igual que para las cales cálcicas a 900°C y casi en la misma diferencia. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 110, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 111 y 112.

Cuadro 110. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.16	0.00	0.00	48.89	28.10	0.10	0.00	0.16	24.06	101.47
	85	0.13	0.00	0.00	48.20	27.77	0.11	0.00	0.10	24.81	101.12
	75	0.12	0.00	0.00	48.53	28.05	0.12	0.00	0.17	24.46	101.45
2	94	0.11	0.00	0.10	49.29	28.65	0.18	0.00	0.02	23.13	101.48
	85	0.06	0.00	0.11	48.16	28.07	0.16	0.00	0.02	24.73	101.31
	75	0.11	0.00	0.11	49.12	28.57	0.18	0.00	0.02	23.35	101.46

Cuadro 111. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.14	0.00	0.05	49.09	28.38	0.14	0.00	0.09
85	0.10	0.00	0.06	48.18	27.92	0.14	0.00	0.06
75	0.12	0.00	0.06	48.83	28.31	0.15	0.00	0.10

Cuadro 112. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 887°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO₂ (%)	Desv. Std. Al₂O₃ (%)	Desv. Std. Fe₂O₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO₃ (%)	Desv. Std. K₂O (%)	Desv. Std. NaO₂ (%)
94	0.04	0.00	0.07	0.28	0.39	0.06	0.00	0.10
85	0.05	0.00	0.08	0.03	0.21	0.04	0.00	0.06
75	0.01	0.00	0.08	0.42	0.37	0.04	0.00	0.11

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 110 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una calcinación óptima. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, en donde se observa una diferencia significativa en el porcentaje de óxido de calcio y magnesio. Incluso se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 111 y 112 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones para algunos datos son menores, en especial aquellos presentes en ambas muestras; en tanto que para algunos son iguales o mayores a los datos que representan debido a la ausencia en una de las muestras.

e. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Las muestras obtenidas del proceso de hidratación de muestras semicalcinadas de calizas dolomíticas permiten distinguir los diferentes porcentajes cuando se transforma el óxido de hidróxido. Las diferencias entre estas muestras serán elevadas, pero las diferencias serán menores que las obtenidas para cales a 887°C y 900°C. Además, los resultados serán diferentes a los que se obtienen para las cales cálcicas hidratadas de la semicalcinación a 850°C. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 113, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 114 y 115.

Cuadro 113. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C.

Mx	Fineza (%)	SiO ₂ (±0.01 %)	Al ₂ O ₃ (±0.01 %)	Fe ₂ O ₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO ₃ (±0.01 %)	K ₂ O (±0.01 %)	NaO ₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.19	0.00	0.00	46.86	27.86	0.10	0.00	0.06	24.32	99.39
	85	0.16	0.00	0.00	46.55	27.39	0.12	0.00	0.06	24.79	99.07
	75	0.14	0.00	0.00	47.22	27.84	0.11	0.00	0.05	23.82	99.18
2	94	0.12	0.01	0.03	47.46	27.97	0.06	0.02	0.00	23.49	99.16
	85	0.07	0.00	0.01	46.95	27.50	0.09	0.02	0.00	24.52	99.16
	75	0.09	0.00	0.00	47.73	28.14	0.07	0.00	0.00	23.19	99.22

Cuadro 114. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C.

Fineza (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO ₂ (%)
94	0.16	0.01	0.02	47.16	27.92	0.08	0.01	0.03
85	0.12	0.00	0.01	46.75	27.45	0.11	0.01	0.03
75	0.12	0.00	0.00	47.48	27.99	0.09	0.00	0.03

Cuadro 115. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 837°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. NaO ₂ (%)
94	0.05	0.01	0.02	0.42	0.08	0.03	0.01	0.04
85	0.06	0.00	0.01	0.28	0.08	0.02	0.01	0.04
75	0.04	0.00	0.00	0.36	0.21	0.03	0.00	0.04

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 113 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una semicalcinación. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, en donde observa una diferencia en el porcentaje de óxido de calcio y magnesio. Sin embargo, una menor diferencia comparada a las cales óptimas. Además de ello, se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 114 y 115 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones para algunos datos son menores, en especial aquellos presentes en ambas muestras; en tanto que para algunos son iguales o mayores a los datos que representan debido a la ausencia en una de las muestras.

f. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Las muestras obtenidas del proceso de hidratación de muestras sobrecalcinadas de calizas dolomíticas permiten distinguir los diferentes porcentajes cuando se transforma el óxido de hidróxido. Las diferencias entre estas muestras serán grandes. Los resultados del duplicado se muestran en el Cuadro 116, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 17 y 118.

Cuadro 116. Análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	SiO₂ (±0.01 %)	Al₂O₃ (±0.01 %)	Fe₂O₃ (±0.01 %)	CaO (±0.01 %)	MgO (±0.01 %)	SO₃ (±0.01 %)	K₂O (±0.01 %)	NaO₂ (±0.01 %)	P.F. (%)	Total (±0.01 %)
1	94	0.11	0.05	0.04	48.37	28.54	0.00	0.02	0.00	24.37	101.50
	85	0.00	0.01	0.02	48.61	29.28	0.00	0.02	0.00	23.56	101.50
	75	0.06	0.05	0.03	48.41	29.18	0.00	0.02	0.00	23.42	101.17
2	94	0.09	0.06	0.03	48.73	28.74	0.00	0.01	0.00	23.83	101.49
	85	0.08	0.03	0.04	48.69	28.84	0.00	0.02	0.00	24.13	101.83
	75	0.03	0.07	0.03	47.66	28.57	0.00	0.03	0.00	25.00	101.39

Cuadro 117. Resultados promedio del análisis de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C.

Fineza (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	NaO₂ (%)
94	0.10	0.06	0.04	48.55	28.64	0.00	0.02	0.00
85	0.04	0.02	0.03	48.65	29.06	0.00	0.02	0.00
75	0.05	0.06	0.03	48.04	28.88	0.00	0.03	0.00

Cuadro 118. Desviación estándar de los resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la hidratación de la cal viva dolomítica proveniente del proceso a 1087°C.

Fineza (%)	Desv. Std. SiO ₂ (%)	Desv. Std. Al ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. Fe ₂ O ₃ (%)	Desv. Std. CaO (%)	Desv. Std. MgO (%)	Desv. Std. SO ₃ (%)	Desv. Std. K ₂ O (%)	Desv. Std. Na ₂ O (%)
94	0.01	0.01	0.01	0.25	0.14	0.00	0.01	0.00
85	0.06	0.01	0.01	0.06	0.31	0.00	0.00	0.00
75	0.02	0.01	0.00	0.53	0.43	0.00	0.01	0.00

En donde Desv. Std.= desviación estándar

En el Cuadro 116 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al hidratar las cales vivas provenientes de una sobrecalcinación. Los resultados permiten comparar entre la cal viva y su versión hidratada, en donde se observa una mayor diferencia en el porcentaje de óxido de calcio y magnesio. Además de ello, se observa una disminución en el porcentaje de los otros óxidos, lo que indica que se formaron productos hidratados de los mismos, pero en menor proporción. Los resultados mostrados en los Cuadros 117 y 118 muestran los promedios y desviaciones estándar. Las desviaciones para algunos datos son menores, en especial aquellos presentes en ambas muestras; en tanto que para algunos son iguales o mayores a los datos que representan debido a la ausencia en una de las muestras.

- g. Gráficos de comparación de porcentaje de óxidos versus la temperatura de calcinación.

Figura 56. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 94% pasante tamiz 200.

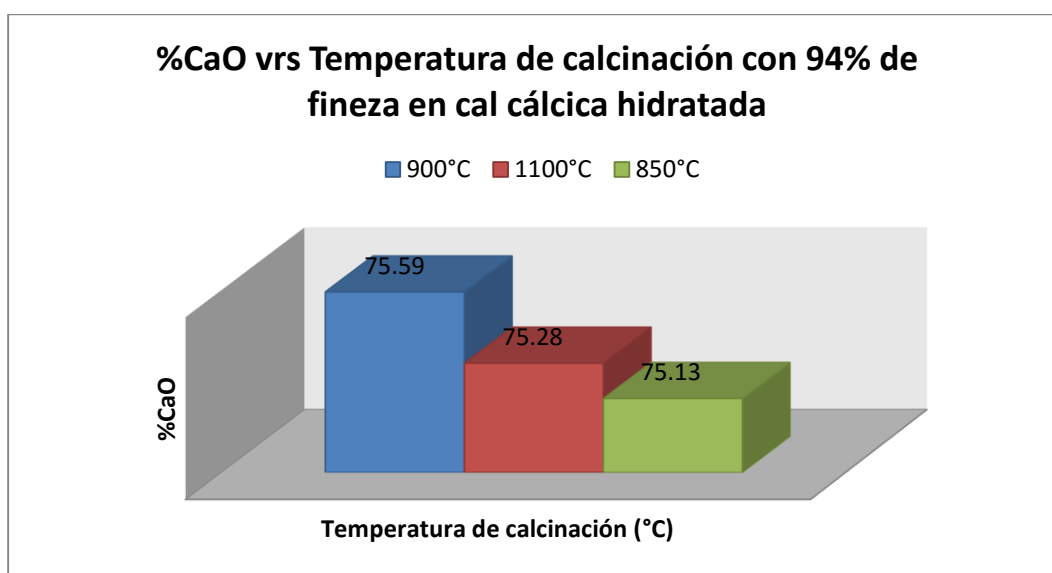


Figura 57. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 85% pasante tamiz 200.

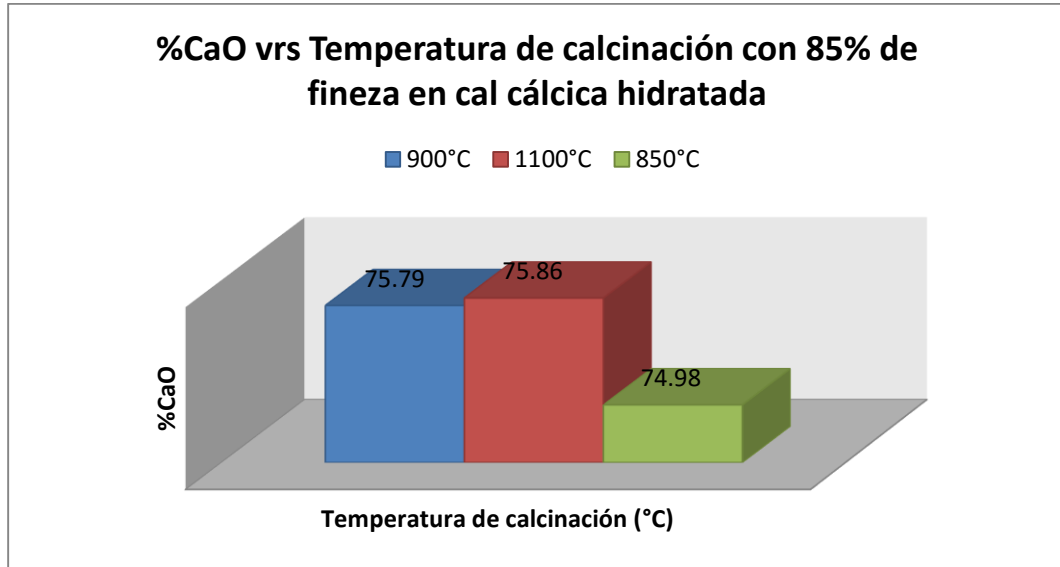


Figura 58. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada cálcica con 75% pasante tamiz 200.

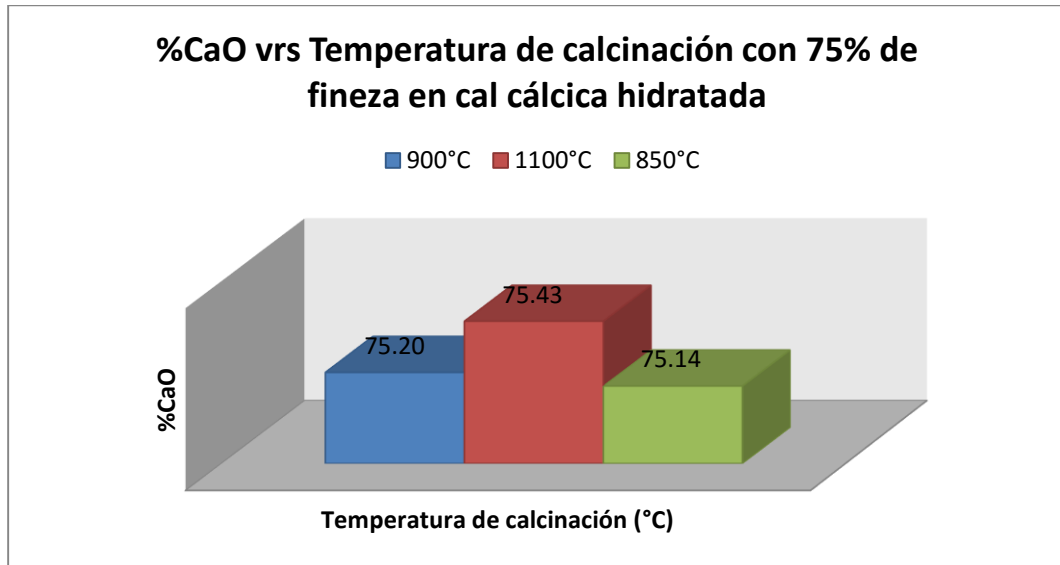


Figura 59. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 94% pasante tamiz 200.

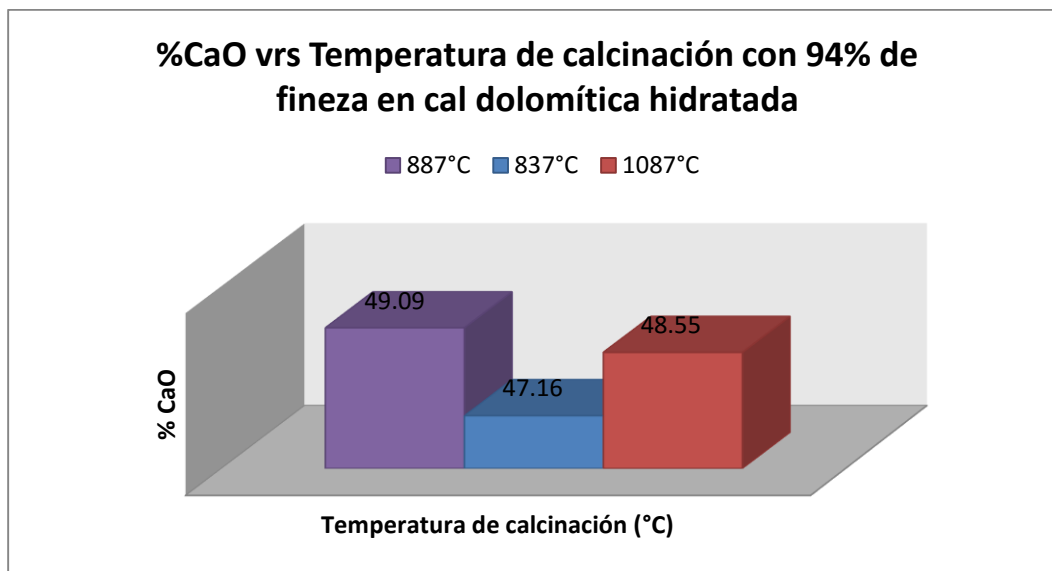


Figura 60. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 85% pasante tamiz 200.

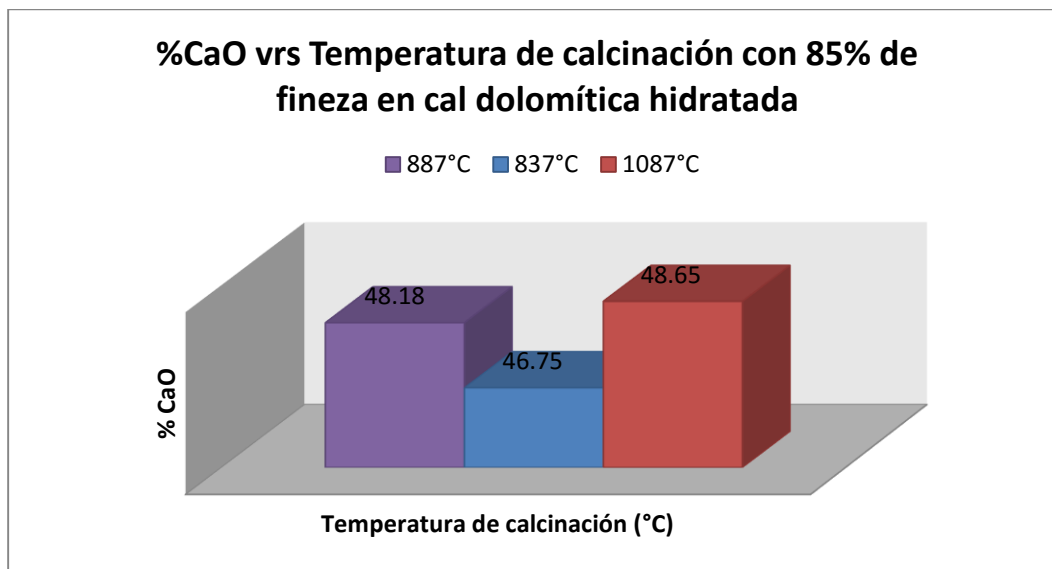


Figura 61. Gráfica de porcentaje de óxido de calcio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 75% pasante tamiz 200.

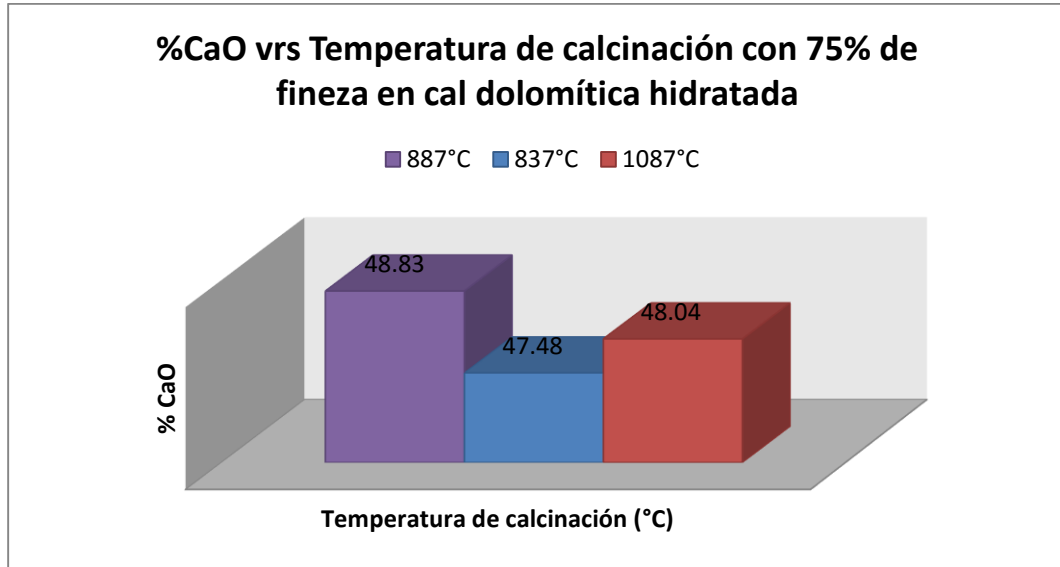


Figura 62. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 94% pasante tamiz 200.

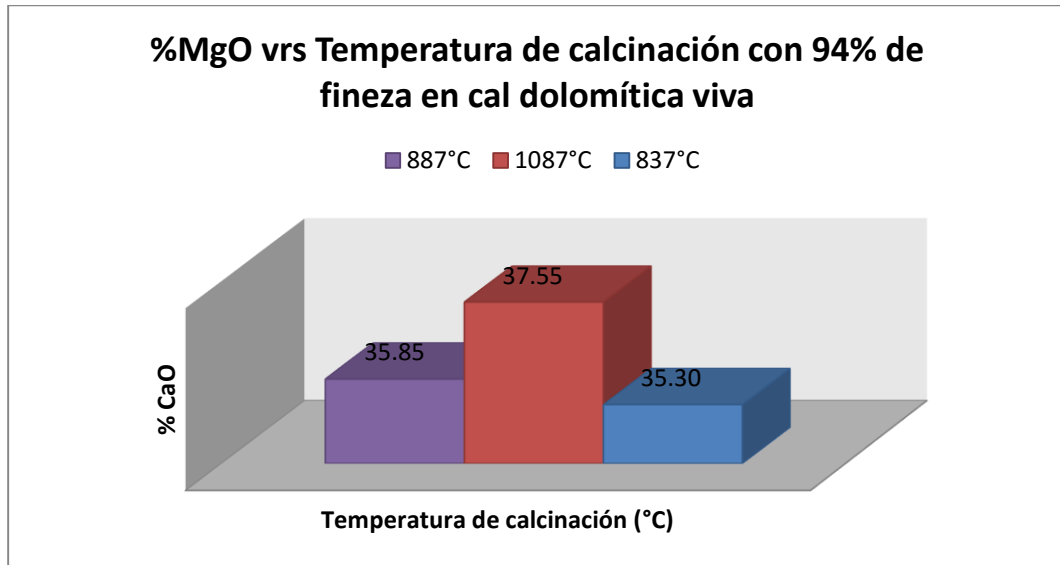


Figura 63. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 85% pasante tamiz 200.

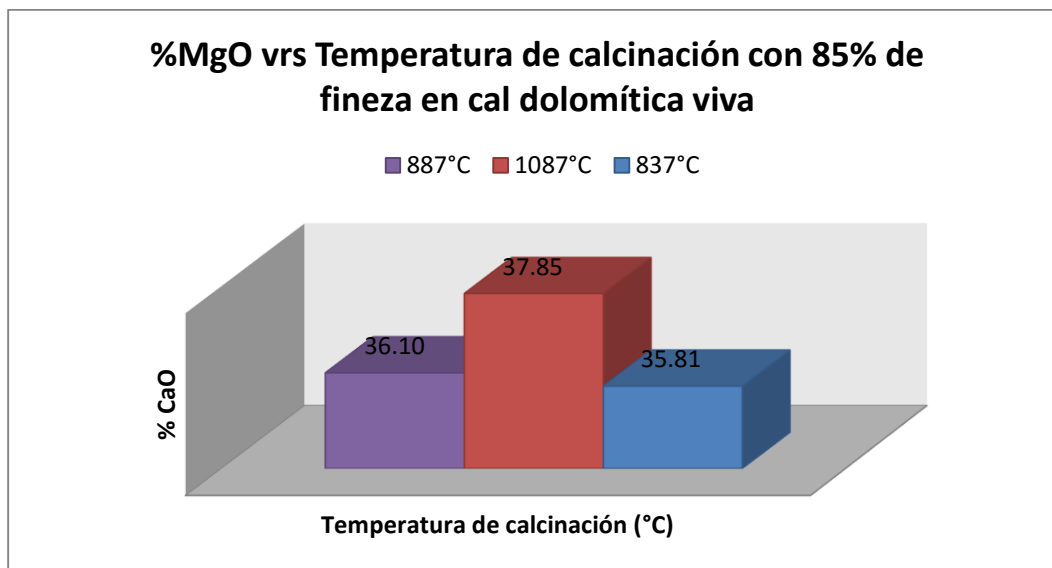
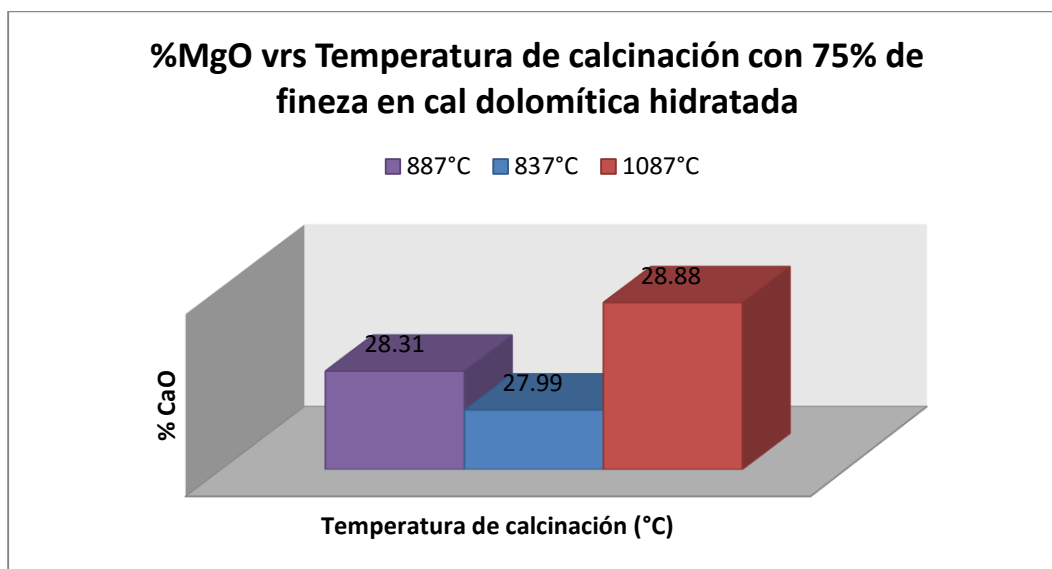


Figura 64. Gráfica de porcentaje de óxido de magnesio versus la temperatura de calcinación para muestras de cal hidratada dolomítica con 75% pasante tamiz 200.



3. Análisis de tamaño de partícula en el equipo de distribución de tamaño de partícula (PSD). Los análisis del tamaño de partícula, como se mencionó para cales vivas, muestran valores máximos, mínimos, promedios y el número de partículas con un tamaño indicado o menor. Esto nos permite ver cómo se comporta el tamaño de partícula dependiendo del valor de la variable

finiza con la que se trabaje. Además de ello, el análisis hace posible la comparación del cambio de volumen del tamaño de partícula de una cal viva a una cal hidratada.

Ya que se trabajó en duplicado, los resultados se muestran a continuación con sus promedios y desviaciones estándar según cada temperatura.

a. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestra en el Cuadro 119, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 120 y 121; respectivamente.

Cuadro 119. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	71.5	6.8	6.8	5.0	14.8
	85	1.0	79.7	7.7	7.6	5.4	17.1
	75	1.0	88.9	8.2	8.1	5.8	18.6
2	94	1.0	75.1	7.6	7.4	5.2	15.4
	85	1.0	88.9	8.5	8.5	5.8	17.2
	75	1.0	92.9	9.0	9.0	5.9	18.3

Cuadro 120. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	73.3	7.2	7.1	5.1	15.1
85	1.0	84.3	8.1	8.1	5.6	17.2
75	1.0	90.9	8.6	8.6	5.9	18.5

Cuadro 121. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	2.5	0.6	0.4	0.1	0.4
85	0.00	6.5	0.6	0.6	0.3	0.1
75	0.00	2.8	0.6	0.6	0.1	0.2

En el Cuadro 119 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 900°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados se observa un incremento poco significativo en el tamaño de partícula comparado con los tamaños obtenidos para cales cálcicas vivas óptimamente fabricadas. Los resultados mostrados en los Cuadros 120 y 121, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados.

b. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestra en el Cuadro 122, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 123 y 124; respectivamente.

Cuadro 122. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	88.0	6.2	6.7	5.1	13.9
	85	1.0	96.0	7.0	7.6	5.3	15.9
	75	1.0	101.4	7.3	11.3	6.3	17.9
2	94	1.0	83.9	5.0	3.1	4.1	10.9
	85	1.0	86.8	5.6	5.0	4.4	14.1
	75	1.0	90.6	6.1	6.0	4.7	15.1

Cuadro 123. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	86.0	5.6	4.9	4.6	12.4
85	1.0	91.4	6.3	6.3	4.9	15.0
75	1.0	96.0	6.7	8.7	5.5	16.5

Cuadro 124. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	2.9	0.8	2.5	0.7	2.1
85	0.00	6.5	1.0	1.8	0.6	1.3
75	0.00	7.6	0.8	3.7	1.1	2.0

En el Cuadro 122 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 850°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados se observa un leve aumento en el tamaño de partícula comparado a las cales vivas cálcicas semicalcinadas. Este aumento es menor al obtenido en cales óptimas. Los resultados mostrados en los Cuadros 123 y 124, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados, exceptuando los resultados de la desviación general que otorga el equipo.

c. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestra en el Cuadro 125, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 126 y 127; respectivamente.

Cuadro 125. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	87.6	6.9	4.6	4.8	12.8
	85	1.0	96.0	7.8	4.6	5.0	13.2
	75	1.0	100.2	8.1	4.2	5.1	14.4
2	94	1.0	78.4	6.4	4.5	4.6	12.3
	85	1.0	92.2	6.9	4.8	4.8	13.4
	75	1.0	99.7	7.8	4.7	5.0	14.8

Cuadro 126. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	83.0	6.7	4.6	4.7	12.6
85	1.0	94.1	7.4	4.7	4.9	13.3
75	1.0	100.0	8.0	4.5	5.1	14.6

Cuadro 127. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	6.5	0.4	0.1	0.1	0.4
85	0.00	2.7	0.6	0.1	0.1	0.1
75	0.00	0.4	0.2	0.4	0.1	0.3

En el Cuadro 125 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 1100°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados se observa un leve aumento en el tamaño de partícula, pero no mayor a la diferencia en el tamaño entre cales vivas e hidratadas cálcicas vivas óptimamente fabricadas y semicalcinadas. Los resultados mostrados en los Cuadros 126 y 127, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados.

d. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestra en el Cuadro 128, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 129 y 130; respectivamente.

Cuadro 128. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	64.5	6.7	5.5	5.3	13.8
	85	1.0	77.1	7.3	6.1	5.7	15.1
	75	1.0	88.5	7.5	6.2	5.9	15.5
2	94	1.0	68.6	7.1	6.0	5.4	14.7
	85	1.0	83.6	8.0	8.0	5.7	16.3
	75	1.0	94.9	8.2	7.3	5.9	17.7

Cuadro 129. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	66.6	6.9	5.4	5.4	14.3
85	1.0	80.4	7.7	5.7	5.7	15.7
75	1.0	91.7	7.9	5.9	5.9	16.6

Cuadro 130. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	2.9	0.3	0.4	0.1	0.6
85	0.00	4.6	0.5	1.3	0.0	0.8
75	0.00	4.5	0.5	0.8	0.0	1.6

En el Cuadro 128 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 887°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados se observa un aumento en el tamaño de partícula. Aumento similar al obtenido para las cales cálcicas obtenidas óptimamente. Los resultados mostrados en los Cuadros 129 y 130, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados.

e. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestran en el Cuadro 131, sus promedios y desviaciones estándar en los Cuadros 132 y 133; respectivamente.

Cuadro 131. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Mx	Fineza (%)	Min (±0.5µm)	Máx (±0.5µm)	Promedio (±0.5µm)	Desviación (±0.5µm)	50% (±0.5µm)	90% (±0.5µm)
1	94	1.0	79.3	6.1	6.2	4.7	13.5
	85	1.0	85.1	6.5	4.5	5.0	14.2
	75	1.0	99.2	7.6	6.5	5.7	15.9
2	94	1.0	78.7	6.9	6.5	5.0	14.3
	85	1.0	99.7	7.2	6.7	5.5	15.5
	75	1.0	105.3	8.8	8.5	6.0	19.1

Cuadro 132. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	Min (µm)	Máx (µm)	Promedio (µm)	Desviación (µm)	50% (µm)	90% (µm)
94	1.0	79.0	6.5	6.4	4.9	13.9
85	1.0	92.4	6.9	5.6	5.3	14.9
75	1.0	102.3	8.2	7.5	5.9	17.5

Cuadro 133. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (µm)	Desv. Std. Máx (µm)	Desv. Std. Promedio (µm)	Desv. Std. Desviación (µm)	Desv. Std. 50% (µm)	Desv. Std. 90% (µm)
94	0.00	0.4	0.6	0.2	0.2	0.6
85	0.00	10.3	0.5	1.6	0.4	0.9
75	0.00	4.3	0.8	1.4	0.2	2.3

En el Cuadro 131 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 837°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados se observa un leve aumento en el tamaño de partícula. Aumento menor al obtenido para las cales dolomíticas obtenidas óptimamente. Los resultados mostrados en los Cuadros 132 y 133, muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados, exceptuando para el valor máximo promedio para la fineza 85%.

- f. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Los resultados obtenidos para ambas muestras se muestran en el Cuadro 134, sus promedios

y desviaciones estándar en los Cuadros 135 y 136; respectivamente.

Cuadro 134. Análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	Min ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	Máx ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	Promedio ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	Desviación ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	50% ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	90% ($\pm 0.5\mu\text{m}$)
1	94	1.0	80.3	7.1	7.2	5.0	14.3
	85	1.0	86.7	7.5	6.3	5.2	14.7
	75	1.0	96.1	7.6	6.6	5.6	17.0
2	94	1.0	81.1	6.9	7.1	4.9	15.0
	85	1.0	89.8	7.4	6.4	5.3	16.5
	75	1.0	98.2	8.0	8.1	5.6	17.2

Cuadro 135. Resultados promedio del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Fineza (%)	Min (μm)	Máx (μm)	Promedio (μm)	Desviación (μm)	50% (μm)	90% (μm)
94	1.0	80.7	7.0	7.2	5.0	14.7
85	1.0	88.3	7.5	6.4	5.3	15.6
75	1.0	97.2	7.8	7.4	5.6	17.1

Cuadro 136. Desviación estándar del análisis de distribución de tamaño de partícula de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Fineza (%)	Desv. Std. Min (μm)	Desv. Std. Máx (μm)	Desv. Std. Promedio (μm)	Desv. Std. Desviación (μm)	Desv. Std. 50% (μm)	Desv. Std. 90% (μm)
94	0.00	0.6	0.1	0.1	0.1	0.5
85	0.00	2.2	0.1	0.1	0.1	1.3
75	0.00	1.5	0.3	1.1	0.0	0.1

En el Cuadro 134 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 1087°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados se observa un leve aumento en el tamaño de partícula. Aumento menor al obtenido para las cales dolomíticas obtenidas óptimamente y a las semicalcinadas. Los resultados mostrados en los Cuadros 135 y 136 muestran los promedios y desviaciones estándar obtenidos para cada fineza del material. Las desviaciones son pequeñas para los resultados, lo que indica poca dispersión de los datos.

- g. Gráficos de comparación del tamaño de partícula versus fineza del material para cales vivas e hidratadas.

Figura 65. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 900°C.

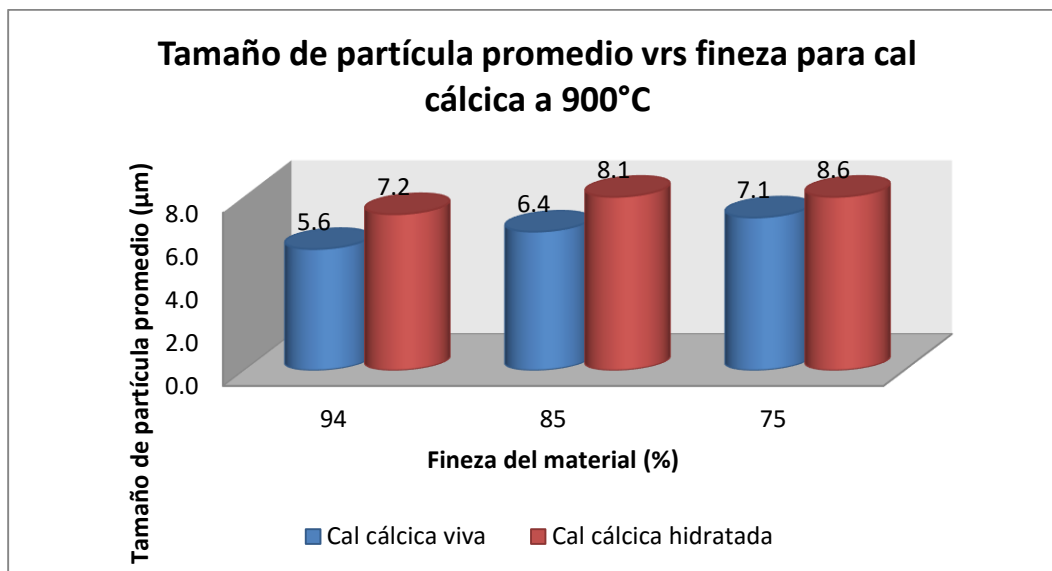


Figura 66. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 850°C.

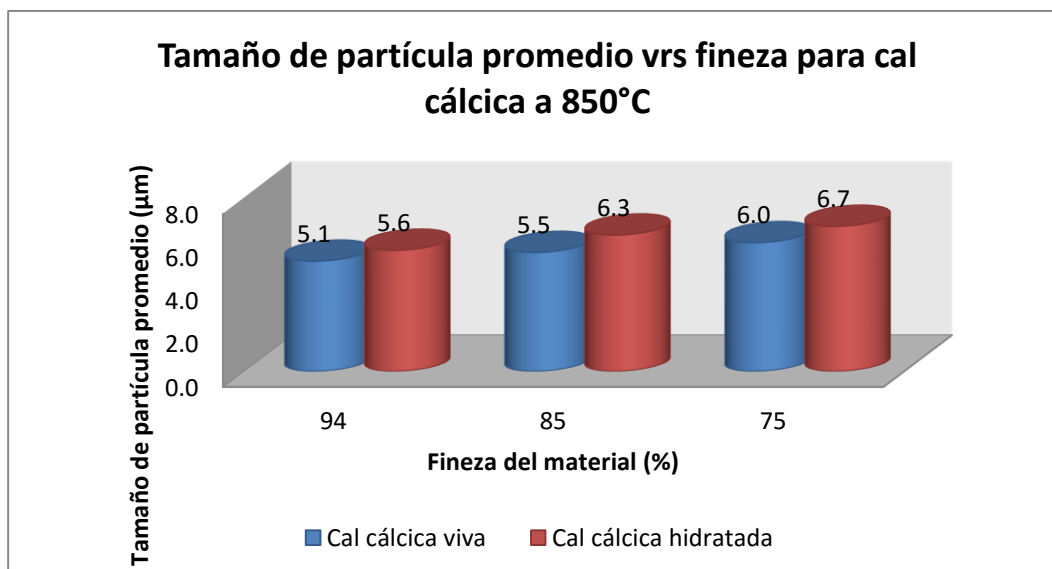


Figura 67. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada cálcica a 1100°C.

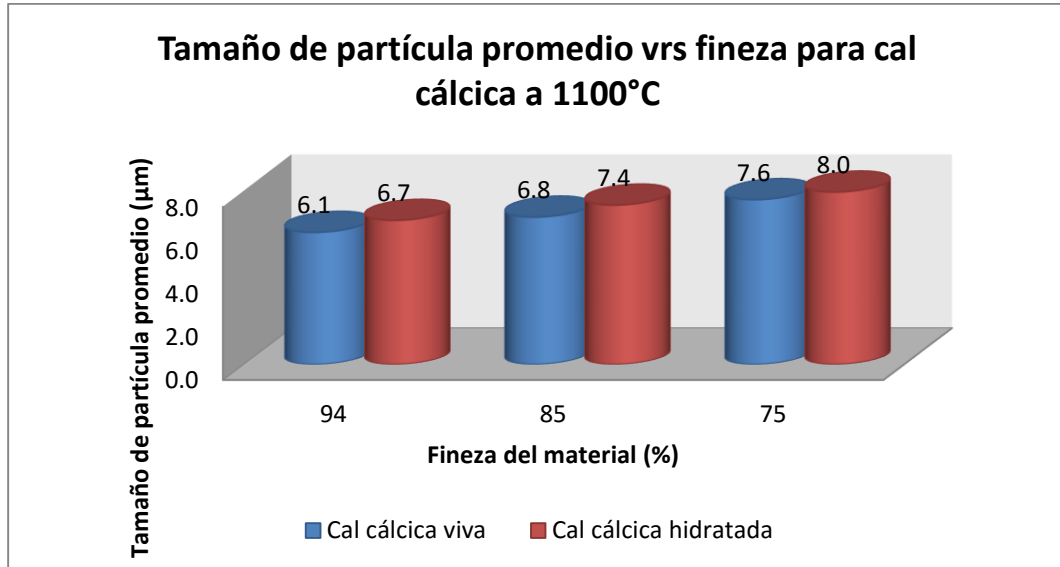


Figura 68. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 887°C.

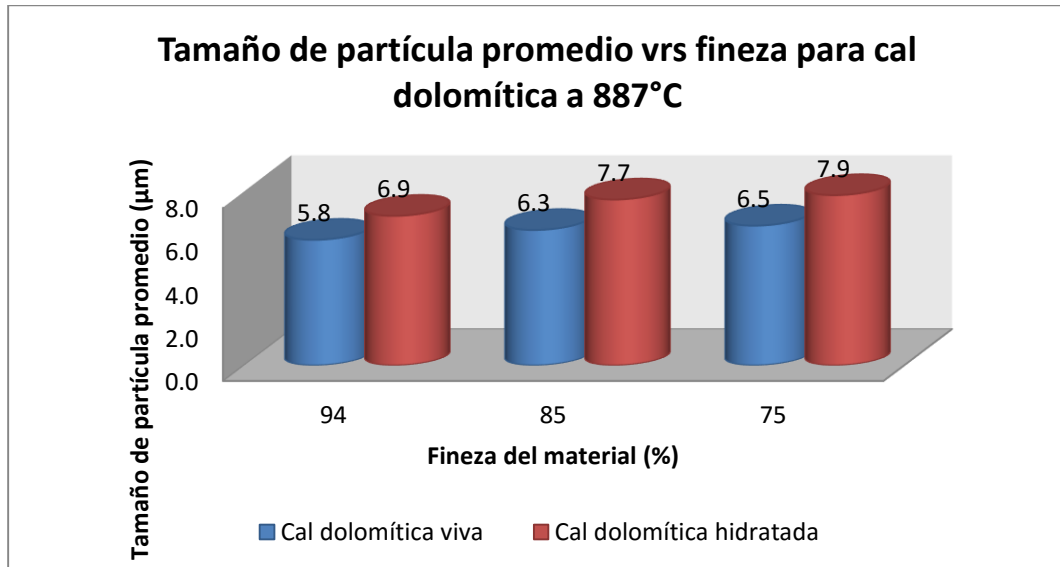


Figura 69. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 837°C.

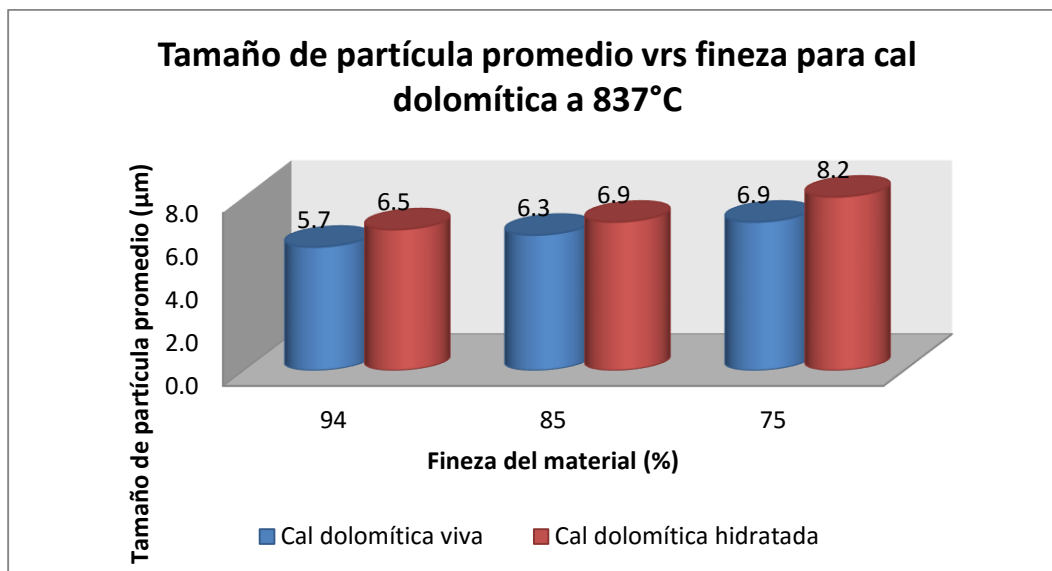
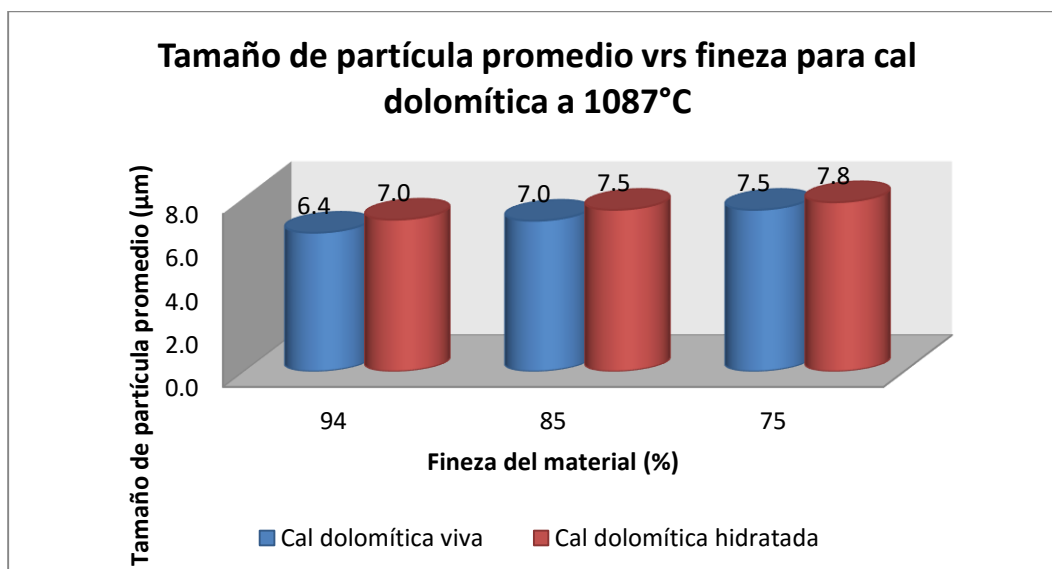


Figura 70. Gráfica del tamaño promedio de partícula en micrómetros versus el porcentaje teórico del material que pasa tamiz 200 para muestras de cal viva e hidratada dolomítica a 1087°C.



4. **Análisis de difracción de rayos X (XRD).** El análisis de difracción de rayos X permite obtener una identificación cualitativa y cuantitativa de las fases cristalinas presentes en muestras de cales. Además, permite monitorear la hidratación de las mismas al obtenerse los minerales correspondientes a los compuestos hidróxido de calcio y de magnesio. Para estas muestras no se obtuvo el promedio ni desviación estándar, ya que algunas muestras variaron en su composición una respecto de otra. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las diferentes muestras de cales hidratadas.

a. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 900°C. Los análisis para cales hidratadas de la calcinación a temperatura óptima muestran resultados de hidratación eficiente, tal y como se observa en el Cuadro 137, y en las Figuras 70, 71, 72, 73, 74 y 75 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 137. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 900°C.

Mx	Fineza (%)	Portlandita (%)
1	94	100.0
	85	100.0
	75	100.0
2	94	100.0
	85	100.0
	75	100.0

En el Cuadro 137 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 900°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral portlandita correspondiente a una de las formas del hidróxido de calcio, el cual es el principal componente de cales óptimamente hidratadas.

b. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 850°C. Los análisis para cales hidratadas de la calcinación a temperatura de semicalcinación muestran resultados de hidratación deficientes, tal y como se observa en el Cuadro 138, y en las Figuras 76, 77, 78, 79, 80 y 81 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 138. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 850°C.

Mx	Fineza (%)	Cal (%)	Calcita (%)	Portlandita (%)	Magnetita (%)
1	94	16.3	57.8	25.8	0.1
	85	25.7	66.3	8.0	0.0
	75	9.6	63.2	27.2	0.0
2	94	14.3	45.1	40.7	0.0
	85	23.6	62.0	14.4	0.0
	75	22.5	59.9	17.6	0.0

En el Cuadro 138 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 850°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral del óxido de calcio, el cual indica que no se llevó a cabo una hidratación completa de las muestras, en tanto que la calcita presente indica que durante la calcinación no se logró descomponer por completo el carbonato de calcio a óxido de calcio. La portlandita presente, indica que parte de la cal obtenida logró hidratarse, pero no en su totalidad. Por último, la magnetita presente es considerada como contaminación de la muestra al momento de moler para ingresarla al equipo.

c. Muestras de cal hidratada cálcica obtenidas a una temperatura de 1100°C. Los análisis para cales hidratadas de la calcinación a temperatura de sobrecalcinación muestran resultados de hidratación no tan eficientes como para cales óptimas, tal y como se observa en el Cuadro 139, y en las Figuras 82, 83, 84, 85, 86 y 87 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 139. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza cálcica a 1100°C.

Mx	Fineza (%)	Cal (%)	Portlandita (%)	Hematita (%)
1	94	0.0	100.0	0.0
	85	18.4	81.6	0.0
	75	78.3	21.7	0.0
2	94	0.0	100.0	0.0
	85	2.4	97.6	0.0
	75	1.9	97.8	0.3

En el Cuadro 139 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 1100°C la piedra caliza cálcica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral del óxido de calcio, el cual indica que no se llevó a cabo una hidratación completa de las muestras, en tanto que la portlandita presente, indica que parte de la cal obtenida logró hidratarse, pero no en su totalidad. Por último, la hematita presente es considerada como contaminación de la muestra al momento de moler para ingresarla al equipo.

d. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 887°C. Los análisis para cales hidratadas de la calcinación a temperatura de óptima muestran resultados de hidratación no tan eficientes a los obtenidos para cales cálcicas óptimas, tal y como se observa en el Cuadro 140, y en las Figuras 88, 89, 90, 91, 92 y 93 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 140. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 887°C.

Mx	Fineza (%)	Periclasa(%)	Portlandita (%)	Brucita (%)	Ferropiclusa (%)
1	94	22.5	76.5	1.1	0.0
	85	12.1	73.4	14.5	0.0
	75	24.2	74.8	1.0	0.0
2	94	26.9	71.7	1.4	0.0
	85	0.0	66.5	33.2	0.2
	75	16.5	82.1	1.4	0.0

En el Cuadro 140 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 887°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral del óxido de magnesio, el cual indica que no se llevó a cabo una hidratación completa de las muestras, en tanto que la portlandita presente, indica que parte del óxido de calcio obtenido logró hidratarse, pero no en su totalidad. De igual manera la presencia de brucita indica la hidratación del carbonato de magnesio, para algunas muestras más que para otras. Por último, la ferropiclusa presente es considerada como contaminación de la muestra al momento de moler para ingresarla al equipo, debido a los discos del molino.

e. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 837°C. Los análisis para cales hidratadas de una semicalcinación muestran resultados de hidratación poco eficientes, tal y como se observa en el Cuadro 141, y en las Figuras 94, 95, 96, 97, 98 y 99 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 141. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 837°C.

Mx	Fineza (%)	Calcita (%)	Periclusa(%)	Portlandita (%)	Brucita (%)
1	94	8.8	0.0	66.0	25.2
	85	8.7	0.0	65.5	25.8
	75	10.3	17.6	66.2	5.9
2	94	0.0	19.4	64.0	16.6
	85	0.0	15.4	63.6	21.0
	75	0.0	26.2	57.6	16.2

En el Cuadro 141 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 837°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral calcita, el cual indica que existe una mala descomposición del carbonato de calcio debido a la temperatura

baja que se utilizó, otorgándole a la cal el carácter de semicalcinada. Además de ello, puede observarse existencia de periclase (MgO) lo que indica que para esas muestras la hidratación no se dio por completo para dicho óxido, en tanto que para el óxido de calcio si lo fue. La presencia de portlandita, indica que el óxido de calcio se hidrató por completo a hidróxido de calcio. En tanto, que la brucita representa el porcentaje de óxido de magnesio que se hidrató. Por último, la ferropiclasa presente es considerada como contaminación de la muestra al momento de moler para ingresarla al equipo, ya que el hierro puede reaccionar fácilmente con el magnesio del óxido.

f. Muestras de cal hidratada dolomítica obtenidas a una temperatura de 1087°C. Los análisis para cales hidratadas de una sobrecalcinación muestran resultados de hidratación poco eficientes, tal y como se observa en el Cuadro 142, y en las Figuras 100, 101, 102, 103, 104 y 105 de los difractogramas en el apartado de apéndice.

Cuadro 142. Análisis de difracción de rayos X de la muestra 1 y 2 de cal hidratada obtenida de la calcinación de caliza dolomítica a 1087°C.

Mx	Fineza (%)	Calcita (%)	Periclase(%)	Portlandita (%)	Brucita (%)
1	94	0.0	0.0	66.2	33.8
	85	2.8	7.2	65.0	25.1
	75	0.0	9.6	87.1	3.3
2	94	0.0	0.0	76.0	24.0
	85	0.0	16.7	63.7	19.6
	75	0.0	27.8	47.1	25.1

En el Cuadro 142 se muestran los resultados para las muestras 1 y 2 de la cal hidratada obtenida al calcinar a 1087°C la piedra caliza dolomítica. En estos resultados puede observarse la presencia del mineral calcita para una muestra, el cual puede indicar una mala descomposición del carbonato de calcio; sin embargo debido a la elevada temperatura utilizada, este porcentaje puede ser considerado más como una contaminación al momento de moler la muestra. La presencia de periclase indica que parte del óxido de magnesio no se hidrató en las muestras, especialmente para muestras de mayor tamaño de partícula. La presencia de portlandita, indica que el óxido de calcio se hidrató por completo a hidróxido de calcio. En tanto, que la brucita representa el porcentaje de óxido de magnesio que se hidrató.

D. Resultados del análisis de ampolladuras y picaduras con base en la norma ASTM C-110.

Cuadro 143. Datos obtenidos del análisis físico de ampolladuras y picaduras de la cal cálcica y dolomítica viva e hidratada semicalcinada, calcinada y sobrecalcinada.

Finezas	Semicalcinada (γ_1)		Calcinada (γ_2)		Sobrecalcinada (γ_3)	
	Caliza (β_1)	Dolomita(β_2)	Caliza(β_1)	Dolomita(β_2)	Caliza(β_1)	Dolomita(β_2)
75% (τ_1)	$y_{1111}= 0$	$y_{1211}= 11$	$y_{1121}= 0$	$y_{1221}= 8$	$y_{1131}= 4$	$y_{1231}= 6$
	$y_{1112}= 0$	$y_{1212}= 1$	$y_{1122}= 0$	$y_{1222}= 0$	$y_{1132}= 3$	$y_{1232}= 20$
85% (τ_2)	$y_{2111}= 0$	$y_{2211}= 0$	$y_{2121}= 0$	$y_{2221}= 0$	$y_{2131}= 1$	$y_{2231}= 15$
	$y_{2112}= 0$	$y_{2212}= 0$	$y_{2122}= 0$	$y_{2222}= 0$	$y_{2132}=4$	$y_{2232}= 18$
94% (τ_3)	$y_{3111}= 0$	$y_{3211}= 0$	$y_{3121}= 0$	$y_{3221}= 0$	$y_{3131}= 0$	$y_{3231}= 0$
	$y_{3112}= 0$	$y_{3212}= 0$	$y_{3122}= 0$	$y_{3222}= 0$	$y_{3132}=0$	$y_{3232}= 0$

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis de varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) se llevó a cabo con el fin de determinar si las fuentes de variación (factores: fineza, tipo de piedra y temperatura de calcinación) influyen de tal manera que existan diferencias significativas entre los resultados de la variable respuesta de cada tratamiento. Para el análisis final se utilizó 95% como nivel de confianza. El modelo estadístico utilizado es el siguiente:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijkl}$$

$$i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c; \quad l = 1, 2, \dots, r$$

En donde:

y_{ijkl} = Variable respuesta, número de ampolladuras y picaduras en 10cm.

μ = Efecto de la media general

τ_i = Efecto de la i-ésima fineza

β_j = Efecto del j-ésimo tipo de piedra

γ_k = Efecto de la k-esima temperatura de calcinación

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción de la i-ésima fineza y del j-ésimo tipo de piedra

$(\tau\gamma)_{ik}$ = Efecto de la interacción de la i-ésima fineza y de la k-ésima temperatura de calcinación

$(\beta\gamma)_{jk}$ = Efecto de la interacción del j-ésimo tipo de piedra y de la k-ésima temperatura de calcinación

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = Efecto de interacción triple del ijk-ésimo

u_{ijkl} = Efecto del error experimental asociado a la ijk-ésima unidad experimental.

Este análisis de varianza se llevó a cabo utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVII.I.

1. Factores.

A= Fineza del material que pasa tamiz 200 (75%, 85% y 94%)

B= Tipo de piedra caliza (cálcica y dolomítica)

C= Temperatura de calcinación (óptima, semicalcinación, sobrecalcificación)

2. Hipótesis nulas del modelo.

$$H_{0A} \equiv \tau_1 \equiv \dots = \tau_a = 0$$

$$H_{0B} \equiv \beta_1 \equiv \dots = \beta_b = 0$$

$$H_{0C} \equiv \gamma_1 \equiv \dots = \gamma_c = 0$$

$$H_{0(AB)} \equiv (\tau\beta)_{ij} = 0, \forall i, j$$

$$H_{0(AC)} \equiv (\tau\gamma)_{ik} = 0, \forall i, k$$

$$H_{0(BC)} \equiv (\beta\gamma)_{jk} = 0, \forall j, k$$

$$H_{0(ABC)} \equiv (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0, \forall i, j, k$$

3. Regla de decisión. Con un nivel de significación $\alpha = 0.05$, se rechaza la H_0 correspondiente si $F_{exp} > F_{teórica}$. O bien, si el valor $p_{exp} < p = 0.05$ con un nivel de confianza de 95.0%.

4. Resultado obtenido del análisis de varianza para ampolladuras y picaduras.

Cuadro 144. Análisis de varianza para los resultados de ampolladuras y picaduras en los diferentes tratamientos.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
A: Fineza	124.389	2	62.1944	5.91	0.0107
B: Tipo de piedra	124.694	1	124.694	11.84	0.0029
C: Temperatura de calcinación	207.389	2	103.694	9.85	0.0013
AB	67.3889	2	33.6944	3.20	0.0647
AC	123.444	4	30.8611	2.94	0.0498
BC	76.7222	2	38.3611	3.64	0.0469
ABC	69.4444	4	17.3611	1.65	0.2055
Residuos	189.5	18	10.5278		
Total	982.972	35			

5. **Conclusión.** Con base en los datos del Cuadro 144, se concluye lo mostrado en el Cuadro 145.

Cuadro 145. Interpretación de los datos estadísticos obtenidos para las ampolladuras y picaduras variando fineza, tipo de piedra caliza y temperatura de calcinación.

Fuente	F calculada (F_c)	F teórica (F_t)	F_c > F_t	Conclusión
A: Fineza	5.91	3.555	Sí	Se rechaza Ho. Por lo que si existe efecto estadísticamente significativo del efecto fineza sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
B: Tipo de piedra	11.84	4.414	Sí	Se rechaza Ho. Por lo que si existe efecto estadísticamente significativo del efecto tipo de piedra sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
C: Temperatura de calcinación	9.85	3.555	Sí	Se rechaza Ho. Por lo que si existe efecto estadísticamente significativo del efecto temperatura de calcinación sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
AB	3.20	3.555	No	No se rechaza Ho. Por lo que no existe efecto estadísticamente significativo de la interacción entre la fineza y el tipo de piedra sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
AC	2.94	2.928	Sí	Se rechaza Ho. Por lo que si existe efecto estadísticamente significativo de la interacción entre la fineza y la temperatura de calcinación sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
BC	3.64	3.555	Sí	Se rechaza Ho. Por lo que si existe efecto estadísticamente significativo de la interacción entre el tipo de piedra y la temperatura de calcinación sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.
ABC	1.65	2.928	No	No se rechaza Ho. Por lo que no existe efecto estadísticamente significativo de la interacción triple sobre la variable respuesta ampolladuras y picaduras con un nivel de confianza del 95.0%.

VII. DISCUSIÓN

A. Materia prima.

1. **Análisis de fluorescencia de rayos X.** El análisis de fluorescencia de rayos X consiste en estudiar las emisiones de fluorescencia que son emitidas tras la excitación de un átomo de una muestra utilizando los rayos X. Esta radiación característica de cada átomo es capaz de difractarse a través de un cristal analizador, el cual otorga un ángulo del cual se detecta la intensidad de la radiación y su longitud de onda que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra. Es por ello que se hace útil su utilización en la cuantificación de diversos elementos y compuestos en diversos materiales, como en los materiales de construcción.

Los análisis en fluorescencia de rayos X de las materias primas fueron utilizados para determinar la composición química característica de cada tipo de piedra utilizado (caliza cálcica y dolomítica). Esto influenciará la temperatura de descomposición de la materia prima la cual será utilizada como temperatura de calcinación óptima.

Al observar los resultados mostrados en los Cuadros 17 y 18 se determinó que las materias primas poseen una composición rica en óxidos de calcio y magnesio según corresponda al tipo de piedra utilizado. Para la piedra caliza cálcica se observa un porcentaje elevado de óxido de calcio en tanto que para la caliza dolomítica un porcentaje de óxido de calcio y magnesio dentro de los porcentajes teóricos mostrados en el marco teórico. Además de ello, se observa que los porcentajes de óxidos de silicio, aluminio y hierro se encuentran en pequeñas magnitudes como es correspondiente para las cales objeto de estudio.

2. **Análisis de difracción de rayos X (XRD).** Los análisis de difracción de rayos X de las materias primas permitieron observar las fases cristalinas que conforman a cada una de las rocas utilizadas.

Para el caso de la caliza, como se observa en el Cuadro 19 el porcentaje de calcita es elevado. Como se menciona en el apartado de marco teórico, la calcita es un mineral compuesto por carbonato de calcio siendo uno de los más estables y el cual conforma a la roca caliza cálcica. Con esta calidad de caliza se obtendrá cal viva cálcica, con un alto contenido de óxido de calcio. Sin embargo, a pesar de obtener un resultado elevado de calcita, se observa también un pequeño porcentaje de grafito 3R. Este compuesto se determinó que se trataba de una contaminación, la cual puede ser explicada debido a restos de muestras con grafito en el molino de anillos utilizado para la preparación previa de la muestra. Esto a pesar de llevar a cabo un proceso de limpieza utilizando como blanco escoria. Otra fuente de contaminación se debe a la presencia de dicha fase mineralógica en la cantera de donde se extrajo la materia prima.

Los resultados para la piedra dolomita, mostrados en el Cuadro 20, presentan un elevado porcentaje del mineral dolomita. Este mineral es el principal componente de dicha piedra, pues la misma está constituida por el carbonato doble de calcio y magnesio. Sin embargo, además ello, se observa la presencia de un porcentaje mínimo de calcita. Este pequeño porcentaje forma parte de la composición química de la dolomita, pues como se mencionó está constituida por ambos carbonatos. Con esta calidad de dolomita se obtendrá cal viva dolomítica, con un alto contenido de óxido de calcio y magnesio.

Los difractogramas mostrados en las Figuras 33 y 34 muestran los picos obtenidos para las muestras de caliza y dolomita analizada. Éstos permiten obtener tanto un resultado cualitativo como cuantitativo. Como es bien sabido el difractograma se obtiene mediante la dispersión de una onda (en este caso rayos X) cuando ésta interacciona con un sistema cristalino, ordenado. La utilización de los rayos X permiten observar distancias interatómicas, dando como resultado la estructura cristalina del compuesto, lo que se traduce al mineral que conforma el material (ICMA, 2013). Con esto fue posible determinar la fase cristalina calcita y dolomita de las rocas, al igual que impurezas presentes en las muestras. Sin embargo, debe mencionarse que las impurezas en ciertas ocasiones no serán detectadas por el equipo de difracción de rayos debido a que poseen una estructura amorfa, es decir no cristalina, que no permite su detección en el equipo; como el caso de óxido de sílice amorfo.

Es importante mencionar que la posición de los cristales al elaborar la pastilla de lectura para el equipo, afecta la dispersión de la onda y por lo tanto la identificación de la muestra. Es por ello que debe elaborarse la pastilla añadiendo una mínima presión mecánica pero no demasiada que pudiera desordenar la orientación de los cristales. Dicha orientación debe ser randómica dentro de la celda unitaria del cristal, para que cada rayo X que incida indique la presencia de las diferentes fases mineralógicas (con lo cual se observan mayor cantidad de picos en los ángulos 2θ correctos). Además de ello, el proceso de molienda puede afectar los cristales, tanto en orientación como en tamaño; lo cual puede afectar la detección que posee el equipo (exposición del PhD Luciano Gobbo de Panalytical en Cementos Progreso, diciembre 2015).

3. **Análisis termogravimétrico (TGA).** El análisis termogravimétrico de las piedras caliza cálcica y dolomítica, permiten observar su comportamiento al ser sometidas a distintas temperaturas, desde 25°C a 1,000°C. El comportamiento térmico que posea una piedra caliza en un período de calcinación puede ser estudiado mediante sus propiedades fisicoquímicas. Es por ello que para este análisis se utilizó la variación del peso, la cual se traduce en la pérdida de dióxido de carbono (CO₂), según la reacción de calcinación mostrada en las Figuras 1 y 4 del apartado de marco teórico. Debido al aumento gradual de la temperatura (de 25°C a 1000°C) y a la pérdida de peso de la muestra se pueden obtener los termogramas o curvas termogravimétricas como las mostradas de la Figura 35 a la 40.

Los resultados pueden observarse en los Cuadros 21 y 22 del apartado de resultados. Mostrando las diferentes temperaturas críticas del proceso de descomposición de la piedra caliza cálcica y dolomítica. Dichas temperaturas van a depender de la presión parcial de CO_2 , así como a la presión atmosférica y a la concentración de CO_2 en la piedra. Los termogramas son presentados en las Figuras de la 35 a la 40. En los mismos se puede observar claramente que existe una semejanza en el comportamiento de los dos diferentes tipos de caliza en donde se inicia la pérdida de peso a los 750°C . En esta temperatura se inicia la descomposición de la piedra en CaO , MgO y CO_2 . Ya en los 900°C tanto la caliza cálcica como dolomítica han perdido gran parte del CO_2 y continúan descomponiéndose, pero en un grado casi imperceptible pues la declinación es mínima comparada con las declinaciones anteriores como puede observarse en los termogramas 35 a 40. Esto indica la descomposición total de las partículas de CaCO_3 y MgCO_3 a CaO y MgO .

Para que exista una descomposición completa, la pérdida del peso con respecto al peso total que se ingresó de muestra (con impurezas) no debe ser mayor a 44% para las calizas cálcicas y del 47.8% para las calizas dolomíticas. Esto debido a que son los porcentajes teóricos de contenido de CO_2 para cada mineral puro. Como puede observarse en los termogramas para las muestras de caliza cálcica (Figura 35 a 37) las pérdidas de peso respecto al total fueron $42.3074 \pm 0.0001\%$, $42.7012 \pm 0.0001\%$ y $42.8293 \pm 0.0001\%$ quedando por debajo del porcentaje teórico debido a la presencia de impurezas. De igual manera, en los termogramas para la caliza dolomítica (Figura 38 a 40) las pérdidas de peso respecto al total fueron $46.6332 \pm 0.0001\%$, $47.1125 \pm 0.0001\%$ y $46.4360 \pm 0.0001\%$, observando menor lejanía con el porcentaje teórico lo que indica que existe una menor cantidad de impurezas que en el caso de la caliza cálcica. Es importante mencionar que la presencia de impurezas produce que la temperatura de disociación de la caliza sea más baja, pues las impurezas poseen temperaturas de disociación menores.

Como se ha venido mencionando, la pérdida de peso que se produce en las piedras calizas cálcicas y dolomíticas es interpretada como la descomposición de los carbonatos con el fin de obtener a los respectivos óxidos. La descomposición de la piedra caliza cálcica y dolomítica se inicia a los 750°C pues el carbonato libera una gran cantidad de CO_2 . Ya a los 900°C para la caliza cálcica y a los 887°C de la dolomita se ha interpretado como el fin de la calcinación, y es en donde se produce la reacomodación de la estructura cristalina con el fin de establecer la estructura cristalina cúbica correspondiente al óxido formado, de esta manera se libera los restos de CO_2 que no escapó en las primeras etapas.

En cuanto a la diferencia de temperaturas mostradas en los Cuadros 21 y 22 para ambos tipos de piedra, puede mencionarse sobre el comportamiento de la velocidad en la pérdida de peso. En Ochaeta, 2004 se ha determinado que el mayor porcentaje de magnesio presente en la caliza dolomítica incrementa ligeramente la liberación del CO_2 presente en los carbonatos a la temperatura de 750°C . Sin embargo, es importante mencionar que aunque la velocidad de pérdida de peso sea mayor para la caliza dolomítica no implica que

se forme igual cantidad de cal viva en ambos tipos de caliza. De aquí se ha deducido que la formación del óxido de magnesio es capaz de competir con la del óxido de calcio para la caliza dolomítica, lo que explica la mayor velocidad en la pérdida de peso al liberarse el CO_2 y por lo tanto la menor temperatura, óptima de 887°C comparada a los 900°C de la caliza cálcica.

4. **Determinación del tiempo óptimo de calcinación, pérdida al fuego.** El tiempo óptimo de calcinación es una variable importante de determinar pues el tiempo de residencia de la piedra dentro del horno o mufla (en este caso) puede producir una semicalcinación o sobrecalcinación de las cales a pesar de que sean consideradas como cales calcinadas óptimamente. Por ello, para este estudio el tiempo de calcinación es una variable que debe permanecer constante para lograr limitarlo.

El tiempo determinado para cada tamaño de piedra depende de la cantidad añadida al crisol de platino con el cual se llevó a cabo la calcinación y a su tamaño en sí. Para el caso de la piedra caliza cálcica se calcinó 10g de cada tamaño de piedra. Como resultado se observa que a mayor tamaño de piedra mayor será el tiempo de residencia dentro de la mufla. Con ello se evita una semicalcinación o sobrecalcinación de piedras con menor o mayor tamaño. En el caso de la piedra dolomita se ingresó aproximadamente 20g del tamaño $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ", mientras que de $\frac{1}{4}$ " se ingresó únicamente 15g, de lo que se obtuvo diferentes tiempos de calcinación.

Mediante análisis en fluorescencia de rayos X se comprobó la composición química de las cales obtenidas en cuanto a los óxidos formados por la calcinación en donde las impurezas no son significativas. Los porcentajes de los óxidos obtenidos permiten determinar el tamaño de piedra adecuado para calcinar. Como se observa en los resultados mostrados para la caliza cálcica (Cuadros 23 al 25) el porcentaje de óxido de calcio formado tras la calcinación es mayor para el tamaño de piedra $\frac{1}{2}$ ". El promedio obtenido fue de 94.30%, lo que denota una alta conversión del carbonato al óxido. Los resultados para la piedra caliza dolomítica (Cuadros del 26 al 28) muestran que el porcentaje de óxido de calcio obtenido tras la calcinación es mayor para el tamaño de piedra de $\frac{1}{2}$ ". Con un porcentaje de CaO promedio de 60.66% (ver Cuadro 27). Estos resultados indican que para esta investigación el tamaño de piedra adecuado para la calcinación es el retenido por el tamiz $\frac{1}{2}$ ".

B. Análisis de cales vivas cálcicas y dolomíticas obtenidas a diferentes temperaturas y finezas.

1. **Pérdida al fuego y fineza del material.** Como se mencionó en el apartado de resultados, estos análisis son importantes para mantener un control tanto en el grado de

calcinación e hidratación de la muestra, así como en la variable fineza que se estipuló como variable independiente de la investigación.

En el análisis de pérdida al fuego es posible observar tanto el grado de calcinación, es decir de conversión del carbonato al óxido, así como la humedad que posea la muestra. Es por ello que para cales vivas calcinadas de manera óptima, a una temperatura suficiente para disociar al carbonato al óxido y CO_2 , la pérdida debe ser muy pequeña pues la disociación se da casi por completo y en ocasiones representa la absorción de humedad (la cal es altamente higroscópica). Lo mismo sucede para cales sobrecalcinadas, en las cuales se sobrepasa la temperatura necesaria para lograr la disociación. Esto indica que un mayor porcentaje del carbonato logrará disociarse, sin embargo, la cantidad es muy pequeña al compararla con cales calcinadas óptimamente. Ahora bien, para el caso de cales vivas obtenidas por un proceso de semicalcinación la pérdida debe ser alta pues gran parte del carbonato no se logró transformar al óxido.

Para el análisis de pérdida de fuego de las muestras de cal viva cálcica y dolomítica obtenidas mediante calcinación a temperatura óptima, se obtuvo valores pequeños (ver Cuadro 29, 30, 41 y 42). Estos valores indican que la calcinación de la piedra se llevó a cabo eficientemente con la transformación del sistema cristalino del carbonato al sistema cristalino cúbico del óxido casi por completo.

Al comparar los datos de cales óptimas con los obtenidos para las cales vivas cálcicas y dolomíticas provenientes de la semicalcinación los resultados poseen notables diferencias; especialmente para el caso de las cales cálcicas. Para estas últimas (ver Cuadros 33 y 34), las pérdidas obtenidas son muy cercanas a las pérdidas de las cales hidratadas; las cuales se encuentran entre el rango de 23% a 25%. El alto porcentaje de pérdida se debe a una mala disociación del carbonato de calcio en óxido de calcio y CO_2 , lo cual se evidenció al elaborar el análisis físico de ampolladuras y picaduras (ASTM C-110) pues se llevó a cabo una reacción exotérmica al preparar el mortero. Los resultados para la cal dolomítica semicalcinada (Cuadros 45 y 46) son mayores comparado a las cales del procesos de calcinación óptimo, lo que muestra que existió una menor transformación del carbonato doble de calcio y magnesio a los óxidos. La diferencia que se observa en ambos procesos de semicalcinación se debe a la composición de la materia prima. Pues, la presencia del carbonato doble en la dolomita produce que la descomposición sea más rápida comparada a la de la piedra caliza cálcica.

Por último, para el caso de las cales obtenidas mediante la sobrecalcinación los valores para la pérdida al fuego pueden observarse en los Cuadros 37 y 38. Los valores obtenidos (ver Cuadros 37, 38, 49 y 50) son similares a los obtenidos para cales del proceso de calcinación óptimo, pues son valores pequeños. Dichos valores muestran que los carbonatos se transformaron por completo a los óxidos correspondientes. Esto indica que el análisis de pérdida al fuego no nos permitirá distinguir entre una cal calcinada óptimamente y una sobrecalcinada, de la manera como se observa para las cales semicalcinadas. Es decir, que al elevarse

la temperatura el proceso producirá una diferencia estructural (de densidad y porosidad) y no un compuesto distinto al óxido.

La pérdida obtenida para cada una de las muestras también puede ser consecuencia de la transformación del óxido de calcio al hidróxido de calcio mediante la reacción de hidratación debido a la humedad del ambiente (ver Figura 2), especialmente durante el proceso de molienda, pues la cal viva es altamente higroscópica. Además, puede observarse una tendencia en cuánto a la pérdida ya que aumenta a mayor finura. Esto puede indicar que parte de la pérdida obtenida se debe a la reacción de hidratación del óxido de calcio, pues teóricamente como se menciona por la Escuela de ingeniería de minas, energía y materiales de Oviedo, 2014, partículas más pequeñas tiene mayor área superficial frente a la reacción de hidratación. Esto se observa especialmente para el caso de la calcinación a temperatura óptima para ambos tipos de piedra, pues la cal es altamente reactiva a la presencia de humedad. Aunque este proceso es más lento para la dolomita por la presencia del magnesio, el cual posee una lenta de hidratación.

Las finezas obtenidas son muy cercanas a las estipuladas como teóricas para la variable finura. Esto totalmente independiente de la temperatura a la cual fue calcinada la piedra, y al tipo de piedra que se trabajó. Los promedios obtenidos se mantienen cercanos a los valores teóricos variando en relación a éstos por $\pm 1\%$ - 2% . Además de ello, las desviaciones estándar para las tres finezas de las cales vivas cálcicas y dolomíticas son pequeñas. Lo que indica poca variabilidad al pasar de una muestra a otra, pues el tiempo utilizado en la molienda se acomodó para obtener la finura requerida.

2. Fluorescencia de rayos X (XRF). De la misma manera que los análisis de fluorescencia de rayos X fueron utilizados para determinar la calidad y tipo de piedra trabajada, se utilizan ahora para el análisis de las muestras de cal obtenidas posterior a la calcinación a diferentes temperaturas.

Los resultados obtenidos variaron según el grado de calcinación y el tipo de materia prima utilizado. Para las cales obtenidas de un proceso de calcinación óptimo, los resultados en cuanto a los óxidos formados son altos. En el caso de las cales vivas cálcicas (ver Cuadros 53 y 54) los análisis XRF muestran un porcentaje elevado de óxido de calcio. De igual manera se puede observar para la cal viva dolomítica obtenida a temperatura óptima que los porcentajes de óxidos de calcio y magnesio (ver Cuadros 62 y 63) son llevados. Estos porcentajes indican que se realizó un proceso eficiente de calcinación ya que gran parte de los carbonatos de calcio y magnesio se descompusieron en CaO, MgO y CO₂, según corresponda a la materia prima. Esto se debe a que se trabajó con la temperatura mínima necesaria para producir la disociación casi completa de los carbonatos en los óxidos.

Las cales obtenidas mediante el proceso de semicalcinación mostraron porcentajes de los óxidos de calcio inferiores a los observados para las cales óptimas. Para las cales cálcicas semicalcinadas a 850°C

(ver Cuadros 56 y 57), el porcentaje de óxido de calcio es bastante bajo y similar al porcentaje observado en cales hidratadas. De la misma manera, los resultados obtenidos para cales dolomíticas semicalcinadas a 837°C (ver Cuadros 65 y 66) muestran que el porcentaje de óxido de calcio es inferior al obtenido para la calcinación óptima, sin embargo, el porcentaje de óxido de magnesio permanece cercanos a las magnitudes de los resultados de cales dolomíticas óptimas. Este porcentaje de óxido de magnesio, similar al obtenido para cales óptimas, se debe a que el carbonato de magnesio requiere una menor temperatura de disociación que la necesaria para disociar el carbonato de calcio. Por ello, los bajos porcentajes de los óxidos de calcio en ambos tipos de materia prima evidencian una pobre conversión del carbonato al óxido. Las diferencias en los procesos de semicalcinación se deben a que la velocidad de descomposición del mineral dolomita es mayor a la velocidad de la calcita, debido a la presencia de carbonato de magnesio el cual compite con el carbonato de calcio en la formación de los óxidos a temperaturas tempranas (menores a 887°C). Por ello, la temperatura de semicalcinación permite que se produzca mayor conversión de los carbonatos de la dolomita que de la calcita.

Los resultados de las cales obtenidas a través del proceso de sobrecalcinación muestran porcentajes elevados de los óxidos según la materia prima, cercanos a los obtenidos para cales óptimas. Para cales cálcicas semicalcinadas a 1100°C (ver Cuadros 59 y 60) el porcentaje de óxido de calcio es elevado. Al comparar dichos porcentajes con los obtenidos para las cales provenientes de una calcinación óptima, se observa que son levemente mayores para las tres finezas. De igual manera, para las cales dolomíticas sobrecalcinadas a 1087°C (ver Cuadros 68 y 69) los porcentajes de óxido de calcio y magnesio son elevados; siendo ligeramente mayores a los obtenidos para cales dolomíticas óptimas. Este incremento se debe a la descomposición total de los carbonatos al rebasar la temperatura mínima requerida para una alta descomposición. Al superar esa temperatura se hace posible que el porcentaje remanente de carbonato se transforme al sistema cúbico del óxido al perder CO₂. Es por ello que al comparar los datos se observan pequeñas diferencias en el porcentaje del óxido de calcio.

Las Figuras 41, 42, 43, 44, 45 y 46 muestran las diferencias en el porcentaje promedio de óxido de calcio para las diferentes finezas con las que se trabajó. Al igual que las Figuras 47, 48 y 49 muestran para el caso de la dolomita las diferencias en los porcentajes de óxido de magnesio. En ellas puede observarse claramente las ligeras diferencias en cuanto al porcentaje del óxido. Y como ya se mencionó el principal factor que tiene influencia sobre el porcentaje de óxido es la temperatura de calcinación.

3. Distribución de tamaño de partícula (PSD). Como se mencionó en el apartado de resultados, el análisis de distribución del tamaño de partícula nos proporciona una serie de valores tanto en cantidad según el tamaño, como el tamaño promedio, mínimo y máximo de las partículas.

El análisis nos permite distinguir entre las diferentes finezas con las cuales se trabajó, pues la cuantificación del tamaño de cada partícula permite obtener un promedio que variará con la cantidad de partículas finas o de menor tamaño y partículas gruesas o de mayor tamaño. En el caso del valor de la variable fineza en su valor más bajo el promedio será menor comparado al valor más grande de dicha variable. Además, analizar las muestras de cal viva en el equipo permite realizar una comparación al momento de hidratar la cal, pues permite observar el cambio de volumen de la partícula posterior a su hidratación, la cual incrementa su tamaño y permite indagar en la posibilidad de que existan partículas de óxido sin hidratación.

Existen dos elementos que restringen el análisis. Por un lado, el equipo que se utilizó está configurado para detectar partículas que posean un tamaño mayor o igual a $1.0\mu\text{m}$ por ello es que en los Cuadros de resultados se observa que dicho tamaño es el valor mínimo detectado. Por otro lado, las muestras debían tamizarse utilizando el tamiz No. 170 para separar cualquier partícula gruesa que pudiera obstruir el sistema de mangueras que componen el equipo. Debido a esto pueden existir factores de error en cuanto a los datos del tamaño de partícula pues se selecciona únicamente las partículas que pasen dicho tamiz dejando a un lado las partículas más gruesas. Esto dos elementos no permiten detectar partículas muy gruesas ni muy finas que pudiesen existir en las muestras analizadas.

Los análisis de cales obtenidas a partir de calizas cálcicas y dolomíticas calcinadas a temperatura óptima permiten observar diferencias entre las finezas trabajadas en cada muestra. Los resultados (ver Cuadros 71 y 83) promedio del tamaño de partícula, muestran una tendencia de aumento de tamaño conforme la fineza del material disminuye, lo que indica que en finezas inferiores existe mayor cantidad de partículas gruesas. A diferencia de las cales cálcicas, los datos máximos son mayores para las dolomíticas debido a la presencia de magnesio en la dolomita, ya que éste posee mayor densidad lo que afecta al momento de moler la muestra.

En cuanto a la muestra cálcica obtenida de la semicalcinación a 850°C , puede observarse que el valor máximo posee la misma tendencia para las cales provenientes de la calcinación óptima, pero únicamente para la muestra 1 (ver Cuadro 74). Para el caso de la muestra 2 el valor máximo obtenido para la fineza 85% es mayor al obtenido para la fineza 75%, esta diferencia es consecuencia del tamizado que se realiza de la muestra previo a ingresarla al equipo pues delimita el tamaño de partículas a ingresar. Para la muestra dolomítica obtenida de la semicalcinación a 837°C el valor máximo, nuevamente muestra una tendencia de aumento cuando la fineza disminuye. Incluso los valores son cercanos a los obtenidos para cales dolomíticas óptimamente calcinadas, aunque levemente mayores debido a la presencia de carbonato remanente el cual posee mayor densidad que el óxido formado (ver Cuadro 83).

Por último, para cales cálcicas y dolomíticas sobrecalcinadas (ver Cuadros 80 y 86), los valores máximos son mucho mayores comparados a los resultados de las muestras semicalcinadas y calcinadas óptimamente. Esta gran diferencia se debe a que la sobrecalcinación produce un aumento en la densidad del material, lo cual lo hace más duro y difícil de moler. Este aumento de densidad, también se refleja en los resultados para los otros parámetros. Esto ya que, para el promedio, 50% y 90% los resultados son levemente superiores a los obtenidos en los otros dos casos. Sin embargo, siguen manteniendo la tendencia a aumentar el tamaño a medida que disminuye la fineza.

La desviación obtenida para las diferentes cales obtenidas (cálcicas y dolomíticas) denota valores elevados lo que indica una dispersión elevada de los datos respecto a la media, denotando variabilidad de tamaños dentro de las muestras. Esto causado por el proceso de molienda.

La tendencia de la que se ha venido hablando en la cual aumenta el tamaño de partícula al reducirse la fineza puede observarse gráficamente en las Figuras 50, 51, 52, 53, 54 y 55, en las cuales se observa casi una tendencia lineal para ambas variables en ambos tipos de materia prima.

C. Análisis de cales hidratadas cálcicas y dolomíticas obtenidas a partir de la hidratación de cales vivas.

1. Pérdida al fuego del material hidratado. Tal y como se mencionó en el apartado de resultados, el análisis de pérdida al fuego es útil para monitorear el grado de hidratación que contiene la muestra. Pues la hidratación se llevó a cabo agregando determinada cantidad de agua a la muestra, homogeneizar y obtener la pérdida al fuego. Se detuvo la hidratación cuando la pérdida se encontraba en el rango entre 23% a 25%, el cual es el porcentaje de pérdida al fuego de cales hidratadas producidas industrialmente.

Este análisis nos permite monitorear el grado de conversión del óxido en su correspondiente hidróxido al reaccionar con el agua. Dicha pérdida también incluye la pérdida obtenida para las cales vivas, que principalmente son reflejo de la descomposición del carbonato remanente y el resto de pérdida se debe a la evaporación del agua que reaccionó con el óxido. El porcentaje de hidratación de la muestra es una variable que se mantuvo constante (dentro del rango antes mencionado), pues no era una variable que quisiera estudiarse en esta investigación, pero la cual se recomienda estudiar en investigaciones posteriores acerca del tema. Para esta investigación se mantuvo el mismo rango para ambos tipos de materia prima y para todas las temperaturas y finezas utilizadas.

Es importante mencionar que al momento de llevar a cabo la hidratación de la muestra, el aspecto de la misma era de un polvo blanco (más blanco que la cal viva), suelto y homogéneo. Esto se debe a que la cal es un producto insoluble en agua (solubilidad de 1.19g/L a 25°C), sin embargo es capaz de reaccionar con la misma produciendo el hidróxido correspondiente (ver Figura 2) y liberando calor pues la reacción es exotérmica y violenta. El recipiente en el cual se realizaba la hidratación se calentó debido a la liberación de calor de la reacción. Este fue un indicio de que la reacción se estaba llevando a cabo.

Los resultados obtenidos para este análisis en cales hidratadas no permiten distinguir entre cales óptimamente calcinadas, semicalcinadas o sobrecalcinadas, pues la variable fue manipulada para mantenerla lo más constante posible. Esto quiere decir, que las pérdidas para las diferentes cales, a distintas temperaturas y finezas tendrán pérdidas al fuego similares, inducidas al añadir el agua suficiente para mantener la pérdida al fuego dentro del rango antes mencionado.

Un resultado importante de observar son las pérdidas obtenidas para las muestras de cal viva e hidratada cálcica semicalcinada. Como se observa en los Cuadros 33 y 34 para los resultados de la cal viva cálcica, las pérdidas ya se encuentran dentro del rango determinado para una cal hidratada, esto complica la hidratación de la muestra sin sobrepasar el límite superior del rango. Por ello, se agregó únicamente 2ml de agua a cada muestra cálcica semicalcinada, con ello la pérdida aumentó, pero sin sobrepasar la pérdida superior estipulada en el rango (ver Cuadros 91 y 92). Es por ello, que gran parte del óxido de calcio presente no se hidrató. Debido a eso, al momento de realizar el análisis de ampolladuras y picaduras se observó que al añadir agua a la muestra para producir el mortero el recipiente se calentó lo que demuestra que parte del óxido de calcio sin hidratarse terminó de hidratarse antes de colocar el mortero en el vidrio de acabado.

Las cales sobrecalcinadas mostraron una hidratación violenta y la reacción exotérmica esperada, pero fue inferior a lo observado al hidratar cales obtenidas del proceso de calcinación óptima. Especialmente para el caso de cales cálcicas, pues su hidratación es más rápida que para cales dolomíticas debido a la presencia de magnesio en las últimas.

2. Fluorescencia de rayos X (XRF) para cales hidratadas. De la misma forma en que los análisis de fluorescencia de rayos X fueron utilizados para analizar las muestras de cal viva para monitorear el proceso de calcinación en las diferentes temperaturas, ahora son utilizados para monitorear el proceso de hidratación de dichas cales vivas.

El análisis, para estas muestras, nos permite poder realizar comparaciones entre las cales vivas e hidratadas, e incluso observar la hidratación basada en la temperatura de calcinación. Sin embargo, esto último se dificulta ya que la variable hidratación se mantuvo constante dentro de un rango lo que no

permite observar claramente las diferencias de hidratación entre muestras calcinadas óptimamente y aquellas sobrecalcinadas. Las diferencias más claras son aquellas observadas entre las cales vivas semicalcinadas y su versión hidratada, pues existe menor transformación del óxido al hidróxido; especialmente para las cales cálcicas obtenidas del proceso a 850°C.

Para las muestras producto de una calcinación óptima, la diferencia en los porcentajes de los óxidos entre cales vivas e hidratadas son elevadas, en ambos casos (cálcica y dolomítica). Para cales cálcicas (ver Cuadros 53 y 101) la diferencia en el óxido de calcio es aproximadamente 20%, denotando que gran parte del óxido de calcio reaccionó para obtener su forma hidratada, hidróxido de calcio. Para cales dolomíticas (ver Cuadros 62 y 110) la diferencia en el óxido de calcio fue aproximadamente de 20% y para el óxido de magnesio del 10%. Estas diferencias en los porcentajes de óxido de calcio y magnesio se deben a que el magnesio como se menciona en el marco teórico, posee una hidratación más lenta a la del óxido de calcio. Esto a pesar de que cuenta con un sistema cúbico al igual que el CaO, pero sin embargo el cristal es levemente más pequeño y denso (con aristas de 4.203Å), lo que le otorga un tiempo tardío de hidratación. Diferencias similares se observan para el caso de las cales obtenidas del proceso de sobrecalcinación. Para cales dolomíticas las diferencias en los óxidos son levemente inferiores que para cales óptimas, debido a la lenta hidratación del magnesio, como se mencionó con antelación, eso sumado al proceso de sobrecalcinación que aumenta la densidad del material y con ello se dificulta la hidratación.

Por último, para el caso de las cales semicalcinadas las diferencias son inferiores, especialmente para las cales cálcicas. Esta inferior diferencia se debe a que no todo el carbonato pasó a ser óxido, pues no existe una buena calcinación, por lo que se hidrata únicamente el óxido formado y no el carbonato. Para el caso de las cales cálcicas semicalcinadas las diferencias en los porcentajes son mínimas e incluso inferiores al 1%. Esto se debe principalmente a que la hidratación de esta muestra no se realizó por completo debido a la pérdida inicial como cal viva que poseía, pues ya se encontraba en el rango establecido para cales hidratadas. Ahora bien, para el caso de las cales dolomíticas las diferencias son mayores que para el caso de cales sobrecalcinadas debido a que la densidad de las cales semicalcinadas es menor a la de sobrecalcinadas por lo que su hidratación será más fácil, incluso para el óxido de magnesio.

En cuanto a las gráficas para cales cálcicas (Figuras 56 a 58) muestran para las finezas 75% y 85% que las cales sobrecalcinadas poseen mayor porcentaje de óxido sin hidratar que es de esperar debido a su condición de sobrecalcinación, en tanto que para la fineza 94% existe mayor cantidad de CaO hidratado. Las cales dolomíticas (Figuras 59 a 64) sobrecalcinadas muestran que la tendencia para el óxido de calcio es variable comparada al porcentaje para cales dolomíticas óptimas. En algunas ocasiones el porcentaje es mayor y en otros no. En gran parte se debe a que no se produjo una buena sobrecalcinación del carbonato de calcio como en el de magnesio. Pues en las gráficas del porcentaje de óxido de magnesio, las cales sobrecalcinadas poseen menor hidratación que aquellas calcinadas óptimamente o semicalcinadas.

3. Distribución de tamaño de partícula (PSD). Este análisis nos permite distinguir, al igual que para cales vivas, las distintas finezas con las que se trabajó, así como las diferencias en el tamaño de partícula al hidratar los óxidos para obtenerse los hidróxidos.

El análisis permite observar las diferencias en las finezas para las cales hidratadas pues el cambio de volumen será proporcional al tamaño de la partícula y con ello se distingue nuevamente la tendencia del aumento del tamaño de partícula a medida que la fineza del material disminuye. Además de ello, como se mencionó permite observar cómo cambia su tamaño la partícula cuando se lleva a cabo la reacción de hidratación. Con esto puede indagarse en la posibilidad de una lenta hidratación en donde existen partículas de óxido sin hidratarse, ya que la diferencia entre el tamaño de partícula promedio de cal viva e hidratada no varía en grandes proporciones, lo que indica que aún existen partículas de óxido que no cambiaron su volumen al no hidratarse.

De igual manera que para las cales vivas, las muestras de cales hidratadas debían tamizarse con un tamiz No. 170, para separar las partículas gruesas que pudieran obstruir el sistema de mangueras del equipo. Este previo tratamiento a las muestras era especialmente necesario para cales hidratadas dolomíticas, pues en estas cales se observaron partículas de mayor tamaño que en cales hidratadas cálcicas. Esto indica que el óxido de magnesio al hidratarse aumenta su volumen más que el óxido de calcio. El tamizado puede influir en la cuantificación del tamaño de partícula y en su distribución, pues no permite la medición de partículas gruesas las cuales pueden provocar una tendencia distinta a la observada. Además, lo mencionado acerca de la configuración del equipo para detectar partículas que tengan un tamaño mayor o igual a $1.0\mu\text{m}$. Estos dos elementos restringen el análisis.

Como se menciona en el apartado de teoría, la cal viva tanto dolomítica como cálcica es un material deseoso de agua, aunque no es soluble en ella, pero posee una alta afinidad por la misma. Debido a eso puede absorberla a velocidades altas, provocándose una reacción exotérmica con la cual expandirá su volumen aproximadamente 2.5 veces su tamaño original. Esto produce, muchas veces, la rotura de las partículas en diversas partículas con un tamaño menor a la partícula hidratada. Sin embargo, esto dependerá de la reactividad que posea la cal y del tamaño de la partícula; pues partículas de menor tamaño tendrán una hidratación más rápida y completa. Es por ello, que se trabajó con tres diferentes finezas, pues debían tener un área superficial distinta para observar el proceso de hidratación. La fineza óptima es aquella en la cual los óxidos de calcio y magnesio poseen tamaños de partículas pequeños con una mayor área superficial que permita una mayor rapidez en la hidratación. El tamaño de la partícula también dependerá de la temperatura en el proceso de calcinación, pues como se observa en la Figura 25, existe una estrecha relación entre el área superficial y la temperatura de calcinación.

En las cales obtenidas de procesos de calcinación óptimos, los tamaños de partículas entre cales vivas e hidratadas poseen una mayor diferencia. Este es el caso de la cal cálcica obtenida a 900°C (ver Cuadros 71 y 119) en la que la diferencia de tamaño de partícula de la cal viva e hidratada es mayor que para las cales semicalcinadas o sobrecalcinadas. Incluso al observar las diferencias en el tamaño promedio para las tres finezas, la fineza de 94% posee diferencias levemente mayores en el cambio de volumen debido a que su tamaño permite una mejor y más completa hidratación, lo cual puede observarse gráficamente en la Figura 64. Las cales dolomíticas óptimas también poseen diferencias entre el tamaño de partícula de cales vivas y de cales hidratadas (ver Cuadros 80 y 128), sin embargo, esa diferencia es inferior a la de cales cálcicas óptimas. Esa diferencia se debe a que el óxido de magnesio presente en la dolomita cuenta con un cristal de menor tamaño comparado al de calcio, lo cual lo hace más denso y lento a la reacción de hidratación. Las diferencias de tamaño para ambos tipos de cal pueden observarse gráficamente en las Figuras 65 y 68, en las cuales se observa claramente las diferencias entre cales vivas e hidratadas, observando un pequeño aumento en la diferencia para cales cálcicas.

Para el caso de cales semicalcinadas los cambios en el tamaño son menores que para las cales óptimas. Esa diferencia se debe a la presencia de partículas de carbonato de calcio, las cuales no son capaces de reaccionar con el agua por lo que su volumen permanece constante e influye en la cuantificación promedio del tamaño de partícula dentro de las muestras. Además de ello, hay que agregar a para las cales dolomíticas la presencia del óxido de magnesio reduce la velocidad de la reacción de hidratación. En el caso de las cales cálcicas semicalcinadas la reducción de la diferencia en el tamaño de partícula entre cal viva e hidratada, también se debe a lo antes expuesto sobre la cantidad de agua añadida por tener una pérdida de cal viva cercana a una de cal hidratada. Esto demuestra nuevamente que en dicha muestra se hidrata una pequeña cantidad del óxido, mientras gran parte del óxido queda sin hidratarse y sin aumentar su volumen. Las Figuras 66 y 69 muestran gráficamente estos resultados, en las cuales las barras poseen menor diferencia de alturas que para las cales óptimas.

Por último, para el caso de las cales sobrecalcinadas la diferencia en el cambio de tamaño de partícula promedio es mucho menor a cualquiera de las cales antes discutidas. Este pequeño incremento en el tamaño de partícula se debe a la poca hidratación de las partículas de óxido de calcio y magnesio. La causa principal, como se menciona en Castillo, 2010; se debe que al aumentar la temperatura de calcinación los cristales formados aumentan su tamaño e inician el proceso de sinterización disminuyendo el volumen de los poros y aumentando la densidad aparente, lo cual afecta la reactividad química que afecta su afinidad por el agua dificultando su hidratación. A ello hay que agregarle, la dificultad que posee el magnesio para hidratarse debido a su estructura cristalina pequeña y más densa. Por ello, existen cantidades de óxidos remanentes sin hidratar.

4. Difracción de rayos X (XRD). El análisis de difracción de rayos X en las muestras de cal hidratada permiten observar las diferentes fases cristalinas que se forman al hidratar la cal, pues se puede observar aquellos componentes que cambian su estructura y fórmula al pasar de una cal viva a una cal hidratada. Además, el análisis nos permite distinguir entre procesos de buena hidratación y de mala hidratación, pues se podrá observar presencia de las estructuras cristalinas de los óxidos, (periclase MgO y cal CaO) e hidróxidos (brucita Mg(OH)₂ y portlandita Ca(OH)₂). Esto dependerá de cada temperatura trabajada y también del tamaño de partícula de la muestra.

Para la muestra de cal hidratada cálcica obtenida del proceso de calcinación óptimo a 900°C, los resultados muestran principalmente la presencia de portlandita (ver Cuadro 137), cuya composición es el hidróxido de calcio, el cual es el componente que se forma tras llevar a cabo la hidratación del óxido de calcio. El 100% de portlandita indica que todo el óxido de calcio presente en la muestra fue capaz de hidratarse para obtenerse cal hidratada en su totalidad. Esta fácil hidratación se debe, principalmente a la temperatura de calcinación, pues se utilizó la temperatura mínima requerida para llevar a cabo una descomposición del carbonato eficiente. Esto indica que la cal obtenida, sin importar su fineza, será altamente reactiva ante la presencia de agua; ya que posee mayor afinidad por la misma. Sin embargo, las cales con menor fineza reaccionaron más rápidamente que las que contienen partículas más grandes, pues la hidratación será más rápida y completa mientras el tamaño de partícula sea menor ya que existe mayor área superficial. Al ser una cal cálcica calcinada a temperaturas mínimas requeridas, la densidad aparente del material es menor comparada a cales sobrecalcinadas, de la misma forma posee mayor porosidad (mayor volumen de poros) lo que permite una hidratación más rápida.

Al comparar los resultados de la cal cálcica óptima, con la obtenida para la cal dolomítica obtenida a temperatura óptima (ver Cuadro 140), se observa una reducción en el porcentaje de hidratación. Esto se debe a que la cal dolomita posee dos tipos de óxidos, de calcio y magnesio. Para el caso del óxido de calcio puede observarse que al hidratar la muestra éste modificó su estructura para obtener la estructura perteneciente a la del hidróxido de calcio. Sin embargo, la hidratación del óxido de magnesio fue más lenta lo que se refleja en los análisis de distribución de tamaño de partícula antes mencionado. Esta hidratación lenta del óxido de magnesio se refleja en los porcentajes de periclase presentes en las muestras y los pequeños porcentajes de brucita en algunas de las muestras. Al contrario de los porcentajes elevados de portlandita en todas las muestras. Para el caso de la fineza 94% en la muestra 2, existe una menor cantidad de brucita a la esperada de la misma manera para la fineza 75%. Esto contradice los resultados obtenidos en los análisis de distribución de partícula, pues en ellos se muestra un cambio en el tamaño de la partícula de la cal viva a la cal hidratada, lo que indica que gran parte de la muestra se hidrató. Esta diferencia observada en el análisis XRD puede deberse a la posición de los cristales al elaborar la pastilla de lectura para el equipo, pues afecta la dispersión de la onda y por lo tanto la identificación de la muestra. Es por ello que debe elaborarse la pastilla añadiendo una mínima presión mecánica pero no demasiada que pudiera

desordenar la orientación de los cristales. Dicha orientación debe ser randómica dentro de la celda unitaria del cristal, para que cada rayo X que incida indique la presencia de las diferentes fases mineralógicas (con lo cual se observan mayor cantidad de picos en los ángulos 2θ correctos). Además de ello, el proceso de molienda puede afectar los cristales, tanto en orientación como en tamaño; lo cual puede afectar la detección que posee el equipo (exposición del PhD Luciano Gobbo de Panalytical en Cementos Progreso, diciembre 2015).

Los resultados para cales cálcicas semicalcinadas mostrados en el Cuadro 138 presentan porcentajes de componentes que evidencian su naturaleza semicalcinada. Por un lado, el porcentaje de cal (CaO) para las diferentes muestras es elevado lo que indica que la muestra no se hidrató por completo. Esto debido a que como se mencionó, la cantidad de agua añadida a estas muestras fue muy poca pues sus pérdidas al fuego como cales vivas eran cercanas a las pérdidas al fuego de una cal hidrata. Esto no permitió que se hidratara por completo el óxido de calcio que se produjo en el proceso de calcinación. Sin embargo, al momento de realizar el análisis de ampolladuras y picaduras; y elaborar el mortero el óxido de calcio remanente terminó de hidratarse. Ahora bien, el porcentaje elevado de calcita indica que la descomposición del carbonato de calcio no se dio por completo pues aún queda la fase mineralógica presente en la caliza (ver Cuadro 19); esto debido a que se utilizó una temperatura inferior a la mínima requerida para descomponer por completo el carbonato. Cabe mencionar que el carbonato es poco reactivo a la presencia de agua por lo que no se producirá hidratación del mismo.

Para el caso de la cal dolomítica semicalcinada, los resultados del Cuadro 141 presentan porcentajes de algunos componentes que representan su naturaleza de cal semicalcinada. Por un lado, el porcentaje de calcita en las muestras, como se mencionó anteriormente evidencia la falta de descomposición del carbonato al óxido, sin embargo, esto se observa únicamente para la muestra 1. En tanto que para la muestra 2 este compuesto no se encuentra presente para las tres finezas. Esto pudo deberse a lo antes mencionado acerca de la orientación de las partículas dentro de la celda unitaria. Ahora bien, el porcentaje de periclase es elevado en algunas muestras, y en otras se encuentra ausente. En las muestras con presencia de periclase se observa una mala hidratación del mismo para producir brucita, esto debido a la lenta hidratación del óxido de magnesio. Ahora bien, para la muestra 1 finezas 94% y 85% se observa que no existe porcentaje periclase, indicando una hidratación completa.

Para las cales cálcicas sobrecalcinadas a 1100°C el Cuadro 139 muestra los resultados obtenidos. Para este caso, existe presencia tanto de cal como de portlandita. Por un lado, la presencia de óxido de calcio como cal sin hidratarse evidencia su naturaleza sobrecalcinada, pues la densidad de la cal, su porosidad y estructura dependen principalmente de la temperatura de calcinación. Cuanto mayor sea dicha temperatura, mayor será la densidad de la cal viva fabricada, por ello es que una cal sobrecalcinada tendrá mayor densidad a una cal semicalcinada u óptimamente obtenida. Esto afecta su afinidad por el agua y por lo tanto

su capacidad a hidratarse, lo que deja presencia de óxido de calcio sin hidratar. A pesar de ello, las muestras con partículas de menor tamaño lograron hidratarse por completo, al igual que las cales óptimas. Esto se debe a que la reacción de hidratación se lleva a cabo en la superficie expuesta del material por lo que las cales más finas tendrán mayor área superficial para la acción del agua por lo que se hidratarán con mayor rapidez (Escuela de ingeniería de minas, energía y materiales de Oviedo, 2014).

Para el caso de cales dolomíticas sobrecalcinadas a 1087°C, el Cuadro 145 muestra los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos indican la presencia de periclasa, portlandita y brucita; principalmente. Aunque también se observa presencia de calcita la cual más que falta de calcinación del carbonato es una contaminación de la muestra, ya que a elevadas temperaturas la disociación del carbonato se da por completo. Para la muestra 1 fineza 94% no se obtiene presencia de periclasa, lo que indica que se llevó a cabo una hidratación completa de ambos óxidos, de igual manera se observa en el caso de la muestra 2 fineza 94%. La tendencia es similar a la obtenida para el material sobrecalcinado de cales cálcicas, explicándose nuevamente por el tamaño de partícula. En el caso de la portlandita se observa, en su mayoría, altos porcentajes debido a la hidratación completa del óxido de calcio presente en la muestra. Esta hidratación es más rápida comparada a la del óxido de magnesio debido a que la partícula es menos densa lo que da lugar a una mejor hidratación. Por último, la lenta hidratación de las cales con finezas mayores se debe al tamaño de partícula y a la temperatura de calcinación pues como se expresó para las cales cálcicas sobrecalcinadas, la densidad es mayor, pues la dolomita sobrecalcinada posee mayor densidad que la cal viva óptimamente obtenida (varia entre 3.4 y 3.8Kg/dm³; como se observa en el marco teórico).

5. Ampolladuras y picaduras; y análisis estadístico. Los resultados mostrados en el Cuadro 143 nos permiten observar el comportamiento de la variable dependiente con base en los diferentes tratamientos que se utilizó al manipular las variables independientes.

Como puede observarse las cales cálcicas óptimamente calcinadas y semicalcinadas no presentaron ampolladuras ni picaduras en los repellos trabajados. Por un lado, las cales cálcicas óptimas fueron obtenidas utilizando la temperatura mínima de calcinación necesaria para descomponer casi por completo la calcita en óxido de calcio. Como se observó en los resultados de fluorescencia de rayos X los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de óxido de calcio son elevados para cada muestra, indicando una alta conversión. Al no sobrepasar la temperatura óptima de calcinación, se evita producir en el material una sobrecalcinación que modifican el tamaño estructural del cristal formado, como se menciona más adelante. Por ello, mientras más cercano a la temperatura mínima requerida se produzca la calcinación, mayor calidad tendrá la cal producida. Estas condiciones de buena calcinación permiten que la cal se hidrate por completo y rápidamente al entrar en contacto con el agua, pues posee una alta afinidad por la misma. La explicación del proceso de calcinación óptimo inicia con el calentamiento de la caliza con lo cual se expande, antes de la disociación produciéndose una calcinación superficial. Esto produce que el volumen

de los poros aumente, manteniéndose constante al finalizar la calcinación; pues llega a un máximo de poros y el volumen queda invariable; por lo que la densidad es pequeña (Castillo, 2010: 4) Este volumen de poros grande y densidad pequeña permiten que la cal sea reactiva y se hidrate con mayor facilidad. Esa hidratación completa puede observarse en los resultados discutidos de difracción de rayos X para estas muestras; en donde se observa únicamente presencia de portlandita.

Lo mismo sucede para las cales dolomíticas calcinadas óptimamente. Sin embargo, como se observa en el Cuadro 143 se produjo presencia de ampolladuras y picaduras en una de las muestras. Esta presencia de la variable respuesta puede explicarse por la lenta hidratación que posee el óxido de magnesio debido a su estructura cristalina ligeramente más pequeña que la del óxido de calcio, lo cual lo hace más denso. La densidad en esta partícula produce que su reactividad disminuya y se produzca hidratación lenta. La muestra en la cual se produjo el fenómeno posee 75% de fineza, otro factor que contribuye a la disminución en la rapidez de hidratación. Pues partículas pequeñas poseen un área superficial mayor con las cuales el agua entra en contacto produciendo una hidratación superficial inicial. Esto no sucede con partículas de mayor tamaño, en donde el área superficial es menor. Esta lenta hidratación se observa en el resultado de difracción en el que se observa que la muestra posee 24.2% de óxido de magnesio no hidratado, el cual al hidratarse posterior a colocarlo en el repello, produce que la partícula aumente su volumen provocando que ésta busque espacio para expandirse; provocando de esta manera el fenómeno de ampolladuras y picaduras. Este fenómeno se observa nuevamente para algunas de las cales dolomíticas semicalcinadas, de igual manera para la muestra con partículas más gruesas pues su reacción de hidratación está doblemente frenada. Sin embargo, los resultados de difracción de rayos X muestran presencia de periclase, especialmente en la muestra 2 dolomítica a 837°C. Sin embargo, para las finezas 85% y 94% no se observó ampolladuras y ni picaduras. No siempre las cales dolomíticas son expansivas, pues depende en gran parte de las circunstancias en el magnesio, como la velocidad de enfriamiento tras la calcinación y el tipo de cristalización que se observa, especialmente su tamaño cristalográfico pues ambas muestras son más finas. Para verificar esto es recomendable observar la partícula mediante tomografía o bien mediante microscopía de barrido electrónico, pues este último permite observar las características de los cristales debido a la temperatura y tiempo de calcinación (Castillo, 2010: 3).

Para las cales cálcicas semicalcinadas, no se observa presencia de ampolladuras ni picaduras, esto a pesar de presentar porcentajes relativamente altos de óxido de calcio sin hidratar en los análisis de difracción de rayos X. Esto se debe a que la hidratación no se llevó a cabo correctamente pues se añadió poca agua a la muestra debido a su pérdida como cal viva. Sin embargo, al momento de elaborar el mortero para el ensayo de ampolladuras y picaduras, la muestra terminó de hidratarse por lo que no provocó expansión volumétrica posterior de ser colocado el mortero como repello. Si se compara esto con la cal dolomítica semicalcinada, puede discutirse que nuevamente la presencia del magnesio reduce la velocidad

de hidratación de la muestra. Por ello en cales dolomíticas se observa presencia de ampolladuras y picaduras.

Por último, el fenómeno puede observarse en las cales dolomíticas sobrecalcinadas, en las cuales 4 de las muestras presentan presencia de ampolladuras y picaduras. Además de los factores antes mencionados, la cal sobrecalcinada posee una desventaja más. Cuando se aumenta la temperatura por encima de la óptima, los cristales aumentan su tamaño y se inicia un proceso de sinterización, lo cual disminuye el volumen de los poros aumentando la densidad aparente del material. Esto afecta la reactividad química y por ende la reacción de hidratación de la misma. Provocando que gran parte del óxido de magnesio (especialmente) se hidrate más lentamente. Esto se refleja en los resultados para partículas gruesas obtenidos en la difracción de rayos X, en los cuales existe porcentaje de óxido de magnesio sin hidratar. Lo mismo puede observarse para las cales cálcica sobrecalcinadas, las cuales presentan ampolladuras y picaduras en 4 muestras, siendo las más gruesas (75% y 85%). Y también puede observarse la presencia de óxido de calcio sin hidratar, debido al aumento en la densidad el material, además de la presencia de partículas con mayor tamaño y menor área superficial.

Cuando se lleva a cabo un mal apagado de las cales vivas, se puede observar la presencia de partículas de óxido de calcio y magnesio, tomadas como impurezas. Al momento de elaborar morteros con este material suelen observarse problemas ante la presencia de humedad, pues los óxidos se transforman en el hidróxido aumentando su volumen significativamente. Es aquí en donde se observan las ampolladuras y picaduras, pues la partícula requiere espacio para producir tal expansión volumétrica.

Las diferencias que poseen las cales semicalcinadas y sobrecalcinadas producen sus diferencias en la hidratación. Por un lado las cales semicalcinadas poseen granos cristalinos más pequeños, con un área superficial mayor, poros más pequeños pero con un volumen total de poros mayor, además su densidad aparente es inferior, y gracias a todo esto posee mayor reactividad química. Por ello se observa menor cantidad de ampolladuras y picaduras, o bien no se observan para el caso de las cales cálcicas. Pues reacciona inmediatamente con el agua.

Los resultados antes mencionados se reflejan en el análisis estadístico. Según el análisis de varianza elaborado, las tres variables (factores) poseen efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta con un nivel de confianza del 95.0%. De igual manera se observa que las interacciones de la fineza y tipo de material, fineza y temperatura de calcinación y tipo de material y temperatura de calcinación, influyen sobre la variable respuesta. Para el caso de la fineza y la temperatura de calcinación se evidencia principalmente en las cales dolomíticas y las cales sobrecalcinadas; en las cuales las muestras finas no presentan ampolladuras ni picaduras. De igual manera la temperatura influye en la presencia de la variable respuesta, por los elementos antes mencionados acerca de la sobrecalcinación de las muestras.

Por ello se concluye que se observa presencia de ampolladuras y picaduras en cales sobrecalcinadas con una fineza por debajo del 94% que pase tamiz 200 para ambos tipos de cal. Además, la presencia de óxido de magnesio en muestras poco finas aumenta la probabilidad de presentar ampolladuras y picaduras.

VIII. CONCLUSIONES

1. La fineza que posea la cal tiene efecto estadísticamente significativo en el apareamiento de ampolladuras y picaduras en acabados que contengan cal en su formulación.
2. La temperatura de calcinación de la piedra caliza en la producción de cal tiene efecto estadísticamente significativo en la presencia de ampolladuras y picaduras en acabados que contengan cal en su formulación.
3. El tipo de materia prima utilizado para la producción de cal posee un efecto estadísticamente significativo sobre la presencia ampolladuras y picaduras en acabados que contengan cal en su formulación.
4. La interacción de los efectos de la fineza y temperatura de calcinación tiene significancia estadística en la presencia de ampolladuras y picaduras en acabados que contienen cal en su formulación.
5. La interacción de los efectos de la temperatura de calcinación y el tipo de materia prima tiene significancia estadística en la presencia de ampolladuras y picaduras en acabados que contienen cal en su formulación.
6. Las cales sobrecalcinadas con finezas por debajo de 94% provocan el apareamiento de ampolladuras y picaduras en morteros de cal.
7. La presencia de partículas de óxido de calcio y magnesio sin hidratar provocan la presencia de ampolladuras y picaduras en morteros a base de cal.
8. La mejor condición de fineza que no provoca apareamiento de ampolladuras ni picaduras es 94% pasante tamiz 200.
9. La obtención de cal cálcica a la temperatura óptima de calcinación no provoca la presencia de ampolladuras ni picaduras en morteros de cal.

IX. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda elaborar una investigación tomando como variables el tiempo de calcinación y el porcentaje de hidratación para determinar si estos pueden ocasionar efecto alguno en la presencia de ampolladuras y picaduras.
2. Es recomendable llevar a cabo análisis cristalográficos para determinar la forma y tamaño del cristal, análisis como microscopía de barrido electrónico, pues este último permite observar las características de los cristales debido a la temperatura y tiempo de calcinación.
3. Es recomendable realizar los análisis de difracción de rayos X elaborando pruebas previas de molienda para obtener un tamaño y orientación de partículas adecuados para obtener mejores resultados.

X. APÉNDICE

Figura 71. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

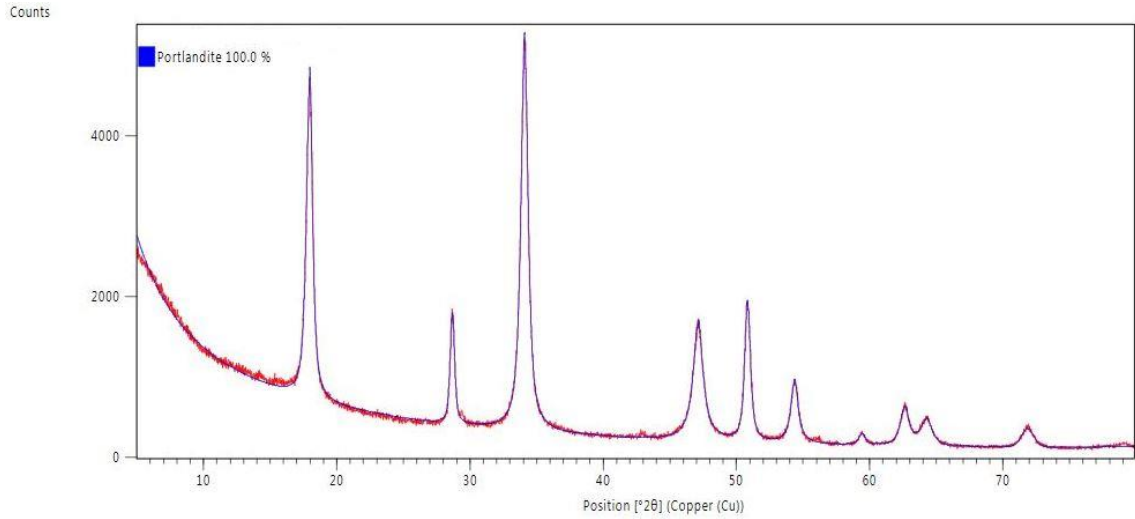


Figura 72. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

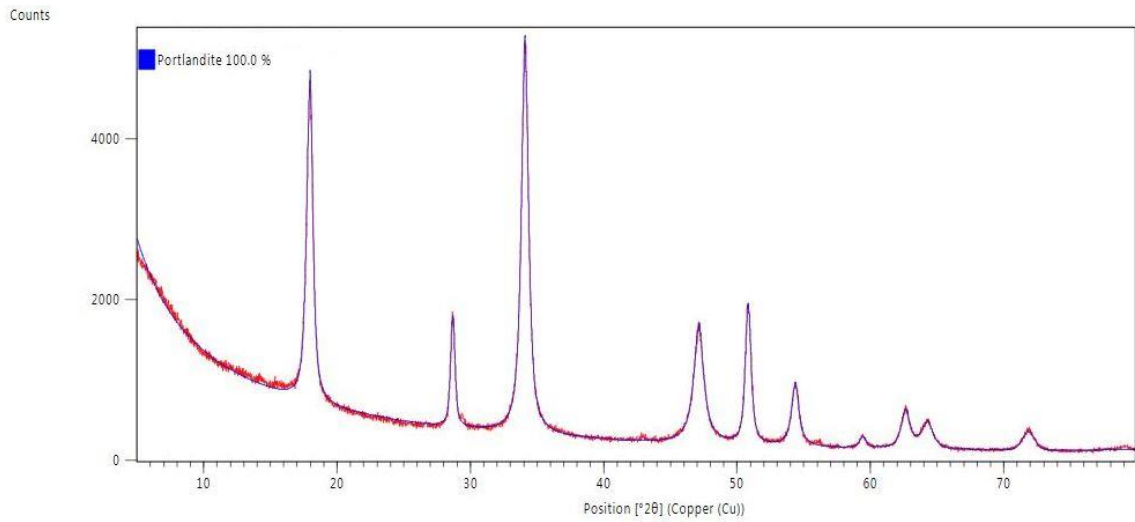


Figura 73. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

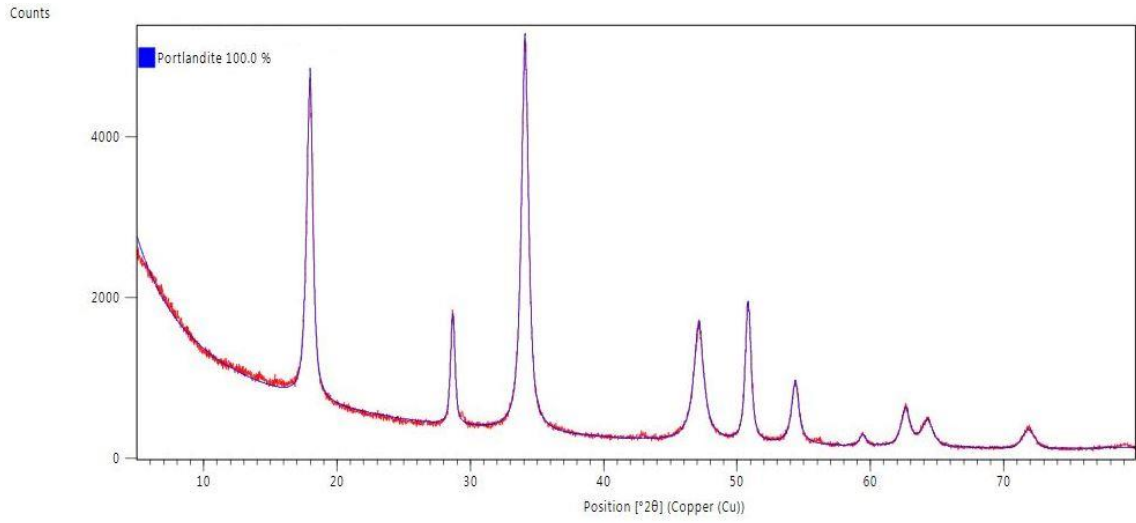


Figura 74. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

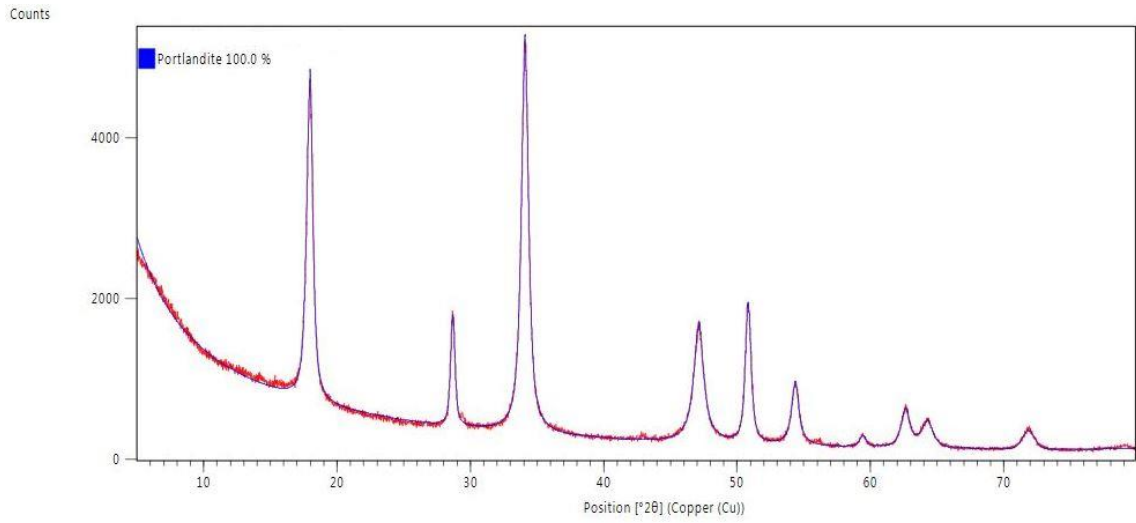


Figura 75. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

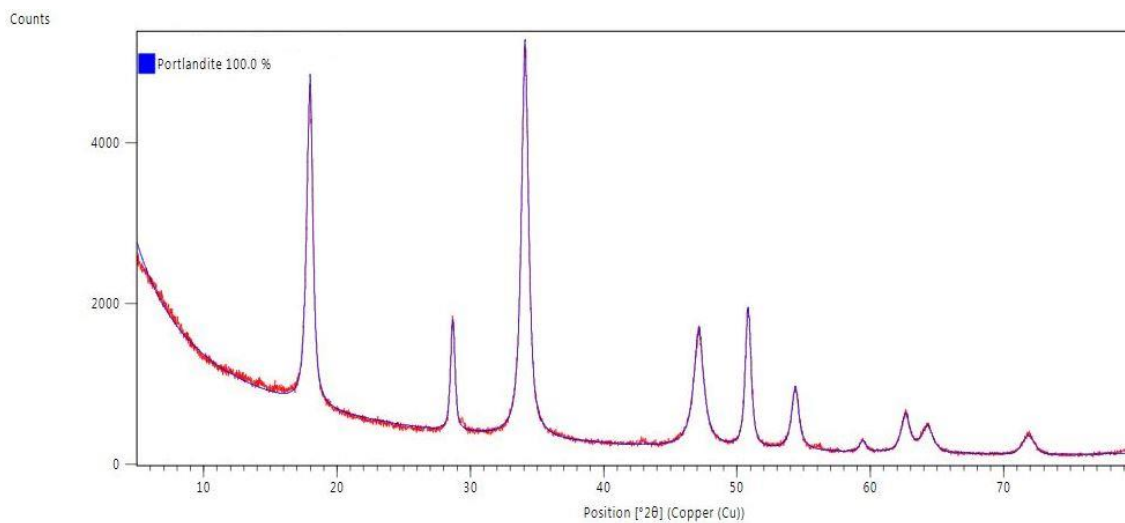


Figura 76. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 900°C.

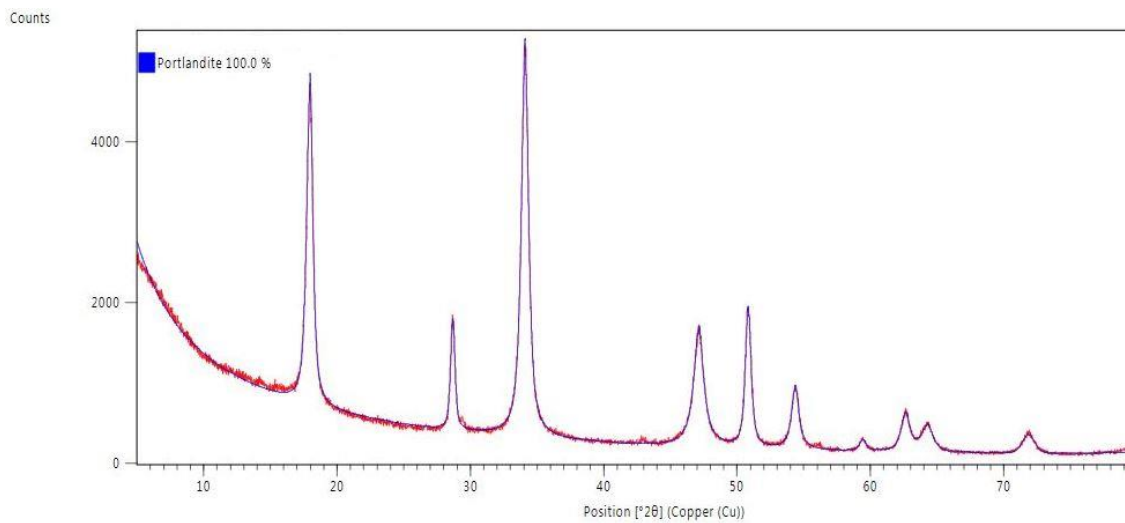


Figura 77. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

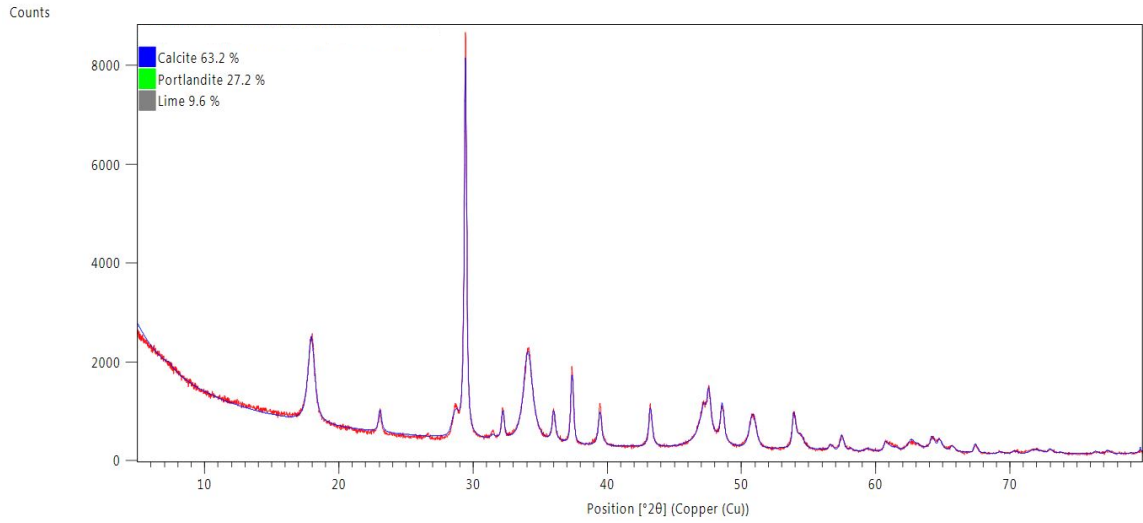


Figura 78. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

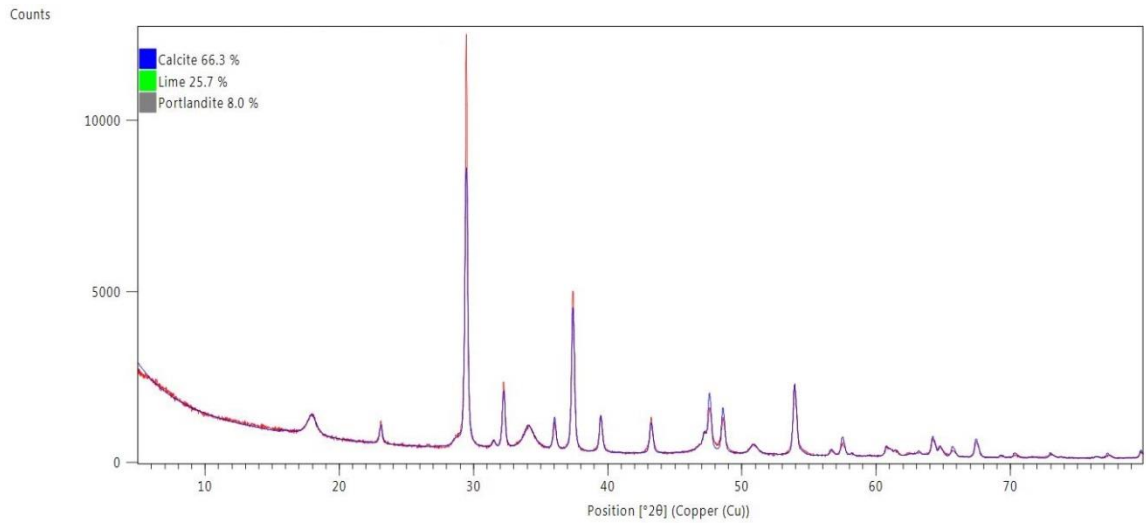


Figura 79. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

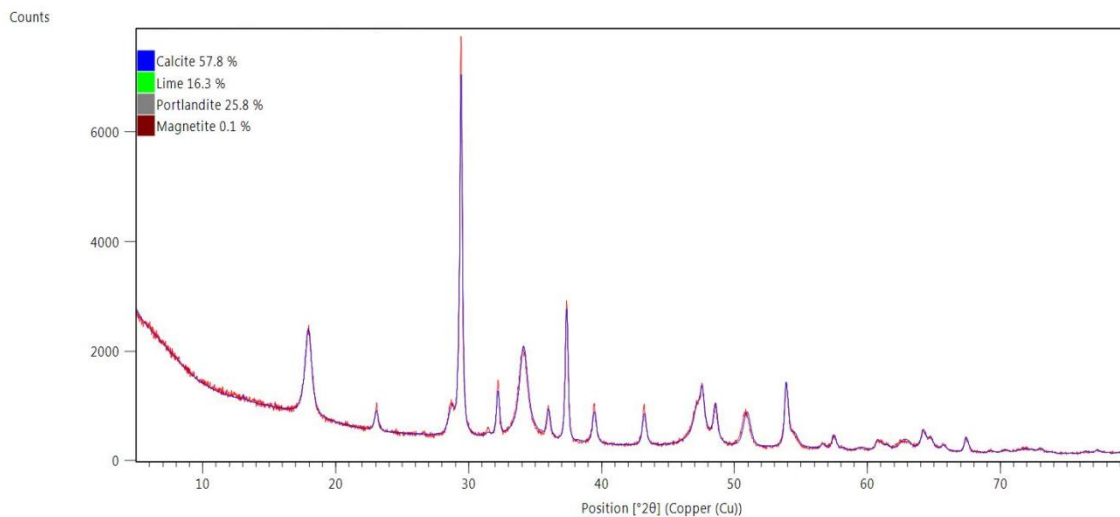


Figura 80. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

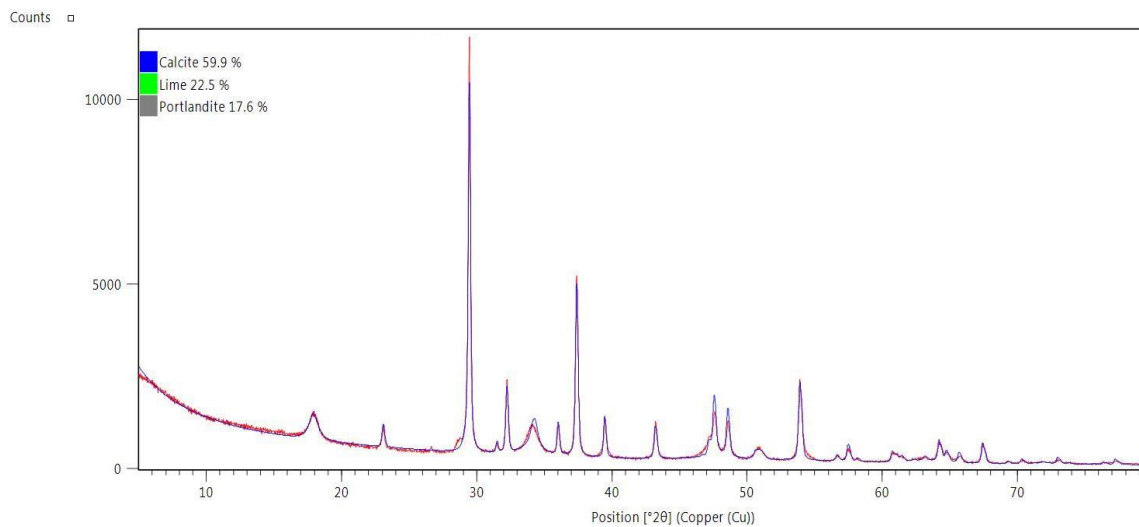


Figura 81. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

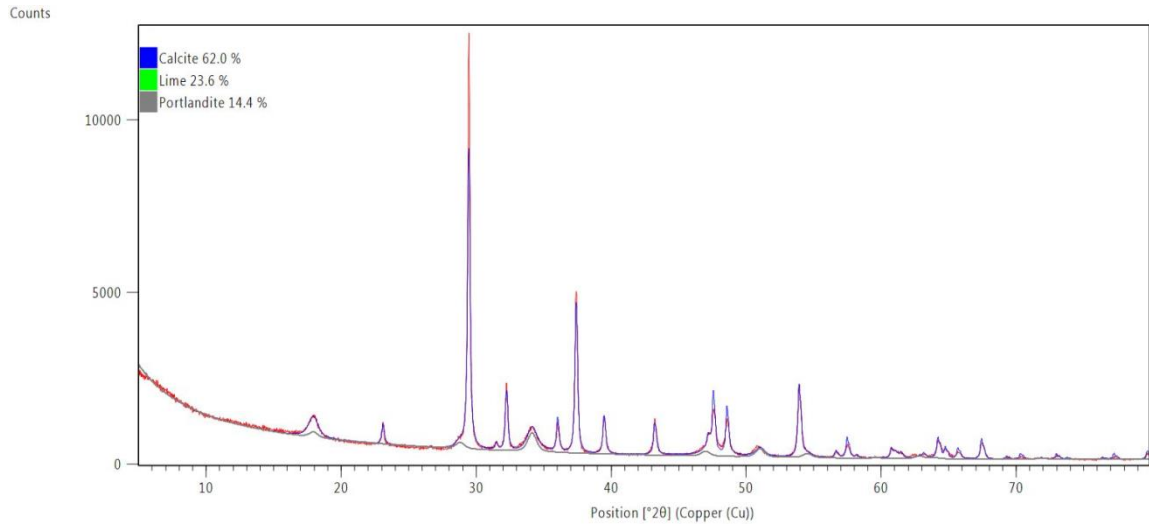


Figura 82. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 850°C.

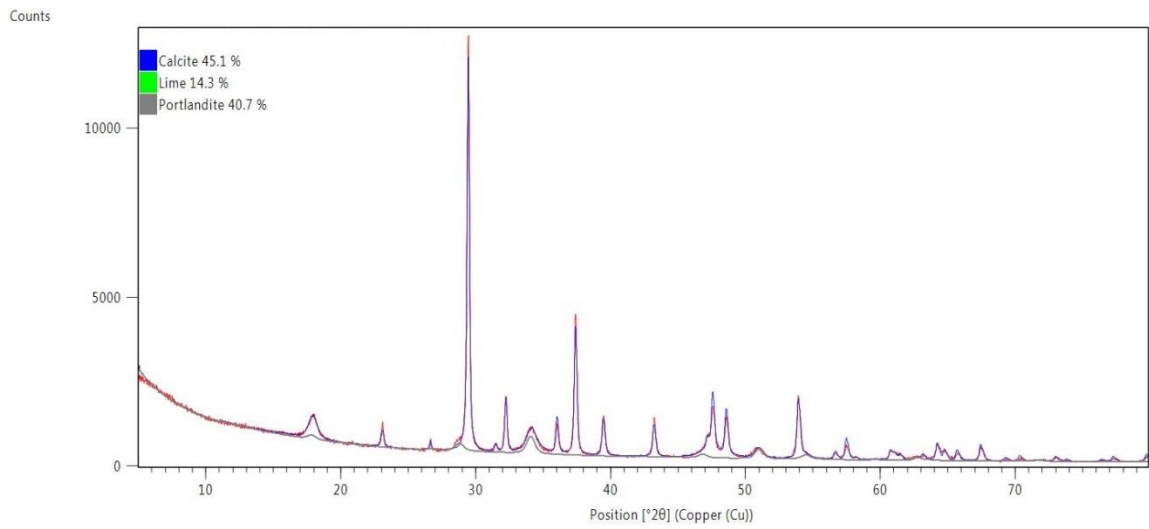


Figura 83. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

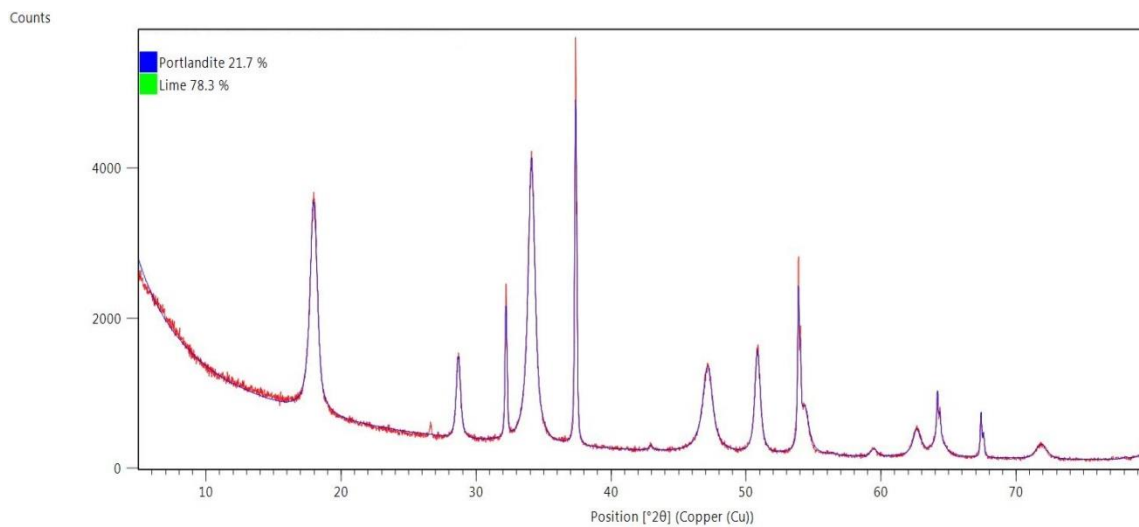


Figura 84. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

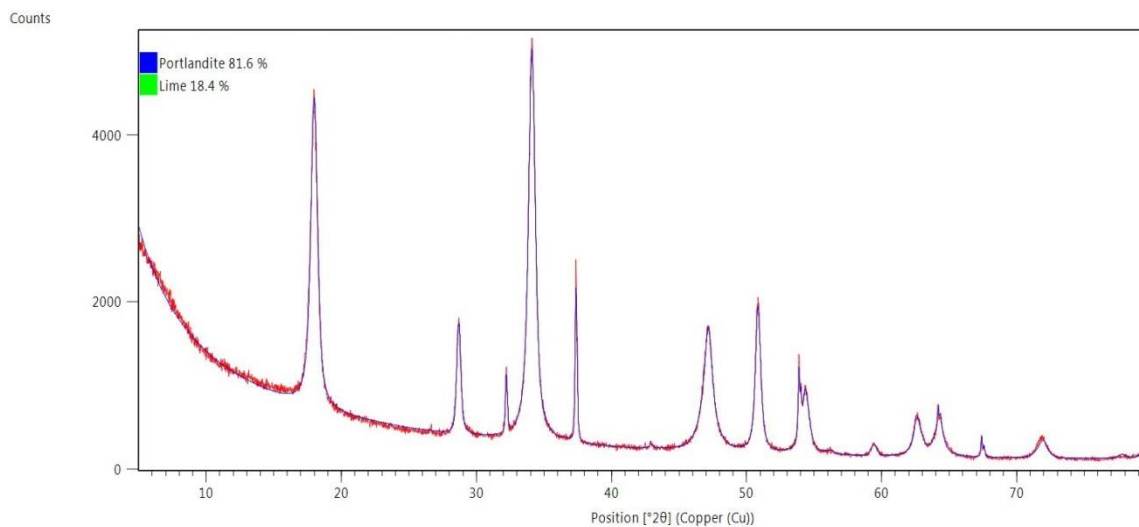


Figura 85. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

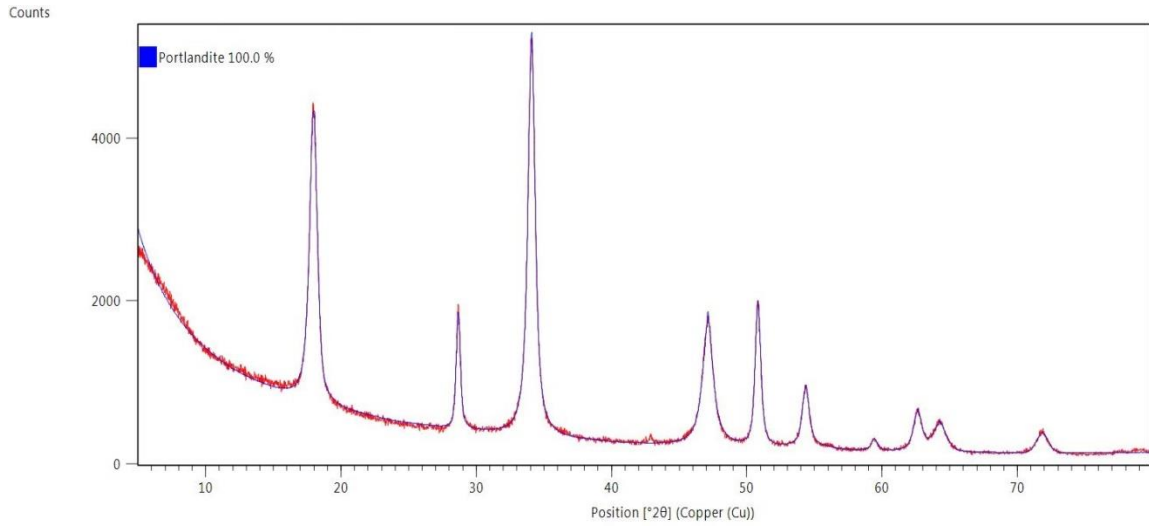


Figura 86. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

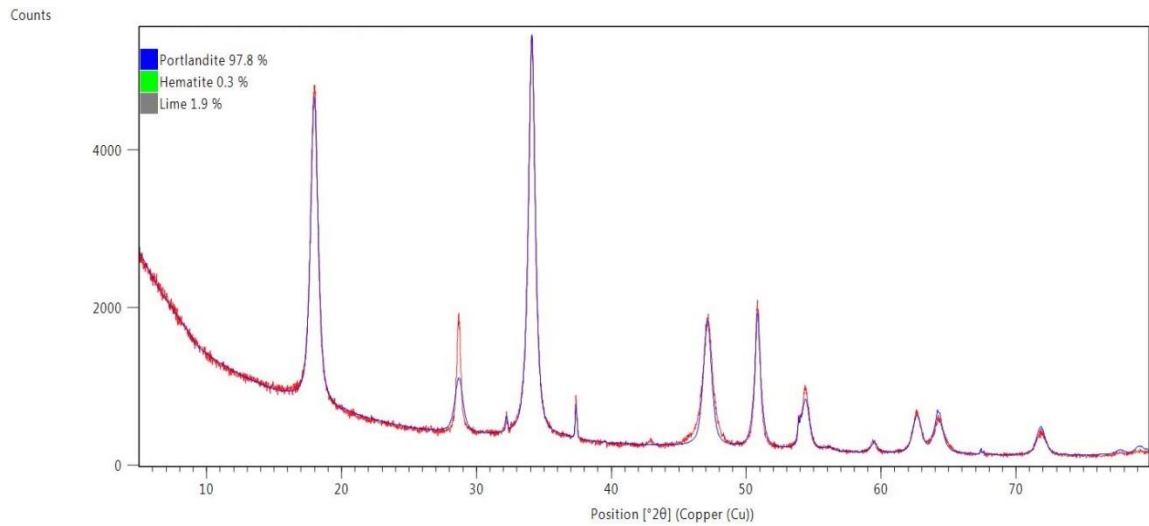


Figura 87. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

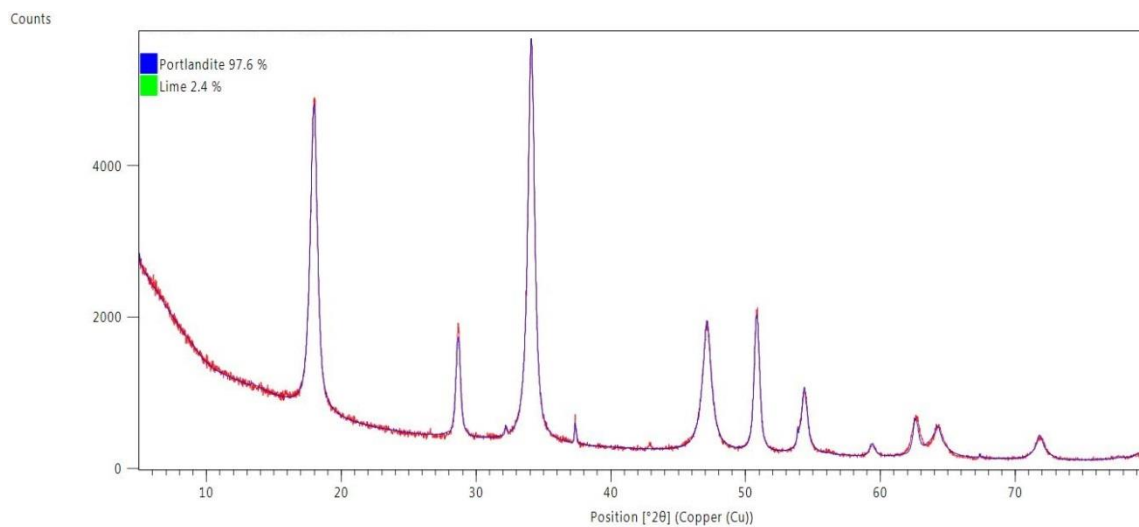


Figura 88. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1100°C.

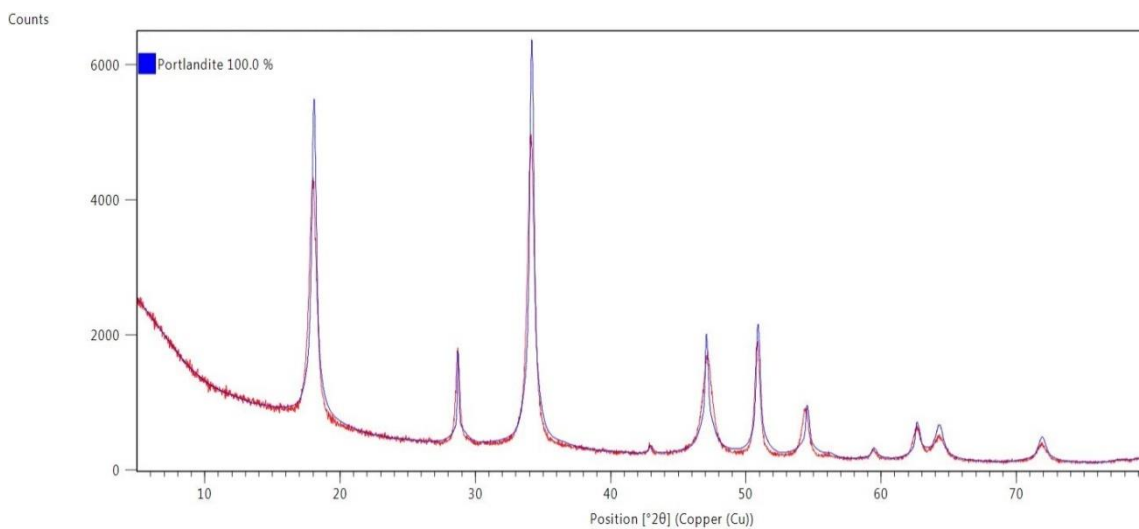


Figura 89. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

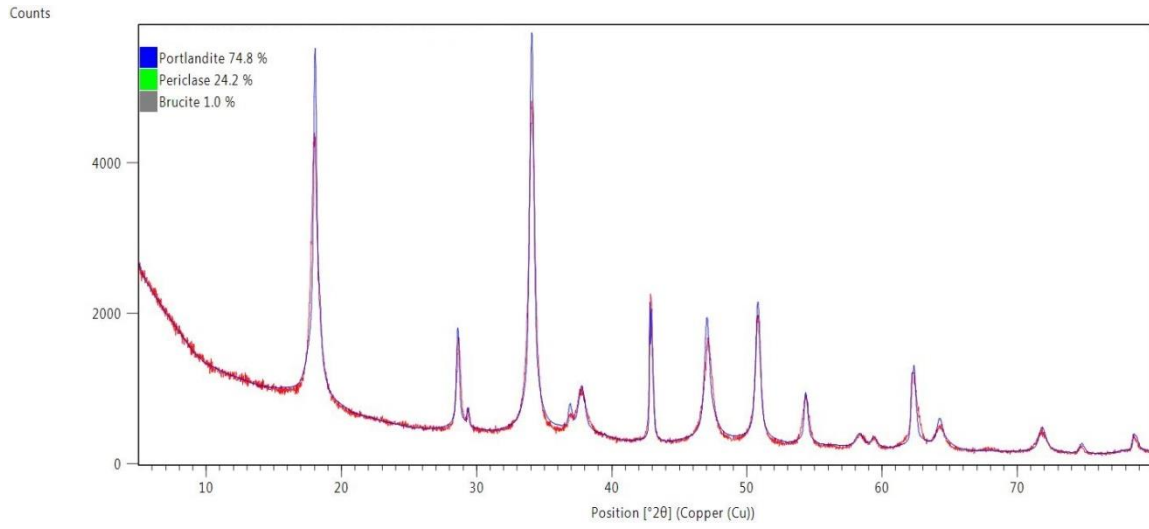


Figura 90. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

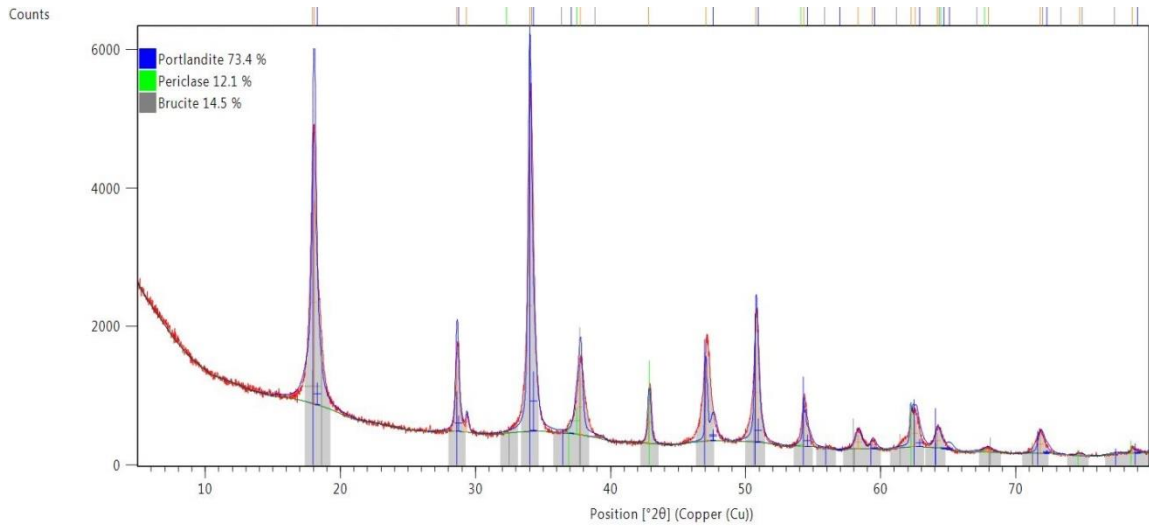


Figura 91. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

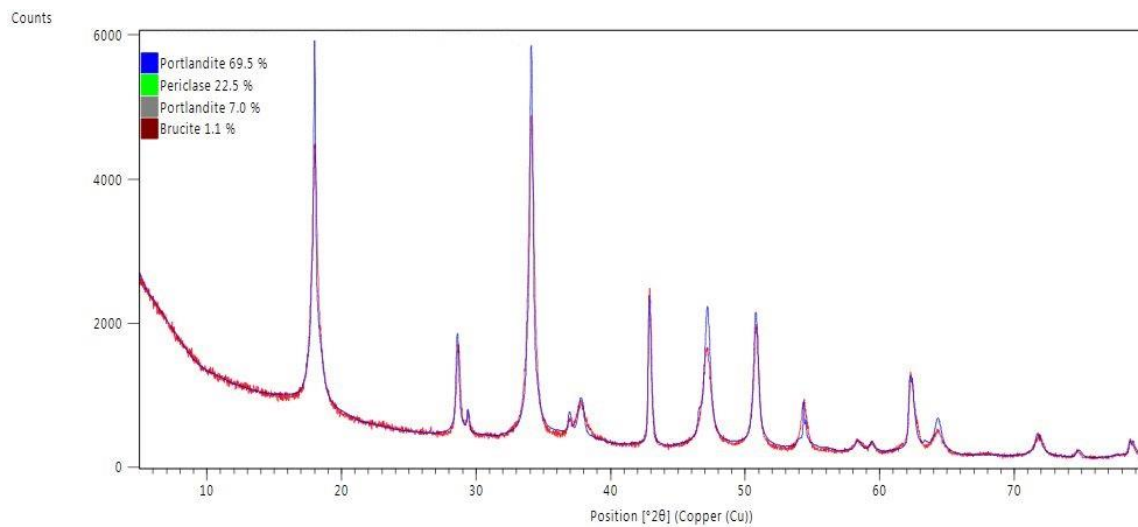


Figura 92. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

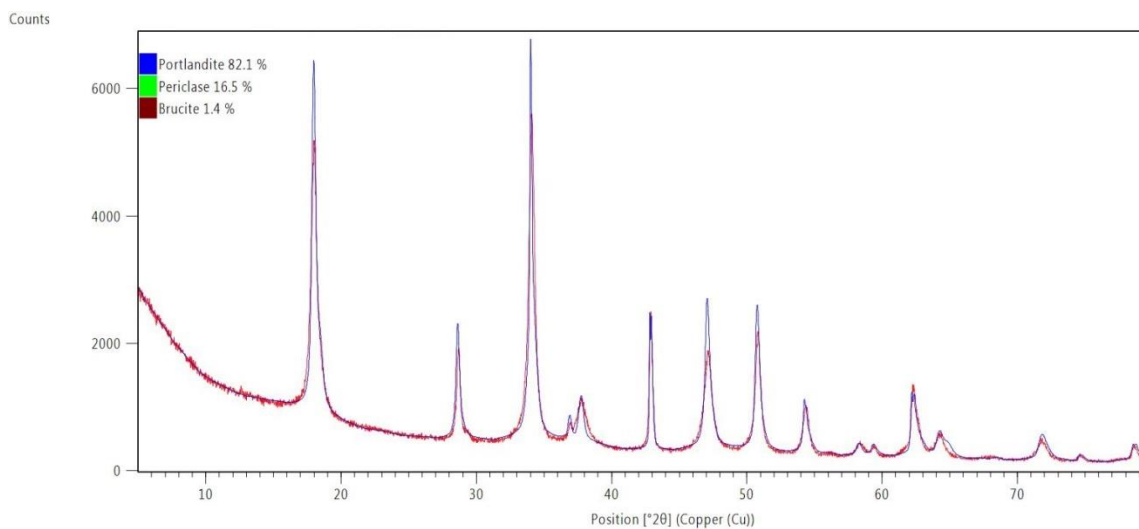


Figura 93. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

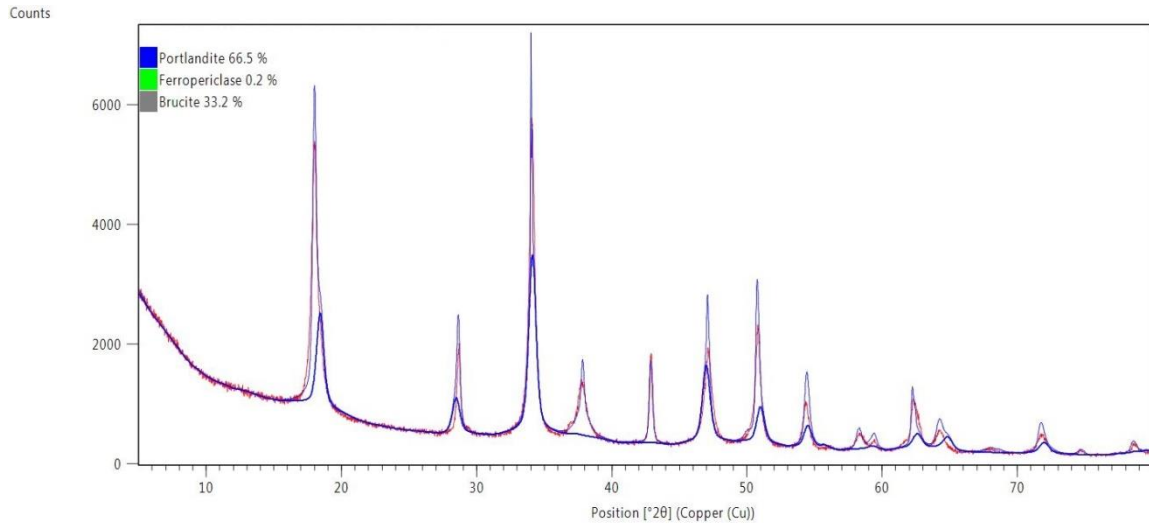


Figura 94. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 887°C.

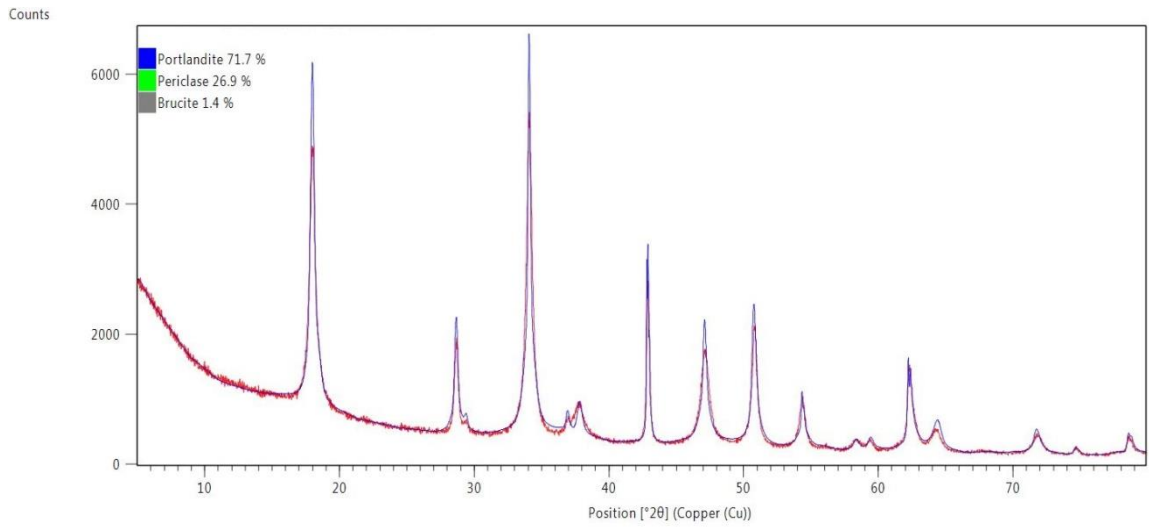


Figura 95. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

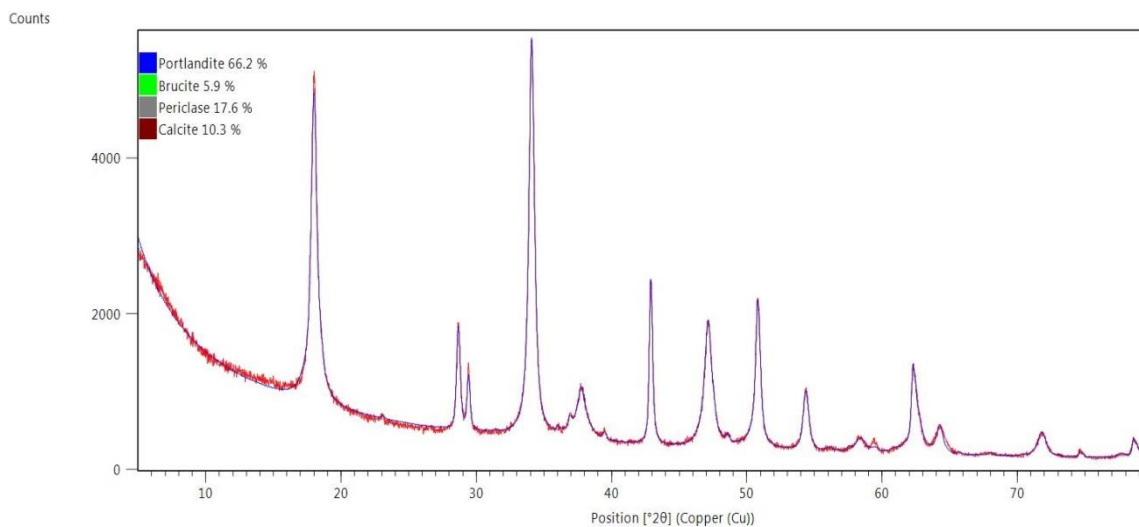


Figura 96. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

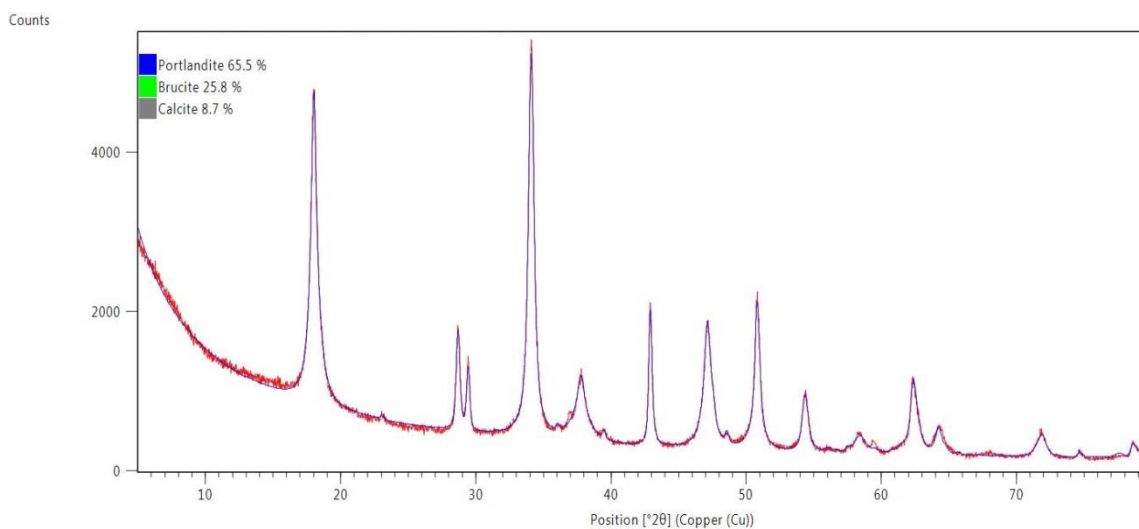


Figura 97. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

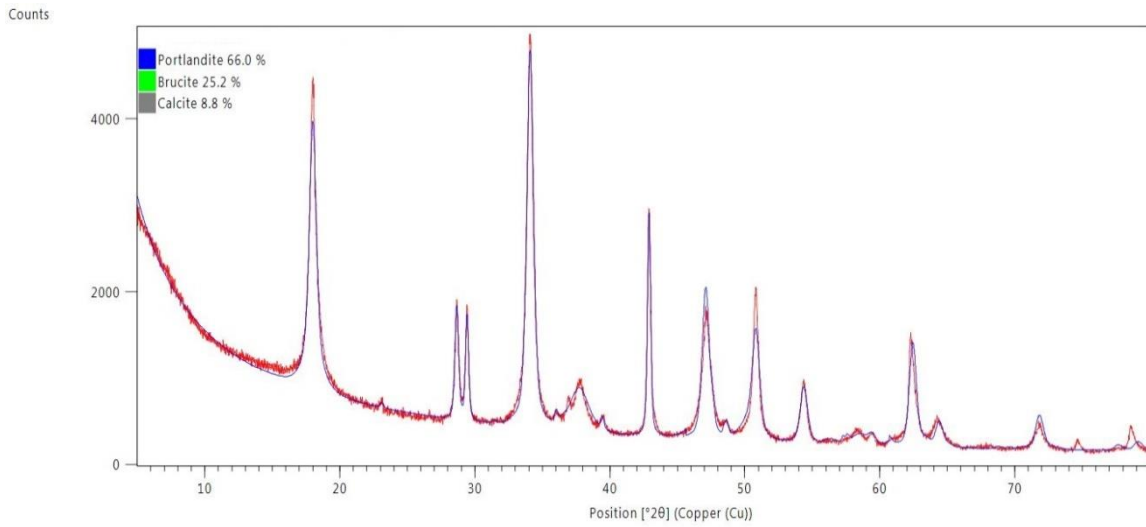


Figura 98. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

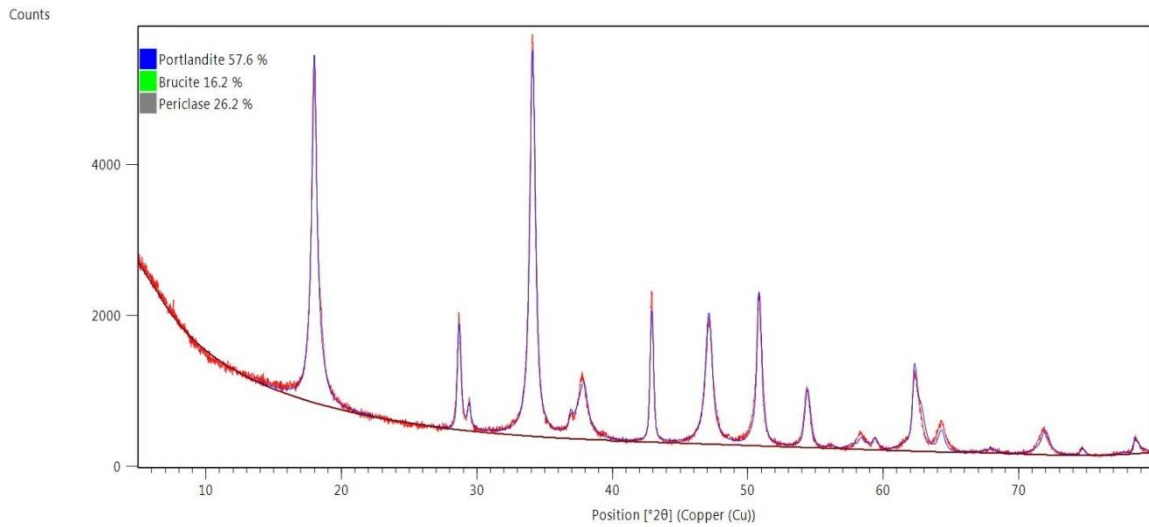


Figura 99. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

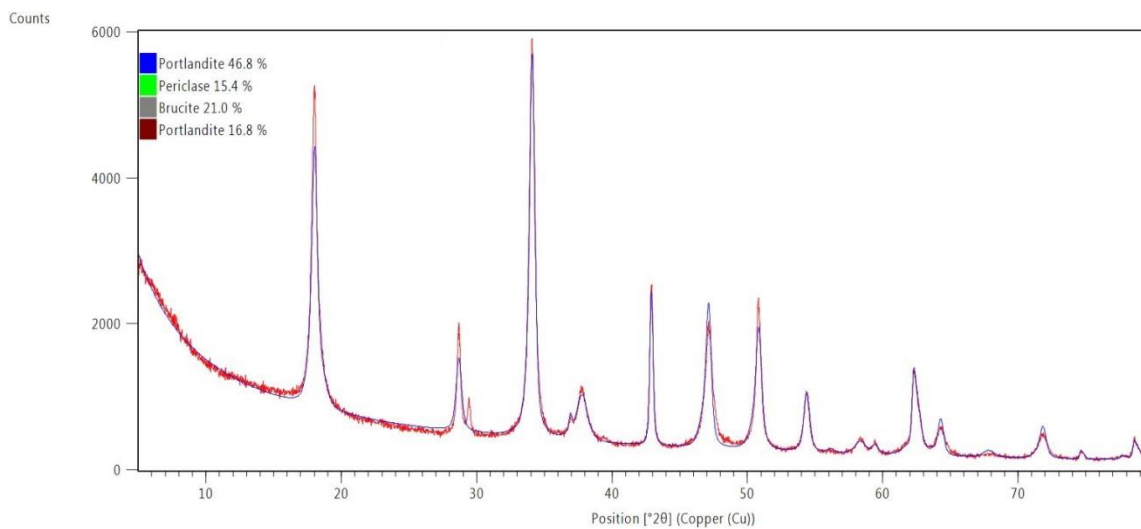


Figura 100. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 837°C.

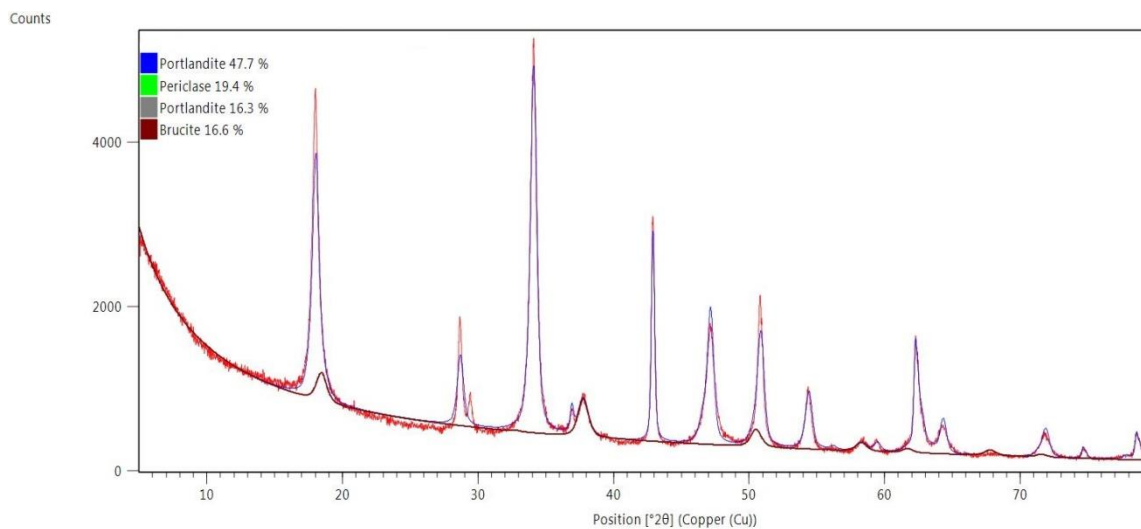


Figura 101. Difractograma de la muestra 1 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.

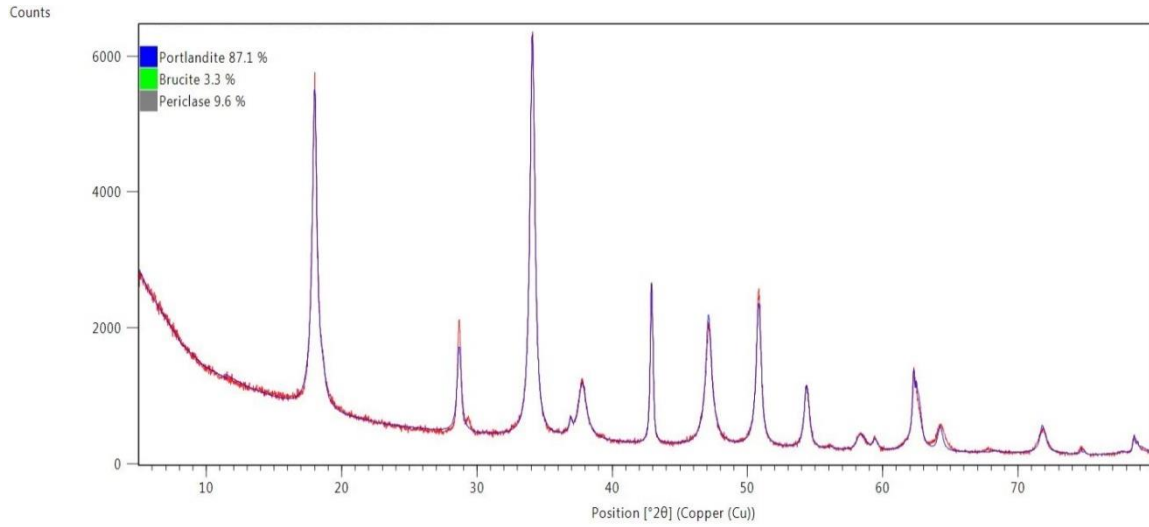


Figura 102. Difractograma de la muestra 1 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.

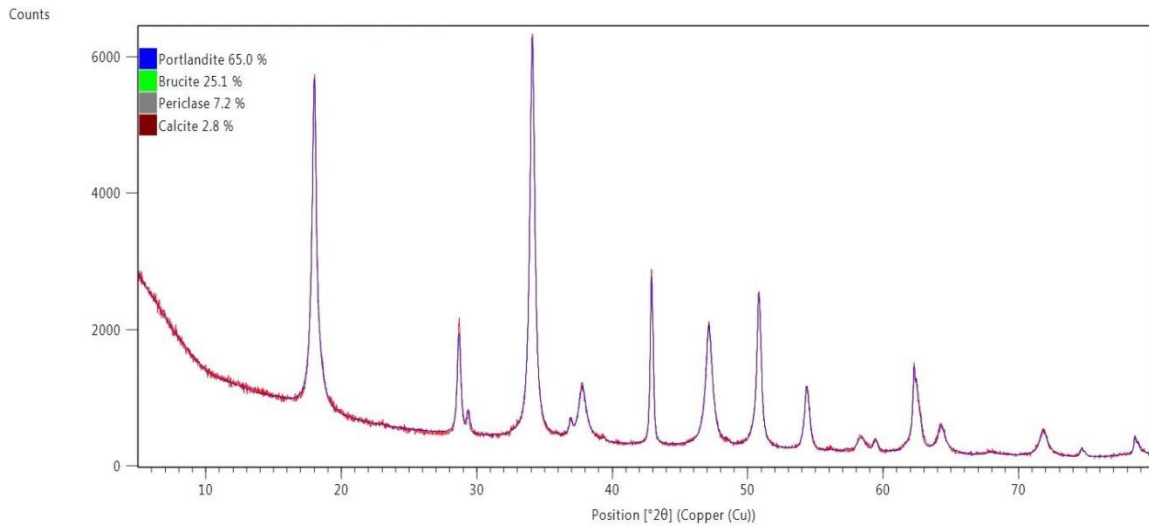


Figura 103. Difractograma de la muestra 1 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.

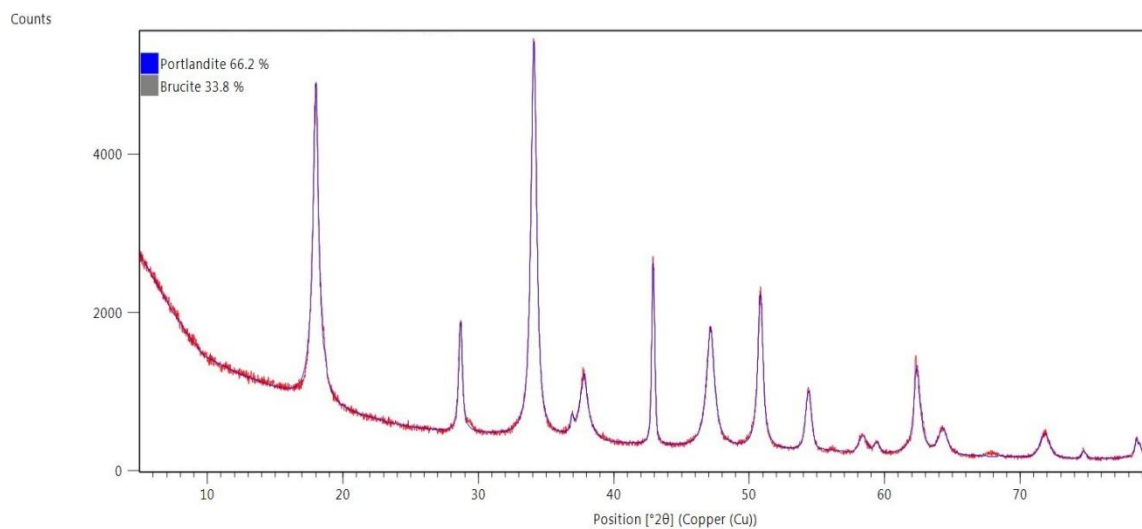


Figura 104. Difractograma de la muestra 2 con 75% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.

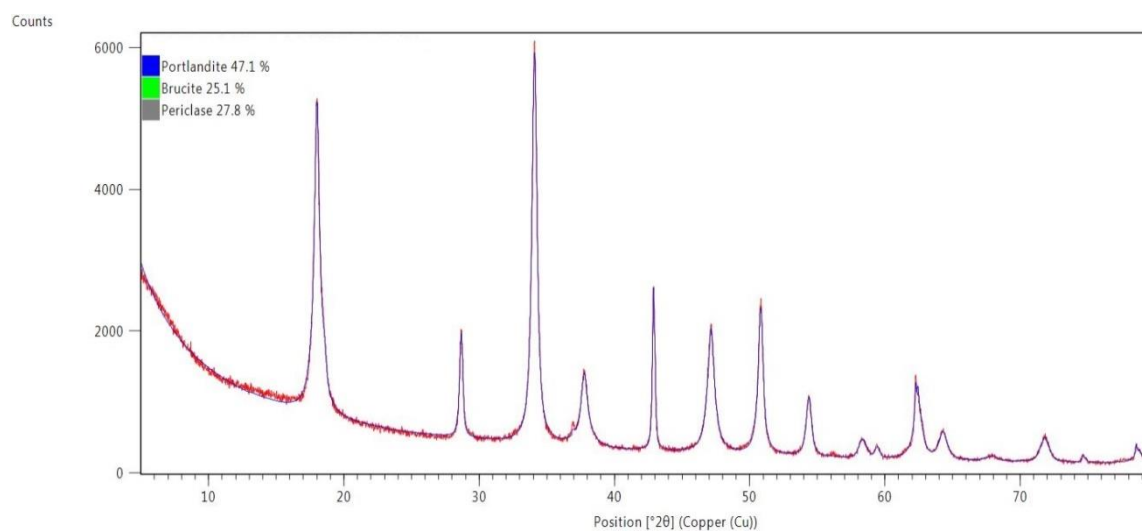


Figura 105. Difractograma de la muestra 2 con 85% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.

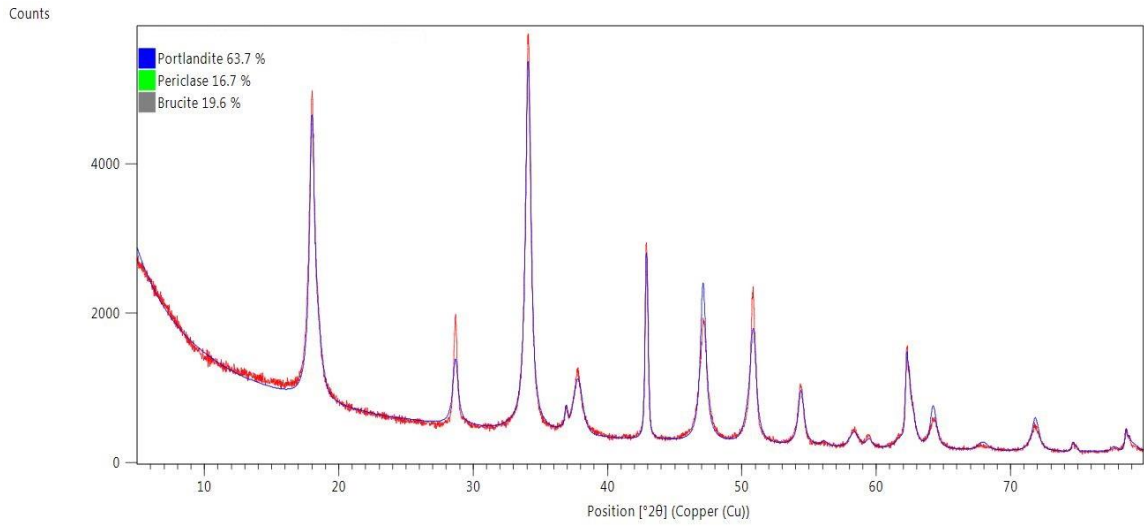
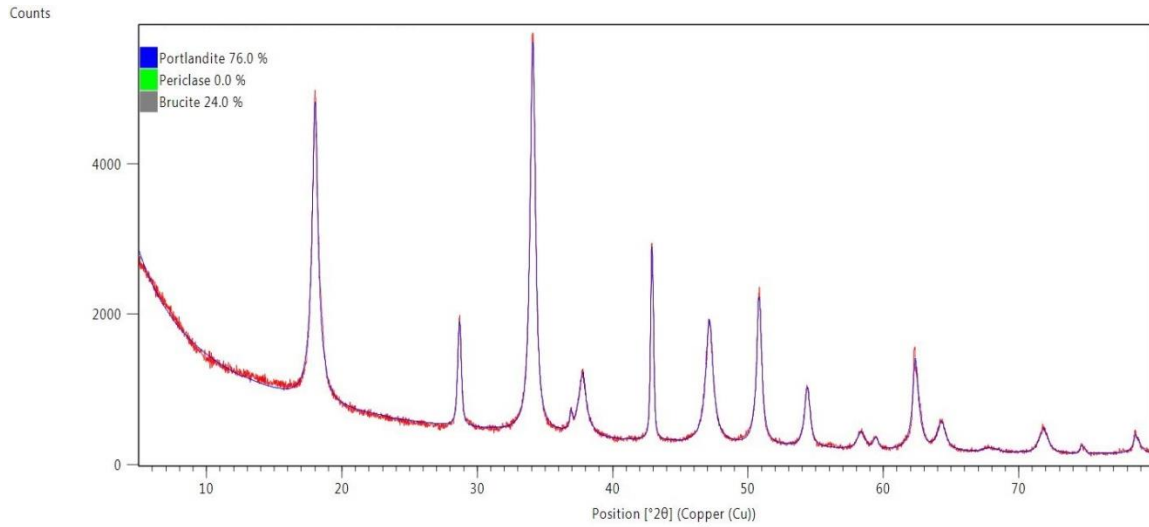


Figura 106. Difractograma de la muestra 2 con 94% de fineza de cal hidratada obtenida del proceso de calcinación a 1087°C.



XI. REFERENCIAS

- AFAM. *Recomendaciones y pliego de condiciones para fábricas de mortero*. AFAM código técnico de la edificación. 2009. España. 59 págs.
- ASTM C-110 International. 2011. *Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone*. Estados Unidos de América. 24págs.
- ASTM C-206 International. 2009. *Standard specification for finishing hydrated lime*. Estados Unidos de América. 2págs.
- ASTM C-207 International. 2011. *Standard specification for hydrated lime for masonry purposes*. Estados Unidos de América. 2 págs.
- Cañón, Juan. D. 2012. *Caracterización físico-química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*. Tesis Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. 104 págs.
- COGUANOR. 1982. *Cal hidratada, especificaciones*. Guatemala. 5 págs.
- Coloma, Guillermo. 2008. *La cal: ¿es un reactivo químico!* Chile. 254 págs.
- Cornelis, Klein y S. Cornelius. 2003. <<Capítulo 11: Mineralogía sistemática>>. Manual de Mineralogía, Vol. 2. España. Libro de Editorial Reverté,, S. A de España. Pág. 434.
- Grupo Calidra. *El uso de la cal en las mezclas*. Grupo Calidra. 2012. México. 4 págs.
- Hurgando en la estructura de las moléculas, difracción de rayos X*. 2013. Instituto de ciencia de materiales de Aragón (ICMA) y Consejo superior de Investigaciones Científicas (CSIC). España. 7 págs.
- Meier, Roger; J. Anderson y S. Verryn. 2012. <<Industrial X-ray diffraction analysis of building materials>>. Mineralogical Society of America. LXXIV (1): 147-165.
- Micromeritics. 2010. *Particle Insight: dynamic image analyzer*. USA. 6 págs.
- Ochaeta, Karen. 2004. *Análisis de las curvas termogravimétricas (640mm Hg) para el estudio de la calcinación de tres calizas con diferente contenido de magnesio en función de la densidad utilizando el método ASTM C 188-95*. Tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de

Ingeniería. 117 págs.

Philips Analytical. *Basic XRD theory*. Philips. USA. 112 págs.

Ramón, María. 2007. *Introducción al método de Rietveld*. México, D. F. 34 págs.

Sabá, Carlos. 2006. *Evaluación de la incidencia de la cal en las propiedades físico-mecánicas de tres tipos de mortero de albañilería*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Facultad de Ingeniería. 153 págs.

Samayoa, Marvin. 2005. *Análisis comparativo de cales hidratadas provenientes de los procesos de manufactura de calizas de alto calcio y de la producción de acetileno mediante el análisis de termogravimetría (TGA)*. Tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 105 págs.