



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE
MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA
ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO**

William Eduardo Fagiani Cruz

Asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Co-Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, octubre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE
MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA
ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA
CO-ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Victor Herber de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha febrero de 2009.



William Eduardo Fagiani Cruz



Guatemala, 17 de mayo de 2011

Ingeniero

Williams G. Álvarez Mejía

Director Escuela Ingeniería Química

Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero Álvarez:

Por este medio hago constar que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO.”**, desarrollado por el estudiante **WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ**, con carné **2004 13201**, cursante de la carrera de Ingeniería Química y considero que cumple los requerimientos que la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala establece.

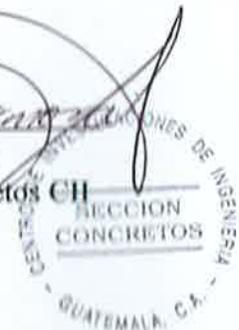
Sin otro particular y agradeciendo la atención que se sirva dar a la presente, me suscribo.

ATT:


Ing. Cesar Alfonso Garcia Guerra
Jefe de Sección de Química Industrial CII
Asesor




Inga. Dilma Mejicanos
Jefa de Sección de Concretos CH
Coasesora





Guatemala, 16 de agosto de 2011
Ref.EIQ.TG.176.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-1392011-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de **INGENIERO QUÍMICO** al estudiante universitario, **William Eduardo Fagiani Cruz**, identificado con carné No. **2004-13201**, titulado: **"DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO"**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Cesar Alfonso García Guerra**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Fagiani Cruz**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA
QUÍMICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012



ACAAI



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.203.2011

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ** titulado: "**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2011

Cc: Archivo
WGAM/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL CURADO DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND UGC4000 Y ARENA SÍLICA SEGÚN LA NORMA ASTM C109 PARA TRES VARIACIONES EN EL MEDIO ACUOSO DE CURADO**, presentado por el estudiante universitario **William Eduardo Fagiani Cruz**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, octubre de 2011

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

La fuente de la vida, de toda inspiración y de toda ciencia, el creador del maravilloso universo del cual somos habitantes. Quién hace posible este proceso de aprendizaje continuo y que me ha bendecido desde el comienzo de mi existencia, a través de muchas personas maravillosas que estratégicamente ha colocado en mi camino.

Mi padre

Quién siempre ha sabido qué decir en cada momento, para guiarme en el camino de la vida, alejándome constantemente de la mediocridad para disfrutar de la excelencia.

Mi madre

Quién a pesar de las circunstancias puede inspirarme a seguir adelante con su ejemplo, pues nunca ha dejado de luchar para darme lo mejor, demostrando su amor por mí en cada momento.

Mi hermano

Mi compañero y amigo de toda la vida, con quien siempre puedo contar en las buenas y en las malas, el instrumento de Dios para darme fuerzas aún en la flaqueza.

Mi familia

Quienes han estado conmigo desde el día que nací y desde entonces no dejan de apoyarme, de creer en mí y de alegrar mi vida.

Mis mentores

Profesionales, maestros y líderes que han marcado mi vida, que con sus vivencias y sabiduría me han guiado en muchos momentos difíciles, portavoces de la razón en un mundo sin razón.

Mis amigos

Compañeros de estudio, de trabajo y de la vida, amigos del alma, con quienes he compartido tantas cosas, los que no puedo olvidar, los que están lejos, los que están cerca, y los que ya no están, que incondicionalmente me han apoyado y ayudado cuando más lo necesito, como verdaderos regalos de Dios.

“No dejes a ningún hombre, por un débil concepto de sobriedad o de una moderación malamente aplicada, pensar o sostener que un hombre puede buscar demasiado lejos o ser muy bien estudiado en el libro de la palabra de Dios o en el libro de las obras de Dios.” Francis Bacon (1561-1626)

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su amor infinito e incondicional.
Mi padre	Por haberme guiado con sabiduría en este camino.
Mi madre	Por su constante y firme apoyo en todo momento.
Mi hermano	Por toda la ayuda, especialmente en los momentos más oscuros.
Mi familia	Por no dejarme solo jamás y siempre creer en mí.
Ing. César García	Por su asesoría y sabia exigencia en la realización del presente trabajo de graduación.
Inga. Dilma Mejicanos	Por su apoyo y ayuda en la realización del presente trabajo de graduación.
Ing. José Manuel Tay	Por sus enseñanzas, apoyo y confianza en todo momento.
Ing. Otto Raúl De León	Por sus grandes consejos y el apoyo brindado.
Dr. Adolfo Gramajo	Por su confianza y apoyo durante este proceso.

Ing. Federico Salazar	Por sus grandes ideas y ayuda para ver las cosas de otra manera.
Ing. Ariel Villela	Por toda la ayuda para no desmayar en los peores momentos.
Mis grandes amigos	Por el apoyo incondicional en las buenas y en las malas.
Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química	Por permitirme aprender, trabajar y formarme en sus instalaciones. Y por toda la colaboración en este proceso académico.
Laboratorio de Físicoquímica	Por la gran ayuda y apoyo en la realización de ésta investigación.
Centro de Investigaciones de Ingeniería	Por la valiosa ayuda en la realización de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XVII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXIV
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Cemento	3
2.2. Sólidos y líquidos	7
2.3. Coloides.....	16
2.4. Reacciones químicas y su estudio.....	19
2.4.1. Termodinámica de las reacciones químicas	21
2.4.2. Cinética química.....	22
2.4.3. Tratamiento de datos cinéticos	27
2.4.4. Mecanismos de reacción.....	32
2.4.5. Factores que afectan la cinética de una reacción química.....	36
2.5. Equilibrio de solubilidad	39
2.6. Fenómenos de transferencia de masa.....	46

2.6.1.	Difusión.....	47
2.6.2.	Transferencia de masa por convección	50
2.6.3.	Coeficiente global de transferencia de masa	51
2.7.	Análisis conceptual del proceso de fraguado y curado.....	53
2.7.1.	Estructura y endurecimiento de la pasta de cemento	57
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	59
3.1.	Variables.....	59
3.2.	Delimitación del campo de estudio	60
3.2.1.	Localización	60
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	60
3.4.	Recursos materiales disponibles	61
3.5.	Técnica cuantitativa.....	64
3.5.1.	Estudio preliminar	64
3.5.2.	Establecimiento de la metodología experimental.....	65
3.5.2.1.	Diseño preliminar	65
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	70
3.6.1.	Selección del tipo de diseño experimental.....	70
3.6.2.	Preparación de medios de curado	70
3.6.2.1.	Determinación del volumen de líquido en cámaras de fraguado	70
3.6.3.	Procedimiento experimental	72
3.6.3.1.	Determinación de reactividad potencial de arena	72
3.6.3.2.	Preparación de muestras de cemento	76
3.6.3.3.	Monitoreo de variables.....	79
3.6.3.4.	Pruebas de resistencia	81
3.6.3.5.	Determinación de la composición del medio de curado.....	82

3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	84
3.7.1.	Determinación de períodos de tiempo:	84
3.7.2.	Determinación de avance porcentual y velocidad de avance del proceso..	85
3.7.3.	Análisis gráfico de variables y construcción de modelos.....	86
3.7.3.1.	Composición química del medio de curado en función del tiempo	86
3.7.3.2.	Avance del proceso de curado en función del tiempo.....	88
3.7.3.3.	Efecto de la composición del medio de curado sobre la velocidad de avance del proceso.	89
3.7.3.4.	Efecto de la solubilidad de las especies reactivas.....	91
3.7.3.5.	Determinación del Modelo Cinético para el proceso	93
4.	RESULTADOS	101
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	141
5.1.	Respecto al esfuerzo mecánico a la compresión.....	141
5.2.	Respecto a la variación en las concentraciones de los iones referidos.....	144
5.3.	Respecto a la significancia de las variaciones del medio de curado.....	147
5.4.	Respecto al modelo cinético.	149
	CONCLUSIONES	151

RECOMENDACIONES 155
BIBLIOGRAFÍA..... 157
APÉNDICES..... 159
ANEXOS..... 187

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comportamiento esperado de la resistencia a la compresión respecto al tiempo, variando la composición del medio de curado de la mezcla seleccionada en las condiciones especificadas.XXV
2.	Comportamiento esperado para el proceso de curado de la mezcla seleccionada en las condiciones especificadas.XXVI
3.	Fotografía obtenida por microscopia del cemento portland..... 4
4.	Redes de Bravais..... 12
5.	Esfuerzos mecánicos 14
6.	Concentración de un reactivo en función del tiempo..... 27
7.	Representación gráfica de la aplicación del método integral en reacciones de un reactivo. 29
8.	Representación gráfica del método diferencial. 31
9.	Relación de la solubilidad con el pH para un soluto con anión débil..... 45
10.	Esquema bidimensional del proceso de hidratación de las partículas de cemento en una pasta compacta a edad temprana..... 56
11.	Representación sistemática del crecimiento de cristales durante el proceso de hidratación. 56
12.	Representación gráfica de la estructura del cemento durante el fraguado..... 57
13.	Pasta de cemento hidratada: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H..... 58
14.	Dimensión del tipo de muestra seleccionado..... 66

15.	Fotografía del tipo de muestra seleccionado.	66
16.	Cámara de curado para pasta de cemento.....	68
17.	Compartimiento para triplicado de muestras.	68
18.	Fotografía de prototipo de cámara de curado para pasta de cemento.	69
19.	Diagrama tridimensional parcial de cámara de fraguado.....	71
20.	Diagrama bidimensional de cámara de fraguado.	72
21.	Criterio gráfico de discriminación de agregados.	75
22.	Moldes estándar.	76
23.	Forma de acomodamientos en proceso de llenado de moldes.....	78
24.	Identificación de compartimientos en cámara de curado.	80
25.	Diagrama máquina universal.	81
26.	Gráficas para analizar la variación en la composición del medio de curado en función del tiempo.	87
27.	Gráficas para analizar el avance del proceso de curado en función del tiempo.	89
28.	Gráficas para analizar la velocidad de avance del proceso de curado en función de la concentración molar del ión referido.	90
29.	Gráficas para analizar el efecto de la composición del medio de curado sobre la velocidad de avance del proceso curado, eliminando el efecto de la solubilidad de cada especie.	92
30.	Prueba de <i>Fisher</i>	99
31.	Esfuerzo de compresión máximo promedio en función del tiempo.	102
32.	Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado.....	103
33.	Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo, utilizando agua potable (Wc) como medio de curado.	104

34.	Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo, con disolución saturada de Ca(OH)_2 como medio de curado.....	105
35.	Velocidad instantánea de curado en función del tiempo, utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado.	106
36.	Velocidad instantánea de curado en función del tiempo, utilizando agua potable (Wc) como medio de curado.....	107
37.	Velocidad instantánea de curado en función del tiempo, utilizando disolución saturada de Ca(OH)_2 como medio de curado.	108
38.	Comparación de velocidades instantáneas de curado en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado.....	109
39.	Concentración promedio de Ca^{2+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	110
40.	Concentración promedio de Mg^{2+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	111
41.	Concentración promedio de Al^{3+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	112
42.	Concentración promedio de CO_3^{2-} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	113
43.	Concentración promedio de HCO_3^- en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.....	114
44.	Potencial de hidrógeno (pH) promedio en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	115
45.	Concentración promedio de OH^- en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados.	116
46.	Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo, utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado.	117

47.	Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo, utilizando agua potable (Wc) como medio de curado.	118
48.	Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo, utilizando disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws) como medio de curado.	119
49.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	123
50.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc).	123
51.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de Ca(OH)_2 (Wd).	124
52.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	124
53.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc).	125
54.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg^{++} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de Ca(OH)_2 (Wd).	125
55.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	126
56.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc).	126

57.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Wd).....	127
58.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	127
59.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc).....	128
60.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Wd).....	128
61.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	129
62.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc).....	129
63.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Wd).....	130
64.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).....	131
65.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc).	131

66.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd).	132
67.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	132
68.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc).	133
69.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd).	133
70.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^{--} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd).	134
71.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^{--} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc).	134
72.	Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^{--} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd).	135
73.	Diferencia de masa porcentual promedio en función del tiempo para los especímenes curados en Wd, Wc y Ws.	136
74.	Capa cristalina sobre especímenes curados con Ws, luego de 24 horas.	143
75.	Cuadro de requisitos académicos.	161
76.	Diagrama de causa y efecto.	162

TABLAS

I.	Composición aproximada del cemento portland.....	3
II.	Simbología de compuestos potenciales del cemento.....	5
III.	Sistemas coloidales.....	18
IV.	Instrumentos de medición.....	61
V.	Equipo especial.....	61
VI.	Reactivos y demás sustancias químicas.....	62
VII.	Cristalería en general.....	63
VIII.	Otros.....	63
IX.	Diseño experimental de ensayos de monitoreo.....	79
X.	Combinaciones de factores para análisis de varianza.....	96
XI.	Nomenclatura de análisis de varianza.....	96
XII.	Resultados para análisis de varianza de dos factores con repetición.....	99
XIII.	Resultados del análisis de varianza para el esfuerzo mecánico a la compresión de los especímenes de cemento en función del tiempo y la variación del medio de curado con tres repeticiones.....	120
XIV.	Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones calcio $[Ca^{2+}]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones.....	120
XV.	Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones magnesio $[Mg^{2+}]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones.....	121

XVI.	Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones aluminio $[Al^{3+}]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones.	121
XVII.	Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones carbonato $[CO_3^{2-}]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones.	122
XVIII.	Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones carbonato $[HCO_3^-]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones.	122
XIX.	Modelos parciales propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio inicial de curado.	137
XX.	Modelos parciales propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando agua potable (Wc) como medio inicial de curado.	138
XXI.	Modelos parciales propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws) como medio inicial de curado.	139
XXII.	Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en agua desmineralizada (Wd).	163
XXIII.	Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en agua potable (Wc).	164

XXIV.	Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws).	165
XXV.	Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en agua desmineralizada (Wd).	166
XXVI.	Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en agua potable (Wc).	166
XXVII.	Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws).	167
XXVIII.	Volúmenes de titulante para determinación de Ca^{++} , Mg^{++} y Al^{++} para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).	167
XXIX.	Volúmenes de titulante para determinación de Ca^{++} , Mg^{++} y Al^{++} para medio de curado inicial: agua potable (Wc).	168
XXX.	Volúmenes de titulante para determinación de Ca^{++} , Mg^{++} y Al^{++} para medio de curado inicial: disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws).	168
XXXI.	Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^{-} y HCO_3^{-} para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).	168
XXXII.	Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^{-} y HCO_3^{-} para medio de curado inicial: agua potable (Wc).	169
XXXIII.	Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^{-} y HCO_3^{-} para medio de curado inicial: disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws).	170
XXXIV.	Determinación de períodos de tiempo para realizar gráficos para Wd y Wc.	171

XXXV.	Determinación de períodos de tiempo para realizar gráficos para Ws.	171
XXXVI.	Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Wd.....	172
XXXVII.	Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Wc.....	172
XXXVIII.	Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Ws.....	173
XXXIX	Determinación de $[Ca^{++}]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).....	173
XL.	Determinación de $[Ca^{++}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc).....	174
XLI.	Determinación de $[Ca^{++}]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws).	174
XLII.	Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).....	174
XLIII.	Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc).....	175
XLIV.	Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws).	176
XLV.	Determinación de $[Al^{+++}]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).....	176
XLVI.	Determinación de $[Al^{+++}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc).....	177
XLVII.	Determinación de $[Al^{+++}]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws).	177
XLVIII.	Determinación de $[CO_3^-]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).....	178

XLIX.	Determinación de $[\text{CO}_3^-]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc).	178
L.	Determinación de $[\text{CO}_3^-]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws).....	179
LI.	Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd).....	179
LII.	Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc).	180
LIII.	Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws).....	180
LIV.	Determinación de cambio de masa porcentual, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Wd.....	181
LV.	Determinación de cambio de masa, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Wc.	181
LVI.	Determinación de cambio de masa, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Ws.	182
LVII.	Determinación de velocidad del proceso de curado ($d\% \xi / dt$).	183
LVIII.	Datos bibliográficos utilizados para determinar la solubilidad de las especies implicadas.	184
LIX.	Determinación del porcentaje de Ca^{++} disuelto.....	184
LX.	Determinación del porcentaje de Mg^{++} disuelto.	185
LXI.	Determinación del porcentaje de CO_3^{--} disuelto.	186

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_3A	Aluminato tricálcico (simbología de compuestos potenciales).
A	Área.
ξ	Avance (mol).
$\% \xi$	Avance porcentual.
Δ	Cambio o variación.
k_c	Coefficiente de transferencia de masa.
ν_i	Coefficiente estequiométrico de la sustancia o especie “ i ”.
$[X]$	Concentración molar determinada para la especie “ X ”.
C_i	Concentración molar preparada para la especie i .
K_w	Constante de disociación ácida del agua.
k	Constante de reacción o velocidad específica.
i	Correlativo o identidad correspondiente (según contexto).
ρ	Densidad.

<i>D</i>	Difusividad (m ² /s).
<i>ε</i>	Difusividad turbulenta (m ² /s).
<i>Ea</i>	Energía de activación.
<i>σ</i>	Esfuerzo (psi).
A, B, C...	Especies químicas hipotéticas.
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico (simbología de compuestos potenciales).
<i>F</i>	Fuerza.
<i>f</i>	Función.
<i>δ</i>	Incertidumbre (por ejemplo δt es la incertidumbre de la variable tiempo).
<i>j</i>	Literal para la velocidad de formación.
<i>L</i>	Longitud (unidades correspondientes)
<i>m</i>	Masa (g)
Wd	Medio de curado: agua desmineralizada.
Wc	Medio de curado: agua potable.
Ws	Medio de curado: disolución saturada de Ca(OH) ₂ .
<i>n</i>	Número o correlativo (dependiendo del contexto).

α_i	Orden de reacción de la especie “ i ”.
M	Óxido de magnesio (simbología de compuestos potenciales).
$\%X(d)$	Porcentaje de la especie “X” disuelto.
%	Porcentaje.
pH	Potencial de hidronio o ión hidrógeno.
P	Presión.
C₂S	Silicato bicálcico (simbología de compuestos potenciales).
C₃S	Silicato tricálcico (simbología de compuestos potenciales).
Sb_i	Solubilidad de la especie “ i ”
t	Tiempo.
N	Transferencia de partículas.
J	Transferencia específica de partículas.
dξ/dt	Velocidad de conversión (mol/s, mol/min).
r	Velocidad de reacción.
V	Volumen.

GLOSARIO

Cemento	Mezcla de caliza y arcilla, sometida a calcinación y molida, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua
Cemento portland	Tipo de cemento que se obtiene por la pulverización del <i>clinker</i> portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio.
<i>Clinker</i>	Es un producto intermedio en el proceso de elaboración de cemento. La piedra caliza, la arcilla y el óxido de hierro se calcinan en un horno a 1 450 grados centígrados para producir el <i>Clinker</i> .
Complejo	Tipo de estructura molecular que se encuentra generalmente formada por un átomo (o grupo) central que posee orbitales de valencia no ocupados; rodeado por un cierto número de moléculas o iones que poseen pares de electrones no compartidos que pueden ser inyectados en los orbitales vacíos del grupo central para formar enlaces coordinados.

Curado del cemento	Proceso de cubrir el cemento con agua de modo que permanezca húmedo durante su hidratación para hacer más fuerte la adherencia entre la pasta y los agregados.
Esfuerzo	Conjunto de fuerzas que se aplican de manera constante y sistemática sobre un cuerpo.
Esfuerzo de compresión	Resultante de las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen.
Esqueleto granular	Se define así al conjunto de materiales inertes del concreto, estos son los agregados tanto finos como gruesos.
Fraguado del cemento	Endurecimiento de la pasta de cemento luego de adicionar agua, refiriéndose al cambio del estado fluido al estado rígido.
Hidratación	Proceso mediante el cual se adicionan moléculas de agua a la estructura interna de una sustancia.
Medio de curado	Disolvente o disolución en la cual se sumerge una pasta de cemento para su proceso de curado.

Modelo cinético

Expresión o conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de un fenómeno en función del tiempo.

Relación agua/materiales cementicios

Se obtiene de dividir la masa total de agua de mezcla entre la suma de las masas del cemento más el peso de los aditivos utilizados, dependiendo de la aplicación.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue realizado con el objetivo de desarrollar una metodología experimental global para el estudio del comportamiento cinético del proceso de curado de cemento. Comprende los factores que presentan variación en función del tiempo, y que permiten predecir posibles anomalías y optimizar las propiedades del material hidratado.

La variable principal de medición, es la resistencia mecánica a la compresión, con la cual se determinó el avance del proceso de curado. Obteniendo dicho avance, fue posible determinar matemáticamente la velocidad porcentual de curado y correlacionarla con la composición del medio de curado, evaluando su relación, efecto de la solubilidad y ganancia de peso.

Este análisis se realizó introduciendo tres variaciones en la composición del medio de curado, con lo cual fue posible determinar, visual, matemática y estadísticamente, su efecto sobre la cinética de la hidratación del cemento. Se determinó que la variación de la composición inicial del medio de curado, tiene un efecto significativo y gradual sobre el comportamiento del proceso de curado y la resistencia de los especímenes expuestos a esto.

Adicionalmente se encontraron tres ecuaciones cinéticas, que prueban que el fenómeno de hidratación del sistema evaluado es un proceso complejo, diferente al de una reacción en disolución acuosa y que su mecanismo también es afectado significativamente por la variación de la composición inicial del medio de curado.

OBJETIVOS

General

Diseñar una metodología experimental que permita evaluar la cinética del proceso de curado de cemento, según la norma ASTM C109/C109M-05, a través del uso de diferentes medios acuosos de curado.

Específicos

1. Evaluar el esfuerzo mecánico a la compresión de especímenes curados con 3 tipos de agua de curado (agua desmineralizada, agua potable y disolución saturada de hidróxido de calcio) en función del tiempo.
2. Evaluar la variación en las concentraciones de calcio, magnesio, aluminio, carbonatos, bicarbonatos e hidrógeno, en cada tipo de medio de curado, relacionándolas con la respuesta del cemento al esfuerzo de compresión, en función del tiempo.
3. Evaluar los resultados obtenidos y establecer si existe o no una diferencia significativa en las variaciones del medio de curado, en función del tiempo.
4. Elaborar un modelo cinético del curado en pasta de cemento a las 3 variaciones de agua de curado.

HIPÓTESIS

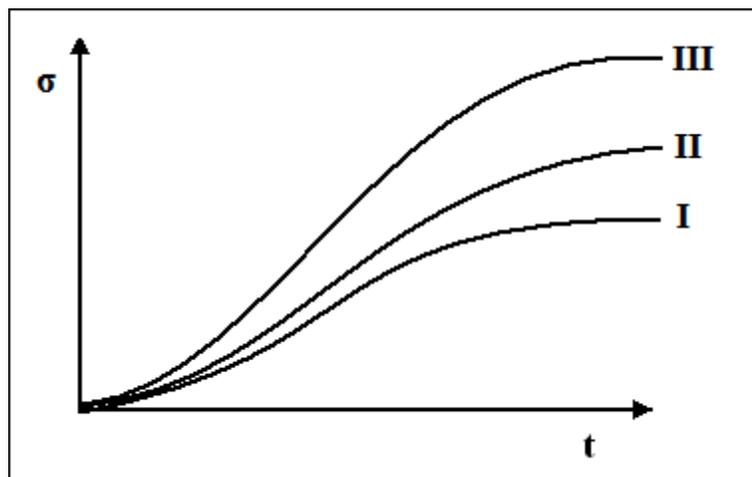
Es posible analizar el comportamiento cinético del proceso de curado de una mezcla de cemento y aditivos específicos en condiciones variables, para realizar e interpretar ensayos de control de calidad adecuadamente.

Hipótesis conceptual

- a. Se predice un comportamiento para el esfuerzo a la compresión diferente para cada tipo de medio de curado (véase figura 1).
 - Utilizando agua desmineralizada: en este caso, debido a la ausencia de electrolitos, se predice una mayor migración de partículas reactivas hacia el agua, las cuales son útiles para el proceso de la formación de los productos y sus estructuras, lo cual retardaría la reacción y debilitaría la estructura cristalina formada.
 - Utilizando agua potable: en esta variante se predice el mismo comportamiento que con agua desmineralizada, pero con efecto menor sobre la resistencia debido a que el agua potable posee cierta concentración de electrolitos que disminuiría el diferencial de concentración y esto hace más lenta la difusión y menor su alcance, lo cual en cierto grado puede beneficiar al avance de la reacción.

- Utilizando disolución saturada de hidróxido de calcio: en el caso de una solución saturada se predice un diferencial de concentración prácticamente nulo, lo cual en teoría elimina el efecto de la difusión, conservando la concentración de las partículas reaccionantes a un valor prácticamente constante, permitiendo la correcta formación de la estructura pseudocristalina, lo cual se traduce en una resistencia mecánica mayor a la observada en los dos casos anteriores.

Figura 1. **Comportamiento esperado de la resistencia a la compresión respecto al tiempo variando la composición del medio de curado de la mezcla seleccionada en las condiciones especificadas**

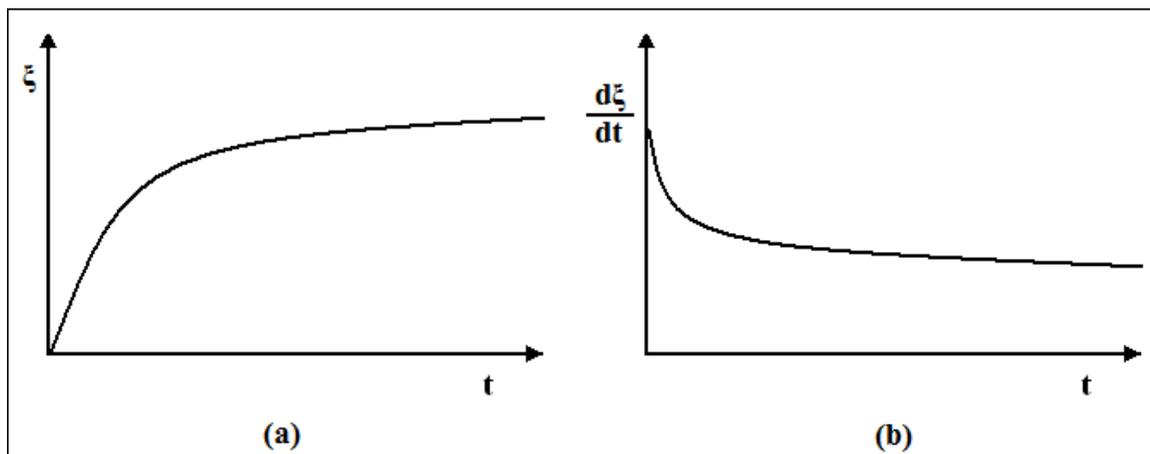


Comportamiento esperado al utilizar (I) agua desmineralizada, (II) agua potable y (III) disolución saturada de hidróxido de calcio, como medio de curado.

Fuente: elaboración propia.

- b. Se predice un comportamiento cinético normal para el proceso de curado del cemento, el cual es observado en reacciones químicas de tipo elemental o de mecanismo simple, esto es: una velocidad inicial relativamente elevada, la cual disminuye en forma asintótica por el efecto del agotamiento de partículas reactivas y la presencia de partículas de producto, provocado principalmente por la formación de estructuras que dificultan gradualmente el contacto, al crear barreras energéticas que merman la formación del posible complejo activado del mecanismo (véase figura 2).

Figura 2. **Comportamiento esperado para el proceso de curado de la mezcla seleccionada en las condiciones especificadas**



Comportamiento normal observado para un proceso cinético elemental o de mecanismo simple:
(a) Avance del proceso en función del tiempo. (b) Velocidad de avance del proceso en función del tiempo.

Fuente: elaboración propia.

Hipótesis estadística

a. Efecto de la composición inicial del medio de curado sobre el esfuerzo máximo de compresión de la mezcla de cemento seleccionada en función del tiempo.

H⁰: Los esfuerzos máximos de compresión promedio correspondientes a cada medio de curado son iguales. (La composición inicial del medio de curado no tiene ningún efecto sobre la resistencia a la compresión).

H¹: Los esfuerzos máximos de compresión promedio correspondientes a cada medio de curado presentan una diferencia significativa. (La composición inicial del medio de curado tiene un efecto cuantificable sobre la resistencia a la compresión).

b. Efecto de la composición inicial del medio de curado sobre la concentración de las especies reactivas (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Al⁺⁺, CO₃⁻⁻ y HCO₃⁻).

H⁰: Las concentraciones medias correspondientes a cada especie para cada medio de curado son iguales. (La composición inicial del medio no tiene ningún efecto sobre la concentración de las especies reactivas de interés).

H¹: Las concentraciones medias correspondientes a cada especie para cada medio de curado presentan una diferencia significativa. (La composición inicial del medio tiene ningún efecto significativo sobre la concentración de las especies reactivas de interés).

INTRODUCCIÓN

El estudio de las reacciones químicas abarca una gran porción de las bases técnicas de la ingeniería, ya que fue uno de los objetivos con el que se creó esta profesión.

En la industria, existen muchos procesos en los que se requiere una transformación química para llevarse a cabo, y es trabajo de un ingeniero químico el controlar, analizar y mejorar dichos procesos, para lo cual conocer la cinética de la reacción y su comportamiento al variar las condiciones es de vital importancia. La industria de la construcción no es la excepción, pues para que un proyecto sea confiable requiere de estructuras resistentes en todo sentido y es el fraguado y curado del cemento la reacción química que debe analizarse, para poder mejorar las técnicas de la construcción.

El fraguado y curado del cemento como reacción química presenta un comportamiento peculiar, que depende de muchos factores, los cuales deben ser aislados para su estudio, y de este modo poder inferir en la manipulación que sea necesaria para un resultado óptimo. Entre esos factores se encuentra: la temperatura, la composición del agua de curado, la morfología de la muestra, entre otras. Al modificar la composición del agua de curado, es posible afectar el proceso, ya que el agua sirve tanto como reactivo del proceso así como vehículo para extraer los materiales presentes dentro de la estructura. Por tanto, debe observarse dichos fenómenos al mismo tiempo de la reacción principal, ya que se llevan a cabo al unísono.

La manera de monitorear la reacción de fraguado puede variar, según sea el enfoque y los recursos con que se cuenta, en este caso se seleccionó la resistencia mecánica, debido a que es un indicador del avance del proceso. Además debe monitorearse los fenómenos asociados, como la transferencia de masa, para lo cual se determinara la composición del agua en cada intervalo de tiempo.

1. ANTECEDENTES

El cemento, como un material complejo y versátil, desde su invención ha sido objeto de diversos estudios con diferentes finalidades. Desde la caracterización de sus propiedades, según las condiciones de fabricación, hasta la investigación y el desarrollo de nuevas variantes de cemento para una mayor cantidad de usos y condiciones de resistencia a nivel mundial.

A raíz de estos estudios, han nacido infinidad de especializaciones para el cemento, unidas a diversos procedimientos para su preparación y manipulación. Además se han descubierto nuevos aditivos, que mejoran sus propiedades, nuevas fuentes de extracción, que facilitan los procesos de fabricación, entre otras.

En Guatemala se han realizado diferentes investigaciones referentes a la extracción, aplicación, mezcla, entre otros factores, para cementos, concretos, y otros materiales relacionados. Cabe subrayar la investigación experimental realizada en 1989 por el Ingeniero Carlos Zeceña, en la cual elaboró una caracterización Físico-Mecánica y Química del Cemento Puzolánico, para lo cual utilizó materiales volcánicos y cal, diseñando ensayos según las especificaciones correspondientes.

Entre los estudios relacionados, solamente se encuentran análisis de estructuras en diferentes condiciones, los cuales entran en el ámbito de la Ingeniería Civil y Mecánica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento

El cemento es un producto “que está hecho básicamente de la combinación de un material calcáreo –cómo piedra caliza y yeso- y una base de sílice y alumina, como arcilla y esquisto”¹, expuestos a un proceso de horneado. La fabricación de cemento comienza extrayendo los minerales que lo conforman de una cantera. Dichos minerales son: caliza, sílice, alumina, oxido de hierro, y aditivos, dependiendo de la aplicación para la que se desea utilizar o la calidad que se requiere. Los minerales obtenidos se trituran, mezclan y homogenizan para obtener una composición definida.

La mezcla obtenida se hornea a altas temperaturas y se produce el clinker, la base del cemento. Finalmente se añaden los aditivos, que confieren al producto final las características para su aplicación. La composición del cemento varía según su uso, pero básicamente contiene lo que se muestra en la tabla I.

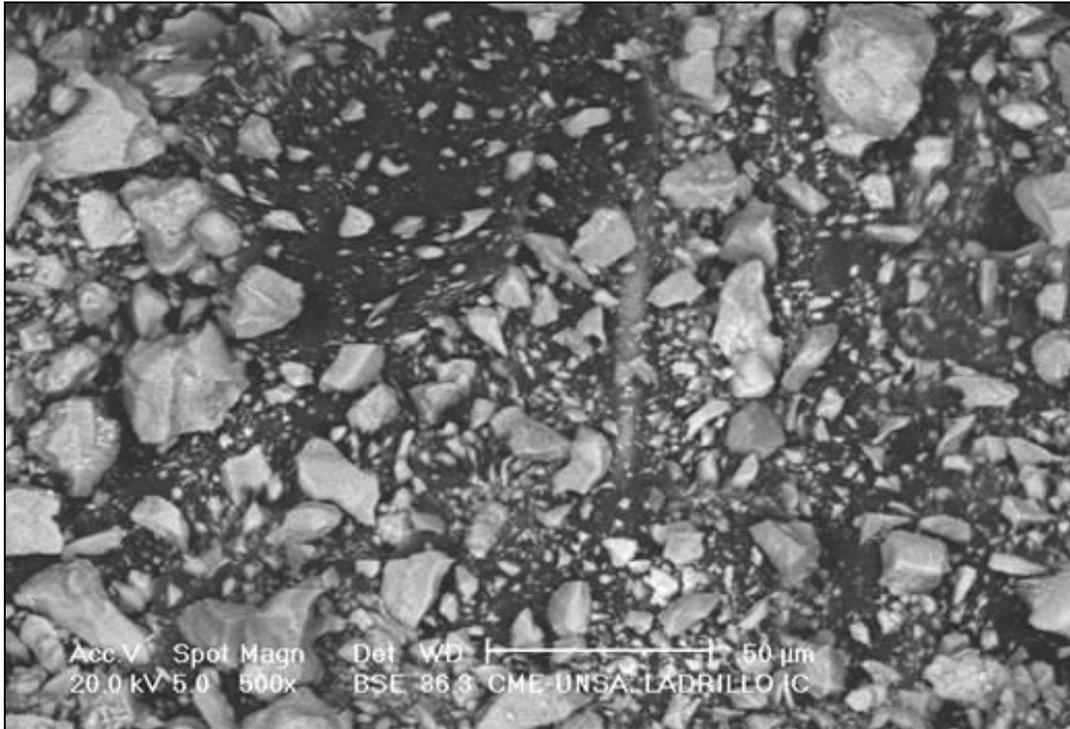
Tabla I. **Composición aproximada del cemento Portland**

Compuesto	Contenido (%)	Compuesto	Contenido (%)
CaO	60,0 – 67,0	MgO	0,1 – 4,0
SiO ₂	17,0 – 25,0	SO ₃	1,0 – 3,0
Al ₂ O ₃	3,0 – 8,0	Álcalis	0,2 – 1,3
Fe ₂ O ₃	0,5 – 6,0		

Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

¹ NEVILLE, A. M.; Brooks, J. J. *Tecnología del Concreto*. p. 14.

Figura 3. **Fotografía obtenida por microscopia del cemento portland**



Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

Cabe mencionar que los compuestos químicos de la tabla I no se encuentran precisamente en esa forma (estado puro) en el cemento, esto se debe a que durante el proceso de horneado, los niveles energéticos a los que se eleva la mezcla de minerales producen algo más que oxidación, pues se forman varios complejos o potenciales (como también se les conoce), a partir de ellos, de los cuales los más importantes son 4: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico, su simbología se presenta en la tabla II.

Tabla II. **Simbología de compuestos potenciales del cemento**

Nombre	Fórmula Extendida	Abreviatura
Silicato Bicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_2$	C_4AF
Óxido de Magnesio	MgO	M

Fuente: NEVILLE, A. M.; Brooks, J. J. *Tecnología del Concreto*. p. 15.

Obsérvese que en la parte final de la tabla II se menciona al óxido de magnesio, que aunque no es realmente un compuesto potencial, si es un componente importante del cemento, por lo que se incluye en la simbología. Cada uno de estos componentes presenta características especiales que le confieren al cemento diferentes propiedades. Entonces, para conocer dichas características más a fondo es necesario explicar el aporte de cada complejo:

Silicato bicálcico (C_2S): “También denominado Belita, es la segunda fase en importancia en el clinker, y se compone de 65,1% de cal y 34,9% de ácido silícico. Este compuesto presenta cristales relativamente anchos, de contornos redondeados y tamaño variable.”² Como se verá más adelante posee una lenta velocidad de hidratación y endurecimiento, además el calor que disipa es relativamente bajo. Este complejo es muy utilizado en cementos resistentes a ataques químicos por sulfatos, debido a su alta estabilidad.

² <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

Silicato tricálcico (C_3S): “También denominado Alita, es la fase principal en la mayoría de los clinker portland, y se compone de 73,7% de cal y 26,3% de ácido silícico. Este compuesto presenta cristales poligonales bien formados, con dimensiones que varían según el grado de cristalización, siendo bien desarrollados cuando la cocción ha tenido lugar a temperatura suficientemente elevada y durante bastante tiempo, así como en presencia de una cantidad adecuada de fase líquida”³.

Aluminato tricálcico (C_3A): “El aluminato tricálcico se compone de 62,3% de cal y 37,7% de alúmina. Este compuesto presenta un color oscuro ante el examen microscópico del clinker, después de los álcalis, los aluminatos son los compuestos del cemento que primero reaccionan con el agua. Su fraguado ocurre a una velocidad de hidratación muy alta, hasta el punto de ser casi instantáneo, es por esta razón que la adición de sulfato de calcio se hace necesaria para controlar esta velocidad de hidratación.”³

El aluminato tricálcico es muy sensible a la acción de sulfatos y cloruros, debido a la formación de sales del tipo sulfoaluminatos y cloroaluminatos, la formación de estas sales es de carácter expansivo, pudiendo originar agrietamiento y desintegración del concreto.

³ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): “El ferroaluminato tetracálcico se compone de 46,1% de cal, 21% de alúmina y 32,9% de óxido de hierro. También es denominado celita clara o ferrito. Este compuesto presenta un calor de hidratación de 100 cal/gr y una alta estabilidad química, los cementos ricos en este compuesto tienen condiciones de empleo específicas en todos aquellos casos en que importe más la durabilidad frente a los agresivos químicos que las resistencias mecánicas”⁴.

2.2. Sólidos y líquidos

Las fases condensadas, sólidas y líquidas, poseen características peculiares, producto de las diferentes interacciones entre las partículas que las conforman.

Los sólidos se caracterizan por poseer una distribución energética tal, que permite a las partículas mantener una posición más o menos rígida. Los sólidos se clasifican generalmente como cristalinos y amorfos:

Sólidos cristalinos: “un sólido cristalino muestra generalmente un punto de fusión bien definido”⁵ o en un rango relativamente pequeño y una estructura desarrollada con morfología peculiar. “La difracción de rayos X demuestra que un sólido cristalino tiene una estructura regular y ordenada, compuesta de unidades idénticas que se repiten y tienen la misma orientación a través de todo el cristal”⁵. La formación de un sólido cristalino es un proceso lento y ordenado, que permite el equilibrio de las fuerzas de atracción y repulsión, colocando a los elementos estructurales en la posición óptima.

⁴ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

⁵ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1121.

Sólidos amorfos: “un sólido amorfo no posee una forma cristalina característica”⁶ y los intervalos de temperatura para la fusión son relativamente grandes. Su estructura es prácticamente caótica y su formación es tan rápida, que no da tiempo a ningún acomodo estructural, generalmente a raíz de cambios de fase abruptos y descensos de temperatura acelerados. En conclusión, un sólido amorfo se asemeja estructuralmente a un líquido y energéticamente a un sólido cristalino, por la cinética de sus partículas.

Los líquidos se diferencian de los sólidos, en que sus partículas no poseen una posición definida, y se encuentran en constante movimiento. “Los líquidos tienen un orden de corto alcance”⁷, lo cual se asocia a que sus unidades poseen mayor energía cinética que en el caso de los sólidos, en los cuales poseen mayor energía potencial. Sin embargo, en los líquidos si existe un orden relativo, que se establece como una orientación molecular, producto de las fuerzas intermoleculares que tienden a equilibrarse, aunque no conservan posiciones definidas.

Las diferentes fuerzas de atracción que se observan en las fases condensadas, generalmente entran en la definición de enlace químico, que por su naturaleza permite clasificar los materiales en sus estados. En el caso de los sólidos cristalinos, el tipo de enlace, permite clasificarlos en:

Cristales metálicos: son aquellos que se componen de átomos enlazados en su estado basal, generalmente esto se presenta en elementos metálicos, ya que sus electrones de valencia se encuentran deslocalizados, generando la fuerza necesaria para mantenerlos unidos.

⁶ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1121.

⁷ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1163.

Cristales covalentes: estos están compuestos de átomos o moléculas que forman enlaces covalentes entre sí, formando una red continua, es decir, no existen partículas individuales. El enlace covalente es formado cuando la configuración electrónica de los átomos permite que algunos electrones migren de un átomo a otro, conformando una sola unidad electrónica. En esta clasificación también se presentan sólidos amorfos, como varios polímeros, que aunque no son cristales, si presentan una red prácticamente infinita de uniones covalentes.

Cristales iónicos: son aquellos cristales formados por iones positivos (cationes) y negativos (aniones) que se mantienen unidos por atracción eléctrica, la cual existe entre cargas opuestas.

Cristales moleculares: estos se componen de partículas individuales, generalmente moléculas, cuyos átomos están unidos por enlaces covalentes, pero entre ellas se mantienen unidas a través de fuerzas más débiles, denominadas fuerzas intermoleculares. Dichas fuerzas pueden ser: de Van der Waals, cuando ninguna molécula es polar, o relacionarse en las variantes dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido, fuerzas de dispersión, y el caso especial de los puentes de hidrógeno. Todas estas fuerzas, como bien se sabe, son producidas por pequeños desequilibrios en las cargas de cada molécula, que producen atracciones periódicas a gran velocidad.

La energía necesaria para convertir un cristal bien conformado en sus unidades estructurales en fase gaseosa (gas ideal), es la energía de cohesión, representada como un cambio de entalpía. Se dice que es la energía potencial que mantiene el cristal rígido y a las partículas en la posición que les corresponde. Esta energía a su vez se asocia con la distancia promedio a la que se encuentran las partículas en el cristal, ya que es proporcional a la energía invertida en repulsiones y atracciones necesarias para mantener la posición definida.

Para analizar una estructura cristalina, debe estudiarse los diferentes elementos que la definen:

Base: “los cristales poseen un unidad estructural, denominada base (o motivo estructural), que se repite a lo largo de las tres dimensiones para general la estructura cristalina”⁸ y puede estar compuesta por un átomo o molécula, o bien un conjunto de estos unidos en racimos.

Red espacial: esta se conforma de la colocación de la base repetida muchas veces en la misma posición relativa. La red espacial es la que le da orientación a la estructura cristalina, ya que “es una abstracción geométrica”⁷ bidimensional hipotética.

⁸ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1132.

Celda unidad: al “unir los puntos de la red por medio de líneas rectas”⁹, es posible formar figuras tridimensionales básicas, que al repetirse sistemáticamente conforman la estructura cristalina. Para definirla, es necesario tomar en cuenta que debe ser la figura que presente la máxima simetría en el menor volumen posible, pues por principio esa es la tendencia que las partículas poseen, para conservar la mínima energía en las superficies, haciendo más estable la estructura, considerando la naturaleza electrostática del material.

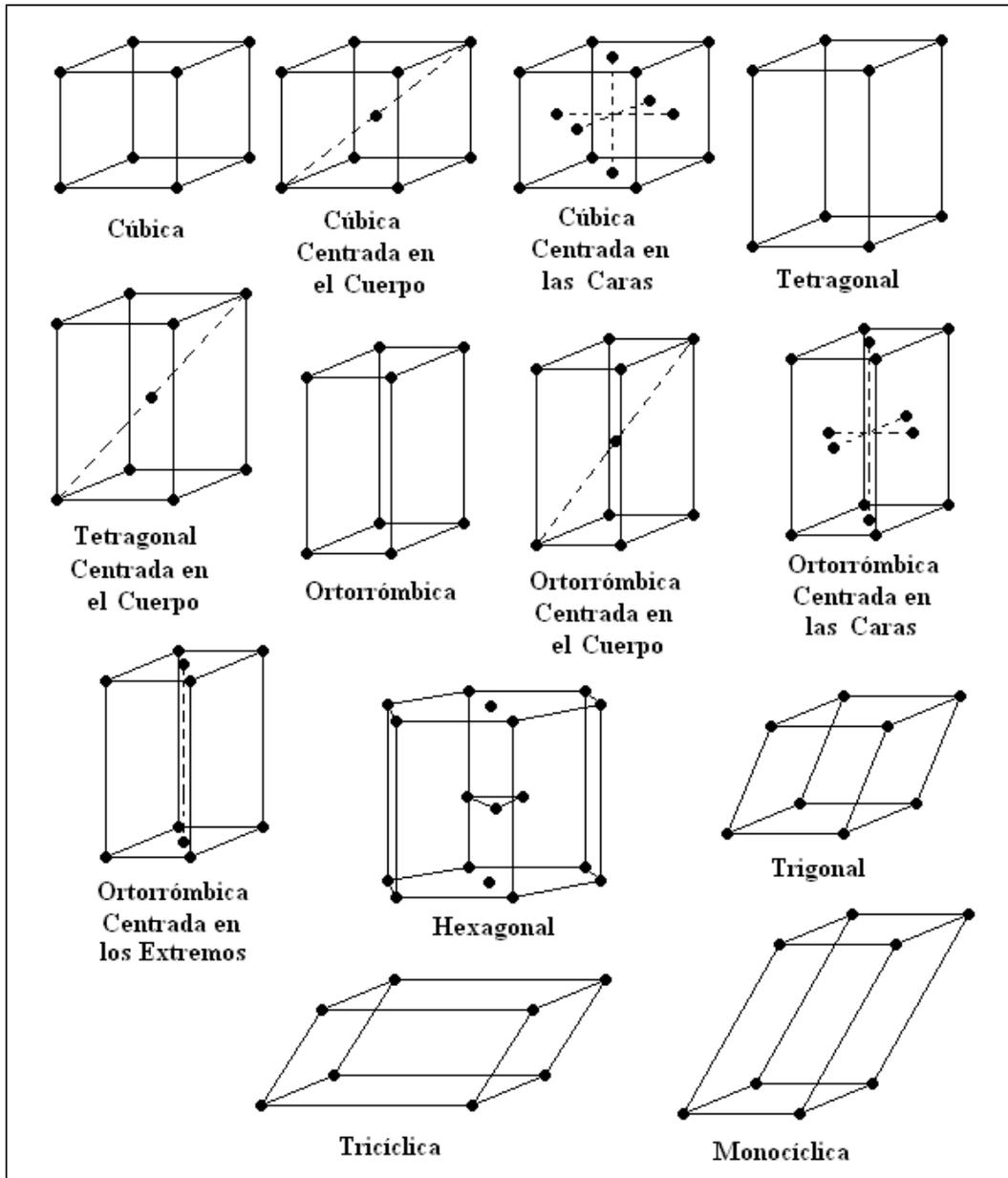
Se conocen hasta el momento 14 tipos diferentes de celdas unidad, que conforman 14 tipos diferentes de estructuras cristalinas, denominadas “redes de Bravais”, estas se muestran en la figura 4.

La estructura que se forma con las celdas unidad generalmente posee una orientación en el espacio, la cual influye en las propiedades del cristal, las cuales serán distintas dependiendo de la dirección que se tome.

“Una sustancia cuyas propiedades físicas son las mismas en todas las direcciones se denomina isotrópica; en caso contrario será una sustancia anisotrópica”⁹. Los gases y los líquidos son isotrópicos, en cambio los sólidos casi siempre presentan carácter anisotrópico.

⁹ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1132.

Figura 4. **Redes de Bravais**



Fuente: LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 1134.

2.2.1. Resistencia de los sólidos

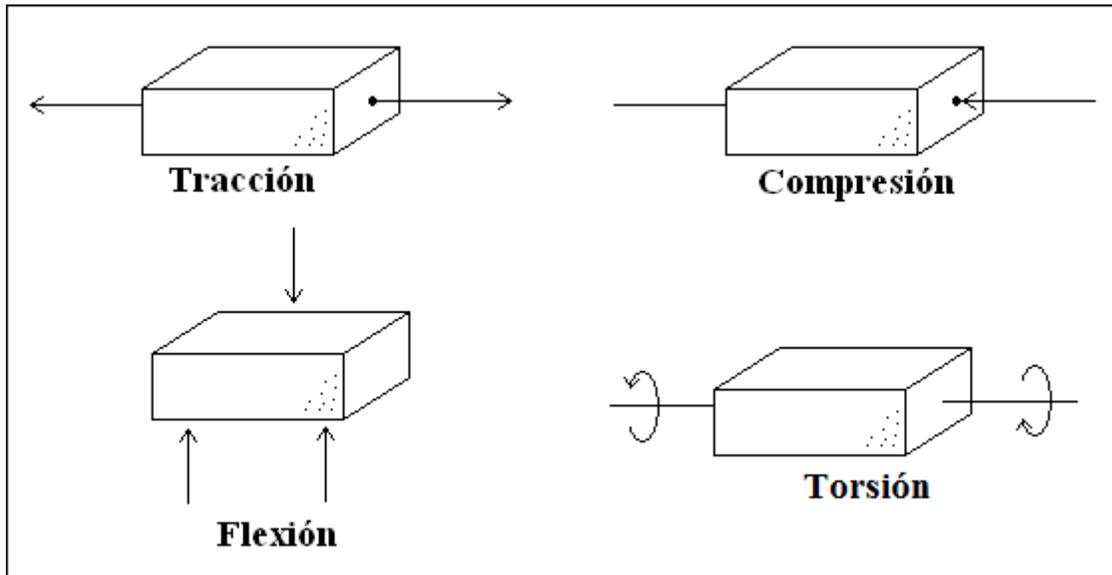
La mayoría de las aplicaciones de los materiales sólidos están relacionadas con la resistencia que estos poseen al exponerse a esfuerzos externos. Un esfuerzo es definido como el conjunto de fuerzas que se aplican de manera constante y sistemática sobre un material. El comportamiento que un sólido puede presentar frente a un esfuerzo, depende totalmente de su estructura interna: su morfología y la interacción de las partículas que lo conforman.

Cuando una porción de un sólido, que posee una forma definida geoméricamente, se expone a un esfuerzo, las fuerzas que mantienen unidas a las partículas generan un campo de fuerzas a nivel microscópico que provoca una reacción a nivel macroscópico en contra de dicho esfuerzo.

Dependiendo de la orientación y posición de las fuerzas aplicadas, los esfuerzos pueden ser: de tracción, compresión, flexión y torsión, los cuales se representan en la figura 5.

Cuando se aplica un esfuerzo a un cuerpo sólido, donde se ve implicada la fuerza F , el sólido por naturaleza ejercerá una fuerza de reacción R que se origina en su interior, y se manifiesta en forma opuesta a F . Esta fuerza busca conservar la integridad estructural del material lo más que sea posible, pues lo que la origina es el excedente de energía potencial que las partículas poseen cuando se encuentran en la estructura.

Figura 5. **Esfuerzos mecánicos**



Fuente: NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnología del Concreto*. p. 80.

Según la teoría, “si un sólido es homogéneo, puede considerarse como una sucesión de innumerables secciones transversales paralelas entre si y perpendiculares a su eje longitudinal, lo cual se extiende a considerarlo como una matriz cuadrada”¹⁰ (equivalente a una red cúbica de Bravais, véase figura 4). A raíz de esta definición, se asume que “las fuerzas aplicadas sobre un sólido se distribuyen en forma homogénea sobre cada partícula que lo conforma, de esta manera, la fuerza F es igual a la sumatoria de todas las fuerzas F_i que tienen efecto sobre cada partícula, y son exactamente idénticas entre sí”¹¹. Si el cuerpo sólido está formado por n partículas, entonces se dice que:

¹⁰ NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnología del Concreto*. p. 77.

¹¹ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo V.

$$F = \sum_i F_i = n \cdot F_i \quad [\text{Ec. 1}]$$

“Cada partícula del sólido representa un diferencial de área, mejor conocido como sección unitaria elemental, la cual posee un área transversal A_{Ti} , que es donde cada fuerza F_i actúa”¹². El área transversal total A_T del cuerpo sólido será entonces la sumatoria de las áreas de cada sección unitaria:

$$A_T = \sum_i A_{Ti} = n \cdot A_{Ti} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Si se divide la ecuación 1 dentro de la ecuación 2, se obtiene que:

$$\frac{F}{A_T} = \frac{n \cdot F_i}{n \cdot A_{Ti}} = \frac{F_i}{A_{Ti}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Como el área A_{Ti} se considera igual a la unidad, se puede simplificar diciendo que:

$$\frac{F}{A_T} = F_i \quad [\text{Ec. 4}]$$

Esto quiere decir, que la fuerza ejercida a cada partícula es igual a la fuerza total dentro del área transversal. Lo que quiere decir, que esta relación es la misma para cada partícula, y representa en forma intensiva el esfuerzo al que está sometido el cuerpo. Dependiendo del tipo de esfuerzo, esta relación recibe diferentes nombres, por ejemplo para el de tracción, se le conoce como tensión, para el de compresión esto viene siendo una presión, y así sucesivamente.

De igual manera, el efecto que un esfuerzo tiene sobre un cuerpo sólido, una deformación, puede expresarse en forma intensiva, para que de esta manera, pueda eliminarse el efecto del tamaño de la muestra y del tamaño del esfuerzo, y el resultado de un estudio de resistencia sea solamente expresado para el material.

¹² <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo V.

La deformación generalmente se expresa como la variación en la distancia del cuerpo ΔL cuando se habla de tracción y compresión, producto de la aplicación del esfuerzo, pero si se divide dentro de la distancia original que poseía el cuerpo L_0 , se obtiene la deformación relativa, expresada como:

$$\% \Delta = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad [\text{Ec. 5}]$$

Cuando un material se expone a un esfuerzo, llega un momento en el cual su estructura comienza lentamente a colapsar, y se fractura o se deforma permanentemente. Un ensayo de resistencia, consiste en caracterizar un material respecto al máximo esfuerzo que soporta antes de que esto ocurra; para lo cual se introduce una muestra del material con la morfología adecuada en una máquina universal, la cual ejerce diferentes esfuerzos, y los cuantifica, junto con las deformaciones producidas. Cuando los datos de ambas variables se grafican, puede observarse el comportamiento mecánico de la muestra, y determinar el máximo esfuerzo que soporta antes de colapsar, lo cual caracteriza al material según cierta especificación para ese ensayo.

2.3. Coloides

Cuando se tienen dos o más componentes en un sistema, formando una mezcla, estos pueden formar una disolución, la cual se presenta en una sola fase homogénea, pero existen casos en los cuales esto no sucede, y aparentemente el proceso de disolución queda incompleto.

En esos casos, la mezcla es continua, pero no es homogénea, su comportamiento no es como el de los componentes separados en suspensión, pero tampoco es como el de una disolución. A este tipo de mezcla intermedia se le llama coloide, “dispersión coloidal o sistema coloidal”¹³.

En un coloide se dice que coexisten dos o más fases, formando una matriz continua, que se encuentra en el límite exacto entre homogeneidad y separación total, y presenta una estabilidad energética tal, que no se separa a menos que se vea sometida a un estímulo externo, caso contrario al de una suspensión, que espontáneamente se separa en sus componentes luego de reposar.

En un coloide en estado estable, se ha observado que generalmente las partículas de una fase están dispersas en otra, formando unidades aglomerantes, es decir, racimos de partículas, las cuales se equilibran mecánicamente con las partículas del medio dispersor, de tal manera que pueden vencer la gravedad y otras fuerzas externas, para conservar sus orientaciones relativas dentro del sistema. Dichos racimos poseen un rango de diámetros aproximado “entre 10 y 1 000 Å”¹².

Cualquier sustancia puede llegar a formar un coloide, sin importar la fase en la que se encuentre, solo son necesarias las condiciones adecuadas. De esta forma, cada combinación de fases dispersa y dispersora forma un tipo de coloide diferente, como se muestra en la tabla III.

¹³ WOOD, Jesse H.; KEEN, Charles W.; BULL, William, E. *Química General*. pp. 224 y 225.

Tabla III. **Sistemas coloidales**

Fase Dispersa	Medio Dispersor	Tipo de coloide
Sólido	Sólido	Sol Sólido
Sólido	Líquido	Sol
Gas	Sólido	Espuma sólida
Sólido	Gas	Aerosol sólido
Líquido	Sólido	Emulsión sólida
Líquido	Líquido	Emulsión
Líquido	Gas	Aerosol líquido
Gas	Sólido	Espuma sólida
Gas	Líquido	Espuma

Fuente: WOOD, Jesse H.; KEEN, Charles W.; BULL, William, E. *Química General*. p. 226.

El proceso de formación de partículas coloidales puede ocurrir de diversas maneras, por dispersión, cuando partículas más grandes se reducen hasta alcanzar el tamaño necesario, o por condensación, cuando partículas básicas se aglomeran en racimos del tamaño específico. En ambos casos la estabilidad del sistema coloidal depende de otros factores, como las condiciones ambientales. Existen sistemas coloidales que se mantienen espontáneamente estables (autoestabilización) y otros que requieren de un componente adicional para lograrlo.

Cuando se requiere de un componente adicional, se debe a que las fases implicadas (dispersa y dispersora) no son afines entre sí, y requieren de un intermediario, generalmente híbrido, que evite la separación de las fases. Los intermediarios pueden ser: coloides protectores, que son los que envuelven en su interior a la fase dispersa, para evitar que ésta entre en contacto con el dispersor; iones adsorbidos, los cuales se adhieren a la superficie de la fase dispersa y repelen el contacto entre sí de la misma fase, evitando la coagulación; también pueden ser polvos, los que son envueltos por la fase dispersa, y por gravedad mantienen suspendidas las partículas coloidales.

Geles: “la palabra gel es un término general que incluye todos los coloides sólidos y semisólidos como las jaleas, precipitados gelatinosos, membranas, fibras sintéticas y naturales y materiales análogos. El tipo más común de gel es la denominada gelatina”¹⁴, que realmente se clasifica como un sol, es decir, partículas sólidas dispersas en un líquido. La estructura característica de esos geles se debe principalmente a que las partículas coloidales “se agregan en estructuras largas, filamentosas”¹³, lo cual le confiere su elasticidad.

Estos filamentos forman una intrincada red que es capaz de retener una gran cantidad de líquido, por lo que su apariencia es más como la de un sólido, “aunque la fase sólida dispersa con frecuencia constituya menos del 1 por 100 del total”¹³.

2.4. Reacciones químicas y su estudio

El término reacción química se aplica generalmente a todo cambio en la estructura de la materia que modifica su identidad en forma total o parcial, es decir, a todo cambio en el orden de los átomos que conforman las unidades químicas (moléculas, iones, etc.) de las sustancias que participan en la reacción, lo cual generalmente conlleva a la formación y destrucción de enlaces químicos de cualquier tipo.

¹⁴ WOOD, Jesse H.; KEEN, Charles W.; BULL, William, E. *Química General*. p. 241.

Asociado a este concepto es posible mencionar un término poco común, reacción física, el cual se diferencia con el anterior, en que se aplica a los cambios estructurales de la materia en los cuales la identidad de la misma permanece intacta.

La mayoría de reacciones químicas en la naturaleza, están asociadas con reacciones físicas, desde un cambio de fase, un cambio en la coloración u otras propiedades, casi todo cambio en la estructura interna de la materia, ocasiona un cambio exteriormente. Es por tanto que se podría hablar de reacciones fisicoquímicas, cuando se enfoca la atención a los dos tipos de fenómenos que ocurren al mismo tiempo.

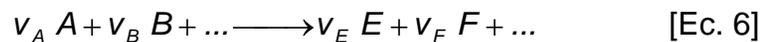
La reacción química de interés para este estudio (la hidratación del cemento) ocurre en dos fases diferentes, y se observa un cambio en la estructura química de las partículas el cual se suma a un cambio físico de su morfología, ya que cambia su estructura cristalina, lo cual se puede compararse a un cambio de fase.

Para estudiar una reacción utilizando los principios de la fisicoquímica, existen dos enfoques: el enfoque termodinámico y el cinético. En el caso de la termodinámica, lo importante siempre son los cambios de estado, es decir, el análisis de los puntos iniciales y finales de todo proceso.

Aplicando esto a las reacciones químicas, el análisis se enfoca a cuantificar las cantidades de reactivos al inicio y de productos en el estado de equilibrio (final), además el efecto sobre otras variables como la temperatura y la presión del sistema. En el caso del fraguado, es de interés simplemente el efecto sobre la temperatura, ya que se está hablando de fases incompresibles (sólida y líquida).

Al hablar del enfoque cinético, se está haciendo referencia a todo el transcurso intermedio de un proceso, es decir, el valor que toman las variables implicadas, en los estados intermedios entre el inicio y el equilibrio. Es hacia ese punto donde el estudio se enfocará esencialmente más adelante.

Avance de reacción: se define como el grado de consumo o producción de las especies de una reacción química expresadas cuantitativamente mediante un sólo valor, utilizando la variable de referencia, que generalmente son los moles reaccionantes. Entonces para una reacción de la forma:



que puede representarse como:

$$\sum_i v_i \cdot i \longrightarrow 0 \quad [\text{Ec. 7}]$$

el avance de reacción esta dado por:

$$\xi = \frac{n_A - n_{A0}}{v_A} = \frac{n_B - n_{B0}}{v_B} = \dots = \frac{n_E - n_{E0}}{v_E} = \frac{n_F - n_{F0}}{v_F} = \dots = \frac{n_i - n_{i0}}{v_i} \quad [\text{Ec. 8}]$$

donde ξ es el avance de la reacción en moles, v corresponde a los coeficientes estequiométricos con el signo incluido para cada especie, n_{i0} y n_i son los moles de cada especie implicada en la reacción al inicio y en cualquier momento de la reacción respectivamente.

2.4.1. Termodinámica de las reacciones químicas

La termodinámica trata a las reacciones químicas analizando su estado de equilibrio, y el efecto de las condiciones y variables sobre dicho estado.

Para comenzar, es necesario conocer el sistema con el que se va a tratar, para esto existe una clasificación según varios criterios. Según el tipo de intercambio con el ambiente, los sistemas pueden clasificarse como: cerrados, abiertos y aislados. “Un sistema abierto es aquel en el que se puede transferir materia entre el sistema y los alrededores. Un sistema cerrado es aquel en el que no es posible tal transferencia de materia. Un sistema aislado es el que no interacciona de ninguna forma con sus alrededores.”¹⁵

Según el número de fases del sistema, este puede ser homogéneo, cuando se encuentra en una sola fase y heterogéneo cuando existe interacción entre varias fases.

Utilizando como criterio la temperatura, también puede realizarse una clasificación: isotérmicos, cuando la temperatura permanece constante y adiabáticos, cuando la cantidad de energía en el interior es constante aunque la temperatura varíe.

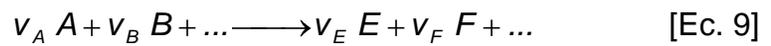
2.4.2. Cinética química

“La cinética es el estudio de la velocidad de cambio en procesos tales como las reacciones químicas, la difusión y el flujo de carga en una célula electroquímica”¹⁵, sin embargo, cuando se refiere a reacciones químicas el término se especifica como cinética química, en cuyo caso, se estudian principalmente “las velocidades y mecanismos de las reacciones químicas”¹⁶.

¹⁵ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 1. p. 2 y 3.

¹⁶ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 659.

Es necesario definir el término “velocidad de reacción”, considerando en primer lugar que se denomina velocidad a una razón de cambio, generalmente en función del tiempo, ya que es la dimensión que posee la menor dependencia de otras variables. Generalmente la variable que se utiliza como referencia para cuantificar el transcurrir de la reacción es la concentración de alguna especie, o de todas representada en una en especial. Sin embargo es posible utilizar otras variables para esto, debido a que la concentración no siempre se puede medir o deducir a través de otras mediciones. Considérese la reacción homogénea:



donde a, b, ..., e, f, ... son los coeficientes estequiométricos de cada especie. Las velocidades con que cada especie se consume o se produce guardan una proporción respecto a sus coeficientes, lo que se observa en la ecuación 4:

$$\frac{1}{v_A} \frac{dn_A}{dt} = \frac{1}{v_B} \frac{dn_B}{dt} \quad [\text{Ec. 10}]$$

de esto se deduce la expresión para la velocidad de conversión:

$$j = \frac{1}{v_A} \frac{dn_A}{dt} = \frac{1}{v_B} \frac{dn_B}{dt} = \dots = \frac{1}{v_F} \frac{dn_F}{dt} = \frac{1}{v_i} \frac{dn_i}{dt} \quad [\text{Ec. 11}]$$

donde i puede ser cualquier especie, y dicha velocidad estaría expresada en moles consumidos o producidos por unidad de tiempo. Si se desea eliminar el efecto numérico de los coeficientes de conversión y obtener una velocidad que exprese el avance de la reacción para cualquier especie se utiliza la definición dada en la ecuación 8, obteniéndose que la “velocidad de conversión”¹⁷ de la reacción puede expresarse según la ecuación 12.

$$j = \frac{d\xi}{dt} \quad [\text{Ec. 12}]$$

¹⁷ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 660.

De este modo la velocidad con que se convierte una reacción es la razón de cambio del avance de dicha reacción respecto al tiempo. Sin embargo, dicha velocidad esta expresada en moles por segundo, convirtiéndose en una variable extensiva, lo cual se hace poco práctico cuando se desea trabajar con una reacción a gran escala, la cantidad de moles sería enorme, y el volumen variable haría cambiar a esta variable, lo cual ocasionaría la necesidad de controlar el tamaño de muestras, el tamaño de los volúmenes, etc., a un valor constante.

Para evitar esto, se emplea una expresión de la “velocidad de reacción, r ”¹⁷ que la convierte en un parámetro intensivo que no depende en nada del tamaño de la muestra, utilizando un avance dado en concentración, moles por unidad de volumen (litro, m³, etc.), esto se muestra en la ecuación 13.

$$r = \frac{j}{V} = \frac{d\left(\frac{\xi}{V}\right)}{dt} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Si se expresa esto para todas las especies, resulta lo siguiente:

$$r = \frac{1}{v_A} \frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{v_B} \frac{dC_B}{dt} = \dots = \frac{1}{v_F} \frac{dC_F}{dt} = \frac{1}{v_F} \frac{dC_F}{dt} = \dots = \frac{1}{v_i} \frac{dC_i}{dt} \quad [\text{Ec. 14}]$$

donde C representa la concentración en moles por unidad de volumen para cada especie, que son variables que no dependen de la cantidad de materia (tamaño de muestra), y la velocidad resultante se expresaría en unidades de concentración por unidad de tiempo. Sin embargo, cabe resaltar que la concentración no es la única variable con la que puede cuantificarse la velocidad de una reacción, cualquier parámetro intensivo que permita deducir la cantidad de cada especie en cada momento de la reacción es útil para este fin.

Así, es posible utilizar variables como la presión para deducir la velocidad con que una reacción se realiza, lo cual se utiliza generalmente en reacciones en fase gaseosa:

$$r_P = \frac{1}{v_A} \frac{dP_A}{dt} = \frac{1}{v_B} \frac{dP_B}{dt} = \dots = \frac{1}{v_F} \frac{dP_F}{dt} = \frac{1}{v_i} \frac{dP_i}{dt} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Ecuaciones cinéticas o leyes de velocidad: una ecuación cinética o Ley de velocidad es un modelo matemático, que permite predecir la velocidad de una reacción a partir de cualquier variable medible, generalmente esta variable es la concentración de las especies. Los modelos varían según el comportamiento de las reacciones y los diseños experimentales, pero el modelo más utilizado es el de la forma:

$$r = k \cdot \prod_i C_i^{\alpha_i} \quad [\text{Ec. 16}]$$

donde para la reacción de la ecuación 1, se obtendría la expresión:

$$r = k \cdot C_A^{\alpha_A} \cdot C_B^{\alpha_B} \cdot \dots \quad [\text{Ec. 17}]$$

en donde k es una constante de proporcionalidad denominada comúnmente velocidad específica, “constante cinética o coeficiente de velocidad”¹⁸, α_A y α_B son generalmente enteros o fracciones que resultan de la construcción del modelo, denominados también ordenes parciales de reacción, los cuales al sumarse dan como resultado el orden global de reacción.

Cabe subrayar la presencia de la concentración de los reactivos únicamente en la expresión, es decir, las especies que entran al sistema reactivo, y no los productos obtenidos, esto se debe posiblemente al hecho de que las sustancias de entrada generalmente son conocidas en cantidad y propiedades.

¹⁸ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 661.

La morfología que presenta este modelo, puede justificarse desde el punto de vista matemático ya conocido, pero su significado físico es más complejo, contemplando aquí, el ámbito de la fisicoquímica estadística, donde se argumenta en conclusión, que mientras mayor sea la concentración de las especies que se consumen, mayor es la velocidad con la que esto sucede, debido a la cercanía entre ellas y, como se verá más adelante, a la frecuencia de las colisiones.

Métodos cinéticos: un método cinético es un procedimiento experimental, por medio del cual se puede determinar la velocidad de una reacción con el fin de construir un modelo cinético. Existen infinidad de métodos, dependiendo del tipo de reacción que se analizará, tomando en cuenta, las fases de las especies, sus propiedades químicas, relaciones moleculares, etc. La mayoría de los métodos cinéticos se basan en la determinación experimental de la concentración, de una o más especies, en el transcurso de la reacción.

En algunos casos es posible realizarlo sin interferir en el proceso, sin embargo existen muchos métodos que implican el detener la reacción para realizar las mediciones necesarias, esto se facilita cuando la velocidad promedio es muy baja, pero para reacciones rápidas existen técnicas especiales que deben llevarse a cabo para lograr las mediciones. Por tanto, para seleccionar un método cinético es necesario tomar en cuenta, como mínimo, los siguientes aspectos:

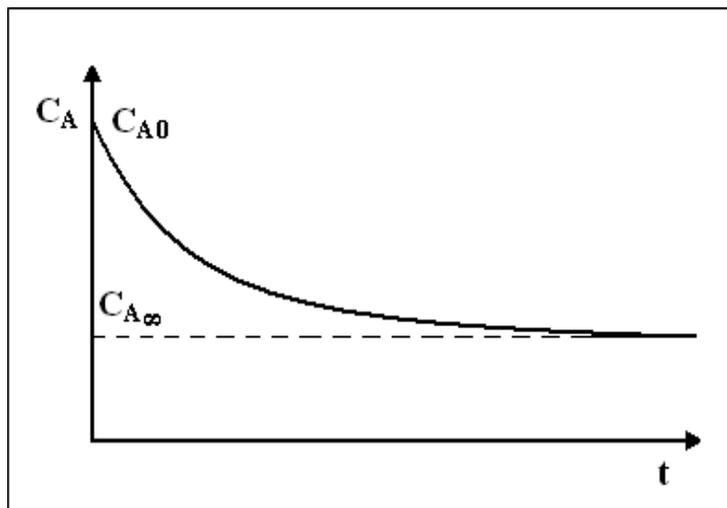
- Las fases en las que se encuentran las especies antes y durante el transcurso de la reacción.
- Las propiedades fisicoquímicas de los reactivos y productos que permitan determinar sus cantidades.

- Las posibles perturbaciones que puedan provocar error en los resultados al tomar las muestras o someterlas a un ensayo.
- Los factores externos que modifiquen la cinética de la reacción y su posible eliminación.
- Factores que puedan detener la reacción sin modificar la composición del sistema (de ser necesario).

2.4.3. Tratamiento de datos cinéticos

Una vez que han obtenido los datos de una reacción a través de un método cinético, es necesario realizar un tratamiento matemático/estadístico que permita deducir la ley de velocidad o modelo cinético que describa su comportamiento. Existen varios métodos de cálculo que se ajustan al comportamiento de cada reacción a estudiar.

Figura 6. **Concentración de un reactivo en función del tiempo**



Fuente: LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 671.

Método integral: este consiste en la integración matemática de la ecuación de la ley de velocidad, como la que se muestra en la ecuación 17, con el fin de obtener “las concentraciones frente al tiempo”¹⁹, tomando en cuenta que se está utilizando la velocidad de reacción, deducida en las ecuaciones 13 y 14. Dicha expresión se puede resultante puede manipularse de muchas maneras, y poder relacionar la concentración de cualquier especie, según sea requerido por el método experimental.

Entonces, si se obtienen los datos, por ejemplo, para un reactivo, de su concentración a diferentes instantes de la reacción, es posible construir una gráfica como la que se muestra en la figura 6, donde la concentración disminuye al transcurrir el tiempo, siendo al inicio $[A]_0$ y al final $[A]_\infty$. Entonces, para una reacción de la forma:



el coeficiente estequiométrico de A es -1 y la velocidad de reacción estará dada por:

$$r = -\frac{dC_A}{dt} \quad [\text{Ec. 19}]$$

y su ley de velocidad tendría la forma:

$$r = k \cdot C_A^n \quad [\text{Ec. 20}]$$

Para aplicar el método integral es necesario combinar ambas ecuaciones para obtener una expresión que es la que finalmente se integrará como una ecuación diferencial de tipo separable, que es el que generalmente resulta:

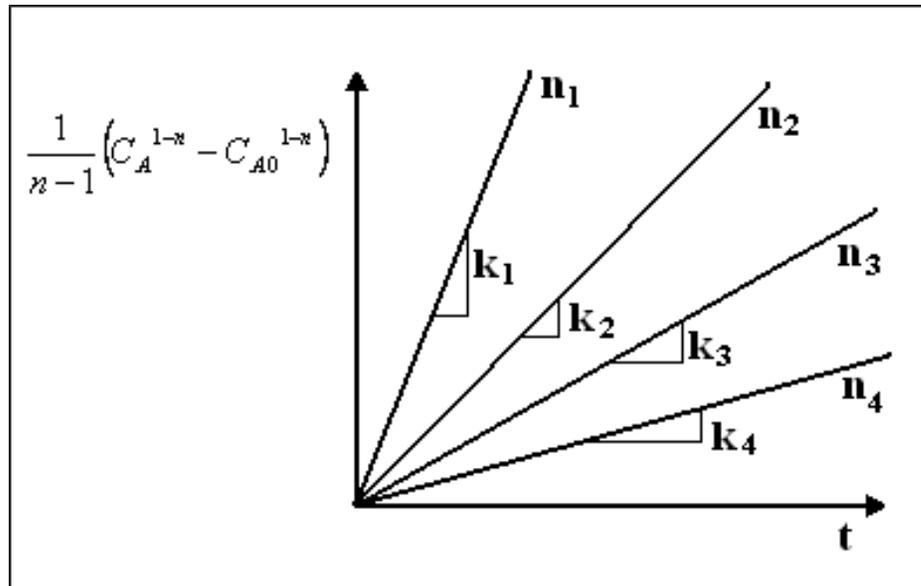
$$-\frac{dC_A}{dt} = k \cdot C_A^n$$

¹⁹ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 665.

$$\begin{aligned}
 -\frac{dC_A}{C_A^n} &= k \cdot dt \\
 -\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^n} &= k \int_0^t dt \\
 \frac{1}{n-1} \left(C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n} \right) &= kt \quad [\text{Ec. 21}]
 \end{aligned}$$

La ecuación 21 es la expresión que se obtiene a partir del proceso de integración, para obtener la constante de reacción, es necesario conocer el orden. Cuando dicho valor no se posee, el método se realiza por prueba y error, asumiendo varios órdenes posibles, y realizando una correlación, como la que se representa en la figura 7.

Figura 7. **Representación gráfica de la aplicación del método integral en reacciones de un reactivo**



Fuente: LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 677.

La correlación que se acerca más a la linealidad (mayor coeficiente de correlación) representa el orden y la constante que más se aproximan a los valores reales. Cuando se trata con reacciones que poseen más de un reactivo, el procedimiento es el mismo, simplemente debe colocarse la concentración de los demás reactivos en función de uno solo (generalmente el limitante), sin embargo, las expresiones obtenidas muchas veces son más complicadas en su integración.

Método diferencial: este método es más sencillo y en ocasiones más exacto que el anterior, debido a que el cálculo se realiza sin prestar atención a ninguna deducción matemática previa. Si se utiliza la ley de velocidad de la ecuación 16, para un solo reactivo, se obtiene:

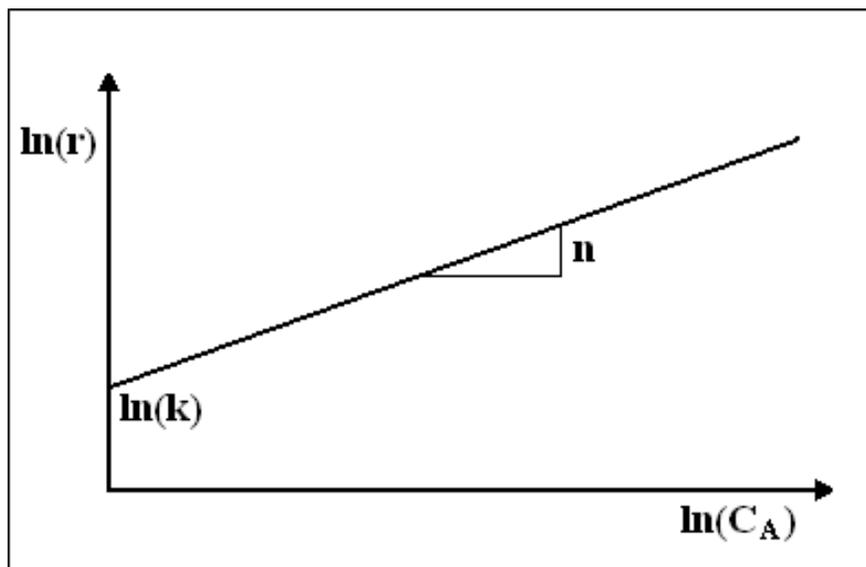
$$r = k \cdot C_A^n \quad [\text{Ec. 22}]$$

entonces, aplicando una linealización, este modelo puede transformarse en una ecuación de la línea recta, esto generalmente se realiza a través de logaritmos:

$$\ln(r) = n \cdot \ln(C_A) + \ln(K) \quad [\text{Ec. 23}]$$

Como puede observarse, la expresión resultante posee la forma de una línea recta, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Representación gráfica del método diferencial



Fuente: LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. Volumen 2. p. 677.

El inconveniente de este método, es que se requieren datos de velocidad de reacción, los cuales son difíciles de obtener por métodos directos, por tanto generalmente se aproximan (velocidades promedio) o se obtienen derivando un modelo del comportamiento, lo cual no es un cálculo sencillo, sin embargo una vez obtenidos, una simple correlación da como resultado el valor del orden y la constante de reacción, sin necesidad de repetir el procedimiento, como sucede en el método integral. Existen otros métodos para determinar la ley de velocidad de una reacción, pero estos dos son los más utilizados en casi todas las variantes experimentales.

2.4.4. Mecanismos de reacción

Un mecanismo de reacción puede definirse como la serie de pasos o cambios los cuales una o varias especies sufren para dar como resultado los productos finales. Tomando esto en cuenta, es posible clasificar a las reacciones químicas según la complejidad de su mecanismo, así una reacción elemental es la que se lleva a cabo en un solo paso y una reacción compleja en dos o más pasos. Para comprender esto de mejor forma, cabe mencionar que un mecanismo de reacción a nivel microscópico consiste básicamente en una serie de choques y colisiones entre las partículas de las especies, producidos por atracciones, repulsiones y otros fenómenos asociados, que ocasionan el ordenamiento de una o más estructuras moleculares.

De esta manera, se puede afirmar, que en una reacción elemental, solo se lleva a cabo un tipo de colisión, luego de la cual los productos están totalmente formados. En cambio para una reacción compleja, es necesario que las primeras colisiones den como resultado otras especies intermedias, que a su vez luego produzcan otras especies al sufrir un cambio subsecuente, hasta que finalmente se formen especies lo suficientemente estables para estar presentes en el equilibrio de la reacción, que vendrían a ser los productos.

“Las transformaciones químicas son el resultado de una o más etapas que implican reacciones simples; dichas etapas se denominan procesos elementales”²⁰, he ahí de donde se origina el término reacción elemental.

²⁰ CANEDA, Rodolfo V. *Cinética Química*. p. 23.

Los procesos elementales pueden clasificarse según su molecularidad, término que se refiere a la cantidad de especies diferentes (tomando en cuenta la función desempeñada) que participan en él, de esta manera se conocen tres tipos: unimoleculares, bimoleculares y trimoleculares, luego de esto es casi imposible encontrar un proceso elemental que implique más de tres especies participantes.

Para estudiar un mecanismo de reacción, es necesario entenderlo desde dos puntos de vista, los cuales se postulan en dos teorías bien conocidas: la teoría de las colisiones y la teoría del estado de transición, las cuales describen los fenómenos considerando algunas idealidades.

Teoría de colisiones: esta tiene como fundamento la hipótesis de que el grado de avance de una reacción a través del tiempo, solo depende del número de choques o colisiones que las moléculas de los reactivos (o especies iniciales) sufren entre sí. Sin embargo, cabe mencionar que para que una colisión se realice, deben intervenir por lo menos dos moléculas, lo cual implica que esta teoría no es válida (aparentemente) para reacciones o procesos unimoleculares.

Por tanto, estableciéndose ciertas restricciones, puede predecirse o tener una idea de la cinética de un proceso a través del cálculo del número de las colisiones en una unidad de tiempo. Otro problema que presenta la teoría de las colisiones es que las restricciones necesarias limitan el campo de acción a condiciones muy específicas, y casi ideales. Por ejemplo, para una reacción en fase sólida los movimientos de las partículas son tan lentos, que la definición de "colisión" pierde su sentido y en una reacción en disolución acuosa (que es representativa de la fase líquida) la presencia del disolvente complica los cálculos y genera muchas incongruencias.

Esta teoría se aplica fácilmente a reacciones que se llevan a cabo en fase gaseosa, y para esto se utiliza básicamente la teoría cinética de los gases ideales, la cual a través de la estadística predice el comportamiento de los fenómenos macroscópicos que dependen de los fenómenos a nivel microscópico.

Teoría del estado de transición: la teoría de las colisiones estudiada anteriormente afirma que cualquier colisión que se llevara a cabo es exitosa, es decir, cualquier choque produciría los acomodos necesarios para concluir el proceso con éxito. Sin embargo, el postulado de la teoría de transición dice que no todos estos choques pueden generar el producto final, ya que se requiere que la colisión libere cierta cantidad de energía y dicha energía se almacene en forma de enlaces temporales formando lo que se conoce como “complejo activado” que es una estructura molecular sumamente inestable que alcanza niveles energéticos considerables, y su formación funciona como una barrera reguladora del avance de la reacción.

Esta definición parte de ciertos principios considerados en la mecánica estadística, pues, si se sabe que el sistema que reacciona cuenta con un número N de partículas (moléculas, iones, etc.) cada una de estas puede pertenecer a tres grupos diferentes, reactivos, productos y complejos activados, considerando que existen varias configuraciones para el complejo activado, mas solo existe un nivel energético para el estado de transición.

Cada uno de estos grupos de partículas, posee una cantidad determinada de estados y niveles energéticos, que se diferencian por la cantidad total y distribución de energía.

Como bien se sabe, cada partícula posee energía en varias formas ya que presentan movimiento de traslación, rotación y vibración (energía cinética), además de la energía que utilizan para mantener su posición (energía potencial). Por tanto, dos estados pueden tener el mismo nivel energético, pero dicha energía puede estar distribuida en las diferentes manifestaciones.

De aquí parte el concepto de la barrera energética del estado de transición, ya que dicho estado corresponde no solo a un nivel energético máximo, sino a una configuración o distribución energética específica, y el complejo activado puede presentar infinidad de distribuciones, que si no cumplen con la del estado de transición, este no formará los productos.

Entonces cada complejo activado que no posee las características de transición al ser inestable, no puede permanecer mucho tiempo conformado, por ende lo que tiende a hacer es a formar reactivos nuevamente, y si estos no logran una colisión exitosa (la cual formaría el complejo exacto que cumpla el estado de transición) el proceso se repite, estableciéndose de esta manera un equilibrio entre los reactivos y el complejo activado.

El valor de la constante de equilibrio influye directamente en la constante de reacción del proceso global, ya que al ser mayor, la probabilidad de que mayor cantidad de partículas de complejo activado alcancen el estado de transición es mayor, y la rapidez con que pasen a ser productos es mayor. De aquí también parte el hecho de que la velocidad de reacción depende de la temperatura, ya que una mayor temperatura conlleva a una mayor energía interna, lo que se traduce a mayores niveles en cada partícula de reactivo y eso significa mayor probabilidad de alcanzar el estado de transición.

2.4.5. Factores que afectan la cinética de una reacción química

Temperatura: como se dijo antes, la temperatura afecta los niveles energéticos y la probabilidad de alcance del estado de transición para las partículas del sistema, además actúa sobre la frecuencia de colisiones, por tanto su efecto es considerado en ambas teorías, la teoría de colisiones y la del estado de transición, las cuales generan, a través de sus consideraciones, dos expresiones para la constante cinética de la reacción, dichas expresiones poseen una forma similar a la ecuación 24:

$$k = Ae^{-E_a / RT} \dots \quad [\text{Ec. 24}]$$

donde E_a es la energía de activación, R la constante de los gases ideales, T la temperatura absoluta y A es una semi-constante que prácticamente no varía con la temperatura. Esta expresión se conoce como el modelo de Arrhenius, debido a quien lo desarrollo. Si a la ecuación de Arrhenius se le aplican logaritmos, es posible hacer una linealización que permite determinar el valor de la energía de activación y de la constante A . Sin embargo esta ecuación se debería aplicar solo a reacciones elementales, para reacciones complejas el modelo no se cumple o si se cumple, las constantes pierden su significado.

Disolvente: antes de definir el efecto de un disolvente, es necesario aclarar los conceptos asociados. Se sabe que una disolución es una mezcla homogénea de dos o más sustancias, y que la sustancia presente en mayor proporción es conocida como disolvente. Esto se asevera sin tomar en cuenta la fase o fases del sistema, en cuyo caso, es clásico aplicar la definición de disolución a la fase líquida, sin embargo existen también disoluciones sólidas y gaseosas que deben tomarse en cuenta.

Para una reacción química que se lleva a cabo en un sistema que se considera una disolución, el disolvente puede o no participar en ella, cuando lo hace, su efecto sobre la velocidad de reacción es como la de cualquier reactivo en exceso. En caso contrario, cuando el disolvente no participa en la reacción y no funciona como catalizador (concepto que se tratará más adelante), puede tomar el papel de inhibidor de la reacción o de medio para que el contacto intermolecular de los reactivos sea posible.

Hablando específicamente en sistemas en fase líquida, es necesario hablar sobre la solvatación, que es “la atracción a que están mutuamente sometidas las moléculas de disolvente y de soluto”²¹, un fenómeno de tipo electrostático orientado según su polaridad donde se forman atmósferas iónicas, lo cual suspende a las partículas y mantiene las cargas lo más equilibradas posible dentro del sistema. El grado de solvatación de un sistema generalmente depende de la naturaleza del disolvente, el cual puede variar en su polaridad.

Mientras más polar sea, mayor será la interacción entre las demás partículas del sistema y mayor el grado de solvatación, presentándose un mayor ordenamiento debido a las fuerzas electrostáticas presentes. Cuando una molécula se solvata, utiliza energía en atraer a las partículas de disolvente. Por lo tanto se puede decir que el efecto del disolvente sobre la velocidad de reacción tiene infinidad de variantes, dependiendo de la naturaleza del sistema y de sus condiciones.

²¹ CANEDA, Rodolfo V. *Cinética Química*. p. 58.

Catálisis: el término catálisis se refiere al proceso, a través del cual, se eleva la velocidad de reacción química. Este proceso puede llevarse a cabo de varias maneras: añadiendo una sustancia, modificando una condición de la reacción, etc. Dicho factor es conocido como genéricamente como catalizador. Existen muchas definiciones para un catalizador, la más utilizada es la que lo considera como una sustancia que altera la velocidad de reacción sin aparecer entre sus productos.

Sin embargo aquí no se están considerando los casos donde esto no se cumple, como cuando los productos forman al catalizador o donde el catalizador se modifica. Para evitar confusiones, debe saberse que la función específica de un catalizador “es cambiar el mecanismo de la reacción, de modo que esta transcurra por otro más rápido que tiene una menor energía libre de activación”²², es decir un mecanismo donde el complejo activado sea más estable.

Existen diversas clases de catálisis considerando diferentes criterios, la clasificación común toma en cuenta las fases presentes, siendo estas: catálisis homogénea y catálisis heterogénea. La catálisis heterogénea (que es la que más se asocia al presente trabajo de investigación) se aplica a procesos químicos que ocurren en interfaces. El caso más observado es aquel en el que la reacción requiere la presencia de un sólido, que al permanecer casi inalterado y participar en la reacción, cumple con la definición de catalizador. Dicho sólido hace posible la reacción ya que permite o facilita el contacto intermolecular entre las partículas de los reactivos, esto generalmente al adsorberlos.

²² CANEDA, Rodolfo V. *Cinética Química*. p. 83.

Este proceso auxiliar también posee una cinética, regida por la naturaleza del sólido y de las partículas adsorbidas, además de las condiciones del sistema, dicha cinética generalmente se cuantifica a través de las isothermas de adsorción.

2.5. Equilibrio de solubilidad

Cuando un sólido y un líquido se encuentran en contacto en un sistema, la tendencia, como cualquier sistema de varias fases, es a establecer un equilibrio. En una mezcla líquida de dos componentes, donde uno de los dos se encuentra presente en mayor proporción (disolvente), el componente minoritario (solute) tiende a distribuirse y a orientarse en la matriz de fuerzas electrostáticas que el disolvente posee en su seno. Dicha matriz, permite cierta cantidad de partículas de soluto, inversamente proporcional a la energía potencial disponible para contenerlas en su pseudo-estructura.

Por lo tanto, cuando se añade un sólido dentro de un líquido, el sólido tiende a disolverse, debido a que la energía cinética del soluto es mayor en la fase líquida que en la fase sólida, entonces para equilibrarse, debe agotar parte de dicha energía, introduciéndose en el líquido, el cual la invierte en solvatar al soluto.

A partir de esta visión, puede definirse a la solubilidad como la capacidad de una sustancia para disolverse en otra. Más específicamente, la solubilidad es la cantidad (generalmente en moles) de un soluto en fase sólida, que se disuelve por cada unidad de volumen de la disolución que formaría con el disolvente al llegar al equilibrio.

Cuando la solubilidad se expresa en moles por litro, se denomina “solubilidad molar” y se representa por S_b . Cuando una disolución llega al límite de soluto disuelto, es decir, si se añade una cantidad más esta precipitaría, se dice que la disolución está “saturada”, y es en ese punto donde se establece el equilibrio de solubilidad.

Para un soluto A, disuelto en un disolvente B, el equilibrio de solubilidad estaría representado por:

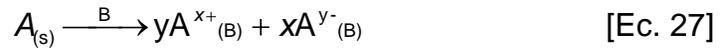


donde $A_{(s)}$ representa al soluto A en fase sólida y $A_{(B)}$ cuando se encuentra disuelto en B. Cuando el disolvente es agua, la notación para el estado disuelto es $A_{(ac)}$, y se dice que está en “fase acuosa”. A partir de esto la solubilidad molar de A en B estaría dada por:

$$S_b = [A_{(B)}] \quad [\text{Ec. 26}]$$

También es necesario tomar en cuenta, que muchos solutos además de disolverse también se disocian, en el caso de ser compuestos iónicos, ya que la solvatación ocasiona una separación de los aniones y cationes. Pero como bien se sabe, cuando dos iones se encuentran unidos en un compuesto iónico (generalmente una sal), sus cargas deben estar equilibradas, entonces si el anión posee dos cargas negativas y el catión solamente una, la unidad molecular estaría formada un anión y por dos cationes para mantener la neutralidad eléctrica.

Esto se cumple con cualquier combinación, y se deduce entonces que los coeficientes estequiométricos de las especies disociadas se relacionan con el número de cargas. Entonces, para el soluto A en el caso de ser un compuesto iónico, su equilibrio de solubilidad está dado por:



donde A^{x+} representa un catión y A^{y-} a un anión, siendo x e y el número de cargas respectivas que dan valor a los coeficientes estequiométricos, de tal manera que ambas especies permanecen disueltas y solvatadas. Para este caso, la solubilidad molar de A en B estaría dada por

$$Sb = \frac{[A_{(B)}^{x+}]^y}{y} = \frac{[A_{(B)}^{y-}]^x}{x} \quad [\text{Ec. 28}]$$

Ahora bien, el equilibrio de solubilidad, posee una constante de equilibrio que, según la ley de acción de masas y para el segundo caso, estaría dada por:

$$K = \frac{[A_{(B)}^{x+}]^x [A_{(B)}^{y-}]^y}{[A_{(s)}]} \quad [\text{Ec. 29}]$$

Sin embargo se hace poco práctico el uso de la constante de equilibrio con esta expresión, debido a que la concentración de $A_{(s)}$ se puede considerar constante, además que por ser un sólido, está separado del resto de la solución, por tanto la variable de concentración perdería su sentido. Es por esto que se introduce el concepto de “producto de solubilidad” o K_{ps} , que está dada por:

$$K_{ps} = K \cdot [A_{(s)}] = [A_{(B)}^{x+}]^x [A_{(B)}^{y-}]^y \quad [\text{Ec. 30}]$$

En el caso de un soluto que no se disocia, esto sería:

$$K_{ps} = K \cdot [A_{(s)}] = [A_{(B)}] = Sb \quad [\text{Ec. 31}]$$

lo que hace muy simple el cálculo, pero regresando a los solutos iónicos, la determinación de la solubilidad a partir del K_{ps} es más compleja. Si se sustituye la ecuación 28 en la 31 se obtiene que:

$$K_{ps} = y \cdot Sb^x \cdot x \cdot Sb^y = (x)(y)Sb^{x+y} \quad [\text{Ec. 32}]$$

al despejar se obtiene la expresión:

$$Sb = \left(\frac{K_{ps}}{(x)(y)} \right)^{\frac{1}{x+y}} \quad [\text{Ec. 33}]$$

Efecto del pH sobre la solubilidad: como bien se sabe, el pH o potencial de hidronios está definido como el logaritmo del inverso de la concentración de iones hidronios en una disolución, dado por:

$$\text{pH} = \log\left(\frac{1}{[\text{H}^+]}\right) = -\log([\text{H}^+]) \quad [\text{Ec. 34}]$$

Existen sustancias que cuando se encuentran en disolución acuosa dependen de la concentración de iones hidronios en el agua, y por consiguiente también de la concentración de iones oxidrilo (OH^-). Por tanto si se modifica la concentración de estos, que implica la modificación del pH, esto puede afectar la solubilidad.

Como bien se sabe, el agua en estado neutro, posee una concentración específica de iones H^+ y OH^- , que se relaciona con el “producto iónico del agua”:

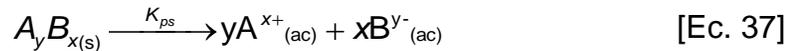
$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = (1,0 \cdot 10^{-7})^2 = 1,0 \cdot 10^{-14} \quad [\text{Ec. 35}]$$

cuando se aplican logaritmos negativos a esta expresión, se obtiene:

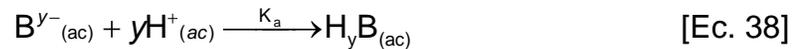
$$\text{p}K_w = \text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad [\text{Ec. 36}]$$

lo cual se cumple para cualquier combinación de concentraciones en el agua.

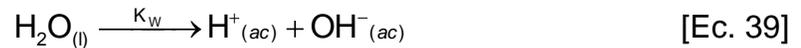
Existen dos maneras en las cuales la concentración de estos iones puede afectar la solubilidad de una sal, la primera se refiere a si el componente posee H^+ u OH^- en su composición iónica, la otra manera es cuando uno de los iones es un electrolito débil, y tiende a atraer H^+ u OH^- del agua. En ambos casos, la presencia del soluto ocasiona una modificación del pH neutro del agua, y por consiguiente, modificaciones del pH producirá cambios en la solubilidad. Además es una opción muy factible para determinar la solubilidad de estas especies a través del pH al equilibrio. Así por ejemplo, para el soluto $AB_{(s)}$ que se disuelve según el equilibrio:



supóngase que el anión $B_{(s)}^{y-}$ es un electrolito débil, y establece un equilibrio de hidrólisis como el siguiente:



Luego por supuesto, está el equilibrio iónico del agua:



las tres constantes de equilibrio estarían expresadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} K_{ps} &= [A^{x+}]^y [B^{y-}]^x \\ K_a &= \frac{[B^{y-}][H^+]^y}{[H_y B]} \\ K_w &= [H^+][OH^-] \end{aligned} \quad [\text{Ec. 40}]$$

como una porción de B^{y-} se hidroliza, la solubilidad estaría dada por:

$$Sb = \frac{[B^{y-}] + [H_y B]}{x} = \frac{[A^{x+}]}{y}$$

despejando de los dos equilibrios respectivos y usando la expresión de solubilidad se tiene que:

$$[B^{y-}] = \left(\frac{K_{ps}}{[A^{x+}]^y} \right)^{\frac{1}{x}} = \left(\frac{K_{ps}}{(S/y)^y} \right)^{\frac{1}{x}}$$

$$[H_yB] = \frac{[B^{y-}][H^+]^y}{K_a} = \left(\frac{K_{ps}}{(S/y)^y} \right)^{\frac{1}{x}} \left(\frac{[H^+]^y}{K_a} \right)$$

al sustituir esto en la expresión de solubilidad se tiene:

$$Sb = \frac{1}{x} \left[\left(\frac{K_{ps}}{(S/y)^y} \right)^{\frac{1}{x}} + \left(\frac{K_{ps}}{(S/y)^y} \right)^{\frac{1}{x}} \left(\frac{[H^+]^y}{K_a} \right) \right]$$

$$Sb = \frac{1}{x} \left(\frac{K_{ps}}{(S/y)^y} \right)^{\frac{1}{x}} \left(1 + \frac{[H^+]^y}{K_a} \right)$$

Despejando la solubilidad se tiene:

$$Sb = \left[\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \left(K_{ps}^{\frac{1}{x}} \right) \left(1 + \frac{[H^+]^y}{K_a} \right) \right]^{\frac{1}{1+\frac{y}{x}}}$$

$$Sb = \left[\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \left(\frac{K_{ps}^{\frac{1}{x}}}{K_a} \right) [H^+]^y + \frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \left(K_{ps}^{\frac{1}{x}} \right) \right]^{\frac{1}{1+\frac{y}{x}}}$$

si se aplican logaritmos negativos a la expresión, resulta:

$$pSb = \frac{1}{1+\frac{y}{x}} \left[-\log \left(\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \right) + \frac{1}{x} pK_{ps} - pK_a + y \cdot pH - \log \left(\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \right) + \frac{1}{x} pK_{ps} \right]$$

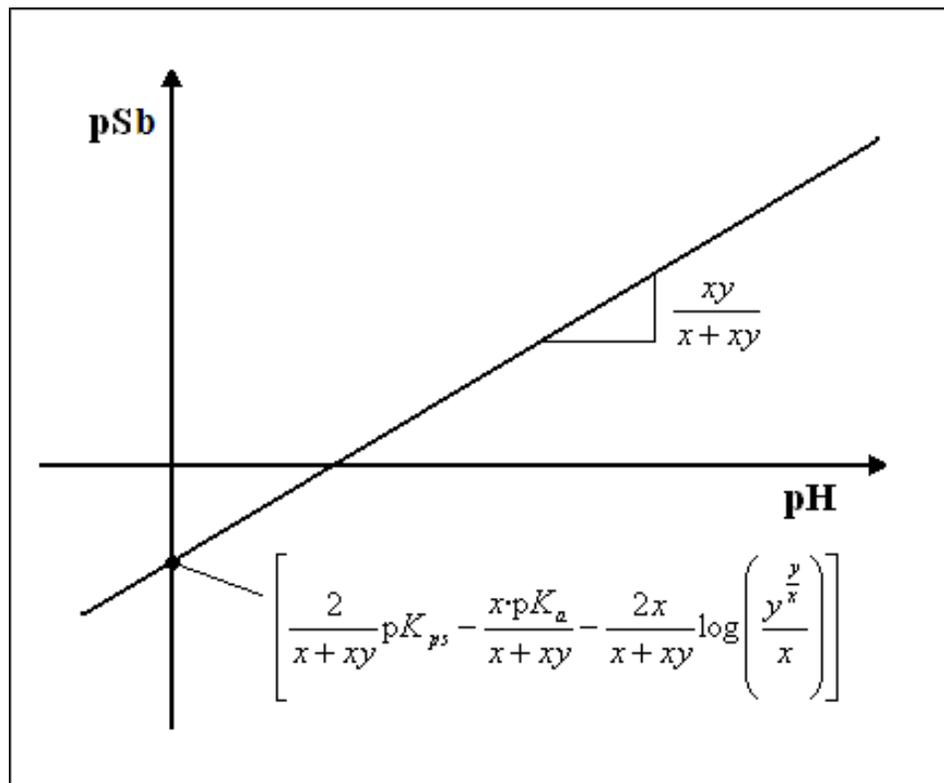
reduciendo y ordenando, se tiene:

$$pSb = \frac{1}{1+\frac{y}{x}} \left[\frac{2}{x} pK_{ps} - 2 \cdot \log \left(\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \right) - pK_a + y \cdot pH \right]$$

$$pSb = \frac{xy}{x + xy} pH + \left[\frac{2}{x + xy} pK_{ps} - \frac{x \cdot pK_a}{x + xy} - \frac{2x}{x + xy} \log \left(\frac{y^{\frac{y}{x}}}{x} \right) \right] \quad [\text{Ec. 41}]$$

Ya que K_a y K_{ps} son constantes, es posible construir un modelo lineal, donde la variable independiente. Para este caso, el modelo sería como el de la figura 9.

Figura 9. **Relación de la solubilidad con el pH para un soluto con anión débil**



Fuente: elaboración propia.

Efecto de la temperatura sobre la solubilidad: del mismo modo que con el pH, la modificación de la temperatura puede tener efectos sobre la solubilidad. Cuando la temperatura aumenta, la energía cinética de las partículas aumenta también, tanto en el sólido como en la disolución, pues las partículas del sólido comienzan a vibrar a mayor frecuencia, lo que permite el escape de un mayor número de estas hacia el fluido, en el cual hay una mayor cantidad de energía cinética que puede absorber para tomar una posición y mantenerla convirtiéndola en energía potencial.

Cuando este excedente de energía cinética finalmente se agota, la disolución nuevamente se encuentra saturada, y no hay cabida para más partículas. En caso contrario, si la temperatura disminuye, la energía cinética de las partículas del sistema disminuye, y aumenta su energía potencial, lo cual causa en la disolución, que exista mayor repulsión, y en el sólido exista menor vibración, lo cual hace que las partículas puedan retornar a su sitio dentro de la estructura cristalina. De este modo el equilibrio se mantiene, siguiendo este comportamiento en la mayoría de los casos, pues debe tomarse en cuenta que existen excepciones a esta regla.

2.6. Fenómenos de transferencia de masa

El estudio cinético de la fisicoquímica no se restringe solo a las reacciones químicas, sino, como se dijo anteriormente, a todo fenómeno que se realiza fuera del estado de equilibrio. Además, en todo sistema donde se encuentran dos o más fases diferentes en interacción, es casi seguro que existirá transferencia de masa, como es el caso del fraguado del cemento.

Se define como transferencia de masa a todo proceso donde un componente selectivo pasa de un punto a otro en un sistema, tal que ambos puntos poseen niveles o distribuciones energéticas diferentes. Estos puntos pueden estar en fases diferentes, o simplemente poseer una cualidad que los diferencie entre sí, como la temperatura, la concentración, presión, etc.

En resumen, y tomando en cuenta las variables termodinámicas asociadas, los dos puntos implicados presentan entre sí una diferencia un diferencial de potencial químico para el soluto migrante. Es decir, que las partículas de soluto migrante tienden, naturalmente, a nivelar la energía útil entre el origen y el destino para sí mismas.

Los fenómenos de transferencia de masa se diferencian de las reacciones químicas, en el hecho de que en estos, no se requiere de una transformación íntima de la materia para alcanzar el equilibrio del sistema, simplemente se modifica su estructura, lo que generalmente está asociado con la migración de materia.

La transferencia de masa, puede realizarse a través de dos mecanismos: la difusión y la convección, los cuales se presentan según las condiciones del sistema.

2.6.1. Difusión

La difusión se define como “el movimiento de las moléculas individuales a través de una sustancia debido a su energía térmica”²³.

²³ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 23.

El principal estímulo físico que produce difusión es una diferencia de concentraciones del componente que se difunde, lo cual provoca el movimiento necesario para que la concentración sea la misma en ambos puntos. Si dicho gradiente se mantiene constante, la difusión nunca llega a su fin, ya que el equilibrio jamás se alcanza. La forma más sencilla de identificar la difusión, es que las partículas migrantes poseen un movimiento generalmente lento, y se presentan como unidades, casi nunca como aglomerados o racimos.

Del mismo modo como se existe una velocidad de reacción, así también existe una velocidad de difusión, que se presenta en muchas formas, según como se deba describir. En primer lugar existe una velocidad lineal, que representa la distancia promedio recorrida por las partículas migrantes en una unidad de tiempo que se representa como u_A . Además debe tomarse en cuenta la densidad de flujo molar, que representa los moles por unidad de área y unidad de tiempo que se transfieren en un plano estacionario, esta se representa por N .

La velocidad volumétrica, que es el volumen transferido por unidad de tiempo, al multiplicarse por la densidad molar de la mezcla, de cómo resultado la densidad de flujo molar N .

$$N = \rho_M \cdot u_0 \quad [\text{Ec. 42}]$$

donde u_0 representa la velocidad total del sistema. Para un componente individual la densidad de flujo está dada por:

$$N_A = C_A \cdot u_A \quad [\text{Ec. 43}]$$

Si se desea expresar la velocidad relativa con que fluyen las partículas de este componente, es decir, tomando en cuenta el movimiento que tiene el medio de transferencia, se utiliza el término J_A , dado por:

$$\begin{aligned}
 J_A &= N_A - C_A \cdot u_0 \\
 J_A &= C_A \cdot u_A - C_A \cdot u_0 \\
 J_A &= C_A(u_A - u_0)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 44}$$

Por principio físico, se deduce que la densidad de flujo J_A es proporcional al diferencial de concentración dC , ya que es este el que impulsa el proceso de transferencia, además se sabe que es inversamente proporcional al gradiente de distancia db , ya que si el camino es más corto, la cantidad de partículas transferidas por unidad de tiempo crecerá. A partir de esto, e introduciendo la constante de proporcionalidad, D (difusividad), se construye la expresión siguiente:

$$J_A = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{db}
 \tag{Ec. 45}$$

“La difusividad, o coeficiente de difusión, D_{AB} de un componente A en solución en B, que es una medida de la movilidad de difusión²⁴, encuentra su definición en la ecuación 45. A partir de diferentes deducciones, se llega a la conclusión, que $D_{AB} = D_{BA}$, para casi todos los casos, debido a que las interacciones son casi idénticas en cada caso. Si se desea encontrar la densidad de flujo absoluta de las partículas, se combinan las ecuaciones 44 y 45, obteniéndose una expresión general:

$$N_A = C_A \cdot u_0 - D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{db}
 \tag{Ec. 46}$$

En esta última ecuación se toma en cuenta tanto la cantidad de soluto transportado por difusión, así como la que se transporta a raíz del flujo neto del medio.

²⁴ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 25.

El mecanismo de la difusión, posee diferentes variantes, que dependen casi siempre de las fases implicadas en el proceso, así en los gases, se observa una difusión equimolar, en la cual el flujo de los componentes es exactamente el mismo, pero en sentido contrario. Cuando se habla de líquidos, entra en juego el movimiento caótico de las partículas, tomando en cuenta que la distancia entre ellas es mucho menos que en los gases.

2.6.2. Transferencia de masa por convección

En la ecuación 19 ya se observa uno de los factores que afectan el flujo de partículas asociado a la convección, esto es, el flujo total del sistema, pero existen otros elementos que lo definen.

Cuando las fases se encuentran en un régimen turbulento, existen remolinos que, cuando se mueven, transfieren materia (además de energía). Esto sumado al flujo global, representa la convección, pero sin embargo, es un aporte casi impredecible, pero si cuantificable, lo cual se realiza usando un término análogo a la difusividad, que se denomina “difusividad turbulenta”²⁵ o “coeficiente de transferencia de masa por convección”, así se obtiene la expresión:

$$J_{A,t} = -\epsilon_N \frac{dC}{db} \quad [\text{Ec. 47}]$$

donde ϵ_N es la difusividad turbulenta y $J_{A,t}$ es la velocidad de flujo de partículas producidas solamente por los remolinos. Entonces al combinar ambos efectos se obtiene:

$$J_A = -(D_v + \epsilon_N) \frac{dC}{dx} \quad [\text{Ec. 48}]$$

donde D_v es la difusividad molecular absoluta del sistema.

²⁵ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 61.

2.6.3. Coeficiente global de transferencia de masa

Finalmente al combinar todos los efectos que hacen posible la transferencia de masa, puede obtenerse una expresión que se pueda utilizar en cualquier caso, ya sea un proceso en estado estacionario o no, donde exista una sola película o donde las fases estén dispersas. Esto se logra a través del “coeficiente global de transferencia de masa”²⁶ representado por k_c , el cual representa la velocidad de transferencia de materia por unidad de área y por unidad de diferencial de concentración o cualquier otra variable (dependiendo del caso). De esta forma, el coeficiente de masa por concentración esta dado por:

$$k_c = \frac{J_A}{C_{Ai} - C_A} \quad [\text{Ec. 49}]$$

Las dimensionales de k_c son las siguientes:

$$k_c \left[\frac{\text{mol} \cdot \text{cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mol}} \right] = \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad [\text{Ec. 50}]$$

Existen varios postulados, que explican claramente, a través de diversas consideraciones, el comportamiento aproximado de la transferencia de materia en condiciones variables. Estas teorías, permiten aproximar un cálculo válido para determinar el coeficiente de transferencia de masa.

Teoría de película: en esta teoría se considera que la resistencia a la difusión es equivalente a la de una película energéticamente estable de un espesor determinado y constante. A partir de esto se deduce que:

$$k_c \approx \frac{D_v}{B_T} \quad [\text{Ec. 51}]$$

donde B_T representa el espesor de la película hipotética.

²⁶ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 129.

Teoría de capa límite: en este caso se presenta una variante de la teoría de película, donde se considera a la capa límite como la película donde hay difusión y la máxima resistencia a la transferencia, la cual, como bien se sabe, se forma a raíz del contacto del flujo con una superficie sólida, zona en la cual el régimen es cien por ciento laminar, aunque el resto sea turbulento. Esto permite aproximar con mayor facilidad el coeficiente de transferencia de masa, pero en forma casi empírica, comprobándose que este varía respecto a la difusividad elevada a potencias entre 2/3 y 1.

Teoría de penetración: la teoría de penetración, toma en cuenta otros factores que impulsan y limitan la transferencia de masa, “considerando al proceso fuera del estado estacionario, es decir, que el sistema es capaz de renovarse y jamás llegar al equilibrio, y que lo único que hace posible la transferencia, es el tiempo limitado en el que las fases entran en contacto”²⁷. A partir de este postulado se deduce que el coeficiente de transferencia de masa puede aproximarse con la expresión:

$$k_c \approx 1.13 \sqrt{\frac{D_v}{t_T}} \quad [\text{Ec. 52}]$$

donde t_T es el tiempo total de contacto.

Teoría de renovación de superficie: esta teoría resulta ser una variante de la anterior, en la cual se asume que la transferencia de masa depende principalmente de la frecuencia con la cual las superficies en contacto se renuevan, producto del estado no estacionario del sistema, de aquí que el coeficiente se aproxima de la siguiente manera:

$$k_c \approx \sqrt{D_v \cdot A_s} \quad [\text{Ec. 53}]$$

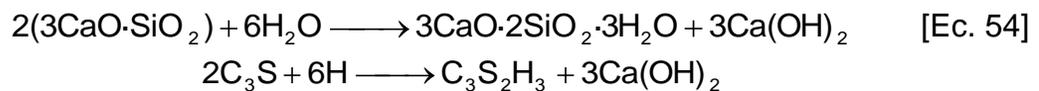
²⁷ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. p. 68.

2.7. Análisis conceptual del proceso de fraguado y curado (hidratación del cemento)

Luego de ver todos los fenómenos asociados a una reacción fisicoquímica como la que se ha venido estudiando, estos serán conectados para dar una explicación compuesta y clara del proceso que se desea estudiar en el trabajo de graduación propuesto.

Cuando los compuestos potenciales del cemento entran contacto con el agua, “forman productos de hidratación, los cuales, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura que se conoce como pasta de cemento endurecida”²⁸.

El primer compuesto potencial que se hidrata en proporción considerables es el Silicato Tricalcico (C_3S), debido a que su estructura atrae con mayor facilidad a las moléculas de agua y a que generalmente se presenta en mayor cantidad dentro de la composición del cemento convencional. Su hidratación se realiza según la ecuación (que se presenta en dos simbologías):



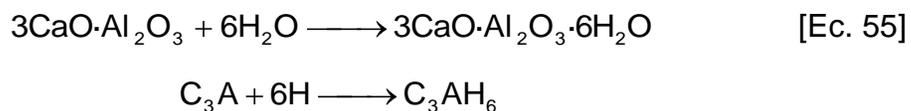
debido a su alta velocidad de hidratación, “contribuye de manera muy importante a las resistencias iniciales, siendo su velocidad de hidratación alta”²⁸. Cuando el agua entra en contacto con la superficie de las partículas no hidratadas, una porción de estas se disuelven, obteniéndose una disolución sobresaturada sobre la superficie y una red de hidratos por donde dicha disolución migra hacia los poros más grandes por capilaridad.

²⁸ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

Los hidratos que forman la red, precipitan gradualmente al ser arrastrados a una superficie o área con diferentes condiciones, dentro de los capilares, y con esto forman una superficie afín para la aglomeración de las partículas hidratadas subsecuentes. Estos hidratos pueden clasificarse según la región estructural donde se encuentren, siendo hidratos internos aquellos que presentan una estructura más densa y compacta, a pesar de tener una composición prácticamente constante.

Al precipitar, el C_3S forma “cristales poligonales bien formados”²⁹, cuyo tamaño es mayor mientras más tienden a encontrarse al exterior de la estructura y la definición de su celda es mejor mientras mayor es la cantidad de partículas de agua que entran en contacto con él. El producto de la hidratación del C_3S se conoce como tobermorita gel (CSH), y es el principal componente de la pasta de cemento, pues le confiere sus propiedades de adherencia y al secarse, es el principal responsable de la resistencia mecánica.

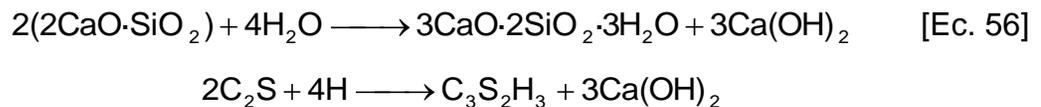
El aluminato tricálcico (C_3A) también presenta una velocidad de hidratación muy alta, siendo casi un proceso instantáneo, controlado generalmente con la adición de Sulfato de Calcio. Por tanto el C_3A compite directamente con el C_3S por las partículas de agua durante los primeros momentos del proceso, siendo estos los principales contribuyente de la resistencia inicial, proceso de hidratación de este complejo se representa generalmente con la siguiente ecuación:



²⁹ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

El producto de este subproceso, C_3AH_6 , que se conoce como trisulfoaluminato de calcio o etringita, presenta cristales alargados similares a varillas que forman una especie de enrejado, siendo el principal responsable de la expansión del cemento al ser curado.

Finalmente, el C_2S tiene la velocidad de hidratación más baja, proceso que ocurre según la ecuación:

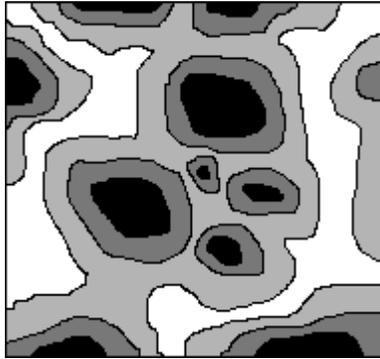


Tanto el C_3S como el C_2S producen hidróxido de calcio como subproducto (en diferente proporción), el cual dentro de la mezcla sirve como una reserva alcalina, que protege a los otros hidratos de un ataque electroquímico o solvatación por un disolvente y presenta cristales en forma de placas hexagonales de varios mm de diámetro, a diferencia de otros hidratos que son amorfos.

Como bien se sabe, el proceso de fraguado y curado del cemento es exotérmico, ya que todos los hidratos presentan una mayor estabilidad que los compuestos potenciales a partir de los que se forman, siendo el valor de entalpía de cada proceso proporcional a su respectiva velocidad de hidratación.

Con esto se deduce que el proceso de hidratación inicial se lleva a cabo en núcleos de material no hidratado, sobre los cuales se depositan los hidratos formando su estructura característica, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. **Esquema bidimensional del proceso de hidratación de las partículas de cemento en una pasta compacta a edad temprana**

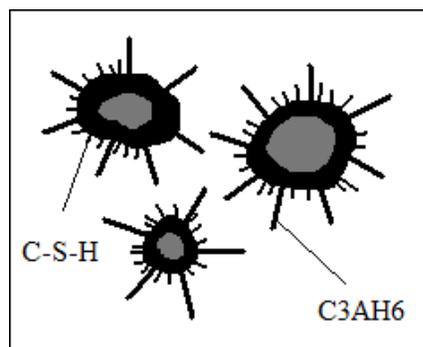


Negro: Material no hidratado; Gris oscuro: Hidratos internos; Gris claro: Hidratos externos.

Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>.

Cuando los hidratos se precipitan y crecen lo suficiente, comienzan a sobresalir de la superficie de los núcleos, asemejándose a agujas, como se observa en la figura 11.

Figura 11. **Representación sistemática del crecimiento de cristales durante el proceso de hidratación**

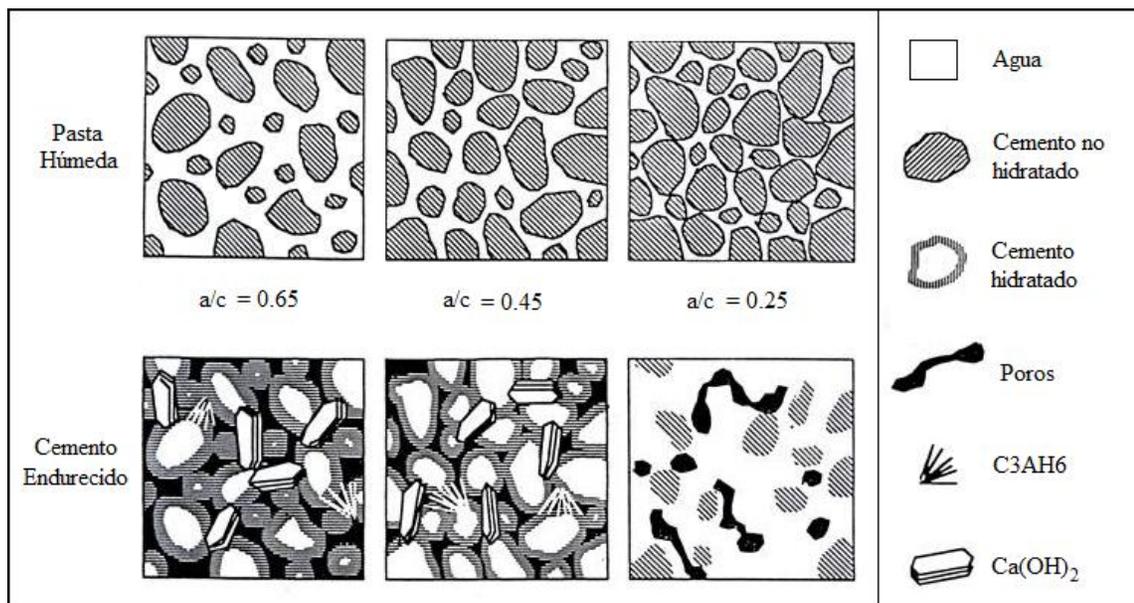


Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>.

2.7.1. Estructura y endurecimiento de la pasta de cemento

Considerando lo anterior, se puede establecer que la estructura de la pasta del cemento es “una suspensión plástica compuesta por diferentes cristales dispersos en una disolución saturada”³⁰, que le confieren diferentes propiedades mecánicas a nivel macroscópico.

Figura 12. Representación gráfica de la estructura del cemento durante el fraguado



Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>.

³⁰ <http://www.concrete.0catch.com>, capítulo II.

Esto es resultado de una compleja red de relaciones intermoleculares, en un marco compuesto por partículas sólidas y burbujas de aire ocluidas, encontrándose aquí la influencia de fuerzas intermoleculares de atracción y repulsión, que son provocadas específicamente por iones positivos y negativos en las superficies sólidas y la disolución que las rodea y por supuesto las moléculas de agua presentes en todo el sistema.

Al endurecerse, la estructura del cemento depende directamente del estado anterior, pasta húmeda, cuantificable a través de la relación de agua y sólidos con que se prepara, observándose esto en la figura 12.

Figura 13. **Pasta de cemento hidratada: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H**



Fuente: <http://www.concrete.0catch.com>.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

3.1.1. Variables de control

- Composición inicial de las muestras de cemento: establecida según la norma ASTM C109, y preparada en forma homogénea para todas las muestras y así, eliminar su efecto.
- Composición y volumen inicial del medio de curado: punto de inicio para el análisis cinético de todas las variables implicadas.
- Tiempo: se relacionó con todas las condiciones y propiedades de las muestras.
- Nivel del medio de curado (altura): permitió mantener un volumen de agua constante hacia el material de la muestra.

3.1.2. Variables de medición

- Temperatura: permitió determinar las propiedades térmicas del proceso de curado.
- Potencial ácido (pH): es parte de la composición del medio de curado: la concentración de iones hidronio.
- Esfuerzo máximo de compresión de las muestras de cemento: permitió evaluar el avance del proceso y con esto determinar su velocidad.

- Composición del medio de curado durante el proceso: esto abarca la concentración de todas las especies que pueden presentar un efecto directo o indirecto sobre la resistencia de la mezcla de cemento y aditivos, al transcurrir el tiempo, dichas especies son: iones de Calcio (Ca^{2+}), iones de magnesio (Mg^{2+}), iones de aluminio (Al^{3+}), carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-).

3.2. Delimitación del campo de estudio

3.2.1. Localización

- Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Ciudad Universitaria, zona 12. Sección de Morteros y Aglomerantes.
- Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: William Eduardo Fagiani Cruz.
- Asesor: Ing. Qco. Cesar Alfonso García Guerra
- Co-asesora: Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

3.4. Recursos materiales disponibles

Tabla IV. Instrumentos de medición

Nombre del equipo	Descripción	Marca	Modelo	Aplicaciones
Balanza analítica	Rango: 0,0 a 750,0 g Incertidumbre: 0,001 g 110 V	Radweg	WPS 750/C/1	Determinación de masa de muestras de cemento antes y después del curado y masa de sustancias sólidas para la preparación de disoluciones acuosas.
Potenciómetro	Rango: pH = -2,00 a 16,00 Incertidumbre: $\pm 0,01$ 110 V	Hanna Instruments	pH 211	Determinación del potencial ácido de los medios de curado durante el proceso.
Termómetro de Barra de Mercurio	Rango: -10°C a 110°C Incertidumbre: $\pm 0,5^\circ\text{C}$	B&C Germany	-	Control de la temperatura de los medios de curado durante el proceso.
Bureta	Rango: 0.0 a 25.0 mL Incertidumbre: $\pm 0,03$ mL	LMS Germany	-	Determinación de volumen de titulante para análisis volumétrico.
Pipeta serológica	Rango: 0.0 a 10.0 mL Incertidumbre: $\pm 0,1$ mL	Marienfeld	-	Toma de muestras de medios de curado. Medición de sustancias líquidas para preparación de disoluciones.
Vernier o Pié de Rey	Rango: Incertidumbre:	Scala	Din 862 Inox	Control del nivel de líquido en los medios de curado.

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

Tabla V. Equipo especial

Nombre del equipo	Descripción	Marca	Modelo	Aplicaciones
Mezcladora mecánica-eléctrica	Capacidad de 4,73 litros	-	-	Preparación de pasta de cemento
Maquina Universal de Ensayos de Resistencia	Capacidad máxima: 55 000 kg	Baldwin Lima-Hamilton (BLH)	Tate-Emery Testing Machine Universal	Aplicación de esfuerzo mecánico de compresión

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

Tabla VI. **Reactivos y demás sustancias químicas**

Nombre de la sustancia	Descripción	Marca	Clasificación	Aplicaciones
Cemento tipo UGC	Polvo fino de color gris	Cementos Progreso	UGC 4 000 psi	Componente de muestras
Arena Sílica (Feldespatos y derivados)	Polvo fino de color blanco con partículas oscuras	Sicasa	Feld.	Componente de muestras
Agua Desmineralizada	Agua desmineralizada por proceso de deionización	Salvavidas	Uso Industrial	Preparación de muestras Medios de Curado Preparación de disoluciones acuosas
Agua Potable	Locación: Edificio T5	-	Potable	Medios de Curado
Hidróxido de Calcio (Ca(OH) ₂)	Apariencia: Polvo fino de color blanco	J. T. Baker	Grado Analítico	Preparación de Medio de curado
Ácido Etilendiaminotetraacético (EDTA)	Polvo fino de color blanco.	J. T. Baker	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Indicador Naranja de Xilenol	Pasta de color violeta. Preparado: Polvo fino de color morado.	Merck	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Sulfato de zinc (ZnSO ₄)	Polvo fino de color blanco.	J. T. Baker	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Trietanolamina	Líquido aceitoso color amarillo.	-	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Ácido Calconcarboxílico	Polvo fino de color blanco.	-	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Cloruro de Amonio	Polvo fino de color blanco.	-	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Negro de Ericromo T (NET)	Polvo fino de color blanco.	Merck	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Fenoltaleína	Polvo fino de color blanco. Preparado: Disolución transparente.	Merck	Grado Analítico	Análisis volumétrico
Ácido Clorhídrico	Líquido transparente y amarillento.	Quimiprova	Grado Industrial	Análisis volumétrico

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

Tabla VII. **Cristalería en general**

Nombre del insumo	Descripción	Marcas	Modelo	Aplicaciones
Beacker	Capacidades: 25,0 mL, 50,0 ml, 100,0 mL, 250,0 mL, 400,0 mL, 600,0 mL y 1 000,0 mL	Kimax Pyrex Vit Lab Boeco Marienfeld	-	Contención de sustancias líquidas y mezclas. Contención de residuos.
Earlenmeyer	Capacidad: 125,0 mL y 100,0 mL	Kimax Pyrex Schott Duran	-	Titulaciones (volumetría)
Tubos de ensayo sin tapadera	Capacidad: 8 mL (aprox.)	-	-	Toma de muestras de medios de curado.
Tubos de ensayo con tapadera	Capacidad: 10 mL (aprox.)	Hach	-	Almacenamiento de muestras diluidas de medios de curado.

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

Tabla VIII. **Otros**

Nombre del insumo	Descripción	Marcas	Modelo	Aplicaciones
Molde para cubos de cemento	ASTM C109	-	-	Contenedor de especímenes para el fraguado.
Soporte Universal	Material: Hierro Altura promedio: 40,0 cm	-	-	Suspender cristalería en el aire.
Pinza para bureta	Material: Metálico	-	-	Sostener buretas en los soportes universales.
Gradilla	-	-	-	Almacenamiento de tubos de ensayo.

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

3.5. Técnica cuantitativa

La investigación se desarrolló utilizando una técnica cuantitativa debido a la naturaleza del fenómeno de interés, pues los parámetros que lo caracterizan son medibles en su mayoría por métodos convencionales. Los parámetros cualitativos adicionales sirvieron como referencia a la construcción de una interpretación y sus respectivas conclusiones, sin ser el centro de atención dentro de los resultados.

Los recursos y etapas para el diseño de la metodología se resumen a continuación:

3.5.1. Estudio preliminar

Se investigó todo lo referente a la cinética y equilibrio de reacciones en varias fases, los fenómenos de transferencia de masa asociados, y el estudio de las estructuras cristalinas en minerales y su formación, además de lo referente a ensayos y pruebas que se realizan sobre el cemento, todo esto con el fin de comprender el fenómeno a fondo y su utilidad a nivel industrial.

Con la información relevada se realizó un análisis teórico ilustrado del fenómeno, con el fin de explicarlo en forma sencilla para facilitar su comprensión. Ya obtenido el análisis, se pudieron descubrir con exactitud las variables y parámetros que debían ser tomados en cuenta, y de este modo plantear los objetivos para la fase experimental y diseñar la metodología de los ensayos a realizar, justificándola al cumplir con dichos objetivos.

3.5.2. Establecimiento de la metodología experimental

3.5.2.1. Diseño preliminar

Luego de la selección del tipo de muestra y de establecer las variables de control y de medición, fue necesario fijar ciertas condiciones y características para que el método fuera efectivo y cómodo para su realización.

Selección del tipo de muestra: las muestras de cemento para el estudio de la cinética, fueron seleccionadas según los siguientes criterios:

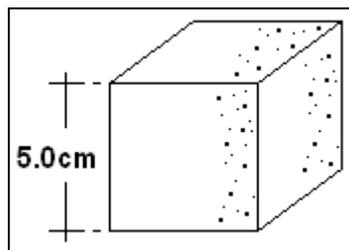
- Estándares: su forma, dimensiones y método de preparación cumple con lo estipulado por la norma ASTM C109.
- Mínimo espacio: las muestras deben ocupar el mínimo espacio posible, para la comodidad del experimentador.
- Geometría: debe tener una morfología que permita la medición de todos los parámetros (resistencia a la compresión, volumen, área superficial, etc.), introduciendo el mínimo error posible.

Seleccionando la norma ASTM C109/C109M-05, se estableció que las muestras de ensayo se conforman con la proporción de cemento y arena estándar para todo ensayo de este tipo y con una forma cúbica de 2 in o 5 cm de arista.

La arena que se utilizó se clasifica como estándar, y debía asegurarse un carácter inocuo, es decir, que no existiera la posibilidad de reacción adversa con las partículas del cemento (según ASTM C-289-87).

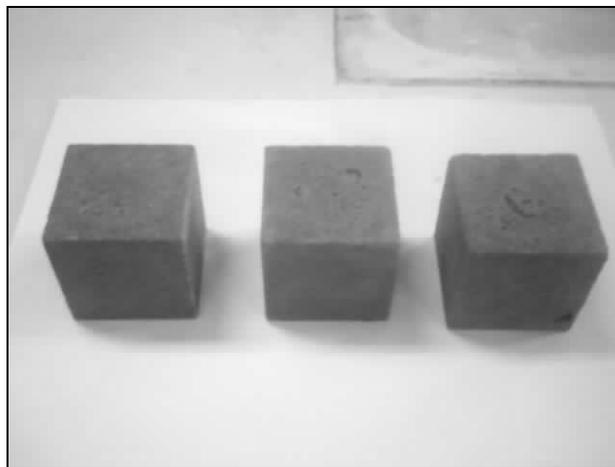
Se utilizó cemento de manufactura reciente, lo que ayudó a producir una pasta trabajable, es decir, su tiempo de fraguado y curado fue máximo, con el fin de asegurar la sensibilidad del método, pues en mayores períodos de tiempo es posible detectar cambios más pequeños en la resistencia a la compresión y otras anomalías.

Figura 14. **Dimensión del tipo de muestra seleccionado**



Fuente: elaboración propia (ASTM International-ASTM C109/C109M-05, 2005.)

Figura 15. **Fotografía del tipo de muestra seleccionado**



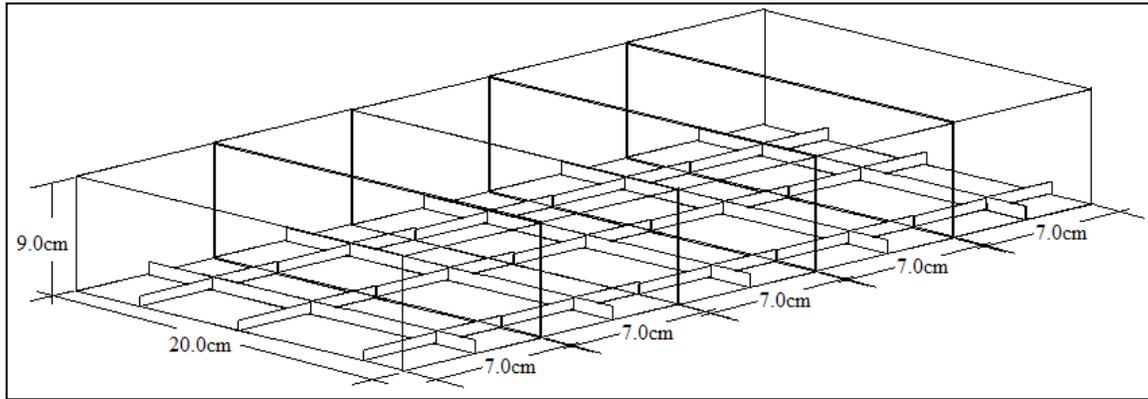
Fuente: elaboración propia (tomada en laboratorio de fisicoquímica, edificio T5, USAC)

Recipientes para monitoreo del curado de pasta de cemento: las muestras de pasta de cemento junto con el medio de curado, debían contenerse en recipientes especializados con las siguientes características:

- Aislamiento: mantener las muestras aisladas entre sí según el tiempo que les corresponde antes de su ensayo de resistencia, es decir, las tres muestras que se ensayarán a las 24 horas no deben tener contacto con las muestras para 7 días, y así sucesivamente, además el aislamiento debía tomar en cuenta el tipo de medio, es decir las diferentes composiciones del agua.
- Medición de nivel: debía ser posible la observación de las muestras y la medición del nivel del agua donde están sumergidas, para inferir sobre la absorción de líquido por parte de las muestras, por tanto su superficie tenía que ser traslúcida y su morfología conformada por ángulos rectos.
- Toma de muestras: fácil toma de muestras de agua, sin interferir en el desarrollo del fenómeno.
- Contacto mínimo: las muestras debían tener un contacto mínimo con las superficies del recipiente, para facilitar la transferencia de masa en las 6 caras de cada cubo.
- Volumen mínimo: el volumen que ocupado por el medio de reacción debía ser minimizado, para una composición fácilmente medible con un método de mediana sensibilidad.

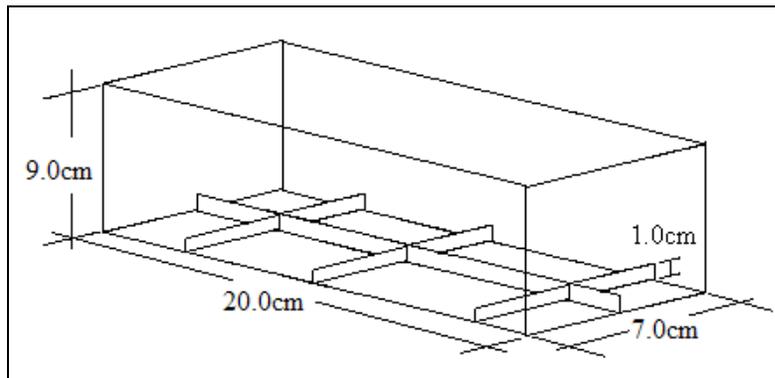
Para cumplir con estos requisitos, se diseñó un prototipo de cámara múltiple de curado, construida con vidrio plano de 3,0 mm de espesor, forma rectangular, y compartimientos para las diferentes muestras, además de aristas adicionales en el fondo para colocar sobre ellas los cubos y lograr el mínimo contacto, según como se muestra en las figuras 16, 17 y 18.

Figura 16. **Cámara de curado para pasta de cemento**



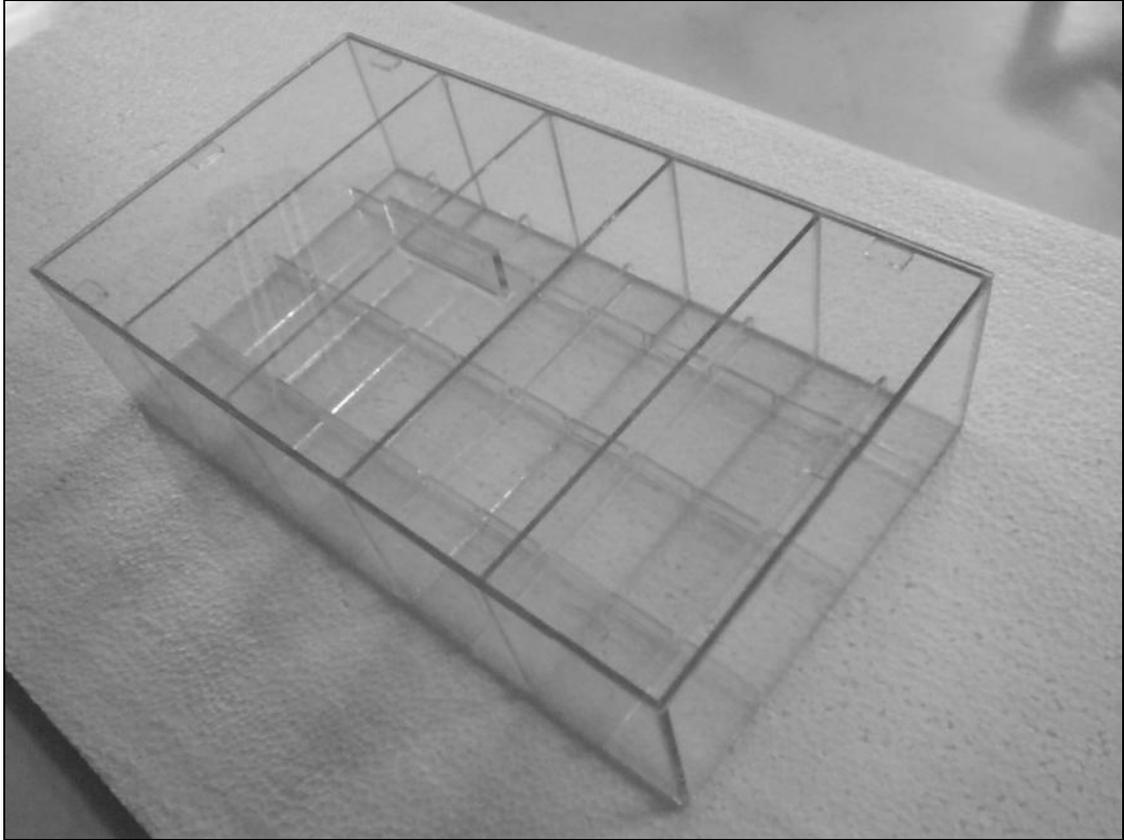
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Compartimiento para triplicado de muestras**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Fotografía de prototipo de cámara de curado para pasta de cemento**



Fuente: elaboración propia (tomada en laboratorio de fisicoquímica, edificio T5, USAC).

Los recipientes, además fueron colocados en una bandeja como baño refrigerante para proteger el vidrio de un sobrecalentamiento y posible ruptura.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

3.6.1. Selección del tipo de diseño experimental

Debido a que la investigación realizada esta basada en combinaciones de dos variables de entrada (grados de libertad) utilizando un triplicado como repetición, se utilizaron combinaciones de dos factores con repetición.

3.6.2. Preparación de medios de curado

- Agua desmineralizada (W_d): en este medio se utilizó agua desmineralizada para uso Industrial, por proceso de deionización.
- Agua potable (W_c): el agua potable fué tomada en la localización donde se realizó el ensayo: edificio T5, Universidad de San Carlos de Guatemala, campus central.
- Solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (W_s): para preparar la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se determinó la solubilidad de dicha sal, en un volumen tal que cubriera las muestras cúbicas, sobrepasando su nivel respectivo por 1cm.

3.6.2.1. Determinación del volumen de líquido en cámaras de fraguado

Utilizando relaciones geométricas se determinó el volumen de agua o disolución que debe verterse dentro de la cámara de fraguado.

Según las figuras 19 y 20 se construye la siguiente relación:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \left[V_{\text{RV}} - (3 \cdot V_{\text{MC}} + V_{\text{SV}} + V_{\text{A}}) \right] \quad [\text{Ec. 57}]$$

Donde:

V_{H_2O} : volumen total de agua o disolución (cm^3)

V_{RV} : volumen de la cámara de curado (cm^3)

V_{MC} : volumen de la muestra cúbica de pasta de cemento (cm^3)

V_{SV} : volumen de los soportes de vidrio (cm^3)

V_A : volumen de Aire (espacio sobre el nivel) (cm^3)

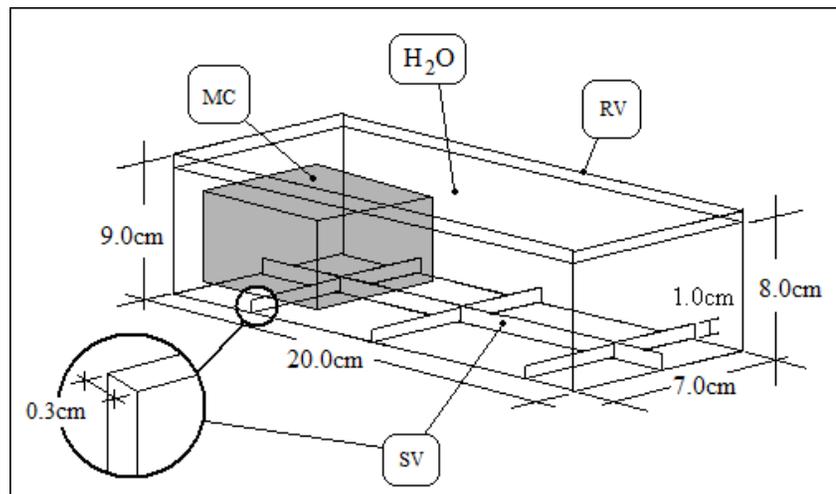
Al sustituir se obtiene:

$$V_{SV} = (0,3)(1)(20)cm^3 + 6[(3,35)(0,3)(1)cm^3] = 12,03cm^3$$

$$V_{H_2O} = 5[(20,0)(9,0)(7,0)cm^3 - 3(5,0cm)^3 + 12,03cm^3 + (20,0)(1,0)(7,0)cm^3]$$

$$V_{H_2O} = 3\,664,85cm^3$$

Figura 19. Diagrama tridimensional parcial de cámara de fraguado



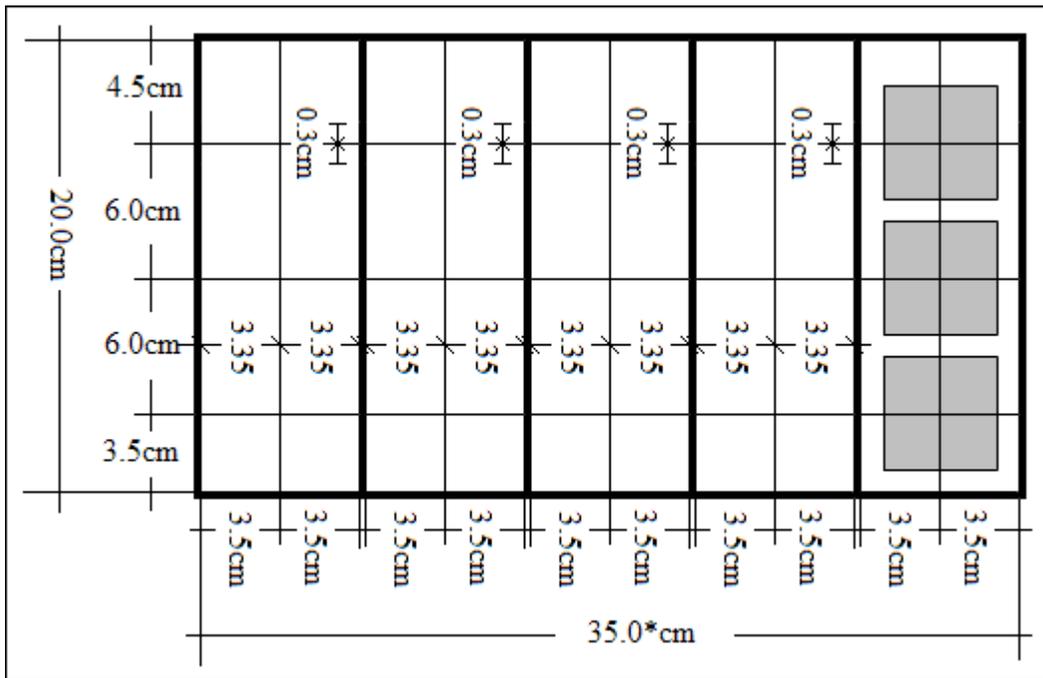
Nomenclatura: MC: muestra cúbica de pasta de cemento, RV: cámara de curado en triplicado,

SV: soporte de vidrio.

Fuente: elaboración propia.

Por tanto se vertieron aproximadamente 3,66 litros de agua o de disolución, según sea el caso, en cada cámara de curado.

Figura 20. **Diagrama bidimensional de cámara de fraguado**



Fuente: elaboración propia.

3.6.3. Procedimiento experimental

3.6.3.1. Determinación de reactividad potencial de arena (ASTM C289-87)

Preparación de la muestra:

- Se tomó una muestra de la arena de aproximadamente 1kg.

- La muestra, se tamizó durante 15,0 o 20,0 min hasta lograr un tamaño de partícula tal, que sea retenido en un tamiz de 150 micrones (No. 100) y que pase por uno de 300 micrones (No.50) (según ASTM C289-87).
- A continuación la arena fue lavada repetidas veces con agua, para eliminar el exceso de impurezas.
- Luego, se dejó secar en un horno a 100°C durante 24 horas para eliminar la humedad.
- Luego se pesaron 4 muestras de arena de 25 g y se depositaron en los depósitos especiales (reactores) adicionando 25 mL de hidróxido de sodio 1,0 N, los cuales se introdujeron en un horno a aproximadamente 90 °C durante 24 horas (según ASTM C-289-87).
- Al sacarse del horno, las muestras se dejaron enfriar, y se tomaron alícuotas de 10 mL de la disolución resultante, las cuales se diluyeron a 200 mL.

Reducción alcalina (mmol/dm³):

- Se tomaron alícuotas de 20 mL de la disolución resultante y se titularon con una solución estándar de ácido clorhídrico (0,05 M), luego se anotó el volumen desplazado en la bureta, el cual indica la concentración resultante de iones hidroxilo.

Determinación de sílice disuelta por método gravimétrico (mmol/dm³):

- Se tomaron 100 mL de la disolución resultante y se llevaron a sequedad agregándole ácido clorhídrico concentrado, luego se restituyeron con 50 mL de agua caliente.

- La disolución fue filtrada y con el remanente se repitió el inciso anterior pero agregando una solución de ácido clorhídrico 1-1V/V. La sílice insoluble, se depositó en la superficie del papel filtro.
- Luego se tararon 4 crisoles de platino (previamente secados), y se colocaron los trozos de papel filtro con la sílice insoluble en cada uno y se colocaron en una mufla para calcinarlos a 950°C por 3 horas.
- Luego de calcinar las muestras, se adicionaron a cada una 5 mL de Fluoruro de Hidrógeno (HF) y se dejaron reaccionar durante 2 horas, hasta la evaporación total.
- Los crisoles con la muestra final, fueron pesados y se determinó la masa resultante.

Criterios numéricos para determinar la reactividad potencial:

- Se calculó la concentración de álcali (reducción alcalina):

$$R_C = \left(\frac{20 \cdot N_{dt}}{V_1} \right) (V_3 - V_2) \cdot 1000 \quad [\text{Ec. 58}]$$

Donde:

M_{Alc} : concentración de álcali (mmol/ml)

N_{dt} : normalidad de disolución titulante

V_1 : volumen de muestra (10,0 ml)

V_2 : volumen de disolución gastado (ml)

V_3 : volumen de disolución gastado al titular blanco (ml)

- Cálculo de concentración de sílice (sílice disuelta)

$$S_C = 3330 \cdot m_R \quad [\text{Ec. 59}]$$

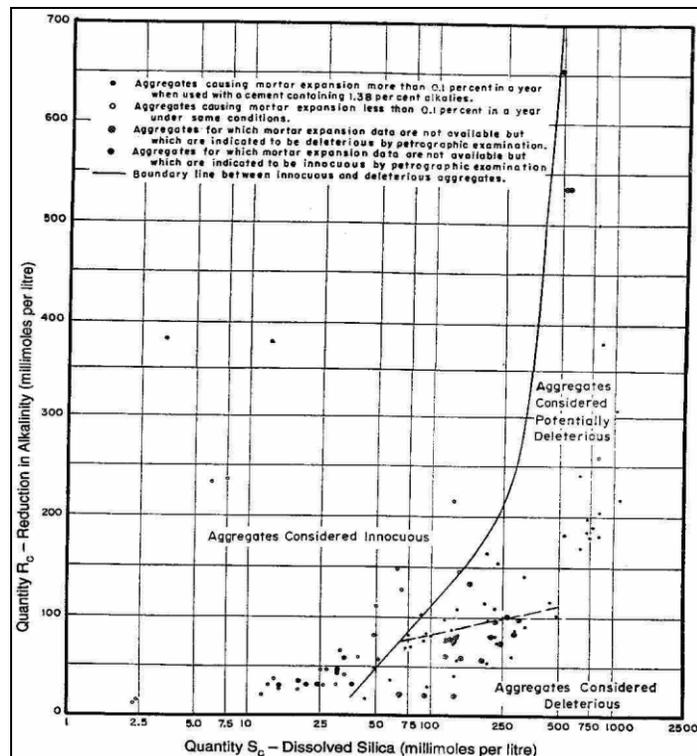
Donde:

S_C : concentración de sílice (mmol/ml)

m_R : masa resultante de la calcinación (g) menos la tara.

- Finalmente se aplicó el criterio de discriminación de muestras de arena: en la figura 21 se muestra una curva de referencia, a la derecha y debajo de ella se encuentran las coordenadas para una arena o agregado potencial o totalmente deletéreo y a la izquierda y arriba para una arena o agregado inocuo, las coordenadas indican su identidad.

Figura 21. **Criterio gráfico de discriminación de agregados**

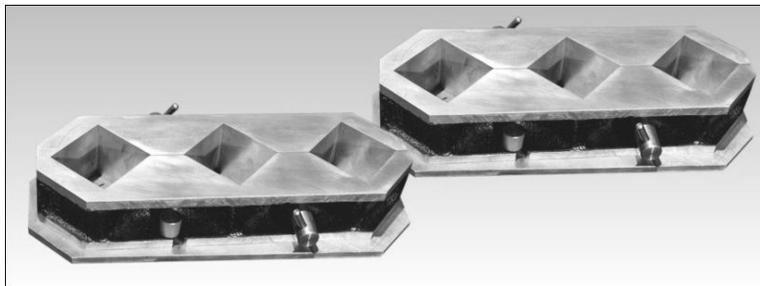


Fuente: ASTM International-ASTM C289-87, 1987.

3.6.3.2. Preparación de muestras de cemento (ASTM C109)

- Un día antes de la preparación, se armaron (apretando los tornillos) y aceitaron los moldes para darles forma a las muestras (véase figura 22).

Figura 22. **Moldes estándar**

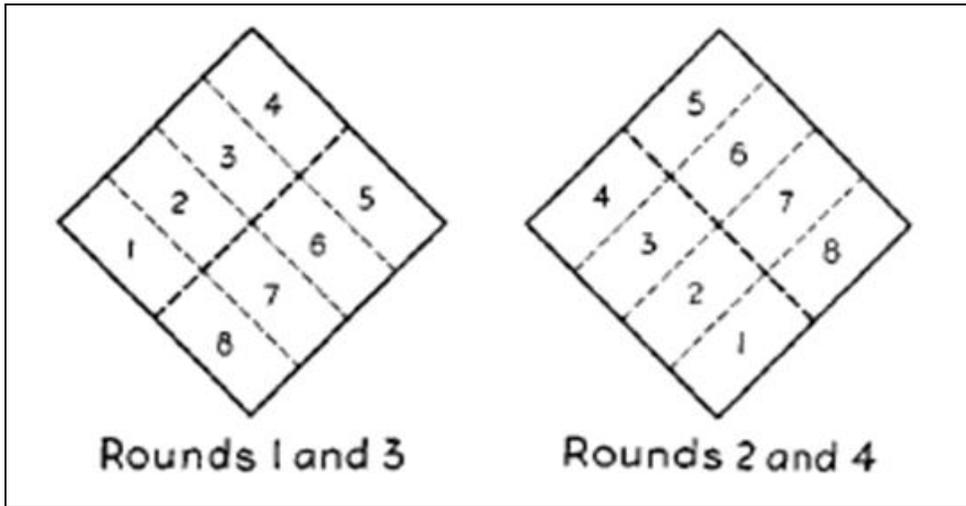


Fuente: ASTM International-ASTM C109/C109M-05, 2005.

- Se midió la masa del cemento, la arena y el agua, según la siguiente proporción: 3 700,0 g de cemento, 10 312,5 g de arena y 1 815,0 mL de agua, para una relación agua/cemento de 0,49.
- Se colocó el cemento en el mezclador, luego se adicionó la mitad del agua y se agitó durante 30 segundos a velocidad baja (140 ± 5 r/min.) hasta lograr homogeneidad.
- Luego de 30 segundos se vertió la arena graduada en un lapso de 30 segundos y se continuó la agitación mientras se adicionaba el resto de agua.
- Pasados los 30 segundos que se vertió la arena se detuvo la agitación y se cambió a velocidad media (285 ± 10 r/min.), para continuar agitando otros 30 segundos.

- Pasados los 30 segundos, por 1 minuto con 30 segundos y durante los primeros 15 segundos se removió el material que estaba en la parte superior del tazón y se colocó en la parte baja del mismo.
- Al cumplirse el 1 minuto y 30 segundos, se procedió a encender nuevamente la mezcladora y mezclar por 1 minuto a velocidad media (285 ± 10 r/min.).
- Luego de esto se procedió a llenar los moldes con la mezcla resultante.
- Se colocó una capa de la pasta de cerca de 1 pulgada (aproximadamente a la mitad del cubo) en todos los compartimientos del molde. Se apisonó el mortero en cada cubo del molde 32 veces en aproximadamente 10 segundos, cada lado tiene 4 acomodamientos, los cuales son perpendiculares a las caras de los cubos y estos deben de consistir en ocho movimientos y así cumplir con los 32 acomodamientos (ver figura 23). Luego de terminado el primer cubo se pasó al segundo y se repitió el proceso, hasta terminar con el tercer cubo repitiendo el proceso, cuando el apisonamiento de la primera capa en todos los cubos terminó, se llenaron los compartimientos con el mortero restante y entonces se aplicó nuevamente el proceso de apisonado como el de la primera capa. Finalizando el apisonado de la segunda capa se procedió a llenar bien el cubo con el material excedente y con una espátula se raza a manera que esta cara del cubo quedó completamente plana.
- Pasadas 24 horas después de su colocación en los moldes se procedió a retirar los moldes de la cámara de curado y a desencofrar los especímenes de los moldes.

Figura 23. **Forma de acomodamientos en proceso de llenado de moldes**



Fuente: ASTM International-ASTM C109/C109M-05, 2005.

3.6.3.3. Monitoreo de variables

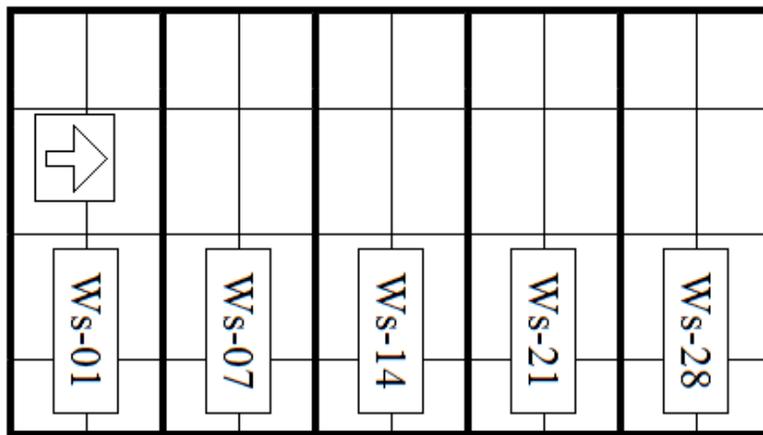
Tabla IX. Diseño experimental de ensayos de monitoreo

t (días)	t (h)	pH	Nivel	Temperatura	Toma de muestras del medio de curado	Pruebas de resistencia
0	0	x	x	x	x	
1	24	x	x	x	x	x
2	48	x	x	x		
3	72	x	x	x		
4	96	x	x	x	x	
5	120	x	x	x		
6	144	x	x	x		
7	168	x	x	x	x	x
8	192	x	x	x		
9	216	x	x	x		
10	240	x	x	x	x	
11	264	x	x	x		
12	288	x	x	x		
13	312	x	x	x		
14	336	x	x	x	x	x
15	360	x	x	x		
16	384	x	x	x		
17	408	x	x	x	x	
18	432	x	x	x		
19	456	x	x	x		
20	480	x	x	x		
21	504	x	x	x	x	x
22	528	x	x	x		
23	552	x	x	x		
24	576	x	x	x	x	
25	600	x	x	x		
26	624	x	x	x		
27	648	x	x	x		
28	672	x	x	x	x	x

Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

- Cuando las muestras de cemento fueron desmoldadas, se introdujeron a las cámaras de fraguado, anotando para cada una, la cantidad de días que permanecerían dentro, y la clasificación del medio de reacción, de la siguiente manera:

Figura 24. **Identificación de compartimientos en cámara de curado**



Fuente: elaboración propia (diseño experimental).

- El nivel del agua inicial se fijó a 1 cm por debajo del borde del recipiente, a partir del cual se midió a través del tiempo.
- Los parámetros de control para el medio de curado son los siguientes: pH, nivel, temperatura, y composición química. El parámetro de control para el cemento fue únicamente la resistencia a la compresión.
- Al iniciar el proceso, se tomaron los parámetros tanto antes como después de sumergir las muestras, durante todo el período de tiempo establecido por la norma ASTM C109.

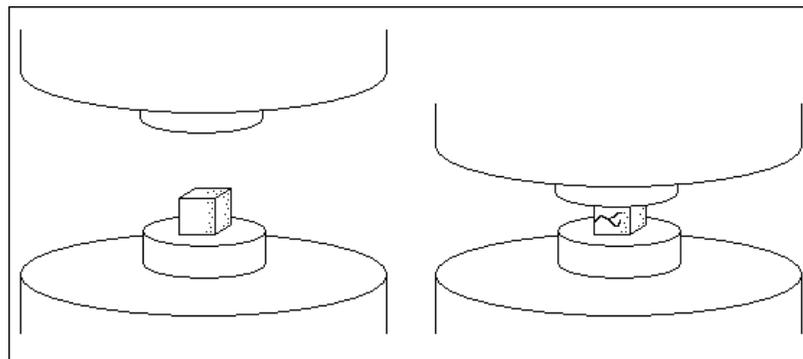
- A las 24 horas del fraguado, se tomó el primer monitoreo completo, midiendo pH, nivel, temperatura y composición química, y además sometiendo las primeras muestras a la compresión.
- Para la determinación de la composición química, se tomaron muestras de 8mL del fluido para someterlas a su respectivo análisis cuantitativo. Dicho volumen fue sustituido por fluido de composición similar, que para términos prácticos tiene la composición de inicio.
- El procedimiento de monitoreo fue repetido sistemáticamente según la tabla IX.

Nota: para las pruebas de resistencia y la determinación de la composición química se establecen los siguientes procedimientos:

3.6.3.4. Pruebas de resistencia (objetivo específico No. 1)

- Se extrajeron las muestras de cemento de los recipiente de monitoreo, y se colocaron sobre papel absorbente durante 2 horas aproximadamente.
- Se preparó el equipo de ensayo (máquina universal), y se ajustó la escala.

Figura 25. Diagrama máquina universal



Fuente: elaboración propia.

- Se colocó cada cubo de cemento en el punto central de impacto con la cara labrada hacia el frente, y se aplicó esfuerzo hasta su ruptura, anotando la fuerza aplicada en ese momento.

Nota: se repitieron los pasos 1 al 3 con los 8 cubos restantes de cada corrida.

3.6.3.5. Determinación de la composición del medio de curado (objetivo específico No. 2)

- Se tomaron muestras de 8,0 mL del fluido del medio, las cuales se sustituyeron por volúmenes iguales con una composición similar.
- Los 8 mL se aforaron a 100 mL con agua desmineralizada.
- Se tomaron 5 alícuotas de 20 mL, para realizar los siguientes ensayos:

Determinación de concentración de Aluminio (Al^{3+}):

- Una muestra de 20 mL de agua se mezcló con 5mL de solución 0,05 M de EDTA, hirviéndola brevemente.
- Después de enfriar se adicionó acetato de sodio para ajustar el pH a 5.
- Después 10 mg de trituración de Naranja de Xilenol fueron añadidos.
- Se titularon 3 muestras de 5,0 mL con solución 0,05 M de sulfato de zinc, hasta el viraje de amarillo a rojo.
- Finalmente se anotó el volumen de sulfato de zinc utilizado.

Determinación de concentración de Calcio (Ca^{2+}):

- Una muestra de 20 mL de agua se mezcló con 2,0 mL de trietanolamina.
- Se le añadieron 0,5 g de hidróxido de potasio.

- Luego 10 mg de trituración de ácido calconcarboxílico indicador mixto fueron adicionados.
- Después se titularon 3 muestras de 5,0 mL con solución de EDTA 0,05 M hasta el viraje de rojo a verde con agitación constante.
- Finalmente se anotó el volumen de EDTA utilizado.

Determinación de concentración de Magnesio (Mg^{2+}):

- Se añadió 1,0 mL de solución buffer amoniacal/cloruro de amonio 0,1 M a otra muestra de 20 mL.
- Luego 2 mL de trietanolamina.
- Después 10 mg de tampón indicador NET (Negro de ericromo T) lo cual ajustó el pH entre 10 y 11.
- Se titularon 3 muestras de 5,0 mL con solución de EDTA 0,05M hasta el viraje de rojo a verde.
- La cantidad de Mg^{2+} se dedujo por diferencia de la determinación de calcio.

Determinación de concentración de Carbonatos (CO_3^{2-}):

- Fueron añadidas entre 2 y 3 gotas de indicador fenolftaleína a otra muestra de 20 mL de agua.
- Se titularon 3 muestras de 5,0 mL con solución de HCl 0,05 M hasta el viraje de violeta a incoloro.
- Se anotó la cantidad de disolución de HCl utilizada.

Determinación de concentración de Bicarbonatos (HCO_3^-):

- Fueron añadidas entre 2 y 3 gotas de indicador naranja de metilo a la última muestra de 20 mL de agua.
- Se titularon 3 muestras de 5,0 mL con solución de 0,05 M hasta el viraje de amarillo a rojo.
- Se anotó la cantidad de disolución de HCl utilizada.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos obtenidos se analizaron gráficamente, con el fin de concluir sobre el comportamiento mostrado por los analitos, y de este modo cuantificarlo y plantear una posible mejora en dicho proceso dentro de los ámbitos que competen.

3.7.1. Determinación de períodos de tiempo

Para determinar la cantidad de tiempo utilizado entre cada ensayo y entre cada toma de muestras durante la experimentación con una precisión considerable, se tomaron las horas de inicio y de finalización de la actividad (véanse tablas XVII, XIX y XX), y se determinó el tiempo de la siguiente manera:

$$t = \frac{(\text{dd/mm/aaaa})_k - (\text{dd/mm/aaaa})_0}{24} + \left[\frac{[(\text{hh : mm : ss})_{I,IN} + (\text{hh : mm : ss})_{F,IN}]}{2} - (\text{hh : mm : ss})_0 \right] \quad [\text{Ec. 60}]$$

Donde:

t : tiempo (d)

$(dd/mm/aaaa)_{tN}$: fecha del ensayo, corrida o toma de muestra.

$(dd/mm/aaaa)_0$: fecha de inicio del experimento.

$(hh:mm:ss)_{tN}$: hora de inicio del ensayo, corrida o toma de muestra.

$(hh:mm:ss)_{F,tN}$: hora de finalización del ensayo, corrida o toma de muestra.

$(hh:mm:ss)_0$: hora de inicio del experimento.

3.7.2. Determinación de avance porcentual y velocidad de avance del proceso (objetivo específico No. 1)

Se define como avance porcentual ($\% \xi$) a la proporción de resistencia alcanzada por la muestra de cemento respecto a la resistencia nominal del mismo aceptada comercialmente. Para este caso, se utilizó 4 000 psi asignada al Cemento Portland UGC el cual será objeto de ensayo. Por tanto se define el avance porcentual del proceso según la ecuación:

$$\% \xi = \frac{\sigma}{\sigma_N} \cdot 100\% \quad [\text{Ec. 61}]$$

Donde:

$\% \xi$: avance porcentual (%)

σ : esfuerzo máximo de compresión (psi)

σ_N : esfuerzo nominal de compresión (4 000,0 psi)

De esta manera puede establecerse la velocidad para el proceso, utilizando la primera derivada del avance porcentual.

$$r_{PFC} = \frac{d\% \xi}{dt} \quad [\text{Ec. 62}]$$

Donde:

r_{PFC} : velocidad del proceso de fraguado y curado (%/s)

$\% \xi$: avance porcentual

3.7.3. Análisis gráfico de variables y construcción de modelos

A partir de los datos obtenidos en las pruebas de resistencia y el monitoreo, se construyeron las siguientes representaciones gráficas.

3.7.3.1. Composición química del medio de curado en función del tiempo

Para la determinación de las concentraciones de las especies anteriormente mencionadas en el medio de curado, a través de la titulación, se utilizó la siguiente relación estequiométrica:

$$[X] = \frac{C_{tit} \cdot V_{tit} \cdot v_x \cdot 1\ 000}{V_m \cdot v_{tit}} \quad [\text{Ec. 63}]$$

Donde:

$[X]$: concentración de la especie "X" en el medio de curado (mmol/dm^3).

C_{tit} : concentración del titulante (mol/dm^3).

v_x : coeficiente estequiométrico de la especie "X" en la reacción de titulación.

V_m : volumen de muestra titulada (ml).

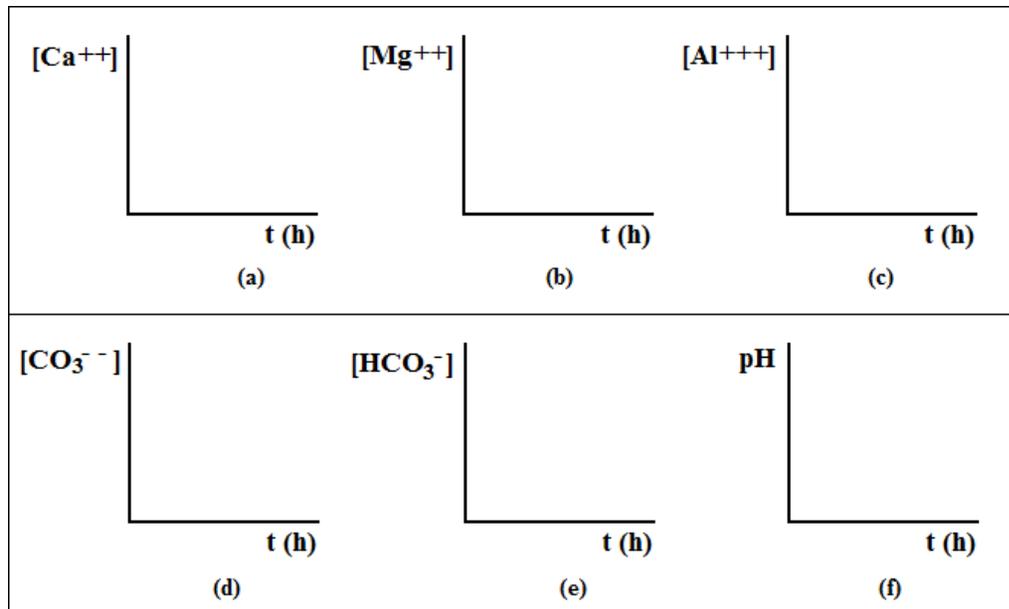
v_{tit} : coeficiente estequiométrico del titulante en la reacción de titulación..

La especie "X" puede ser Ca^{++} , Al^{+++} , CO_3^{--} o HCO_3^- , en el caso del Mg^{++} , a la concentración obtenida debía restársele el resultado de la concentración de Ca^{++} en cada muestra, de la siguiente manera:

$$[\text{Mg}^{++}] = \frac{C_{tit} \cdot V_{\text{EDTA}} \cdot V_{\text{Mg}^{++}} \cdot 1000}{V_m \cdot V_{\text{EDTA}}} [\text{Ca}^{++}] \quad [\text{Ec. 64}]$$

Al analizar estas variables fue posible observar el comportamiento de la migración de partículas reactivas entre la muestra y el medio de curado, para las especies de interés: iones de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), aluminio (Al^{+++}), carbonatos (CO_3^{-}), bicarbonatos (HCO_3^{-}) e hidronio (pH), según se muestra en la figura 26.

Figura 26. **Gráficas para analizar la variación en la composición del medio de curado en función del tiempo**



- (a) Concentración de iones Calcio en función del tiempo. (b) Concentración de iones Magnesio en función del tiempo. (c) Concentración de iones Aluminio en función del tiempo. (d) Concentración de Carbonatos en función del tiempo. (e) Concentración de Bicarbonatos en función del tiempo. (f) Potencial ácido en función del tiempo.

Fuente: elaboración propia.

3.7.3.2. Avance del proceso de curado en función del tiempo

Una vez planteado el concepto de avance porcentual (ecuación 61), es posible realizar un monitoreo indirecto de esta variable, con el fin de analizar el comportamiento de la resistencia de las muestras conforme transcurre el tiempo, utilizando los mismos tipos de modelos propuestos anteriormente.

Una vez encontrado el modelo de avance porcentual en función del tiempo:

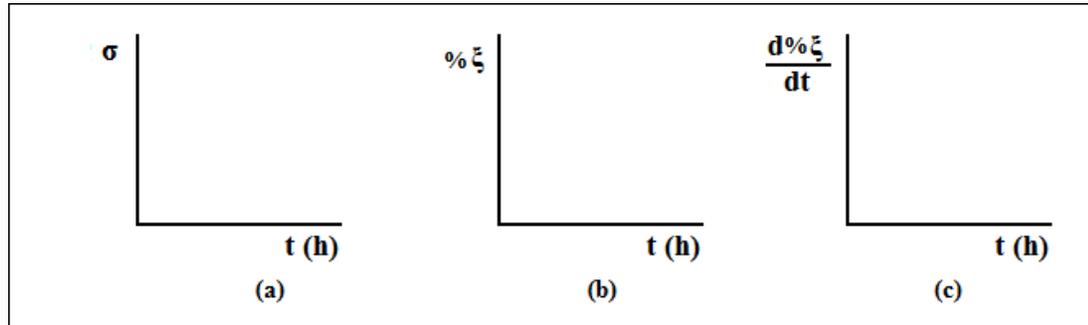
$$\% \xi = f(t) \quad [\text{Ec. 65}]$$

es posible derivarlo y deducir un modelo de la velocidad de avance en función del tiempo, completando así la primera variable cinética como se muestra la ecuación 66 y la figura 27.

$$\frac{d(\% \xi)}{dt} = f'(t) \quad [\text{Ec. 66}]$$

Dicha velocidad corresponde a una razón instantánea del porcentaje de la resistencia nominal (4 000 psi) que alcanzan los especímenes, en función del tiempo.

Figura 27. **Gráficas para analizar el avance del proceso de curado en función del tiempo**



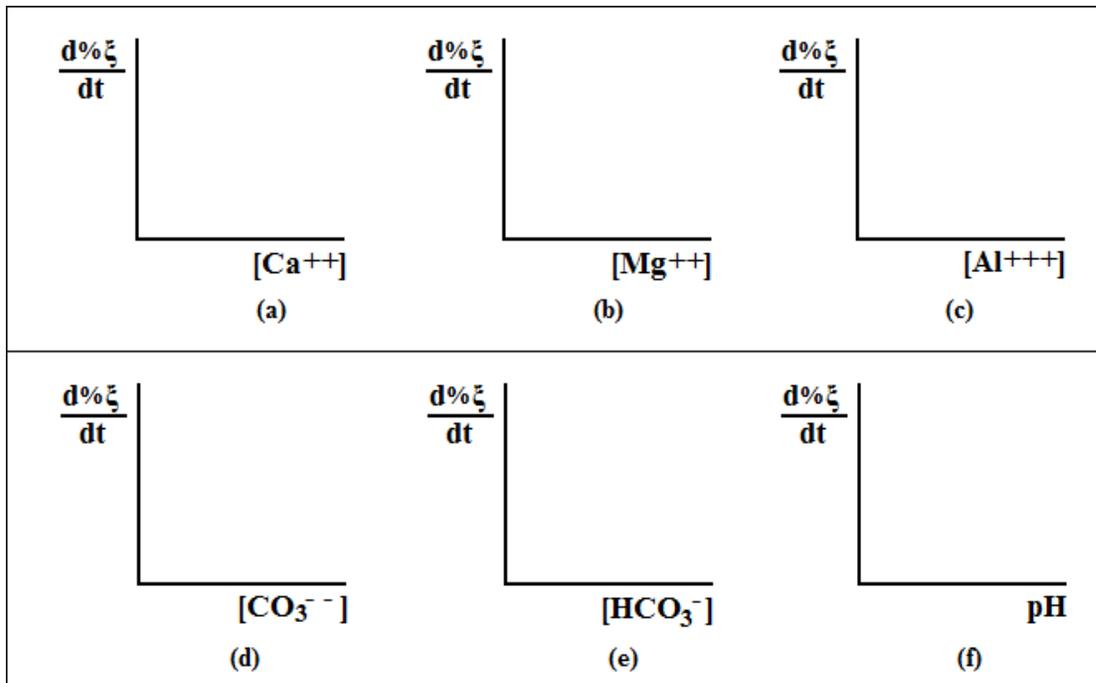
(a) Esfuerzo máximo en función del tiempo. (b) Avance porcentual en función del tiempo. (c) Velocidad de avance del proceso.

Fuente: elaboración propia.

3.7.3.3. Efecto de la composición del medio de curado sobre la velocidad de avance del proceso (objetivo específico No. 2)

Finalmente con los modelos encontrados anteriormente, fue posible evaluar el efecto de cada especie en el medio de curado sobre la velocidad de avance del proceso. Relacionando tanto la concentración como la velocidad de migración de cada especie con la velocidad de curado, como se muestra en la figura 28. El análisis gráfico y los modelos matemáticos permiten entonces, predecir el comportamiento de la mezcla en cuestión, y permiten incluso establecer metodologías específicas para optimizar el curado, tomando en cuenta el tiempo como un proceso cinético totalmente.

Figura 28. **Gráficas para analizar la velocidad de avance del proceso de curado en función de la concentración molar del ión referido**



- (a) Velocidad de avance del proceso en función de la concentración de iones calcio.
- (b) Velocidad de avance del proceso en función de la concentración de iones magnesio.
- (c) Velocidad de avance del proceso en función de la concentración de iones aluminio.
- (d) Velocidad de avance del proceso en función de la concentración de carbonatos.
- (e) Velocidad de avance del proceso en función de la concentración de bicarbonatos.
- (f) Velocidad de avance del proceso en función del pH.

Fuente: elaboración propia.

3.7.3.4. Efecto de la solubilidad de las especies reactivas

Como se explicó en la sección 2.5 la solubilidad de una o más especies iónicas define el alcance de migración de dichas partículas desde la fase sólida hacia una disolución (equilibrio sólido-líquido), lo cual se aplica al objeto del estudio, pues en diferentes condiciones (pH, T, etc.), dicha solubilidad puede cambiar (véase figura 9), y limitar la transferencia de partículas en forma heterogénea entre las muestras. Es por eso que será planteada una corrección en la composición de cada especie reactiva, para eliminar ese posible factor adicional, planteando un porcentaje de especie disuelta definido por:

$$\%X(d) = \frac{[X]}{Sb_x} \cdot 100\% \quad [\text{Ec. 67}]$$

Donde:

$\%X(d)$: porcentaje de especie disuelta.

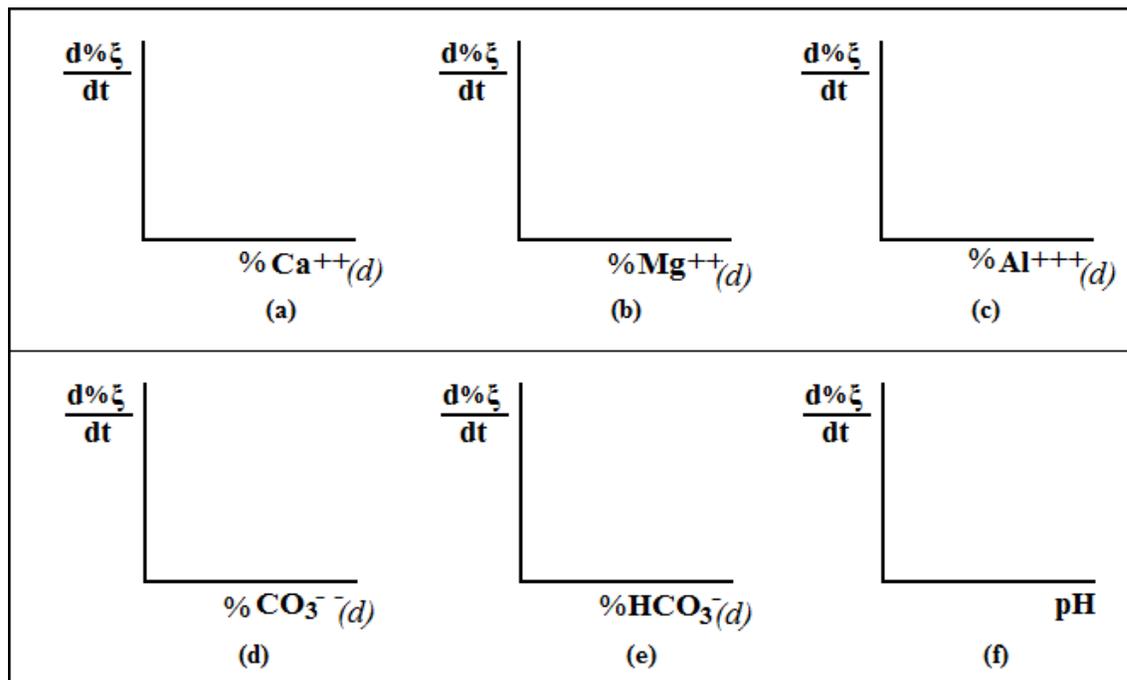
$[X]$: concentración de cada especie (mol/dm^3)

Sb_x : sumatoria de solubilidades de la especie combinando iones (mmol/dm^3)

contra el cual se realizó el mismo análisis que en la sección 3.7.3.4 visualizada en la figura 28. La corrección se muestra en la figura 29.

El valor de la solubilidad fue aproximado según el razonamiento de la sección 2.5 (véanse ecuaciones 25 a la 41 y la figura 9), los datos de pK_{ps} se pueden encontrar en la tabla LVIII.

Figura 29. **Gráficas para analizar el efecto de la composición del medio de curado sobre la velocidad de avance del proceso curado, eliminando el efecto de la solubilidad de cada especie**



- (a) Velocidad de avance del proceso en función del porcentaje de iones calcio disueltos.
- (b) Velocidad de avance del proceso en función del porcentaje de iones magnesio disueltos.
- (c) Velocidad de avance del proceso en función del porcentaje de iones aluminio disueltos.
- (d) Velocidad de avance del proceso en función del porcentaje de carbonatos.
- (e) Velocidad de avance del proceso en función del porcentaje de bicarbonatos disueltos.
- (f) Velocidad de avance del proceso en función del pH.

Fuente: elaboración propia.

3.7.3.5. Determinación del modelo cinético para el proceso (objetivo específico No. 4).

Para relacionar las variables independientes con la variable principal, el porcentaje de avance del proceso, se seleccionó un modelo de tipo potencial:

$$r_{PFC} = \frac{d(\% \xi)}{dt} = k_z (z)^{nz} \quad [\text{Ec. 68}]$$

Donde:

r_{PFC} : velocidad del proceso de fraguado y curado (%/s)

$\% \xi$: avance porcentual

t : tiempo

z : cualquier variable evaluada

k_z : constante de proporcionalidad entre la variable z y r_{PFC}

nz : exponente empirico para la variable z

Esto puede generalizarse para todas las variables, obteniendo la expresión combinada:

$$r_{PFC} = k \left(\prod_m (z_m^{nz_m}) \right) \quad [\text{Ec. 69}]$$

Donde:

r_{PFC} : velocidad del proceso de fraguado y curado. (%/s)

z_m : variable evaluada

k : constante de proporcionalidad global

nz_m : exponente empirico para cada variable z_m

Los exponentes empíricos podrán evaluarse con un método diferencial cinético y la constante global con un método integral.

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Dato promedio estadístico

El promedio (\bar{a}), permite obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomó en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad [\text{Ec. 70}]$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio.

a_i : valor i

n : número de datos.

3.8.2. Desviación estándar

La desviación estándar (S_a), permite cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representa el error aleatorio causado por diversos factores:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n-1}} \quad [\text{Ec. 71}]$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio

a_i : valor i

n : número de datos

S_a : desviación estándar de la variable a

3.8.3. Incertidumbre absoluta

El error por incertidumbre permite determinar la utilidad del resultado final, evaluar la confianza que se puede tener en una decisión basada en el resultado y comparar resultados de mediciones. Para cualquier variable:

$$a_x = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \quad [\text{Ec. 72}]$$

donde a_n es la n -ésima variable independiente, su incertidumbre está dada por la siguiente ecuación:

$$\delta a_x = \delta f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right| \times \delta a_i \quad [\text{Ec. 73}]$$

donde a_i es la i -ésima y Δa_i es la i -ésima incertidumbre de la n -ésima variable de la función a_x .

3.8.4. Análisis de varianza (objetivo específico No. 3)

El análisis de varianza realizado, permite determinar si el error sistemático en los datos de cada variable, pueden atribuirse a factores reales y comprobables, o pueden considerarse errores aleatorios, al relacionarlas entre sí.

Debido al número de relaciones entre variables (factores), el análisis fue desarrollado como un sistema de dos factores con repetición, tratado por secciones:

Tabla X. **Combinaciones de factores para análisis de varianza**

#	Factor 1	Factor 2	Variable Dependiente
1	Períodos de Tiempo	Medio de Curado	Esfuerzo máximo de muestras
2	Períodos de Tiempo	Concentración de iones Calcio	Esfuerzo máximo de muestras
3	Períodos de Tiempo	Concentración de iones Magnesio	Esfuerzo máximo de muestras
4	Períodos de Tiempo	Concentración de iones Aluminio	Esfuerzo máximo de muestras
5	Períodos de Tiempo	Concentración de Carbonatos	Esfuerzo máximo de muestras
6	Períodos de Tiempo	Concentración de Bicarbonatos	Esfuerzo máximo de muestras

Fuente: elaboración propia.

A cada una de las combinaciones anteriores debía adicionarse el efecto estadístico de las repeticiones, tratada con la siguiente metodología:

Tabla XI. **Nomenclatura de análisis de varianza**

		FACTOR 2 (<i>k</i>)				TOTAL
		1	2	...	<i>b</i>	
FACTOR 1 (<i>j</i>)	1	X_{111}, \dots, X_{11l}	X_{121}, \dots, X_{12l}	...	X_{1b}	$\hat{X}_{1\#}$
	2	X_{211}, \dots, X_{21l}	X_{221}, \dots, X_{22l}	...	X_{2b}	$\hat{X}_{2\#}$
	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
	<i>a</i>	X_{a11}, \dots, X_{a1l}	X_{a21}, \dots, X_{a2l}	...	X_{ab}	$\hat{X}_{a\#}$
TOTAL		$\hat{X}_{\#1\#}$	$\hat{X}_{\#2\#}$...	$\hat{X}_{\#b\#}$	\hat{X}

Fuente: SPIEGEL, Murray R. *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística*. pp.306 a 316.

La corrida l de la combinación de la entrada j del factor 1 y la entrada k del factor 2, se denotó como x_{jkl} donde $j = 1, \dots, a$, $k = 1, \dots, b$ y $l = 1, \dots, c$.

Cálculo de valores medios:

$$\hat{x}_{j\#\#} = \frac{1}{bc} \sum_{k,l} x_{jkl} \quad \hat{x}_{\#k\#} = \frac{1}{ac} \sum_{j,l} x_{jkl} \quad \hat{x}_{\#\#l} = \frac{1}{ab} \sum_{j,k} x_{jkl} \quad \hat{x} = \frac{1}{abc} \sum_{j,k,l} x_{jkl} \quad [\text{Ec. 74}]$$

Donde:

$\hat{x}_{j\#\#}$: media de la entrada j del bloque 1

$\hat{x}_{\#k\#}$: media de la entrada k del bloque 2

$\hat{x}_{\#\#l}$: media de las repeticiones de la entrada j, k

\hat{x} : media de medias

Determinación de variaciones:

$$\hat{v}_E = \sum_{j,k,l} (x_{jkl} - \hat{x})^2 \quad [\text{Ec. 75}]$$

$$\hat{v}_{B1} = bc \sum_{j=1}^a (\hat{x}_{j\#\#} - \hat{x})^2 \quad [\text{Ec. 76}]$$

$$\hat{v}_{B2} = ac \sum_{k=1}^b (\hat{x}_{\#k\#} - \hat{x})^2 \quad [\text{Ec. 77}]$$

$$\hat{v}_i = c \sum_{j,k} (\hat{x}_{jk\#} - \hat{x}_{j\#\#} - \hat{x}_{\#k\#} + \hat{x})^2 \quad [\text{Ec. 78}]$$

$$\hat{v} = \hat{v}_E + \hat{v}_{B1} + \hat{v}_{B2} + \hat{v}_i \quad [\text{Ec. 79}]$$

Donde:

\hat{v}_E : variación debida al error o variación aleatoria

\hat{v}_{B1} : variación entre datos del factor 1

\hat{v}_{B2} : variación entre datos del factor 2

\hat{v}_i : variación debido a la interacción

\hat{v} : variación total

Hipótesis nula:

Las hipótesis nulas que se establecen en el análisis son las siguientes:

$H_0^{(1)}$: todas las mediciones del factor 1 son iguales (el factor 1 no contribuye en la variabilidad).

$H_0^{(2)}$: todas las mediciones del factor 2 son iguales (el factor 2 no contribuye en la variabilidad).

$H_0^{(3)}$: no hay interacción entre los factores (el factor 1 y el factor 2 no poseen una relación que afecte).

Al aceptar estas hipótesis se afirma que el factor, o la relación entre factores (en el caso de la tercera), no produce ningún efecto significativo sobre la variabilidad de los resultados.

Al determinar la F de Fisher, esta debe ser comparada con un valor crítico que permitirá evaluar las hipótesis, dicho valor crítico se determina a partir de una tabla de percentiles para la distribución F, de la siguiente manera (véase figura 30).

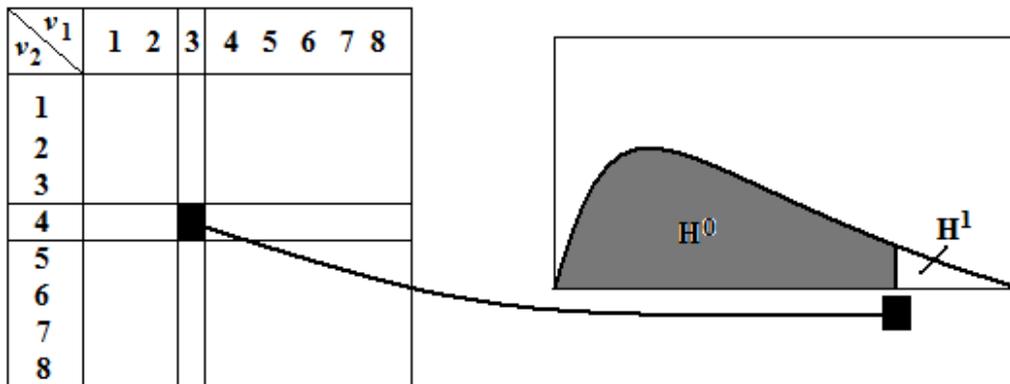
Cuadro de resultados:

Tabla XII. **Análisis de varianza de dos factores con repetición**

Factor	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F
Entre filas (factor 1)	$\hat{v}_{B1} = b \sum_{j=1}^a (\bar{x}_{j\#} - \bar{x})^2$	$a - 1$	$s_{B1}^2 = \frac{\hat{v}_{B1}}{a - 1}$	$\frac{s_{B1}^2}{s_E^2}$
Entre columnas (factor 2)	$\hat{v}_{B2} = a \sum_{k=1}^b (\bar{x}_{\#k} - \bar{x})^2$	$b - 1$	$s_{B2}^2 = \frac{\hat{v}_{B2}}{b - 1}$	$\frac{s_{B2}^2}{s_E^2}$
Interacción	$\hat{v}_i = c \sum_{j,k} (\bar{x}_{jk\#} - \bar{x}_{j\#\#} - \bar{x}_{\#k\#} + \bar{x})^2$	$ab(c - 1)$	$\hat{s}_i^2 = \frac{\hat{v}_i}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{s_i^2}{s_E^2}$
Aleatoria	$\hat{v}_E = \sum_{j,k,l} (x_{jkl} - \bar{x})^2$	$(a - 1)(b - 1)$	$\hat{s}_E^2 = \frac{\hat{v}_E}{ab(c - 1)}$	
Total	$\hat{v} = \hat{v}_E + \hat{v}_{B1} + \hat{v}_{B2}$	$abc - 1$		

Fuente: SPIEGEL, Murray R. *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística*. pp.306 a 316.

Figura 30. **Prueba de Fisher**



Fuente: elaboración propia.

De este modo la hipótesis nula es aceptada si el valor de F experimental es menor al valor crítico (zona gris), con lo cual se concluye un efecto nulo sobre la variación de los resultados atribuyéndoselo al error aleatorio.

4. RESULTADOS

A continuación se presenta una serie de gráficas, tablas y ecuaciones que fueron obtenidas a través del procedimiento de cálculo descrito en la sección anterior, con la finalidad de cumplir los objetivos específicos del presente trabajo de investigación. Los datos de origen se presentan en la sección de apéndices, y se refieren sistemáticamente en cada resultado.

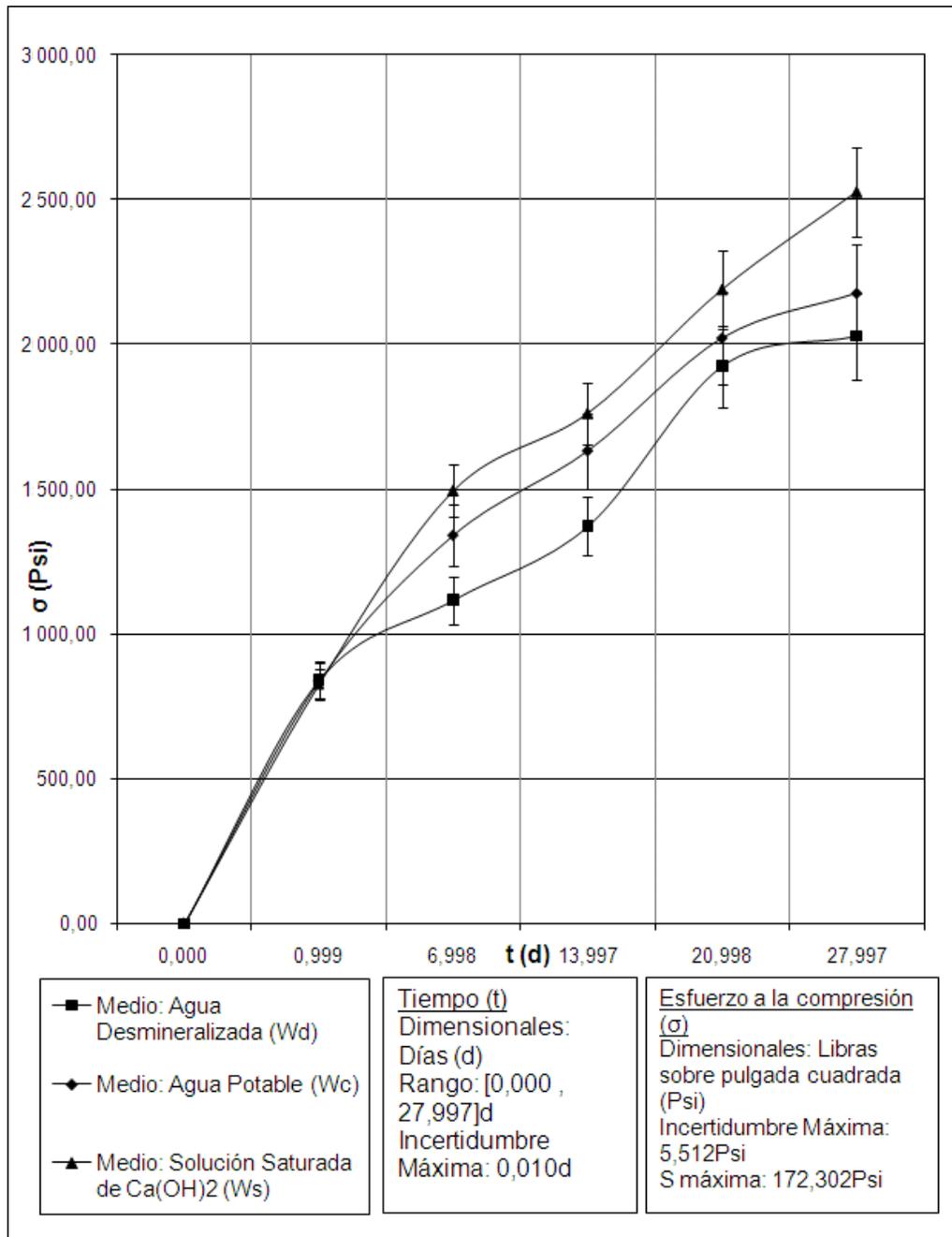
Cada valor numérico, que representa una variable de medición o una respuesta, fue obtenido a partir de un promedio estadístico de los tres datos que el diseño experimental requiere, motivo por el cual se presentan, especialmente en las gráficas, los valores de desviación estándar como forma de cuantificar la dispersión.

Los resultados, además, fueron separados en cinco apartados, según el objetivo específico al que corresponden.

4.1. Avance del proceso de curado en función del tiempo (objetivo específico No. 1)

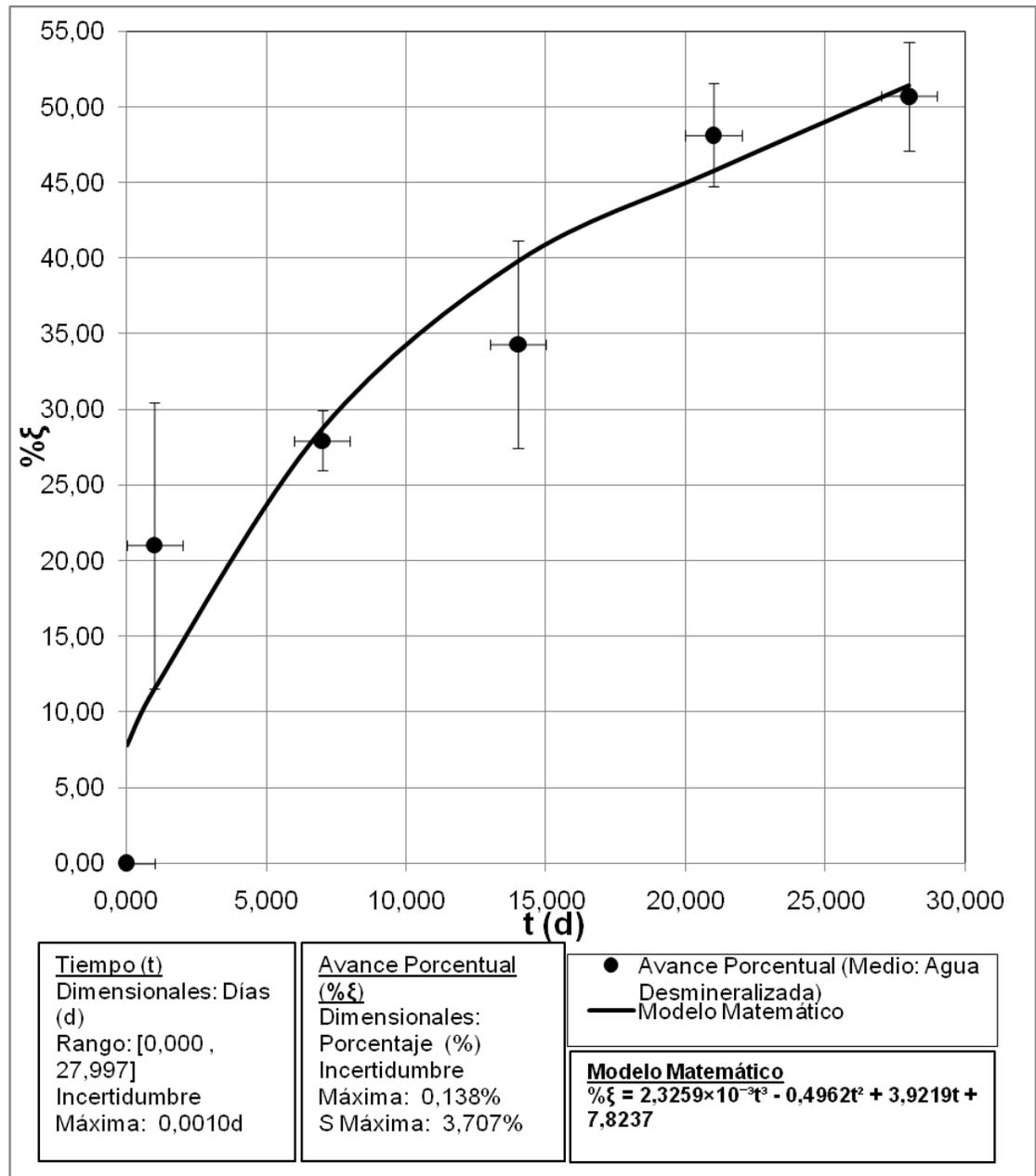
Aquí se presentan las gráficas que describen cómo varía la resistencia de los especímenes de cemento, el avance porcentual, su velocidad instantánea porcentual y la composición del medio de curado, mientras el proceso de curado avanza.

Figura 31. **Esfuerzo de compresión máximo promedio en función del tiempo**



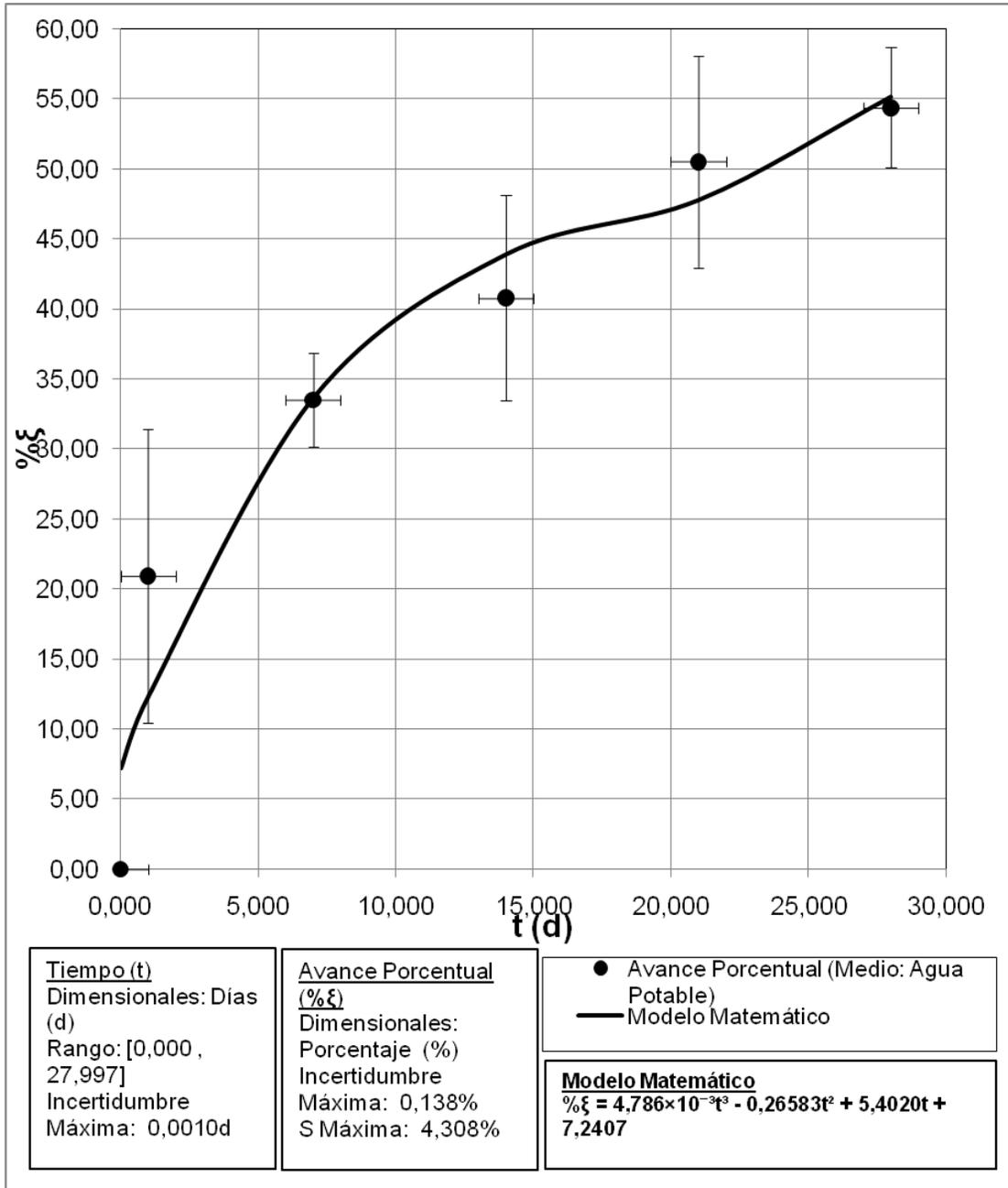
Fuente: elaboración propia (tablas LIV, LV y LVI).

Figura 32. **Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado**



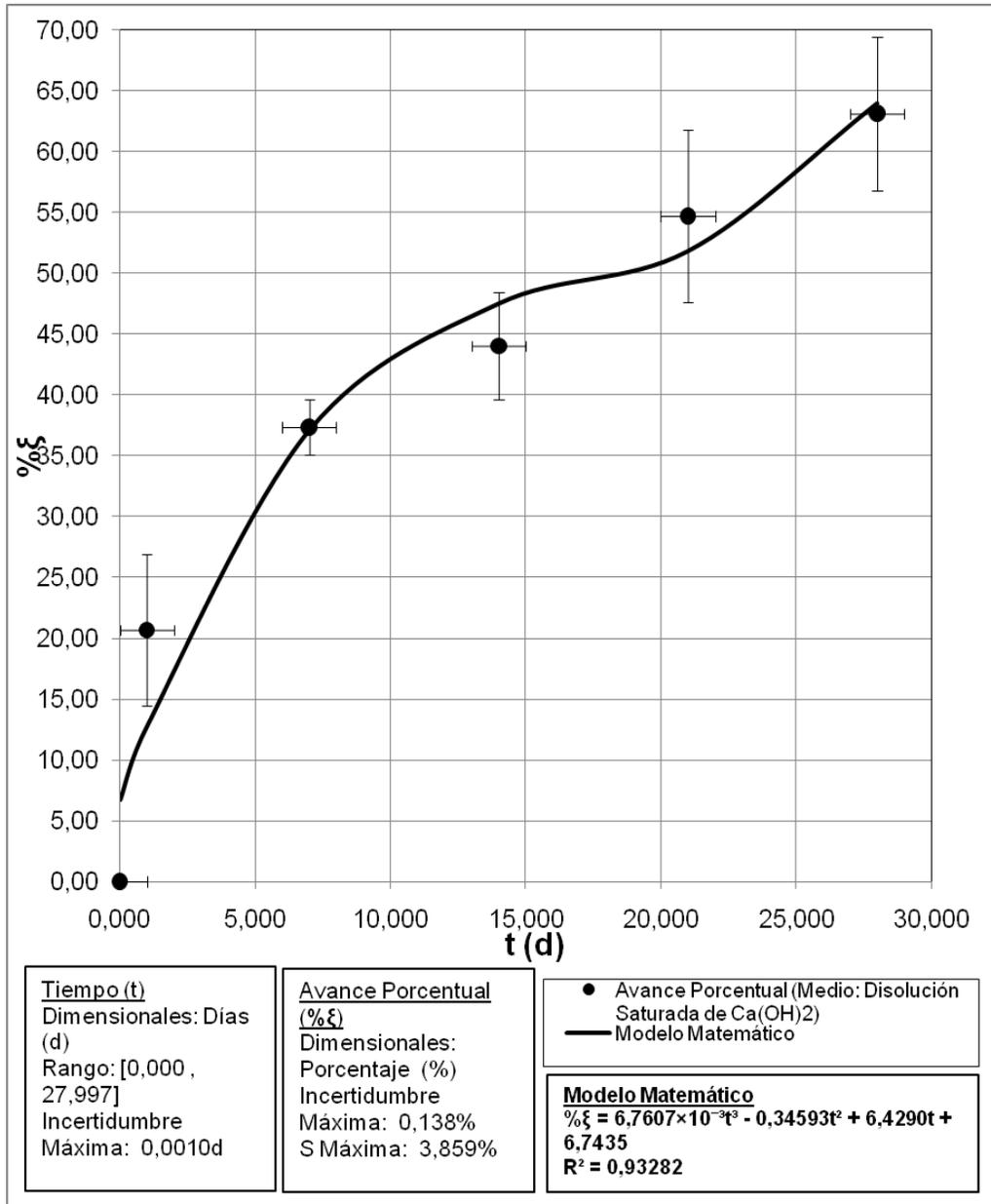
Fuente: elaboración propia (tabla LIV).

Figura 33. Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo utilizando agua potable (Wc) como medio de curado



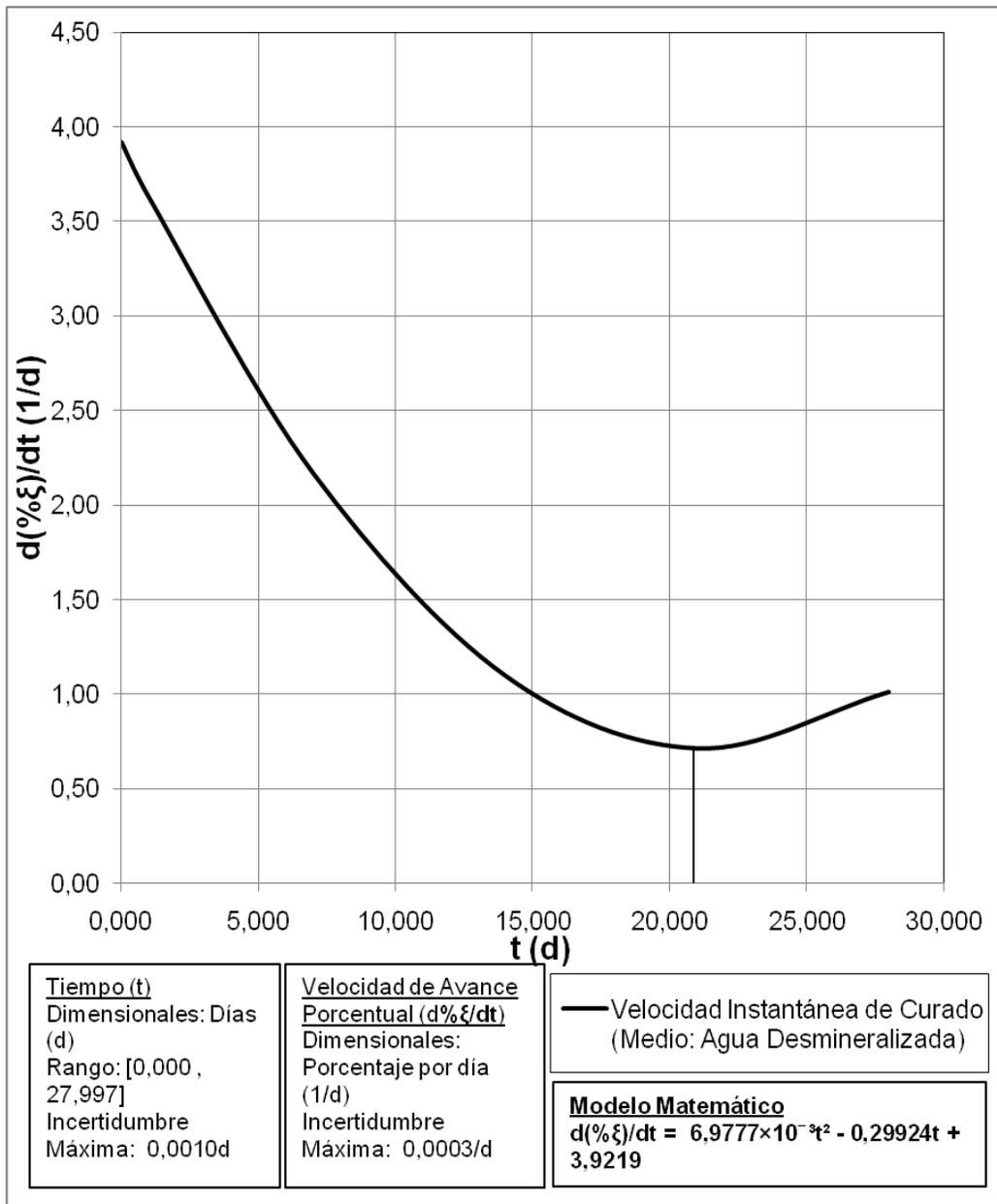
Fuente: elaboración propia (tabla LV).

Figura 34. Avance porcentual promedio de curado en función del tiempo con disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como medio de curado



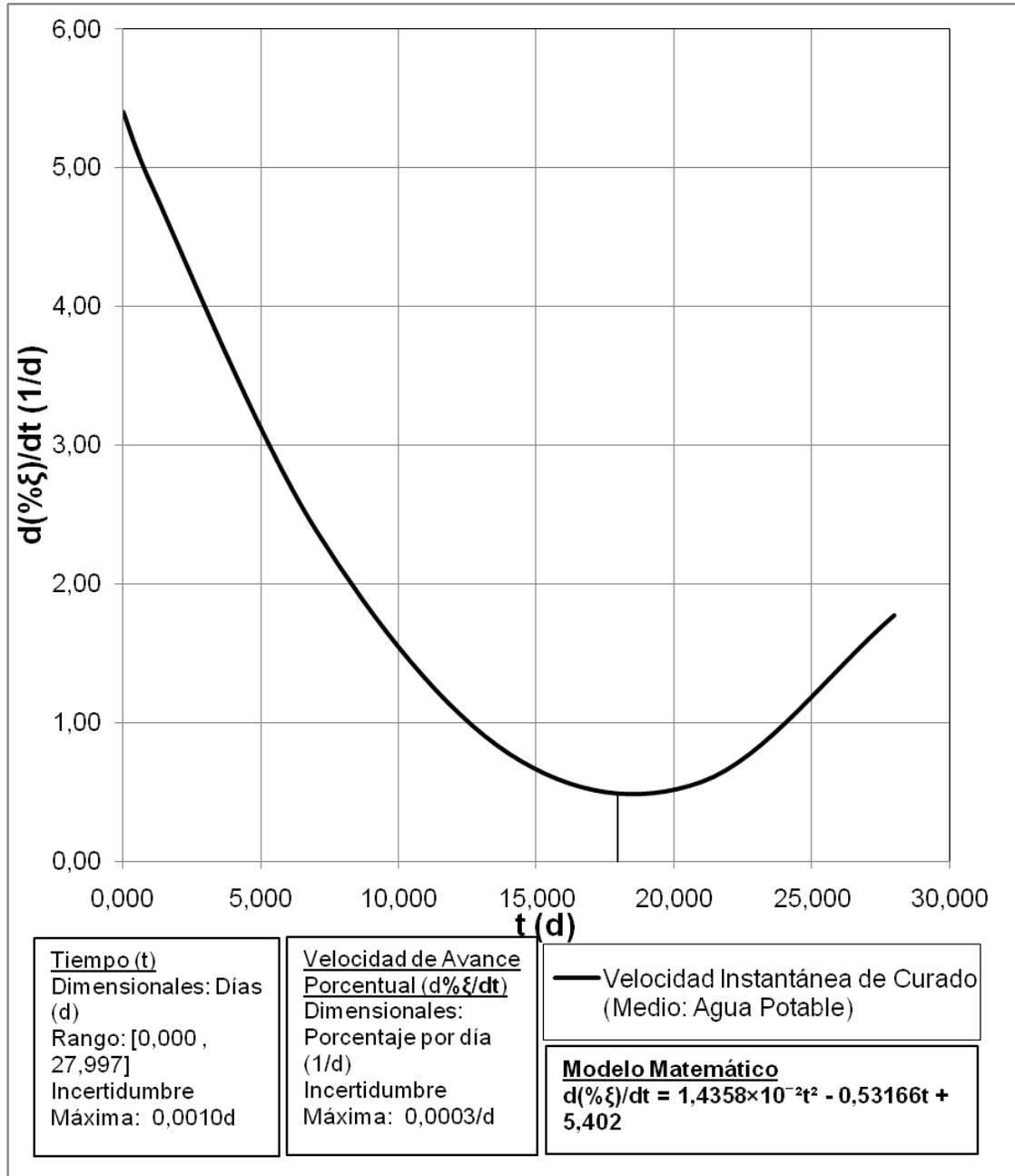
Fuente: elaboración propia (tabla LVI).

Figura 35. **Velocidad instantánea de curado en función del tiempo utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado**



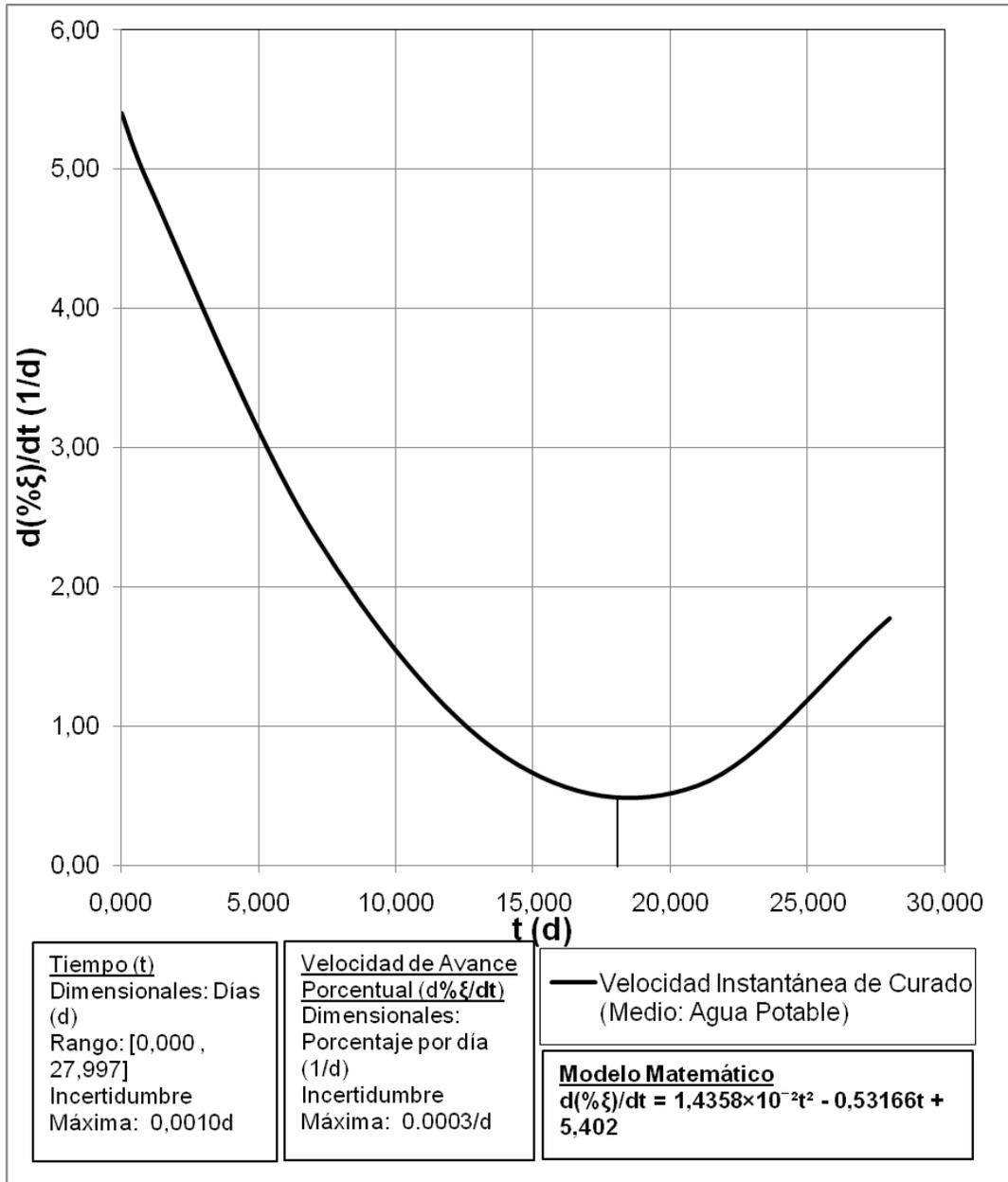
Fuente: elaboración propia (tabla LVII).

Figura 36. **Velocidad instantánea de curado en función del tiempo utilizando agua potable (Wc) como medio de curado**



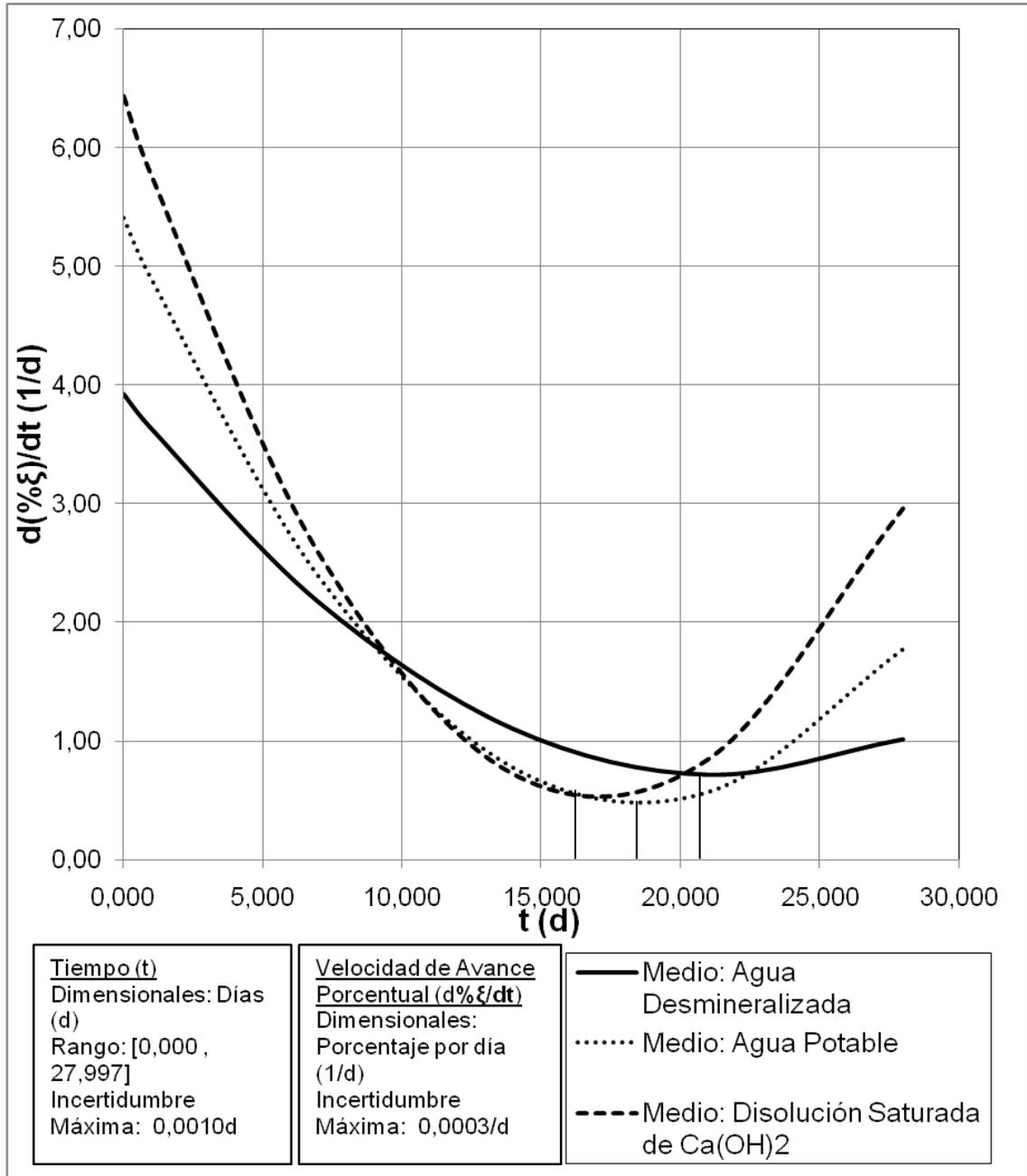
Fuente: elaboración propia (tabla LVII).

Figura 37. **Velocidad instantánea de curado en función del tiempo utilizando disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como medio de curado**



Fuente: elaboración propia (tabla LVII).

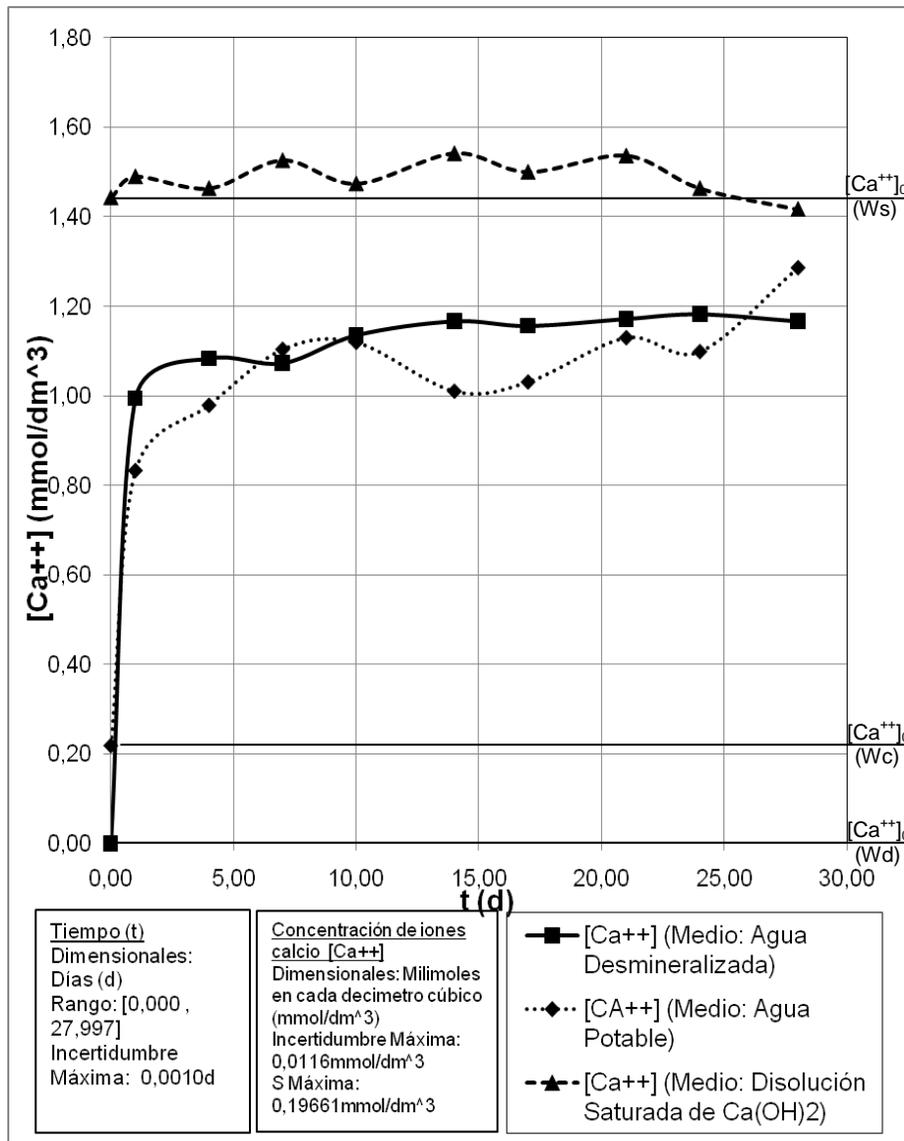
Figura 38. Comparación de velocidades instantáneas de curado en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado



Fuente: elaboración propia (tabla LVII).

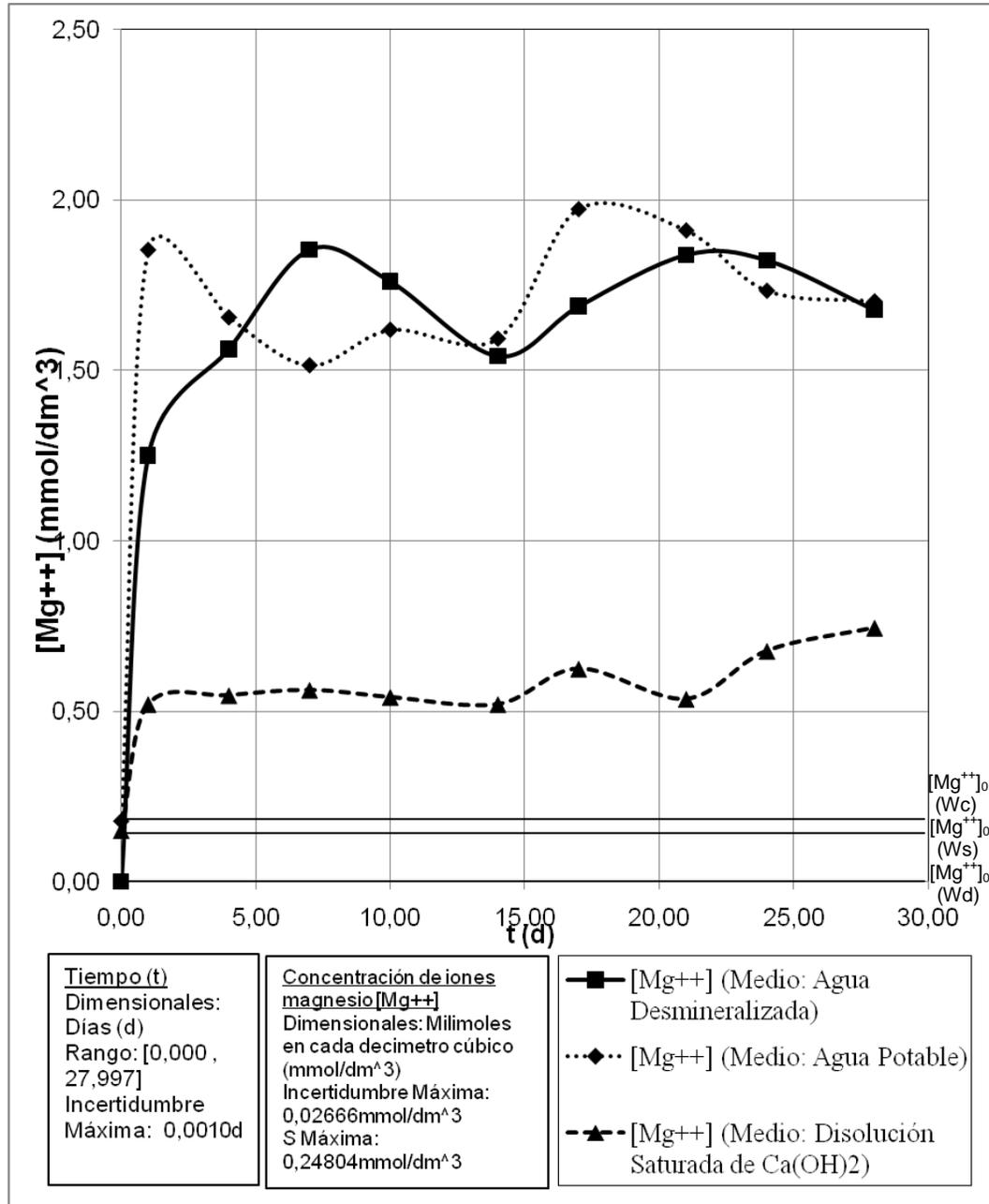
4.2. Variación de la composición del medio de curado en función del tiempo (objetivo específico No. 2)

Figura 39. Concentración promedio de Ca^{2+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados



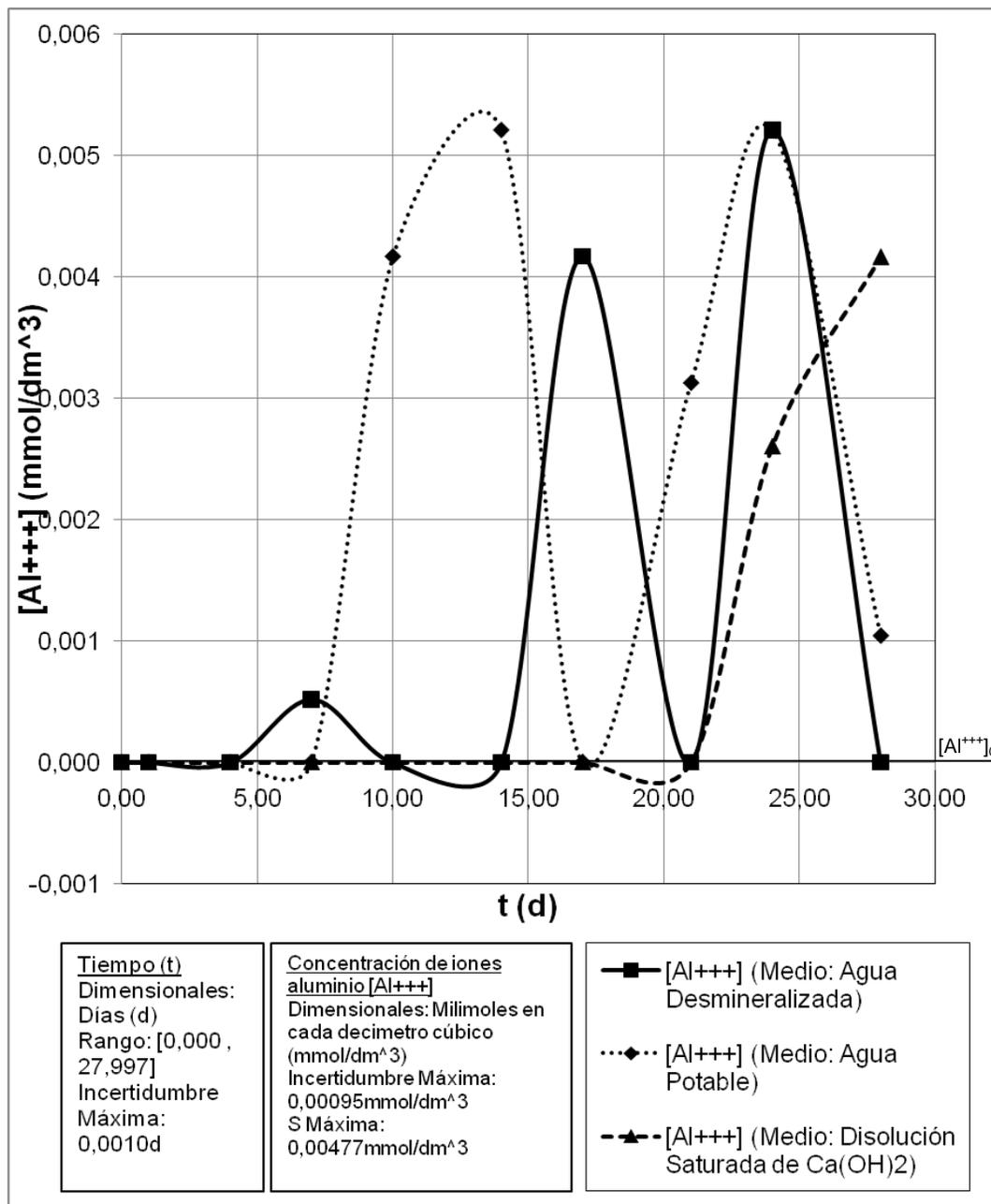
Fuente: elaboración propia (tablas XXXIX, XL y XLI).

Figura 40. Concentración promedio de Mg^{2+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados



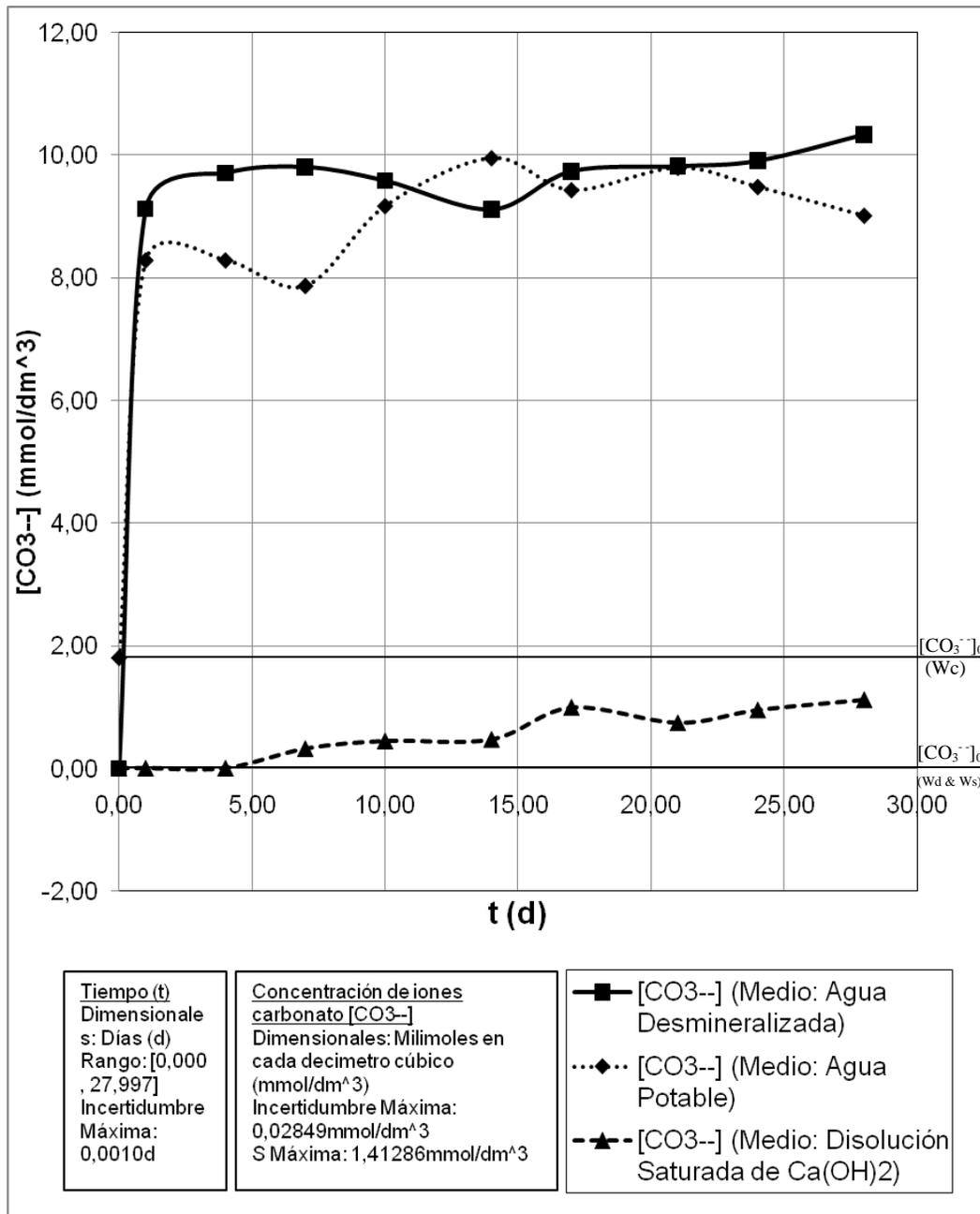
Fuente: elaboración propia (tablas XLII, XLIII y XLIV).

Figura 41. **Concentración promedio de Al^{3+} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados**



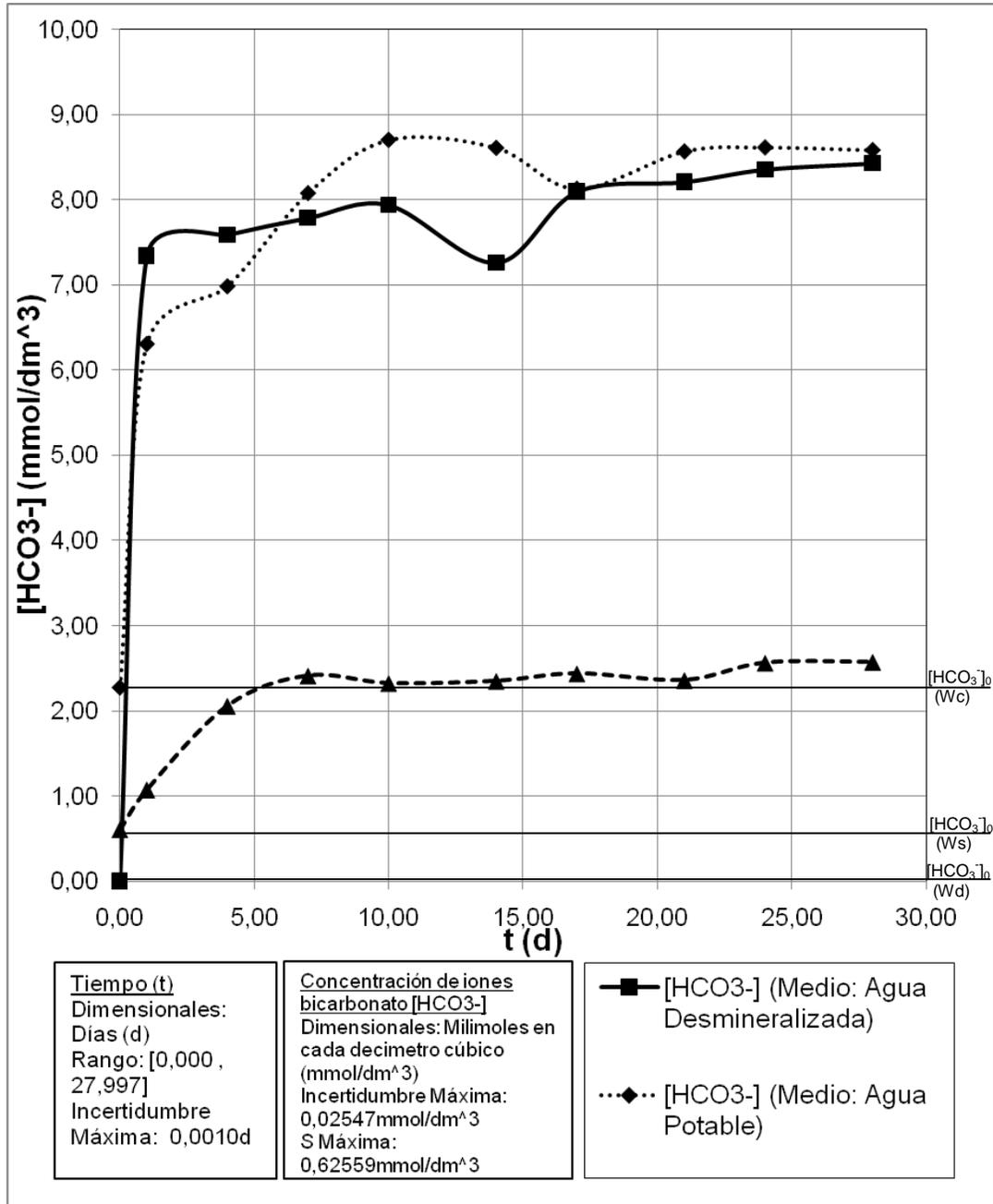
Fuente: elaboración propia (tablas XLV, XLVI y XLVII).

Figura 42. **Concentración promedio de CO_3^{--} en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados**



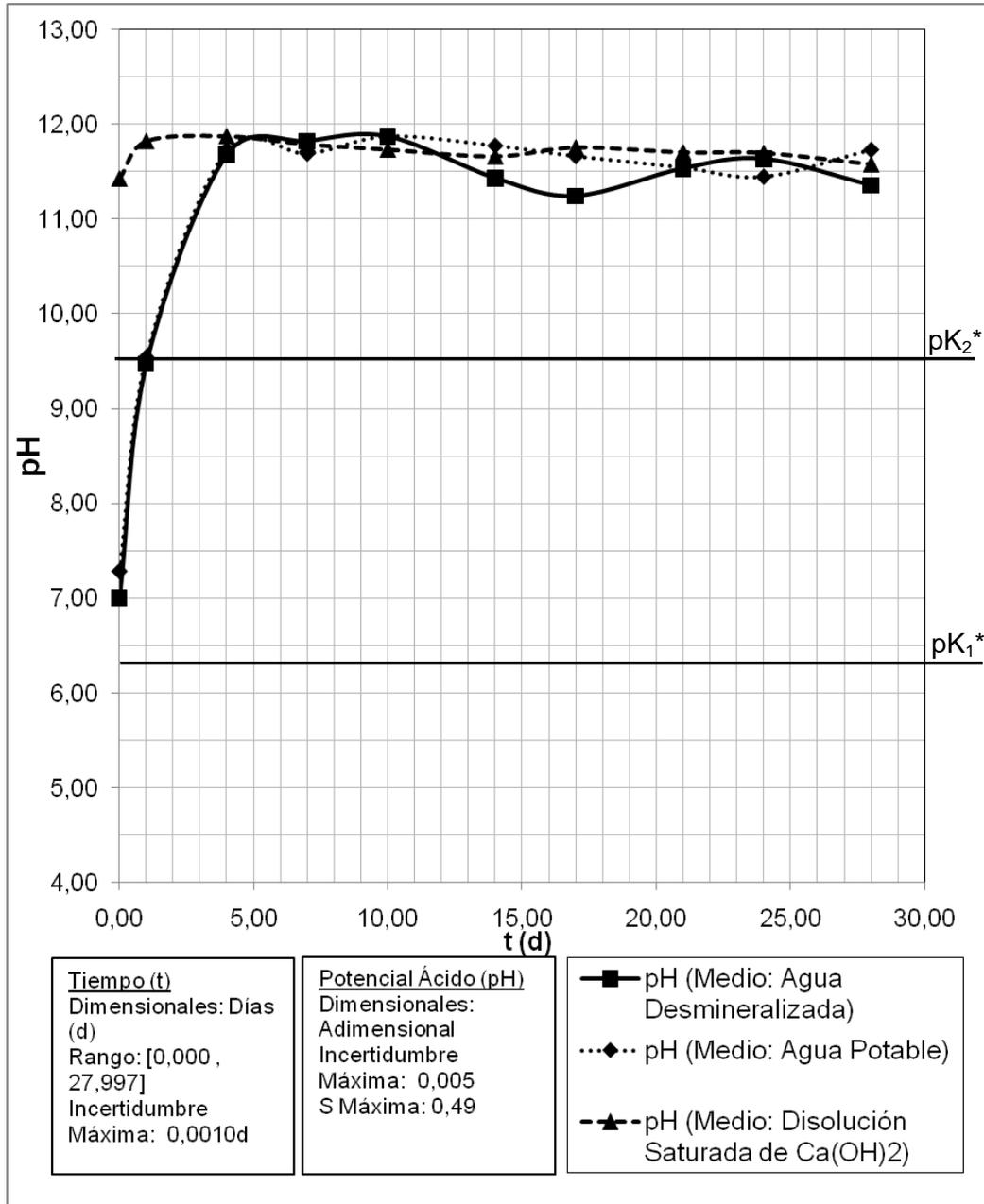
Fuente: elaboración propia (tablas XLVIII, XLIX y L).

Figura 43. **Concentración promedio de HCO_3^- en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados**



Fuente: elaboración propia (tablas LI, LII y LIII).

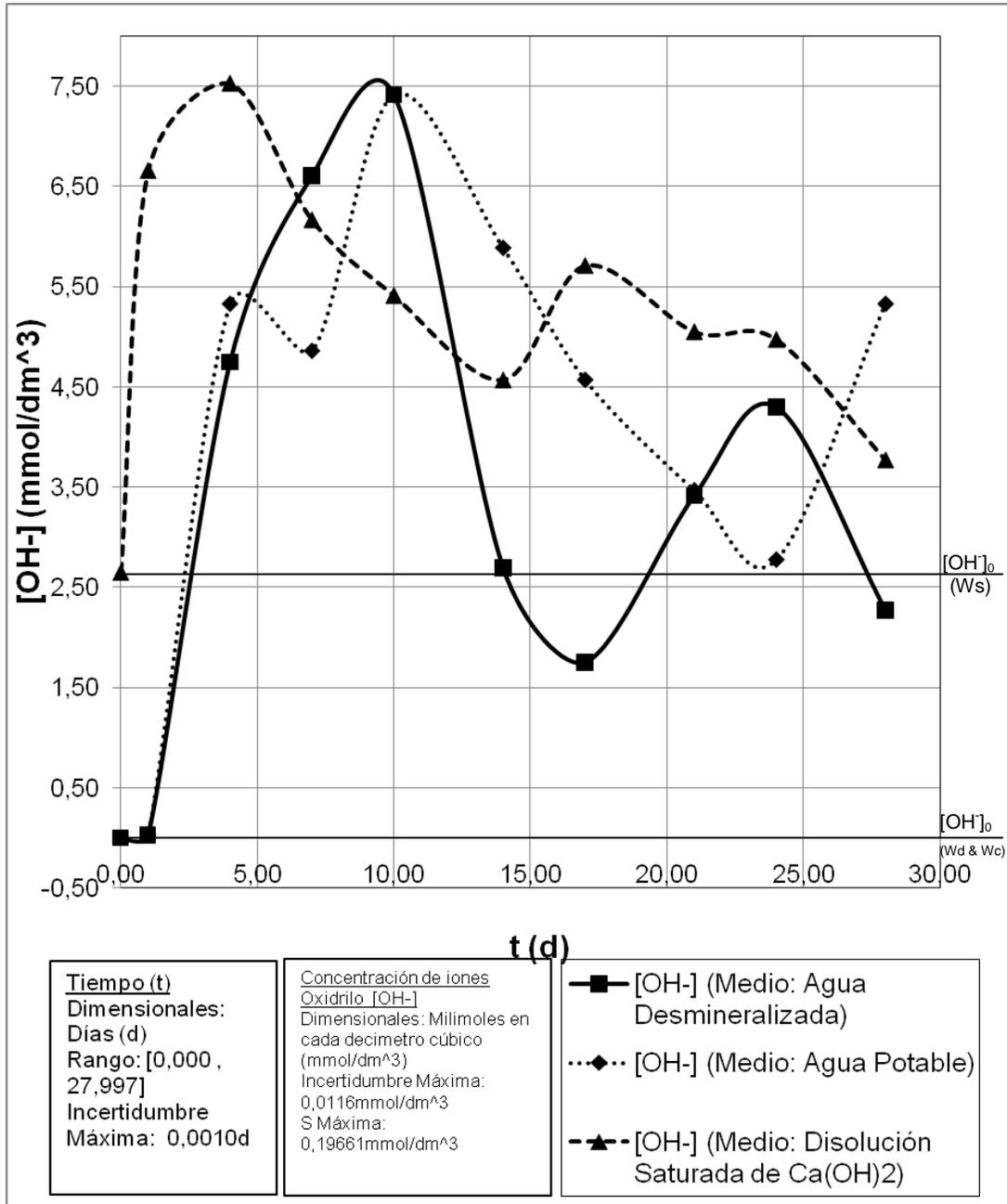
Figura 44. **Potencial de hidrógeno (pH) promedio en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados**



* Constantes de disociación del sistema $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{2-}$.

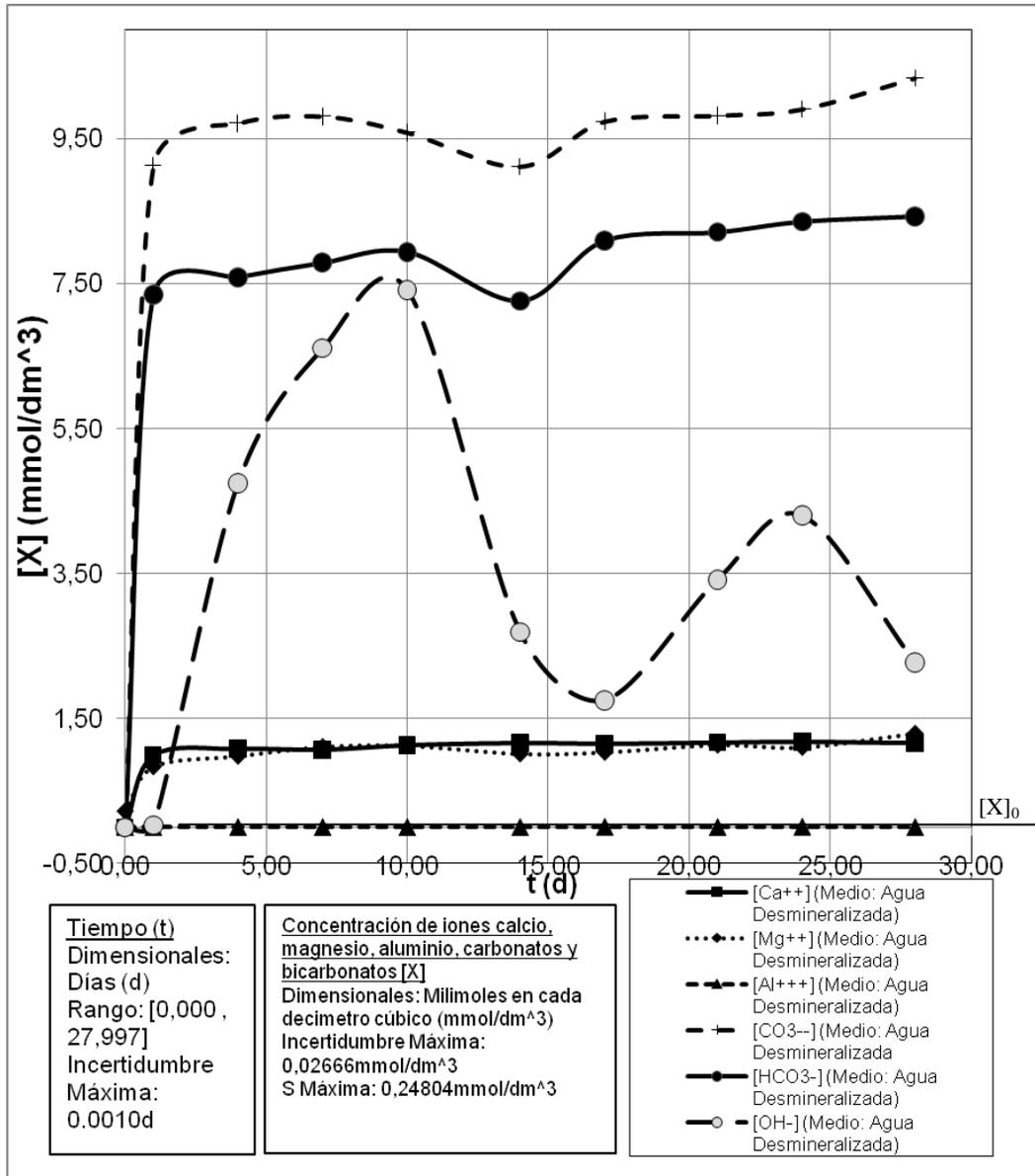
Fuente: elaboración propia (tablas LI, LII y LIII).

Figura 45. **Concentración promedio de OH⁻ en función del tiempo para los 3 diferentes medios de curado utilizados**



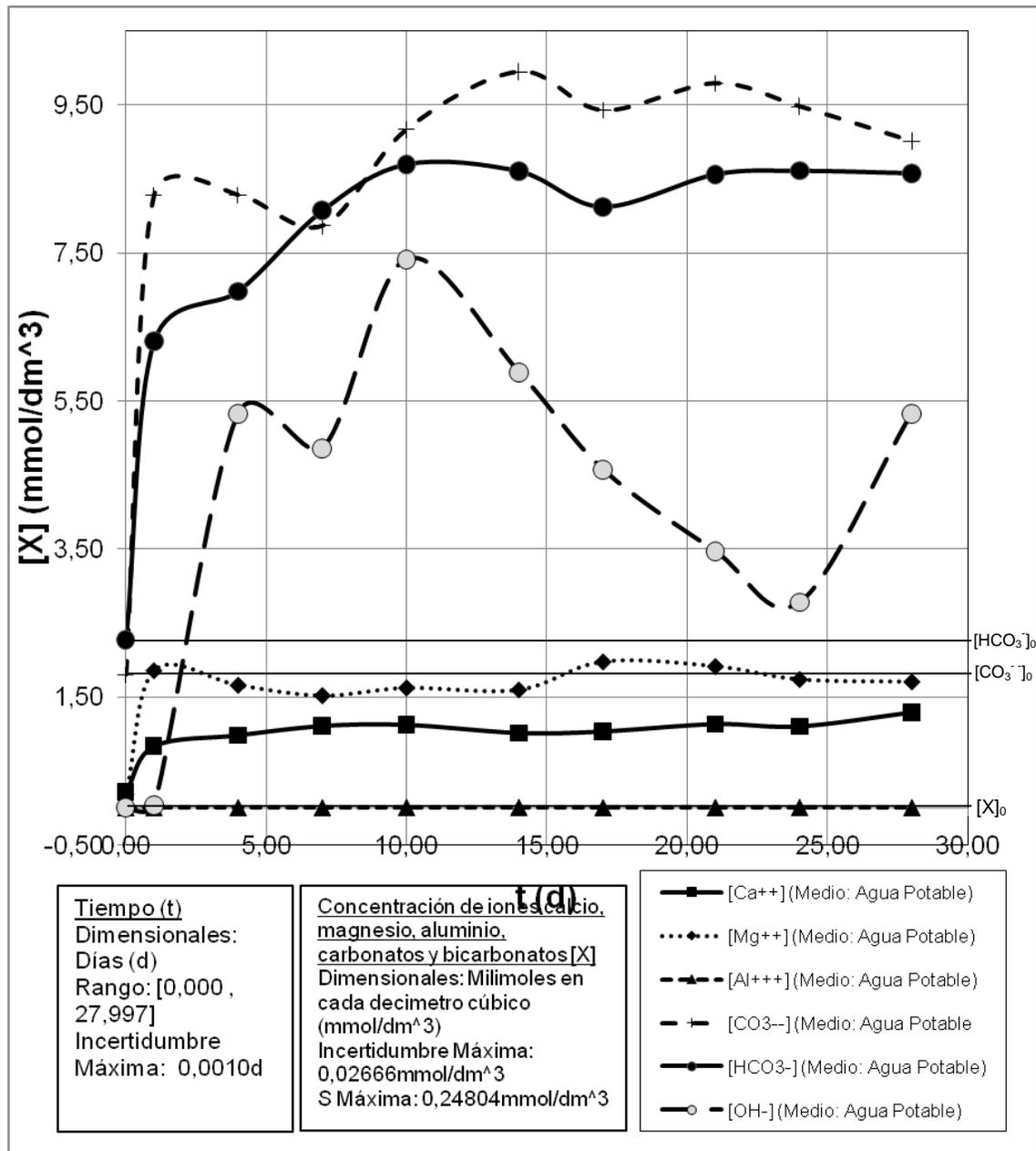
Fuente: elaboración propia (tablas LI, LII y LIII).

Figura 46. Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio de curado



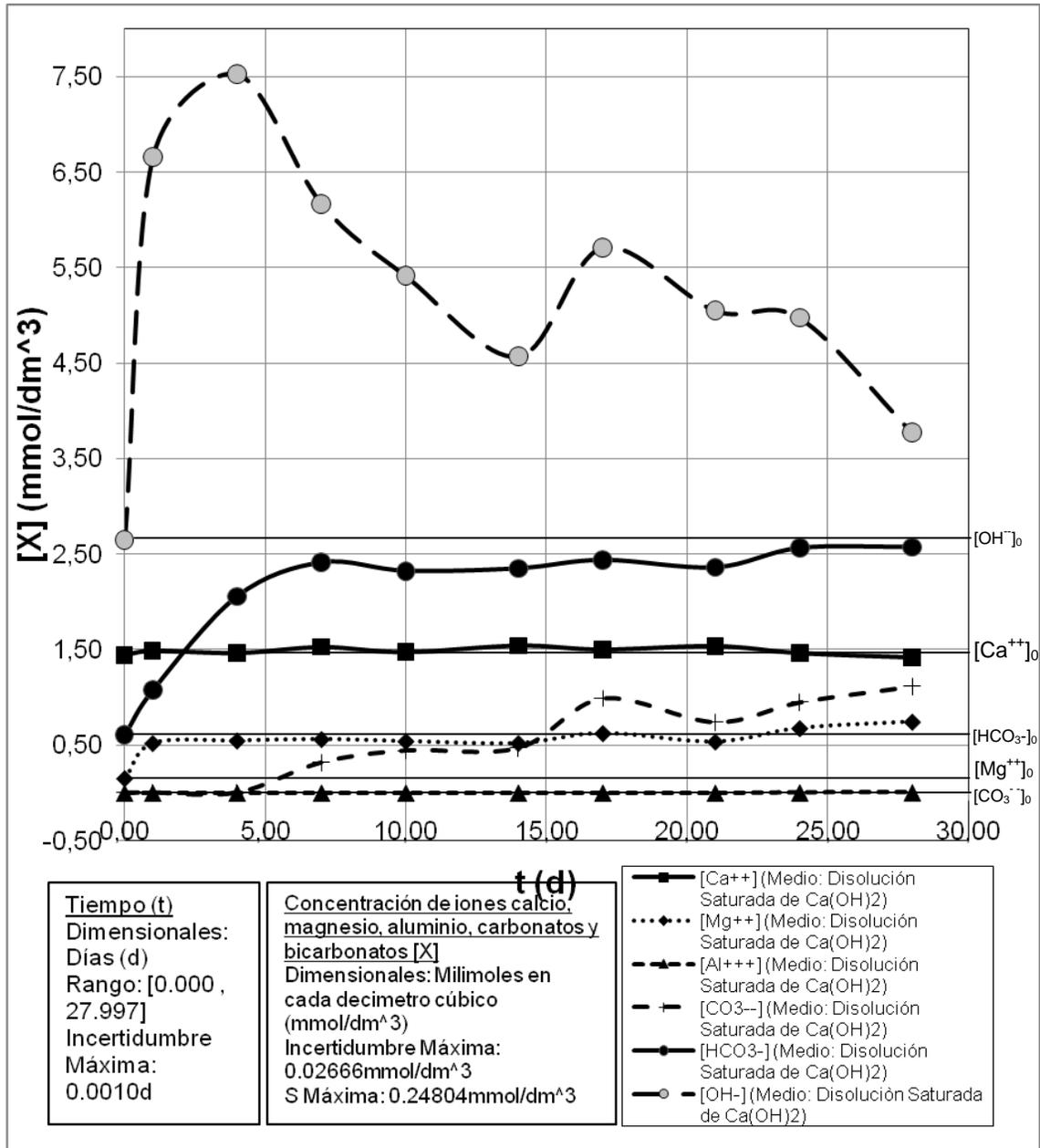
Fuente: elaboración propia (tablas XXXIV, XXXIX, XLII, XLV, XLVIII y LI).

Figura 47. Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo utilizando agua potable (Wc) como medio de curado



Fuente: elaboración propia (Tablas XXXV, XL, XLIII, XLVI, XLIX y LII).

Figura 48. Comparación de concentraciones promedio en función del tiempo utilizando disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws) como medio de curado



Fuente: elaboración propia (tablas XXXVI, XLI, XLIV, XLV, L y LIII).

4.3. Análisis de varianza y evaluación de significancia en la variación del medio de curado

Tabla XIII. Resultados del análisis de varianza para el esfuerzo mecánico a la compresión de los especímenes de cemento en función del tiempo y la variación del medio de curado con tres repeticiones

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	$F_{(1-\alpha=0,9)}$	Hipótesis nula (H^0)
Factor 1: tiempo (d)	11 497 023,108	4	2 874 255,777	6,768	2,806	Rechazada
Factor 2: variación del medio de curado	3 444 306,763	2	1 377 722,705	3,244	3,113	Rechazada
Interacción entre factores	39 004 420,940	8	32 861,542	0,077	2,383	Aceptada
Aleatoriedad	3 787 788,968	30	424 697,347			
Total	57 733 539,779	44				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

Tabla XIV. Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones calcio [Ca^{2+}] en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	$F_{(1-\alpha=0,9)}$	Hipótesis nula (H^0)
Factor 1: tiempo (d)	3,8278	9	0,425	2,312	1,738	Rechazada
Factor 2: variación del medio de curado	4,7835	2	2,392	13,000	2,393	Rechazada
Interacción entre factores	1,9732	18	0,110	0,596	1,564	Aceptada
Aleatoriedad	11,0391	60	0,184			
Total	10,5845	89				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

Tabla XV. **Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones magnesio [Mg²⁺] en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones**

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	F _(1-α=0.9)	Hipótesis nula (H ⁰)
Factor 1: tiempo (d)	12,1861	9	1,354	2,202	1,738	Rechazada
Factor 2: variación del medio de curado	19,8443	2	9,922	16,135	2,393	Rechazada
Interacción entre factores	3,5598	18	0,198	0,322	1,564	Aceptada
Aleatoriedad	36,8968	60	0,615			
Total	35,5902	89				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

Tabla XVI. **Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones aluminio [Al³⁺] en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones**

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	F _(1-α=0.9)	Hipótesis nula (H ⁰)
Factor 1: tiempo (d)	0,0001	9	5,9184E-06	0,814	1,738	Aceptada
Factor 2: variación del medio de curado	0,0000	2	1,1583E-05	1,594	2,393	Aceptada
Interacción entre factores	0,0002	18	9,0211E-06	1,241	1,564	Aceptada
Aleatoriedad	0,0004	60	7,2682E-06			
Total	0,0002	89				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

Tabla XVII. **Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones carbonato $[\text{CO}_3^{2-}]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones**

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	$F_{(1-\alpha=0.9)}$	Hipótesis nula (H^0)
Factor 1: tiempo (d)	278,0839	9	30,898	1,083	1,738	Aceptada
Factor 2: variación del medio de curado	1 284,7045	2	642,352	22,518	2,393	Rechazada
Interacción entre factores	129,5344	18	7,196	0,252	1,564	Aceptada
Aleatoriedad	1 711,5495	60	28,526			
Total	1 692,3228	89				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

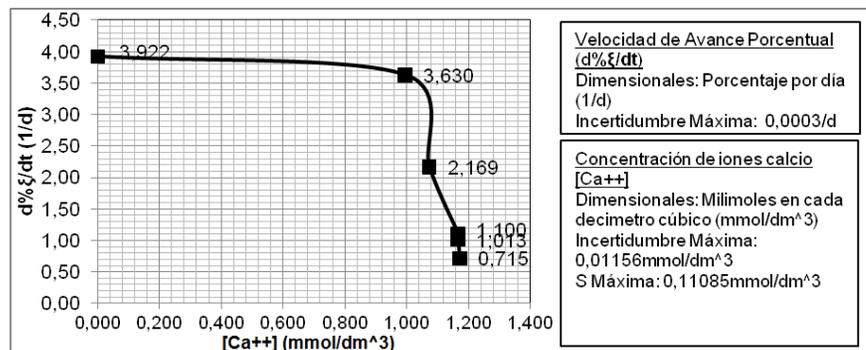
Tabla XVIII. **Resultados del análisis de varianza para la concentración de iones carbonato $[\text{HCO}_3^-]$ en el medio de curado, en función del tiempo y la variación inicial de dicho medio, con tres repeticiones**

Elemento	Variación	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	$F_{(1-\alpha=0.9)}$	Hipótesis nula (H^0)
Factor 1: tiempo (d)	222,6612	9	24,740	1,765	1,738	Rechazada
Factor 2: variación del medio de curado	546,1146	2	273,057	19,484	2,393	Rechazada
Interacción entre factores	61,6375	18	3,424	0,244	1,564	Aceptada
Aleatoriedad	840,8504	60	14,014			
Total	830,4133	89				

Fuente: elaboración propia (cálculos de análisis de varianza de dos factores con repetición).

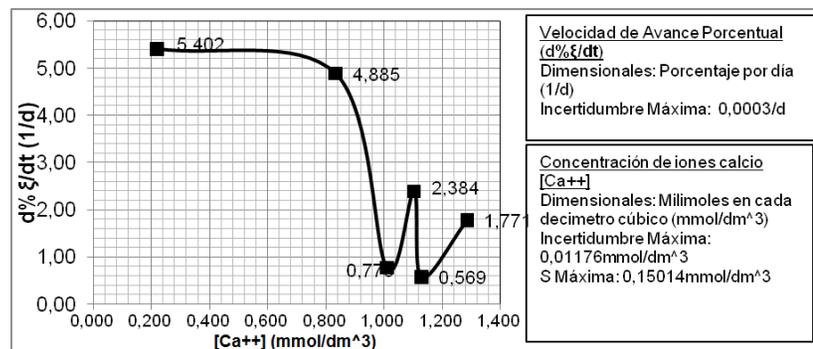
4.4. Cinética del proceso de curado y su relación con la composición del medio

Figura 49. Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)



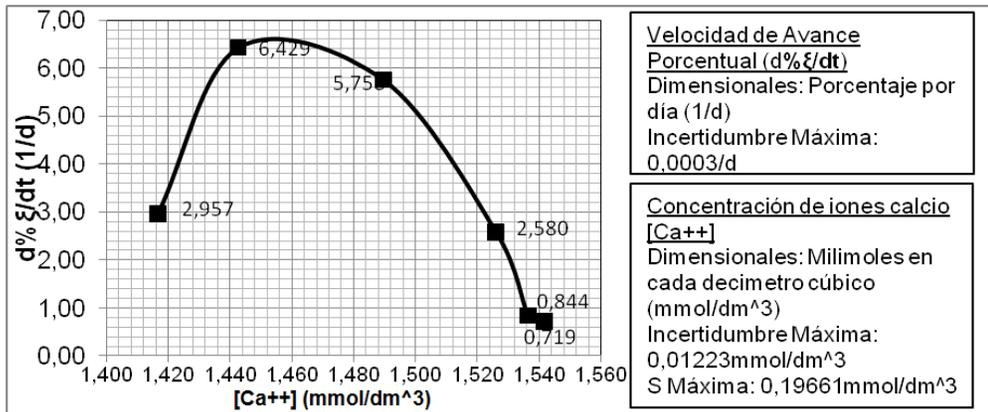
Fuente: elaboración propia (tablas XXXIX y LVII).

Figura 50. Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc)



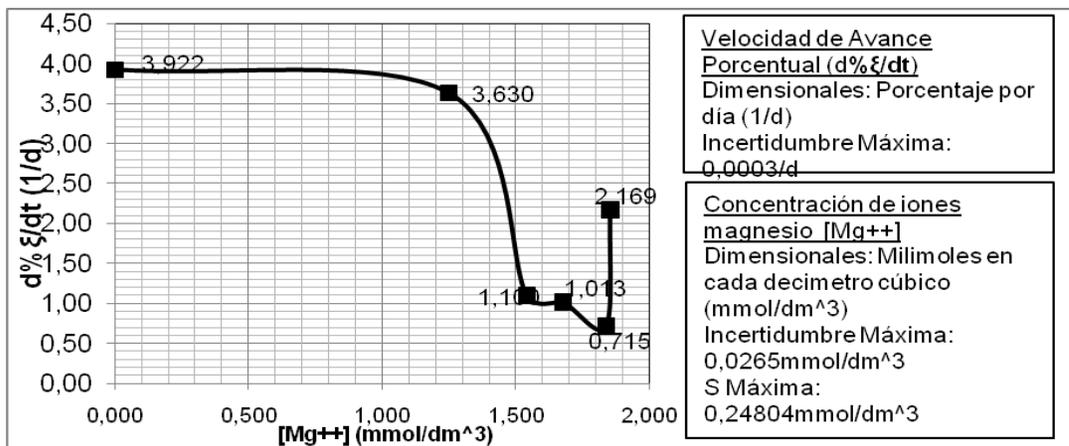
Fuente: elaboración propia (tablas XL y LVII).

Figura 51. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Ca⁺⁺ en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de Ca(OH)₂ (Wd)**



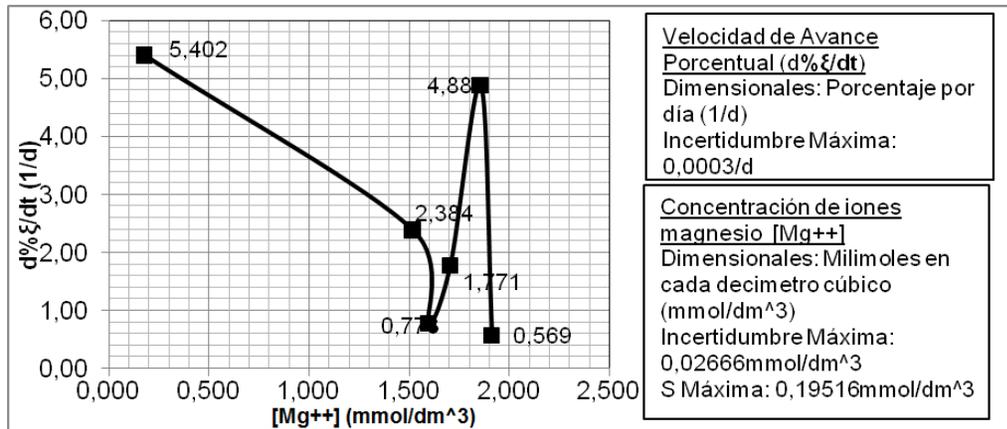
Fuente: elaboración propia (tablas XLI y LVII).

Figura 52. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg⁺⁺ en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



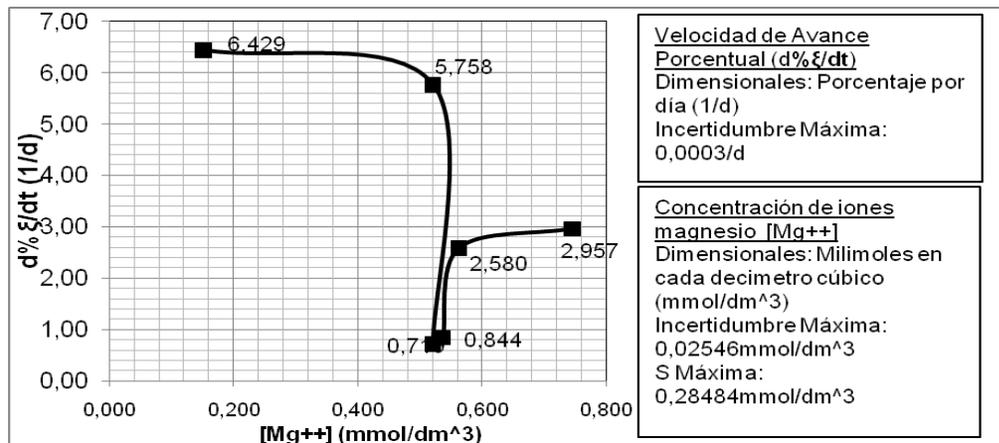
Fuente: elaboración propia (tablas XLII y LVII).

Figura 53. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg⁺⁺ en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc)**



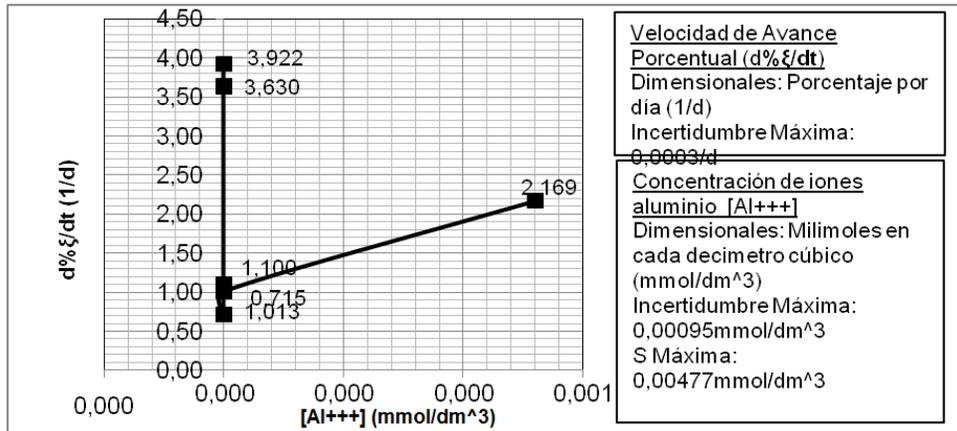
Fuente: elaboración propia (tabla XLIII y LVII).

Figura 54. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Mg⁺⁺ en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de Ca(OH)₂ (Wd)**



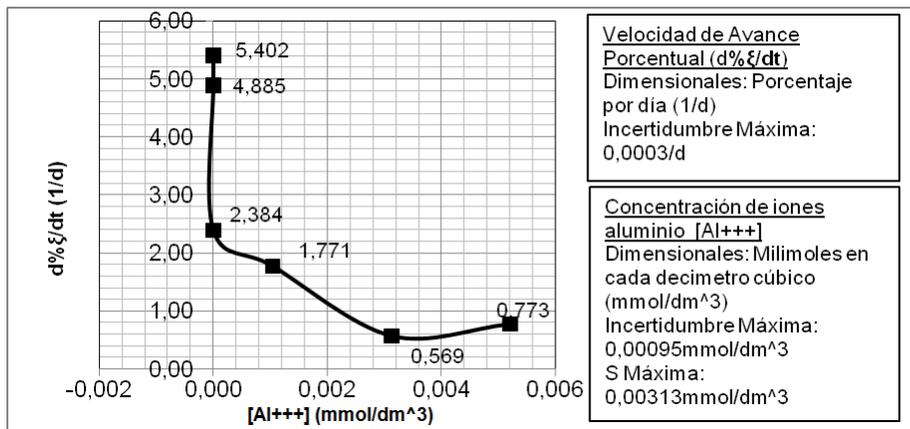
Fuente: elaboración propia (tabla XLIV y LVII).

Figura 55. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



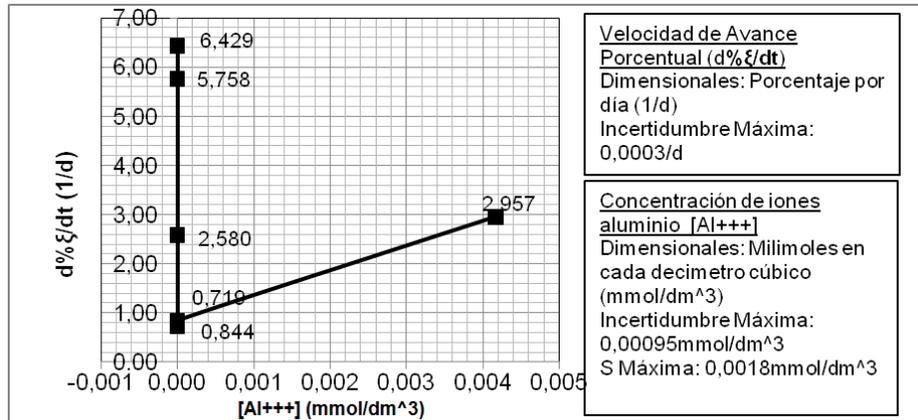
Fuente: elaboración propia (tabla XLV y LVII).

Figura 56. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc)**



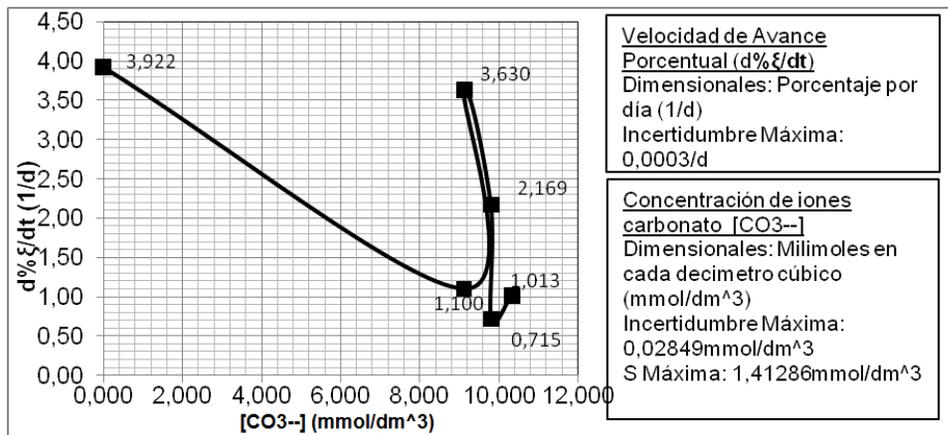
Fuente: elaboración propia (tabla XLVI y LVII).

Figura 57. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de Al^{+++} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Wd)**



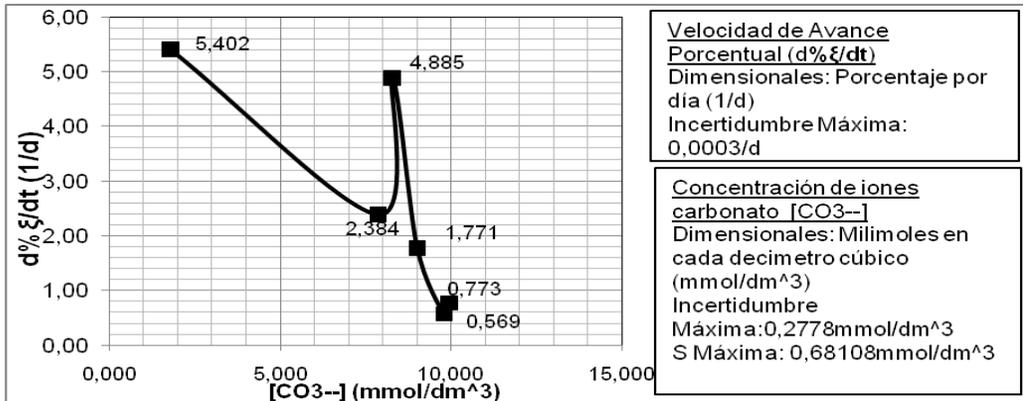
Fuente: elaboración propia (tabla XLVII y LVII).

Figura 58. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



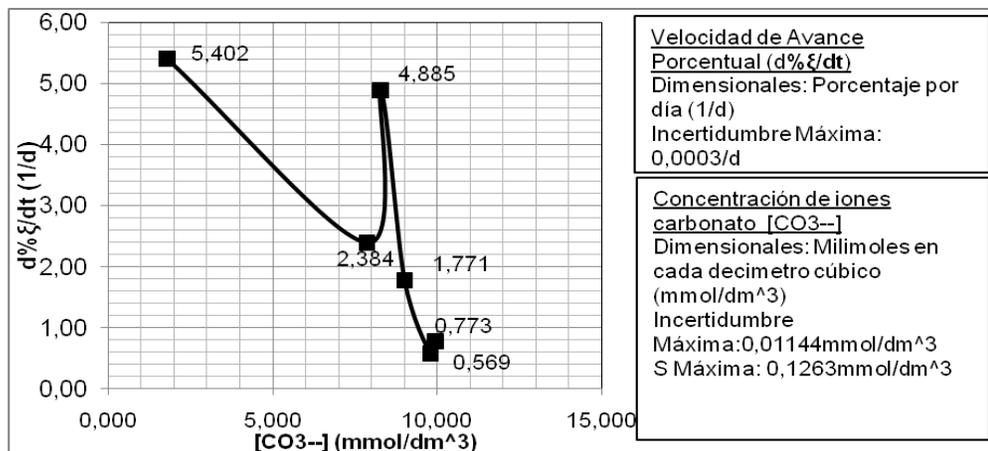
Fuente: elaboración propia (tabla XLVIII y LVII).

Figura 59. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: agua potable (W_c)**



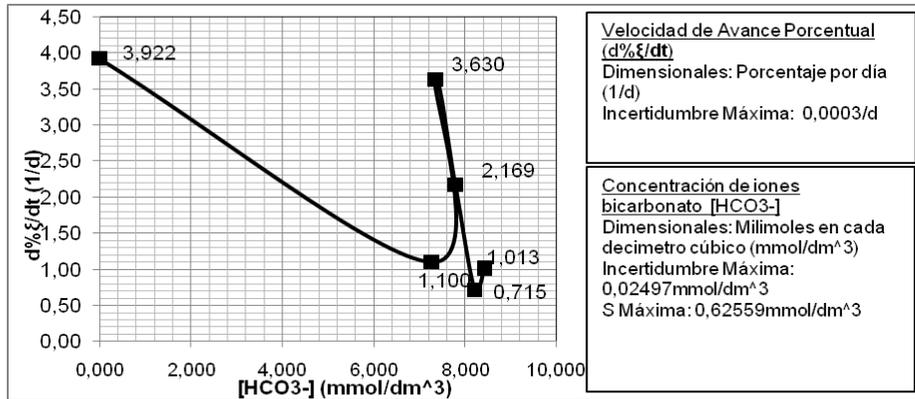
Fuente: elaboración propia (tabla XLIX y LVII).

Figura 60. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de CO_3^{--} en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (W_d)**



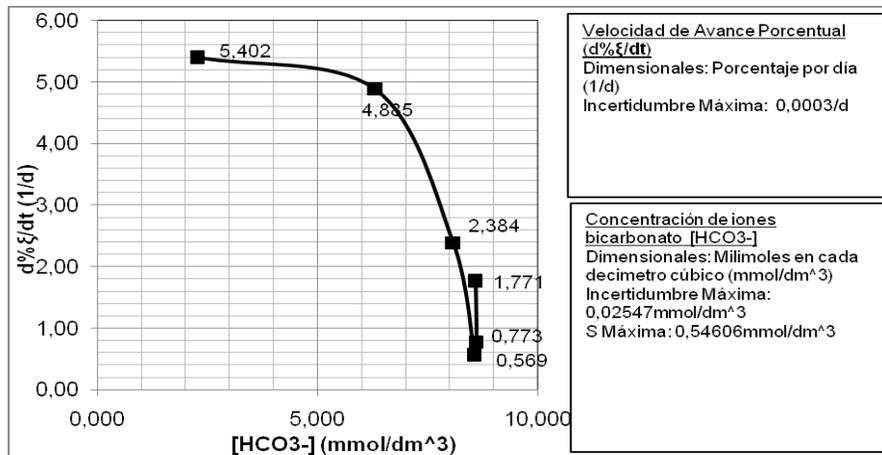
Fuente: elaboración propia (tabla L y LVII).

Figura 61. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



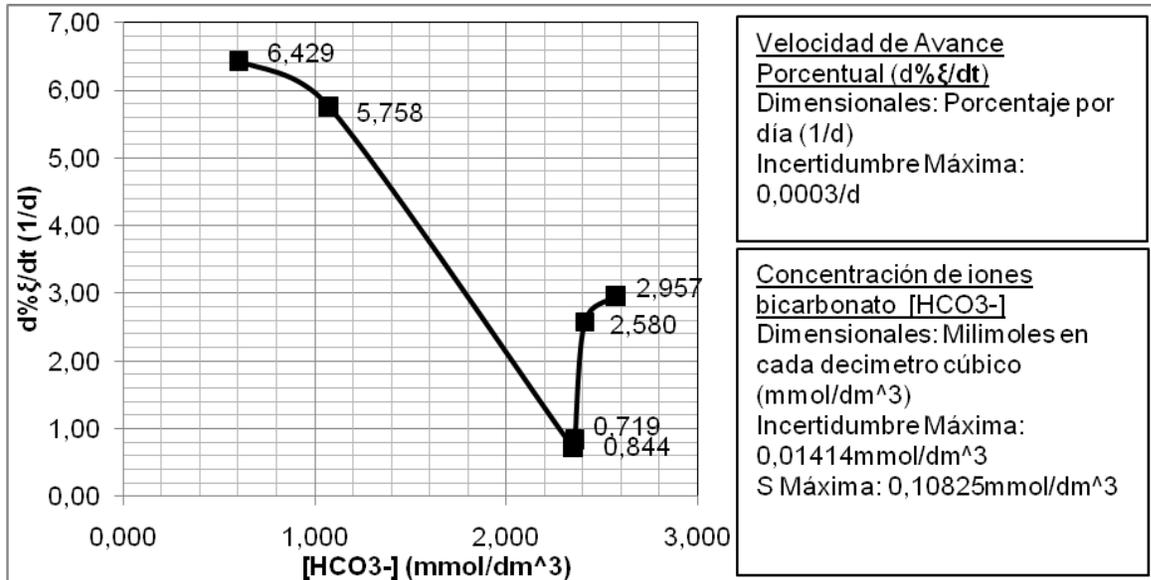
Fuente: elaboración propia (tabla LI y LVII).

Figura 62. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: agua potable (Wc)**



Fuente: elaboración propia (tabla LII y LVII).

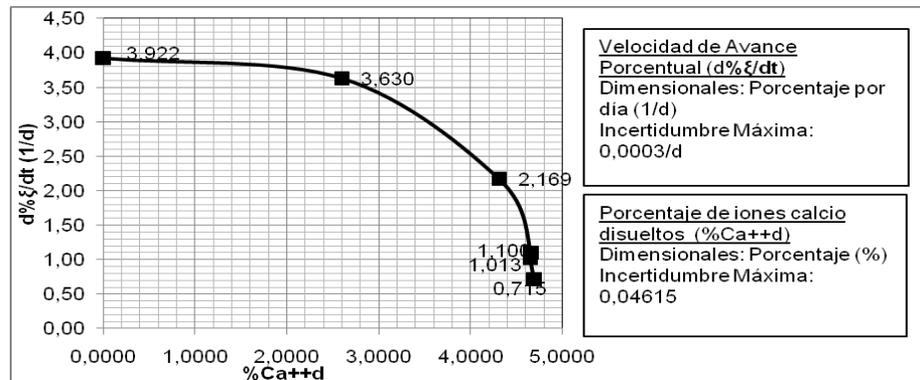
Figura 63. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y la concentración de HCO_3^- en el medio de curado, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd)**



Fuente: elaboración propia (tabla LIII y LVII).

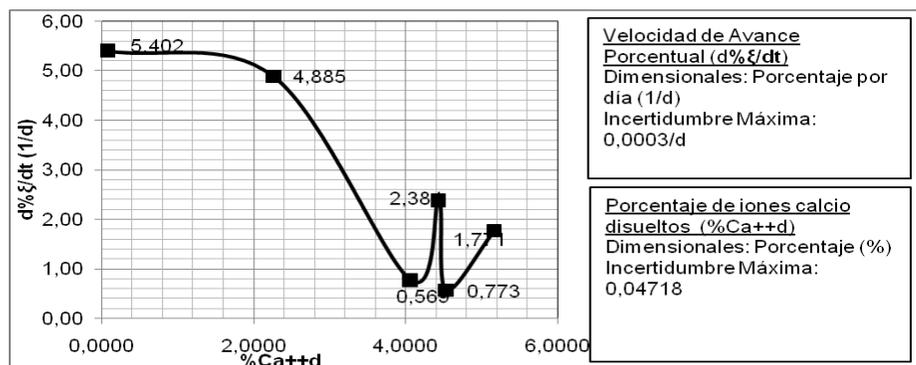
4.4. Efecto de la solubilidad en tres especies (Ca^{++} , Mg^{++} y CO_3^{--})

Figura 64. Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)



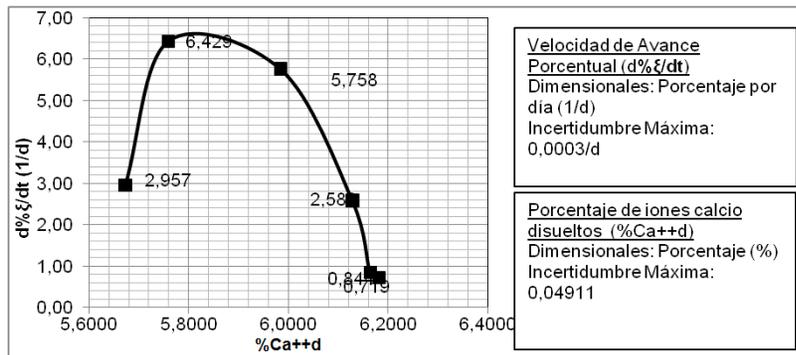
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LIX).

Figura 65. Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc)



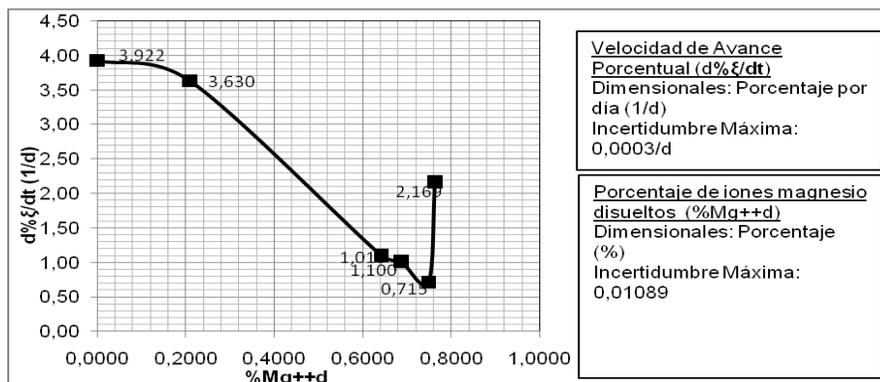
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LIX).

Figura 66. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Ca^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd)**



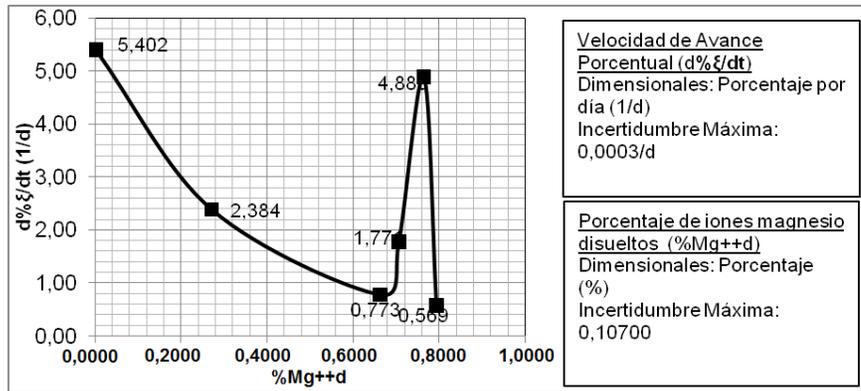
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LIX).

Figura 67. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg^{++} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



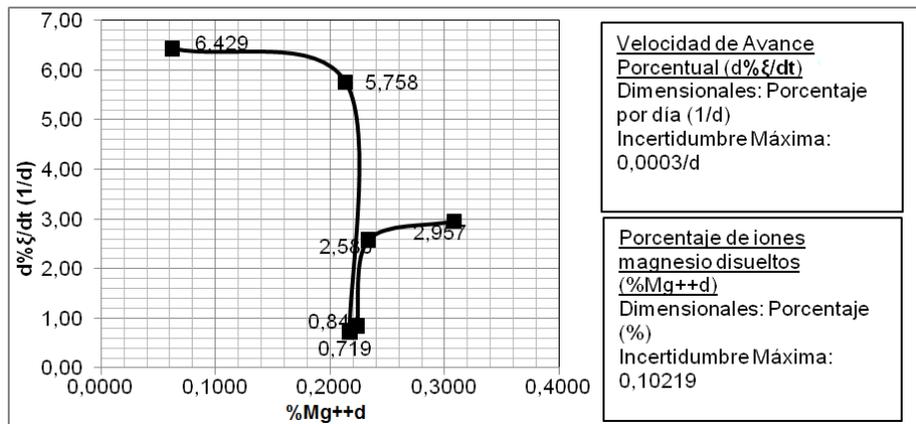
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LX).

Figura 68. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg⁺⁺ disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc)**



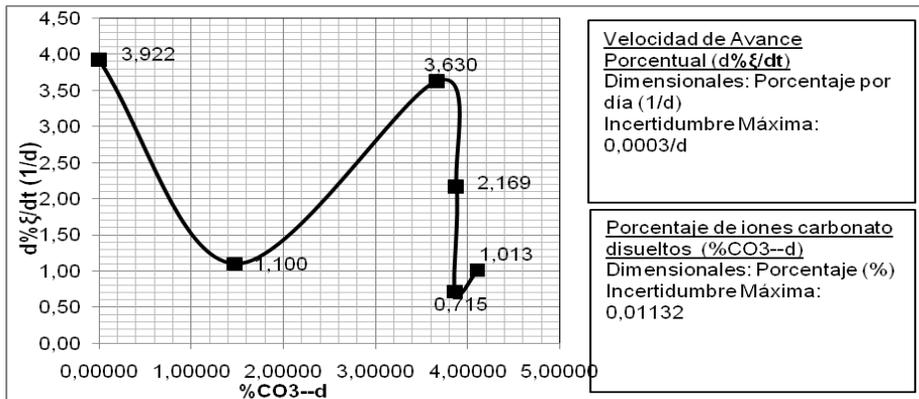
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LX).

Figura 69. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de Mg⁺⁺ disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de Ca(OH)₂ (Wd)**



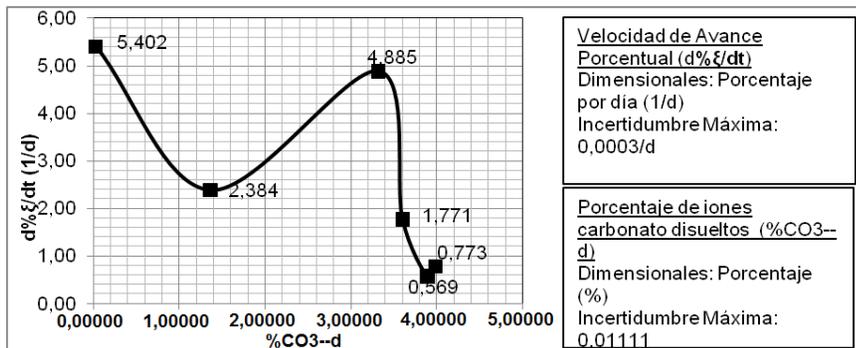
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LX).

Figura 70. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^- disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua desmineralizada (Wd)**



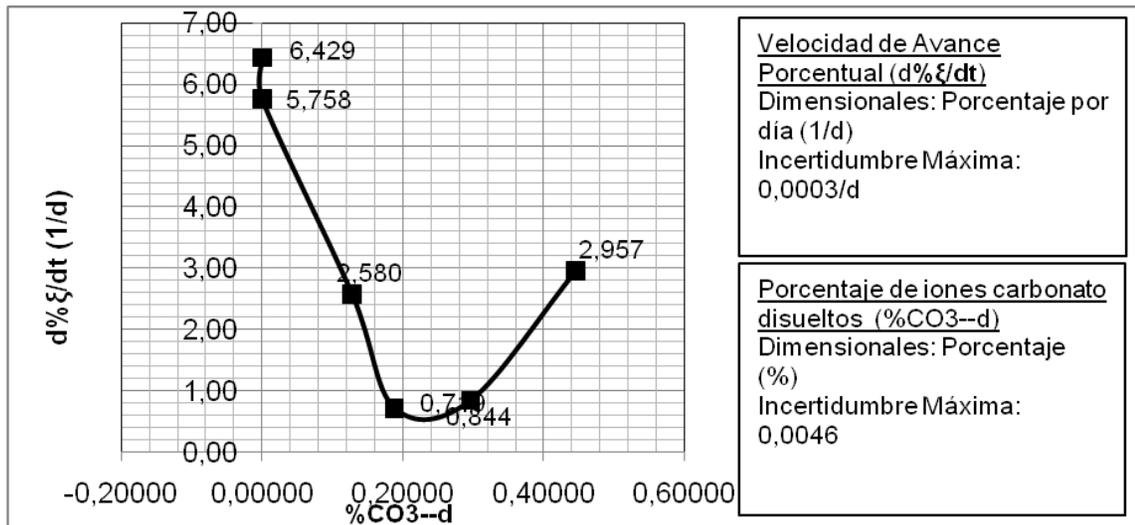
Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LXI).

Figura 71. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^- disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: agua potable (Wc)**



Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LXI).

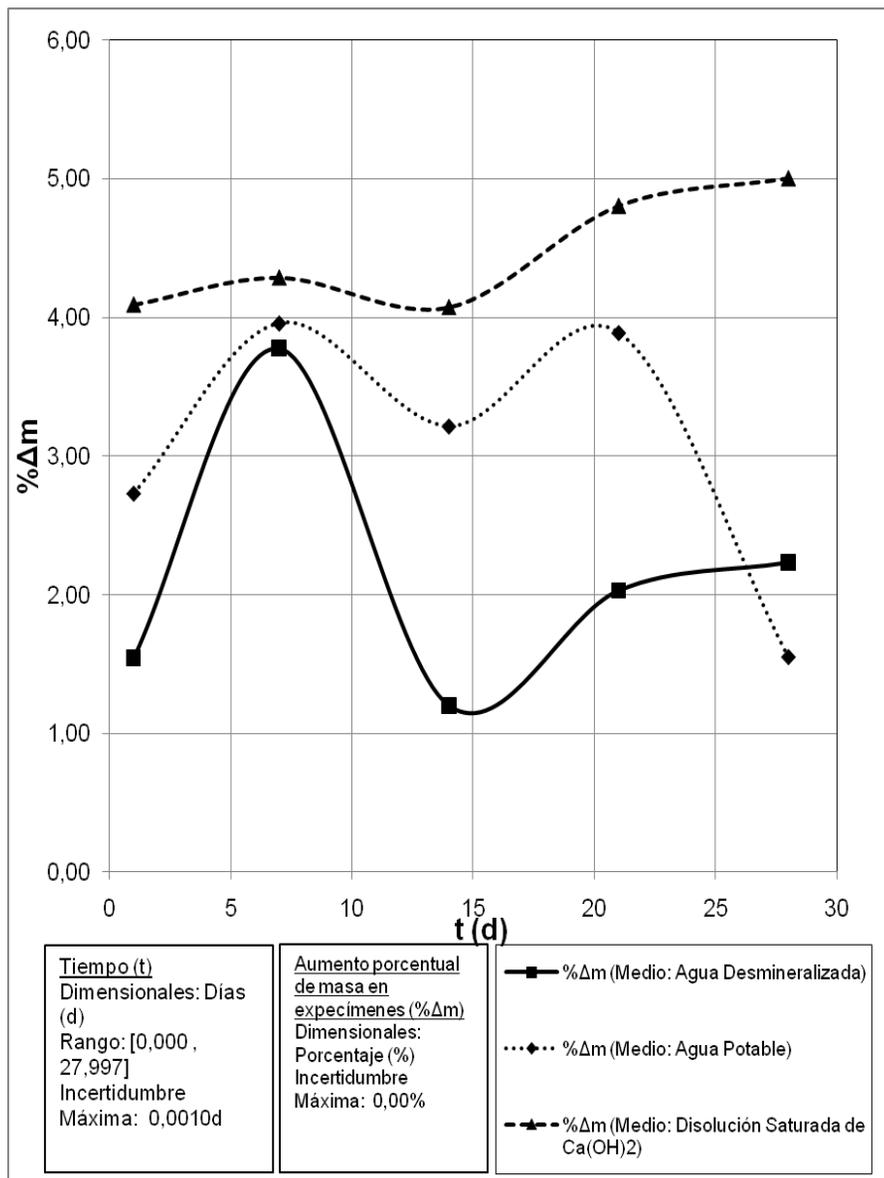
Figura 72. **Relación entre la velocidad de avance porcentual y el porcentaje de CO_3^{--} disuelto en el medio de curado respecto a su solubilidad total, inicialmente: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wd)**



Fuente: elaboración propia (tabla LVII y LXI).

4.5. Comportamiento de la masa de los especímenes

Figura 73. **Diferencia de masa porcentual promedio en función del tiempo para los especímenes curados en Wd, Wc y Ws**



Fuente: elaboración propia (tabla XXV, XXVI y XXVII).

4.6. Modelo cinético propuesto

Tabla XIX. Modelos propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando agua desmineralizada (Wd) como medio inicial de curado

Variable Dependiente		Variable Independiente		Modelo	R ²	Fuente
Símbolo	Dimensionales	Símbolo	Dimensionales			
d%ξ/dt	1/d	[Ca ⁺⁺]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = \frac{[Ca^{++}]}{0,002434 \cdot e^{7,2381 \cdot [Ca^{++}]}}$	0,9969	Figura 49
		[Mg ⁺⁺]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = \frac{[Mg^{++}]}{0,0003766 \cdot e^{4,8507 \cdot [Mg^{++}]}}$	0,9515	Figura 52
		[CO ₃ ⁻⁻]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = \frac{[CO_3^{--}]}{0,0002652 \cdot e^{1,0503 \cdot [CO_3^{--}]}}$	0,9832	Figura 58
		[HCO ₃ ⁻]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = \frac{[HCO_3^-]}{0,0002687 \cdot e^{1,268 \cdot [HCO_3^-]}}$	0,9848	Figura 61
Modelo global						
$\frac{d\% \xi}{dt} = \left[\left(\frac{[Ca^{++}]}{0,0002434 \cdot e^{7,2381 \cdot [Ca^{++}]}} \right) \left(\frac{[Mg^{++}]}{0,0003766 \cdot e^{4,8507 \cdot [Mg^{++}]}} \right) \left(\frac{[CO_3^{--}]}{0,0002652 \cdot e^{1,0503 \cdot [CO_3^{--}]}} \right) \left(\frac{[HCO_3^-]}{0,0002687 \cdot e^{1,268 \cdot [HCO_3^-]}} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$						

Rango de validez: [1 , 28] días de curado

Fuente: elaboración propia (tabla XIX).

Tabla XX. Modelos parciales propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando agua potable (Wc) como medio inicial de curado

Variable Dependiente		Variable Independiente		Modelo	R ²	Fuente
Símbolo	Dimensionales	Símbolo	Dimensionales			
d%ξ/dt	1/d	[Ca ⁺⁺]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = \ln \left(8,599 \cdot e^{3[Ca^{++}]} - 557,47 \cdot e^{2[Ca^{++}]} + 1116,3 \cdot e^{[Ca^{++}]} + 454,69 \right)$	0,9650	Figura 50
		[Mg ⁺⁺]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = [Mg^{++}] \cdot \ln \left(0,0 \cdot 10^{11} \cdot e^{2[Mg^{++}]} + 10^{13} \cdot e^{[Mg^{++}]} + 3,0 \cdot 10^{13} \right)$	0,9967	Figura 53
		[CO ₃ ²⁻]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = 3,5864 \cdot [CO_3^{2-}] - 0,37 \cdot [CO_3^{2-}]^2$	0,9705	Figura 59
		[HCO ₃ ⁻]	mmol/dm ³	$\frac{d\% \xi}{dt} = 3,1363 \cdot [HCO_3^-] - 0,354 \cdot [HCO_3^-]^2$	0,9919	Figura 60
Modelo global						
$\frac{d\% \xi}{dt} = \left[\frac{[Mg^{++}] \cdot \ln \left(8,599 \cdot e^{3[Ca^{++}]} - 557,47 \cdot e^{2[Ca^{++}]} + 1116,3 \cdot e^{[Ca^{++}]} + 454,69 + 9,0 \cdot 10^{11} \cdot e^{2[Mg^{++}]} + 10^{13} \cdot e^{[Mg^{++}]} + 3,0 \cdot 10^{13} \right)}{(3,5864 \cdot [CO_3^{2-}] - 0,37 \cdot [CO_3^{2-}]^2) \cdot (3,1363 \cdot [HCO_3^-] - 0,354 \cdot [HCO_3^-]^2)} \right]^{\frac{1}{4}}$						

Rango de validez: [1 , 28] días de curado

Fuente: elaboración propia (tabla XX).

Tabla XXI. **Modelos parciales propuestos para el proceso de curado del sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica – agua, utilizando disolución saturada de Ca(OH)₂ (Ws) como medio inicial de curado**

Variable Dependiente		Variable Independiente		Modelo	R ²	Fuente
Símbolo	Dimensionales	Símbolo	Dimensionales			
d%ξ/dt	1/d	[Ca ⁺⁺]	mmol/dm ₃	$\frac{d\% \xi}{dt} = 8129,8[Ca^{++}]^3 - 37287 \cdot [Ca^{++}]^2 + 56895[Ca^{++}] - 28879$	0,9930	Figura 51
		[Mg ⁺⁺]	mmol/dm ₃	$\frac{d\% \xi}{dt} = \ln \left(\frac{113,78}{[Mg^{++}]} - 130,69 \right)$	0,9874	Figura 53
		[CO ₃ ⁻⁻]	mmol/dm ₃	$\frac{d\% \xi}{dt} = \frac{11,469[CO_3^{--}]^3 - 15,313 \cdot [CO_3^{--}]^2 + 5,7778 \cdot [CO_3^{--}] + 0,01}{[CO_3^{--}]}$	0,9911	Figura 59
		[HCO ₃ ⁻]	mmol/dm ₃	$\frac{d\% \xi}{dt} = \ln \left(1,1363 \cdot e^{-2 \cdot [HCO_3^-]} - 0,0381 \cdot e^{[HCO_3^-]} + 11,629 \right)$	0,9379	Figura 62
Modelo global						
$\frac{d\% \xi}{dt} = \left[\frac{\left(129,8[Ca^{++}]^3 - 37287[Ca^{++}]^2 + 56895[Ca^{++}] - 28879 \right) \cdot \ln \left(\frac{113,78}{[Mg^{++}]} - 130,69 \right)}{1} \cdot \left(\frac{11,469[CO_3^{--}]^3 - 15,313[CO_3^{--}]^2 + 5,7778[CO_3^{--}] + 0,01}{[CO_3^{--}]} \right) \cdot \left(1,1363 \cdot e^{-2 \cdot [HCO_3^-]} - 0,0381 \cdot e^{[HCO_3^-]} + 11,629 \right) \right]^{\frac{1}{4}}$						

Rango de validez: [1 , 28] días de curado

Fuente: elaboración propia (tabla XXI).

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado al sistema: cemento portland UGC4000 – arena sílica, en tres medios de curado a una temperatura promedio de 23,2°C y una relación agua/cemento de 0,49, permite el siguiente análisis en función de los objetivos específicos:

5.1. Respecto al esfuerzo mecánico a la compresión

El comportamiento del esfuerzo máximo de compresión en función del tiempo (figura 31) demuestra visualmente la existencia de una diferencia gradual en la resistencia del material evaluado, para los tres medios de curado preparados, presentando un mayor valor al final del proceso en el sistema curado con una disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, seguido por el correspondiente con agua potable, y un valor mínimo para el sistema curado con agua desmineralizada. Según lo planteado en la sección de marco teórico, esto se explica combinando los modelos asociados a los fenómenos que conforman el proceso complejo de hidratación del cemento.

En primer lugar, debe resaltarse que para el proceso previo de fraguado, el agua de composición se identifica como agua desmineralizada, debido al interés de mantener una concentración inicial constante en los especímenes de cemento consistente con los requerimientos en la norma ASTM C 109/C 109M – 05, proceso que dura aproximadamente 24 horas.

Cuando concluye el fraguado y se dispone a curar cada espécimen, este posee cierta humedad, que por razones obvias, se sabe que es una disolución sobre-saturada de los minerales de composición, la cual cubre las superficies expuestas. Por tanto, cuando la muestra entra en contacto con el medio de curado, los primeros minerales que migran son los que componen la disolución saturada antes mencionada.

En el caso del medio formado por disolución saturada, esta migración ocurre debido a los diferenciales de temperatura y densidad que posiblemente prevalecen contra el diferencial de concentración, que respectivamente se considera nulo, fenómeno asociado a la convección natural. Dicho efecto se confirma con la formación de una capa cristalina en la superficie de estos especímenes (curados con W_s), la cual es producto de una sobresaturación en el medio.

Comparando los 3 medios de curado, la etapa inicial (las primeras 24 horas del proceso) el comportamiento prácticamente es el mismo, como se observa en la figura 31 y respectivamente en las figuras 32, 33 y 34 para el avance porcentual, el cual expresa el grado de alcance de una resistencia de referencia (en este caso 4 000,0 psi). Dicho avance presenta un máximo valor de 63,15%, de la resistencia que según el estándar establecido debería alcanzar.

Luego de esto, entre las 24 horas y los primeros 7 días de curado, comienza la verdadera extracción de partículas provenientes del material sólido en los medios no saturados (W_d y W_c) hasta su inminente saturación, la cual, aparentemente ocurre entre los 14 y 21 días donde se observa un aumento de la velocidad de curado, como puede verse en las figuras 35 y 36.

Figura 74. **Capa cristalina sobre especímenes curados con W_s , luego de 24 horas**



Fuente: elaboración propia (tomada en laboratorio de fisicoquímica, edificio T5, USAC).

En el caso del medio saturado (W_s) se observa una disminución de velocidad de mayor magnitud, debido a su mayor velocidad de consumo de componentes hidratables pero luego también presenta un aumento de velocidad. Dicho cambio en la pendiente de las gráficas se puede comparar en la figura 38, notándose el desfase, lo que indica que la presencia de partículas al inicio del proceso, retarda el inicio de la segunda etapa de aceleración del curado del sistema.

Como se estudió anteriormente, los hidratos complejos (C-S-H) poseen una forma alargada y crecen en forma de agujas y el Ca(OH)_2 cristalizado tiene una forma hexagonal (véase figura), estructuras que gradualmente le confieren su resistencia al cemento, entre otras propiedades, y que requieren de una cantidad específica de iones reactivos para su formación a una velocidad específica. Es lo que explica microscópicamente la diferencia entre W_d , W_c y W_s .

Continuando el análisis, los medios no saturados (W_d y W_c) presentan un nuevo descenso en la tasa de avance de curado al finalizar el período de monitoreo, cosa que no ocurre con el medio saturado (W_s), debido a que la composición del sustrato de hidratación es preservada en este último de una manera más afectiva que con los otros dos medios (W_d y W_c), los cuales también presentan una diferencia entre sí.

Los hechos expuestos hasta aquí, demuestran una consistencia entre las figuras 31 hasta la figura 37, y la comparación en la figura 38 da la pauta para sostener que existe una diferencia medible en el uso de los diferentes medios de curado, al observar los posibles comportamientos de velocidad en el desarrollo del proceso.

5.2. Respecto a la variación en las concentraciones de los iones referidos

En las figuras 39 a la 45, se hacen comparaciones del desarrollo de la composición del medio de curado en función del tiempo, lo cual permite confirmar el comportamiento descrito líneas arriba.

Para empezar, los iones de calcio (Ca^{++}), debido a su abundancia relativa en el cemento (véase tabla I), se considera que su presencia tiene un efecto más notorio sobre el proceso de curado. En el caso de los medios no saturados, la migración inicial, que prácticamente acontece durante el primer día, lleva su concentración al valor que prácticamente conserva durante los 28 días del estudio. Dicho valor es menor al valor del medio saturado, lo que indica una limitación en dicho fenómeno debido a la presencia de otras especies migratorias.

En el caso del magnesio (Mg^{++}), el comportamiento es similar, mostrándose una diferencia marcada en el medio saturado (W_s), donde existe migración pero en una proporción casi un 60% menor al de los otros medios, en los cuales se observa una marcada oscilación, atribuible a un intercambio iónico que ocasiona un flujo en ambas vías, efecto que en el caso del calcio es menos perceptible.

Para analizar los iones de aluminio, el método experimental utilizado no posee la sensibilidad necesaria para su detección, por tanto en este caso los resultados no son concluyentes, salvo que permiten enunciar, que la migración de aluminio es relativamente insignificante ocasionando un efecto igualmente insignificante sobre la resistencia de los especímenes de cemento, lo cual se atribuye a su mínima proporción en la composición del cemento (véase tabla I).

Las dos especies aniónicas estudiadas (carbonatos y bicarbonatos), presentan un comportamiento similar entre sí, especialmente en los medios no saturados (véanse figuras 42 y 43), lo cual es obvio si se sabe que ambas especies están conjugadas y su proporción depende del grado de disociación, el cual es regulado por el potencial ácido del medio (pH), que también ocurre con la solubilidad, como se explica en la sección 2.4.

Es por esto que debe observarse la figura 44, donde se muestra que el pH de los medios no saturados llegó a un valor constante aproximadamente a los 7 días de iniciado el proceso, en el caso del medio saturado, el pH máximo fue inducido ya que la sal de saturación es un álcali.

El comportamiento del pH descrito en la figura 44, justifica una mayor proporción de carbonatos que de bicarbonatos durante el proceso, ya que el pH promedio se mantiene en un valor por encima del potencial de la constante de disociación respectiva del sistema $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$.

Por tanto, la suma de todos los efectos asociados con la migración y equilibrio de las partículas estudiadas conlleva a un modelo complejo, cuya cuantificación requiere de un aislamiento en las variables.

Las figuras 46, 47 y 48, muestran las razones circunstanciales de los diferentes comportamientos en el avance del proceso de curado, pues es evidente que la presencia de partículas de composición en el medio de curado, es afectada por la composición inicial del mismo, factor que igualmente afecta la resistencia del espécimen sumergido en el.

Como se expresó detalladamente líneas atrás, toda oscilación en la composición se atribuye a un intercambio iónico entre las especies, que puede llegar a revertir la migración, pero esto implica la sustitución de los componentes, modificando de esta manera la composición del sustrato de la hidratación y quizá sustrayendo algunos productos de la misma hidratación ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ y C_3AH_6).

Además de darle a la hidratación un medio propicio, saturar el medio de curado con Ca(OH)_2 también produce un efecto de especie en común, ya que el Ca(OH)_2 es también un producto del proceso de fraguado y curado, encontrándose en forma de cristales hexagonales, que también colaboran en la resistencia y en dado caso pueden servir de sustrato para la formación de otros hidratos principales, ya que el proceso de hidratación nunca se detiene.

5.3. Respecto a la significancia de las variaciones del medio de curado

Continuando el estudio, se hizo uso del análisis de varianza como herramienta estadística para comprobar la significancia del efecto de los factores o variables de control sobre las variables de medición (respuesta), a través de la prueba de la distribución de Fisher y un 90% de confiabilidad. Dicha prueba se realizó, en primer lugar, con los valores del esfuerzo a la compresión siendo los factores sobre ellos: el tiempo y la variación en el medio de curado, además de la posible interacción entre ambos factores que el método introduce.

Para estos tres elementos se determinó la variación y se comparó con la variación aleatoria, que representa todos los elementos que están fuera de control en el experimento. La hipótesis nula (H^0) consiste en postular que la variación de la magnitud respuesta es independiente del factor evaluado, consecuentemente rechazar dicha hipótesis permite sostener que la variación en el factor tiene un efecto significativo sobre la respuesta.

Por tanto los resultados de la tabla X indican que, el efecto del tiempo sobre la resistencia de los especímenes es significativo y que la variación del medio de curado produce una diferencia significativa en el desarrollo de la estructura interna del cemento y por consiguiente en su resistencia a la compresión, cumpliendo así con el tercer objetivo específico de la investigación. Sin embargo, la interacción entre la variación del medio de curado y el tiempo no presenta un efecto significativo, obviamente debido a que dicha composición también cambia con el tiempo, sin un patrón constante.

Debido a esto último fue aplicando el análisis de varianza para la composición del medio como variable respuesta, para cada especie respectivamente. Se determinó, como lo muestran las tablas XI y XII, que el tiempo y la variación del medio tienen un efecto significativo sobre la concentración de calcio y magnesio en el mismo medio, lo que implica que la cinética de la migración si depende de la composición inicial.

En el caso del aluminio (tabla XIII), su concentración es estadísticamente independiente, al aceptarse la hipótesis nula en los tres casos. Lo cual es consistente con el hecho de que no se encontró una tendencia que permita pensar que la migración de aluminio tiene un efecto sobre la resistencia del cemento.

El análisis realizado con los iones carbonato (tabla XIV) demuestra un efecto nulo por parte de la variación inicial del medio, lo que podría correlacionarse con el efecto del pH que se mencionó antes, ya que en el caso de los bicarbonatos (tabla XV) si existe un efecto significativo.

Por lo tanto, el análisis gráfico y el análisis estadístico demuestran que si existe una diferencia significativa en el proceso de curado utilizando una composición inicial diferente en el medio (W_d , W_c y W_s) donde se lleva a cabo dicho proceso.

Esto último se confirma al observar la figura 73, en la cual se muestra la diferencia de peso promedio de cada espécimen antes y después de su respectivo período de curado, mostrando las mayores diferencias los que fueron curados con W_s .

5.4. Respecto al modelo cinético

Relacionar los valores encontrados para la velocidad de avance del proceso de curado, con las concentraciones de las especies encontradas en el medio acuoso donde dicho proceso se realizó, no es cosa fácil, debido a que ambas variables son dependientes de las variables de control, así es que los valores de ambas son obtenidos a partir del fenómeno en estudio. Fue por esto que los datos de concentraciones fueron reordenados y coordinados con los valores respectivos de velocidad, y graficados (véanse figuras 49 a la 63) de tal manera que fuera posible observar la tendencia y poder construir eventualmente un modelo matemático en cada una.

El efecto de los iones calcio sobre la velocidad de curado (figuras 49 a la 51) varía significativamente, específicamente en W_s . En caso de los iones magnesio (figuras 52 a la 54) la tendencia es similar en W_d , pero cambia en forma importante para W_c y W_s , esto debido a que su concentración inicial en estos casos es prácticamente nula.

Como se dijo antes, el efecto de los iones aluminio (figuras 55 a la 57), no es suficientemente perceptible para detectarlo con el método utilizado. En el caso de los iones carbonato y bicarbonato (figuras 58 a la 63), su tendencia es casi la misma, presentando una importante oscilación cuando la concentración es alrededor de $10,0 \text{ mmol/dm}^3$.

Al evaluar el efecto de la solubilidad sobre las tendencias anteriormente expuestas, resulta significativo el efecto en el comportamiento de los iones calcio, esto debido a su abundancia y su precipitada saturación (véanse figuras 64 a la 72).

La construcción del modelo cinético del proceso se realizó con la finalidad de esbozar una predicción del comportamiento de la velocidad de curado (d%) respecto a la composición de su medio entre el tiempo inicial y el final de los 28 días establecidos.

La tabla XIX muestra un efecto homogéneo por parte de las cuatro especies implicadas: Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{-} y HCO_3^{-} , para especímenes curados con Wd, de las cuales fue eliminado el aluminio al observar su comportamiento en las figuras 55, 56 y 57, además de la limitada detección del método. El efecto antes mencionado prueba que la migración de las partículas, afecta la velocidad del proceso.

En el caso de los especímenes curados con Wc y Wd, los aportes de cada especie muestran modelos diferentes y cada vez más complejos, lo cual indica que la presencia de especies comunes en el medio de curado modifica el mecanismo del curado del cemento.

CONCLUSIONES

1. El sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, alcanza una resistencia a la compresión de mayor magnitud, después de 28 días con una temperatura promedio de 23,2°C y una proporción agua/cemento de 0,49, al ser curado (hidratado) utilizando una disolución saturada de hidróxido de calcio, en comparación al proceso si se realiza con agua potable o agua desmineralizada.
2. En las primeras 24 horas de iniciado el proceso de curado el sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, alcanza la misma resistencia para los tres medios de curado.
3. El sistema cemento portland UGC4000 – arena sílica, alcanza un porcentaje de avance máximo de un 63,15% curado con disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a una temperatura promedio de 23,2°C y una proporción agua/cemento de 0,49.
4. El sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, alcanza una resistencia a la compresión de mayor magnitud, después de 28 días con una temperatura promedio de 23,2°C y una proporción agua/cemento de 0,49, al ser curado (hidratado) utilizando agua potable, en comparación al proceso si se realiza con agua desmineralizada.

5. El efecto producido por la variación del medio de curado sobre la resistencia a la compresión del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica es gradual durante el período de 28 días de curado, manteniéndose la diferencia en su resistencia para los tres medios a partir de los 7 días de iniciado el proceso.
6. La variación inicial en el medio de curado produce una diferencia significativa en el comportamiento de la resistencia a la compresión del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, a una temperatura promedio de 23,2°C y proporción agua/cemento de 0,49, con un 90,0% de confiabilidad y dentro de un período de tiempo de 28 días.
7. El proceso de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica – agua, presenta dos fases, la primera donde la velocidad disminuye y la segunda donde esta se restituye para concluir en una estabilización. La presencia de partículas suspendidas en el medio de curado al inicio del proceso retarda dicho cambio de etapas, casi en 5 días entre el caso del medio saturado en comparación con el desmineralizado.
8. La variación inicial en el medio de curado produce una diferencia significativa en el comportamiento de la concentración de iones calcio, magnesio, carbonato y bicarbonato en el mismo medio, para el sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, a una temperatura promedio de 23,2°C y proporción agua/cemento de 0,49, con un 90,0% de confiabilidad y dentro de un período de tiempo de 28 días.

9. La velocidad de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica a una temperatura promedio de 23,2°C y proporción agua/cemento de 0,49, posee una relación y dependencia aparente respecto a la concentración de Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{--} , HCO_3^- y OH^- .
10. La velocidad de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica a una temperatura promedio de 23,2°C, es afectada en forma homogénea por la concentración de Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{--} y HCO_3^- y OH^- , cuando los especímenes son sumergidos en agua desmineralizada.
11. La velocidad de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica – agua a una temperatura promedio de 23,2°C y proporción agua/cemento de 0,49, es afectada en forma variable por la concentración de Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{--} y HCO_3^- y OH^- , cuando los especímenes son sumergidos en los medios de curado que saturado y de agua desmineralizada.
12. La notable lixiviación de la concentración de OH^- , observada entre agua desmineralizada y disolución saturada reduce la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cristalizado dentro de los especímenes.
13. El efecto de la solubilidad afecta significativamente la relación entre la velocidad de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica a una temperatura promedio de 23,2°C y la concentración de Ca^{++} en el medio de curado.

14. El efecto de la solubilidad no afecta significativamente la relación entre la velocidad de curado del sistema cemento portland UGC 4 000 – arena sílica, a una temperatura promedio de 23,2°C y la concentración de Mg^{++} , CO_3^{-} y HCO_3^{-} , en el medio de curado.
15. Se ratifica la necesidad de utilizar disolución saturada de $Ca(OH)_2$ en cumplimiento del inciso 10,5 (almacenamiento de especímenes de prueba) de la norma ASTM C109/C109M – 05.

RECOMENDACIONES

1. Realizar los estudios cinéticos del curado del cemento aumentando la cantidad de muestras, es decir, disminuyendo los intervalos de tiempo entre cada ensayo, especialmente durante los primeros 7 días, para mejorar la sensibilidad del método.
2. Utilizar un método cuantitativo más sensible para la determinación de iones aluminio en el medio de curado de cualquier sistema cemento – agregados.
3. Determinar si los comportamientos descritos anteriormente pueden ser reproducidos utilizando el esfuerzo a la tensión indirecta, como variable para cuantificar el avance del proceso.
4. Utilizar la metodología planteada en el presente informe, para el estudio de diferentes agregados al cemento y su efecto en función del tiempo.
5. Utilizar la metodología planteada en el presente informe, para el estudio de otras variables como la temperatura u otros factores externos.
6. Determinar, mediante ensayos, la composición química que debe cumplir el agregado fino y grueso (arena y piedrín) para obtener un resultado aceptable en la resistencia mecánica del cemento, utilizando el medio saturado para el proceso de curado.

7. Determinar, mediante ensayos, las mejores condiciones ambientales de trabajo, para obtener un resultado aceptable en la resistencia mecánica del cemento, utilizando el medio saturado para el proceso de curado.

BIBLIOGRAFÍA

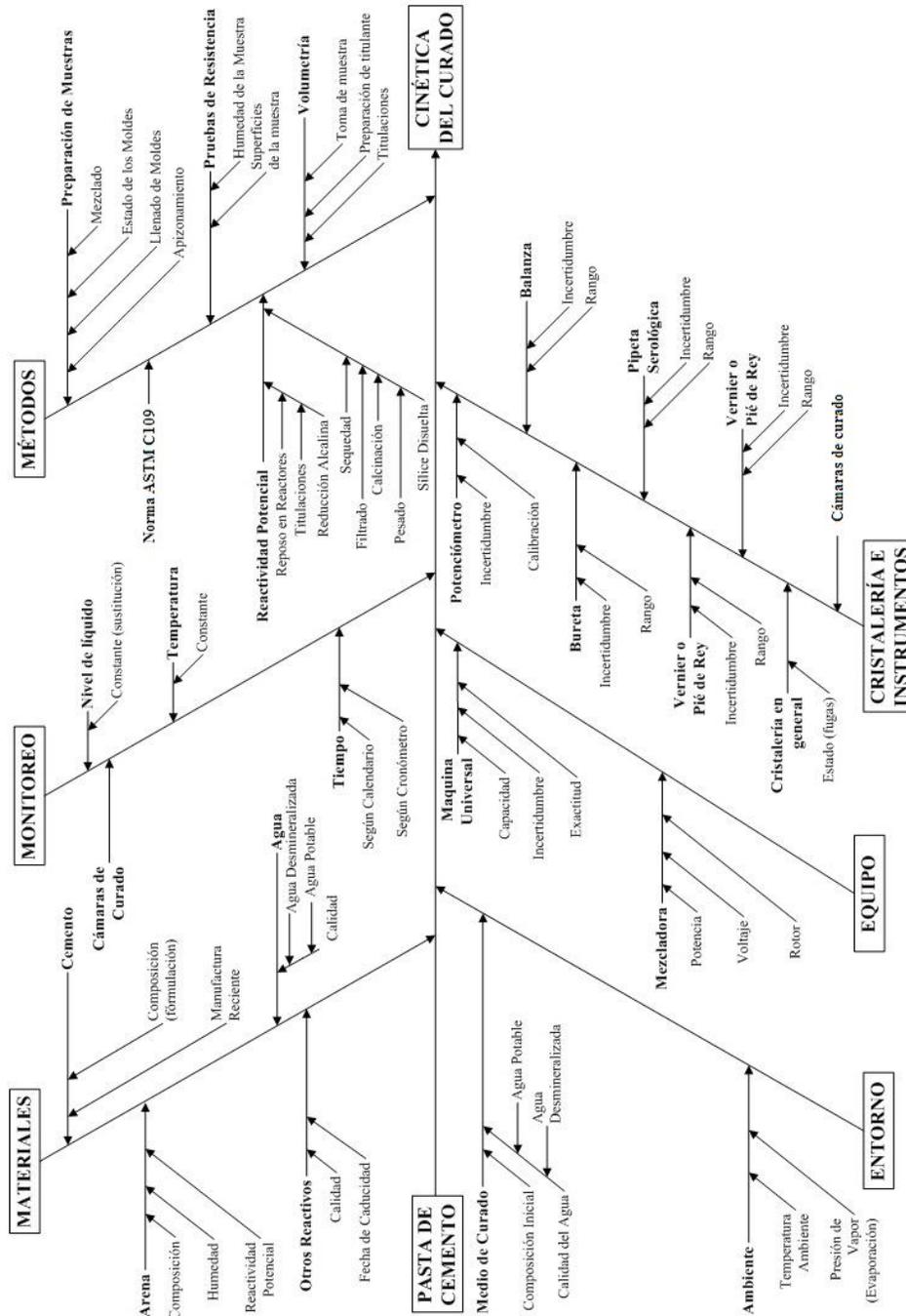
1. ASTM International. *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM C109/C109M-05. 2005. 9 p.
2. CANEDA, Rodolfo V. *Cinética Química*. Chesneau, Eva V. (trad.). Washington D.C.: Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Departamento de Asuntos Científicos, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos; 1978. 227 p.
3. LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. González Ureña, Ángel (trad.). 5a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2002. Vol. 1. 513 p. ISBN: 84-481-3786-8.
4. _____. *Fisicoquímica*. González Ureña, Ángel (trad.). 5a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2002. Vol. 2. 679 p. ISBN: 84-481-3787-6.
5. NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnología del concreto*. Pineda, Rosa (trad.). México D.F.: Trillas, 1998. 329 p. ISBN: 968-24-0461-4.
6. PORTUGAL, P. *Concretos de alto desempeño/high performance concrete (HPC)* [en línea]. Revisado 07/04/2007 [Ref. Julio 2010]. Disponible en Web: <<http://www.concrete.0catch.com>>.
7. SPIEGEL, Murray R. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. Bogotá: McGraw-Hill, 1991. 416 p. ISBN: 9789584101334.

8. TREYBAL, Robert E. *Operaciones de transferencia de masa*. García Rodríguez, Amelia (trad.). 2a ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2000. 858 p. ISBN: 968-6046-34-8.

9. WOOD, Jesse H.; KEEN, Charles W.; BULL, William, E. *Química general*. De La Rubia, Juan; Doria Rico, José (trads.). Nueva York: Harper & Row, 1974. 581 p. ISBN: 06-3170503.

APÉNDICES

Figura 76. Diagrama de causa y efecto



Fuente: elaboración propia (estudio preliminar del tema).

DATOS ORIGINALES

Tabla XXII. **Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en agua desmineralizada (Wd)**

tN (d)	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora inicial (hh:mm:ss)	Hora final (hh:mm:ss)	pH			T (°C)		
0	10/09/2009	12:30:00	13:40:00	7,01	6,95	7,05	24	23	24
1	11/09/2009	12:00:00	12:30:00	9,78	9,39	9,25	24	23	24
2	12/09/2009	11:30:00	11:50:00	11,64	1,79	11,72	23	23	22
3	13/09/2009	10:30:00	11:50:00	11,72	11,74	11,79	24	23	23
4	14/09/2009	11:25:00	12:00:00	11,91	11,23	11,89	23	23	24
6	16/09/2009	11:30:00	12:00:00	11,85	11,74	11,75	24	23	22
7	17/09/2009	11:45:00	12:35:00	11,85	11,63	11,98	24	24	23
8	18/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,67	11,79	11,98	24	23	23
9	19/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,69	11,79	11,85	22	23	24
10	20/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,78	11,85	11,98	22	24	23
11	21/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,76	11,63	11,85	24	24	23
12	22/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,48	11,54	11,63	23	24	23
14	24/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,25	11,63	11,41	23	22	23
17	27/09/2009	11:30:00	12:00:00	11,12	11,36	11,25	24	23	23
21	01/10/2009	11:30:00	12:00:00	11,45	11,63	11,52	24	23	24
24	04/10/2009	11:00:00	11:30:00	11,63	11,85	11,42	24	23	24
28	08/10/2009	11:00:00	11:30:00	11,13	11,52	11,42	21	22	23

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXIII. **Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en agua potable (Wc)**

tN (d)	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora inicial (hh:mm:ss)	Hora final (hh:mm:ss)	pH			T (°C)		
0	10/09/2009	12:30:00	13:40:00	7,4	7,21	7,25	24	24	23
1	11/09/2009	12:00:00	12:30:00	8,98	9,82	9,83	23	23	22
2	12/09/2009	11:30:00	11:50:00	11,69	11,58	11,55	22	23	22
3	13/09/2009	10:30:00	11:50:00	11,44	11,59	11,66	22	23	23
4	14/09/2009	11:25:00	12:00:00	11,68	11,78	11,72	24	23	23
5	15/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
6	16/09/2009	11:30:00	12:00:00	11,75	11,79	11,83	24	24	23
7	17/09/2009	11:45:00	12:35:00	11,59	11,75	11,72	23	23	24
8	18/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,86	11,84	11,87	23	24	23
9	19/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,96	11,86	11,95	24	24	23
10	20/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,78	11,85	11,98	24	24	24
11	21/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,79	11,78	11,72	23	23	24
12	22/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,74	11,68	11,72	23	23	23
13	23/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
14	24/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,76	11,81	11,74	23	23	24
15	25/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
16	26/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
17	27/09/2009	11:30:00	12:00:00	11,79	11,45	11,74	24	23	23
18	28/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
19	29/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
20	30/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
21	01/10/2009	11:30:00	12:00:00	11,47	11,52	11,63	23	23	24
22	02/10/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
23	03/10/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
24	04/10/2009	11:00:00	11:30:00	11,45	11,63	11,25	22	21	22
25	05/10/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
26	06/10/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
27	07/10/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
28	08/10/2009	11:00:00	11:30:00	11,75	11,69	11,74	22	21	22

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXIV. **Mediciones de potencial de hidrógeno y temperatura para especímenes sumergidos en disolución saturada de Ca(OH)_2 (Ws)**

tN (d)	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora inicial (hh:mm:ss)	Hora final (hh:mm:ss)	pH			T (°C)		
0	10/09/2009	12:30:00	13:40:00	11,78	11,17	11,32	24	24	23
1	11/09/2009	12:00:00	12:30:00	11,87	11,81	11,79	23	23	22
2	12/09/2009	11:30:00	11:50:00	11,78	11,72	11,78	22	22	23
3	13/09/2009	10:30:00	11:50:00	11,78	11,73	11,75	24	23	25
4	14/09/2009	11:25:00	12:00:00	11,95	11,84	11,84	24	24	23
5	15/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
6	16/09/2009	11:30:00	12:00:00	11,75	11,86	11,92	23	23	23
7	17/09/2009	11:45:00	12:35:00	11,72	11,85	11,80	24	24	23
8	18/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,80	11,82	11,86	24	24	23
9	19/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,74	11,85	11,71	24	23	24
10	20/09/2009	11:00:00	11:30:00	11,75	11,74	11,71	24	23	23
11	21/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,74	11,84	11,76	23	24	24
12	22/09/2009	10:30:00	11:00:00	11,84	11,86	11,87	24	23	24
13	23/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
14*	13/11/2009	11:00:00	11:30:00	11,45	11,75	11,78	23	23	24
15*	14/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
16*	15/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
17*	16/11/2009	11:30:00	12:00:00	11,74	11,75	11,78	23	23	24
18*	17/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
19*	18/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
20*	19/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
21*	20/11/2009	11:30:00	12:00:00	11,59	11,74	11,78	23	22	23
22*	21/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
23*	22/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
24*	23/11/2009	11:00:00	11:30:00	11,56	11,74	11,79	23	22	23
25*	24/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
26*	25/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
27*	26/11/2009	-	-	-	-	-	-	-	-
28*	27/11/2009	11:00:00	11:30:00	11,63	11,56	11,54	23	22	23

* Fechas corregidas por repetición de mediciones.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXV. **Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en agua desmineralizada (Wd)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	m ₀ (g)			m _f (g)			F (kg)		
0	10/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	11/09/2009	250,566	253,459	252,061	255,472	256,017	256,469	1 600	1 635	1 340
7	17/09/2009	251,597	254,049	239,15	260,452	262,254	251,321	1 900	1 900	2 280
14	24/09/2009	246,961	238,707	253,77	254,325	254,654	239,440	2 540	2 440	2 490
21	01/10/2009	237,062	251,713	249,745	241,50	252,140	260,185	3 520	3 320	3 640
28	08/10/2009	234,510	253,153	253,885	240,584	257,365	260,541	3 600	3 460	3 980

* Hora de inicio y final en la tabla XXII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXVI. **Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en agua potable (Wc)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	m ₀ (g)			m _f (g)			F (kg)		
0	10/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	11/09/2009	250,829	256,142	237,081	255,371	258,945	250,619	1 500	1 355	1 700
7	17/09/2009	249,832	248,757	235,569	259,36	255,469	249,589	2 460	2 475	2 360
14	24/09/2009	237,415	238,707	250,614	259,254	240,365	251,256	3 000	2 980	2 900
21	01/10/2009	239,867	237,944	249,835	249,366	259,360	248,365	4 000	3 620	3 380
28	08/10/2009	249,089	247,502	249,613	250,236	249,360	258,360	3 760	3 880	4 200

* Hora de inicio y final en la tabla XXIII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXVII. **Mediciones de masa y fuerza máxima de compresión para especímenes sumergidos en disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	m_0 (g)			m_f (g)			F (kg)		
0	10/09/2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	11/09/2009	248,809	252,923	245,322	265,371	262,945	250,619	1 620	1 450	1 430
7	17/09/2009	249,587	244,546	251,765	257,584	265,878	255,850	2 660	2 650	2 825
14**	13/11/2009	257,300	260,540	251,360	270,300	269,120	262,450	3 200	3 120	3 269
21**	20/11/2009	242,140	259,600	267,300	274,300	265,310	268,250	3 856	4 100	3 960
28**	27/11/2009	265,450	259,320	253,250	275,400	274,250	269,360	4 300	4 590	4 860

* Hora de inicio y final en la tabla XXIV.

** Fechas corregidas por repetición de mediciones.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXVIII. **Volúmenes de titulante para determinación de Ca^{++} , Mg^{++} y Al^{+++} para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V_{EDTA} (mL) especie: Ca^{++}			V_{EDTA} (mL) especies: Mg^{++} y Ca^{++}			V_{ZnSO_4} (mL) especie: Al^{+++}		
0	10/09/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	11/09/2009	3,25	3,10	3,20	7,85	7,40	6,30	0,00	0,00	0,00
4	14/09/2009	3,40	3,85	3,15	8,50	8,40	8,50	0,00	0,00	0,00
7	17/09/2009	3,25	3,60	3,45	9,60	9,10	9,40	0,00	0,05	0,00
10	20/09/2009	3,85	3,55	3,50	9,20	9,40	9,20	0,00	0,00	0,00
14	24/09/2009	3,70	3,65	3,85	8,90	8,50	8,60	0,00	0,00	0,00
17	27/09/2009	3,55	3,50	4,05	9,20	8,50	9,60	0,10	0,10	0,20
21	01/10/2009	3,65	3,80	3,80	9,60	9,80	9,50	0,00	0,00	0,00
24	04/10/2009	3,75	3,70	3,90	9,50	9,50	9,85	0,20	0,00	0,30
28	08/10/2009	3,65	3,80	3,75	9,80	8,60	8,90	0,00	0,00	0,00

* Hora de inicio y final en la tabla XXII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXIX. **Volúmenes de titulante para determinación de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y Al⁺⁺ para medio de curado inicial: agua potable (Wc)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V _{EDTA} (mL) especie: Ca ⁺⁺			V _{EDTA} (mL) especies: Mg ⁺⁺ y Ca ⁺⁺			V _{ZnSO4} (mL) especie: Al ⁺⁺⁺		
0	10/09/2009	0,50	1,00	0,60	1,20	1,40	1,20	0,00	0,00	0,00
1	11/09/2009	2,95	2,35	2,70	8,70	8,50	8,60	0,00	0,00	0,00
4	14/09/2009	3,25	3,00	3,15	8,20	8,50	8,60	0,00	0,00	0,00
7	17/09/2009	3,50	3,60	3,50	8,35	8,35	8,45	0,00	0,00	0,00
10	20/09/2009	4,10	3,50	3,15	9,20	8,50	8,60	0,10	0,10	0,20
14	24/09/2009	3,20	3,35	3,15	8,25	8,30	8,45	0,10	0,20	0,20
17	27/09/2009	3,15	3,25	3,50	9,50	9,60	9,75	0,00	0,00	0,00
21	01/10/2009	3,60	3,65	3,60	9,60	9,75	9,85	0,10	0,00	0,20
24	04/10/2009	3,55	3,75	3,25	8,90	8,80	9,50	0,10	0,20	0,20
28	08/10/2009	4,50	4,10	3,75	9,55	9,65	9,50	0,10	0,00	0,00

* Hora de inicio y final en la tabla XXIII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXX. **Volúmenes de titulante para determinación de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y Al⁺⁺ para medio de curado inicial: disolución saturada de Ca(OH)₂ (Ws)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V _{EDTA} (mL) especie: Ca ⁺⁺			V _{EDTA} (mL) especies: Mg ⁺⁺ y Ca ⁺⁺			V _{ZnSO4} (mL) especie: Al ⁺⁺⁺		
0	10/09/2009	4,60	4,70	4,55	5,10	4,95	5,25	0,00	0,00	0,00
1	11/09/2009	4,75	4,80	4,75	6,40	6,60	6,30	0,00	0,00	0,00
4	14/09/2009	4,70	4,70	4,65	6,60	6,60	6,10	0,00	0,00	0,00
7	17/09/2009	4,75	4,80	5,10	6,70	6,50	6,85	0,00	0,00	0,00
10	20/09/2009	4,65	4,80	4,70	6,10	6,70	6,55	0,00	0,00	0,00
14**	13/11/2009	4,65	4,80	5,35	6,70	6,90	6,20	0,00	0,00	0,00
17**	16/11/2009	4,60	4,65	5,15	7,00	6,70	6,70	0,00	0,00	0,00
21**	20/11/2009	5,00	5,50	4,25	6,55	6,40	6,95	0,00	0,00	0,00
24**	23/11/2009	4,55	4,65	4,85	7,00	7,05	6,50	0,10	0,10	0,05
28**	27/11/2009	5,15	4,20	4,25	6,95	6,80	7,00	0,20	0,10	0,10

* Hora de inicio y final en la tabla XXIV.

** Fechas corregidas por repetición de mediciones.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXXI. **Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^{2-} y HCO_3^- para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V_{HCl} (mL) especie: CO_3^{2-}			V_{HCl} (mL) especie: HCO_3^-		
		0	10/09/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
1	11/09/2009	29,30	29,50	28,80	23,60	23,20	23,70
4	14/09/2009	31,25	31,50	30,45	24,40	24,20	24,25
7	17/09/2009	31,45	31,40	31,30	25,40	24,90	24,45
10	20/09/2009	28,50	31,70	31,80	25,70	25,50	25,00
14	24/09/2009	27,85	25,45	34,20	23,25	24,25	22,20
17	27/09/2009	26,57	32,10	34,80	28,20	24,55	24,95
21	01/10/2009	29,20	32,20	32,85	27,25	26,20	25,35
24	04/10/2009	31,90	31,55	31,65	26,20	27,25	26,75
28	08/10/2009	32,55	34,20	32,45	27,25	26,55	27,10

* Hora de inicio y final en la tabla XXII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXXII. **Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^{2-} y HCO_3^- para medio de curado inicial: agua potable (Wc)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V_{HCl} (mL) especie: CO_3^{2-}			V_{HCl} (mL) especie: HCO_3^-		
		0	10/09/2009	5,50	5,75	6,00	7,00
1	11/09/2009	27,50	26,00	26,00	20,00	20,50	20,00
4	14/09/2009	24,00	27,50	28,00	22,30	22,50	22,20
7	17/09/2009	25,50	25,00	25,00	26,50	25,50	25,50
10	20/09/2009	30,50	29,00	28,50	27,50	28,00	28,00
14	24/09/2009	31,50	32,00	32,00	28,00	25,60	29,00
17	27/09/2009	30,50	29,00	31,00	25,50	26,60	25,90
21	01/10/2009	31,00	31,00	32,00	27,50	27,20	27,50
24	04/10/2009	29,00	30,00	32,00	27,60	27,55	27,50
28	08/10/2009	29,00	28,50	29,00	27,55	27,40	27,40

* Hora de inicio y final en la tabla XXIII.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

Tabla XXXIII. **Volúmenes de titulante para determinación de CO_3^- y HCO_3^- para medio de curado inicial: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws)**

tN (d) *	Fecha (dd/mm/aaaa)	V_{HCl} (mL) especie: CO_3^-			V_{HCl} (mL) especie: HCO_3^-		
0	10/09/2009	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	1,80
1	11/09/2009	0,00	0,00	0,00	3,50	3,30	3,50
4	14/09/2009	0,00	0,00	0,00	6,60	6,90	6,25
7	17/09/2009	1,05	1,00	1,00	7,65	7,70	7,80
10	20/09/2009	1,20	1,55	1,50	7,30	7,50	7,50
14**	13/11/2009	1,60	1,20	1,70	7,50	7,55	7,50
17**	16/11/2009	3,00	3,00	3,50	8,00	7,90	7,50
21**	20/11/2009	2,00	2,50	2,60	7,35	7,70	7,60
24**	23/11/2009	3,00	2,90	3,20	8,60	8,00	8,00
28**	27/11/2009	4,00	3,50	3,20	8,50	8,00	8,20

* Hora de inicio y final en la tabla XXIV.

** Fechas corregidas por repetición de mediciones.

Fuente: elaboración propia (medición experimental).

DATOS CALCULADOS

Tabla XXXIV. **Determinación de períodos de tiempo para realizar gráficos para Wd y Wc**

tN (d)	Fecha (dd:mm:aaaa)	Hora promedio (hh:mm:ss)	t(h)	t(d)	δt (h)	δt (d)
0	10/09/2009	13:05:00	0,00	0,000	0,02	0,0010
1	11/09/2009	12:15:00	23,97	0,999	0,01	0,0004
4	14/09/2009	11:42:30	95,94	3,998	0,01	0,0005
7	17/09/2009	12:10:00	167,96	6,998	0,02	0,0007
10	20/09/2009	11:15:00	239,92	9,997	0,01	0,0004
14	24/09/2009	11:15:00	335,92	13,997	0,01	0,0004
17	27/09/2009	11:45:00	407,94	16,998	0,01	0,0004
21	01/10/2009	11:45:00	503,94	20,998	0,01	0,0004
24	04/10/2009	11:15:00	575,92	23,997	0,01	0,0004
28	08/10/2009	11:15:00	671,92	27,997	0,01	0,0004
				Máxima	0,03	0,0012

Fuente: elaboración propia (ecuación 60).

Tabla XXXV. **Determinación de períodos de tiempo para Ws**

tN (d)	Fecha (dd:mm:aaaa)	Hora promedio (hh:mm:ss)	t(h)	t(d)	δt (h)	δt (d)
0	10/09/2009	13:05:00	0,00	0,000	0,02	0,0010
1	11/09/2009	12:15:00	23,97	0,999	0,01	0,0004
4	14/09/2009	11:42:30	95,94	3,998	0,01	0,0005
7	17/09/2009	12:10:00	167,96	6,998	0,02	0,0007
10	20/09/2009	11:15:00	239,92	9,997	0,01	0,0004
14*	13/11/2009	11:15:00	335,92	13,997	0,01	0,0004
17*	16/11/2009	11:45:00	407,94	16,998	0,01	0,0004
21*	20/11/2009	11:05:00	503,92	20,997	0,02	0,0007
24*	23/11/2009	11:45:00	575,94	23,998	0,01	0,0004
28*	27/11/2009	11:45:00	671,94	27,998	0,01	0,0004
				Máxima	0,03	0,0012

* Fechas corregidas por repetición de mediciones.

Fuente: elaboración propia (ecuación 60).

Tabla XXXVI. **Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Wd**

t(d)	pH _{prom}	δpH	SpH	T _{prom} (°C)	δT (°C)	ST (°C)
0,000	7,00	0,005	0,05	24	0,5	0,58
0,999	9,47	0,005	0,27	24	0,5	0,58
3,998	11,68	0,005	0,39	23	0,5	0,58
6,998	11,82	0,005	0,18	24	0,5	0,58
9,997	11,87	0,005	0,10	23	0,5	1,00
10,996	11,75	0,005	0,11	24	0,5	0,58
13,997	11,43	0,005	0,19	23	0,5	0,58
16,998	11,24	0,005	0,12	23	0,5	0,58
20,997	11,53	0,005	0,09	24	0,5	0,58
23,998	11,63	0,005	0,22	24	0,5	0,58
27,998	11,36	0,005	0,20	22	0,5	1,00
	Máxima	0,005	0,39	Máxima	0,5	1,00

Fuente: elaboración propia (ecuación 70).

Tabla XXXVII. **Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Wc**

t(d)	pH _{prom}	δpH	SpH	T _{prom} (°C)	δT (°C)	ST (°C)
0,000	7,29	0,005	0,10	24	0,5	0,58
0,999	9,54	0,005	0,49	23	0,5	0,58
3,998	11,73	0,005	0,05	23	0,5	0,58
6,998	11,69	0,005	0,09	23	0,5	0,58
9,997	11,87	0,005	0,10	24	0,5	0,00
13,997	11,77	0,005	0,04	23	0,5	0,58
16,998	11,66	0,005	0,18	23	0,5	0,58
20,997	11,54	0,005	0,08	23	0,5	0,58
23,998	11,44	0,005	0,19	22	0,5	0,58
27,998	11,73	0,005	0,03	22	0,5	0,58
	Máxima	0,0050	0,4879	Máxima	0,5000	0,58

Fuente: elaboración propia (ecuación 70).

Tabla XXXVIII. **Determinación de pH promedio y temperatura promedio para Ws**

t(d)	pH _{prom}	δpH	SpH	T _{prom} (°C)	δT (°C)	ST (°C)
0,000	11,42	0,005	0,32	24	0,5	0,58
0,999	11,82	0,005	0,04	23	0,5	0,58
3,998	11,88	0,005	0,06	24	0,5	0,58
6,998	11,79	0,005	0,07	24	0,5	0,58
10,996	11,78	0,005	0,05	24	0,5	0,58
13,997	11,66	0,005	0,18	23	0,5	0,58
16,998	11,76	0,005	0,02	23	0,5	0,58
20,997	11,70	0,005	0,10	23	0,5	0,58
23,998	11,70	0,005	0,12	23	0,5	0,58
27,998	11,58	0,005	0,05	23	0,5	0,58
	Máxima	0,0050	0,3179	Máxima	0,5000	1,00

Fuente: elaboración propia (ecuación 70).

Tabla XXXIX. **Determinación de [Ca⁺⁺] para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)**

t(d)	δV _{tit} (mL)	[Ca ⁺⁺] (mmol/dm ³)			δ[Ca ⁺⁺] (mmol/dm ³)			[Ca ⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)	S[Ca ⁺⁺] (mmol/dm ³)	δ[Ca ⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)	
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,000	0,00	0,009375	
0,999	0,03	1,0156	0,9688	1,0000	0,01125	0,01117	0,01123	0,995	0,02	0,011216	
3,998	0,03	1,0625	1,2031	0,9844	0,01134	0,01160	0,01120	1,083	0,11	0,011379	
6,998	0,03	1,0156	1,1250	1,0781	0,01125	0,01146	0,01137	1,073	0,05	0,011360	
9,997	0,03	1,2031	1,1094	1,0938	0,01160	0,01143	0,01140	1,135	0,06	0,011476	
13,997	0,03	1,1563	1,1406	1,2031	0,01151	0,01149	0,01160	1,167	0,03	0,011534	
16,998	0,03	1,1094	1,0938	1,2656	0,01143	0,01140	0,01172	1,156	0,10	0,011514	
20,997	0,03	1,1406	1,1875	1,1875	0,01149	0,01157	0,01157	1,172	0,03	0,011543	
23,998	0,03	1,1719	1,1563	1,2188	0,01154	0,01151	0,01163	1,182	0,03	0,011562	
27,998	0,03	1,1406	1,1875	1,1719	0,01149	0,01157	0,01154	1,167	0,02	0,011534	
					Máxima	0,01	0,0116	0,0117	Máxima	0,11	0,011562

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XL. **Determinación de $[Ca^{++}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)			$[Ca^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Ca^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,1563	0,3125	0,1875	0,00966	0,00995	0,00972	0,219	0,08	0,009780
0,999	0,03	0,9219	0,7344	0,8438	0,01108	0,01073	0,01094	0,833	0,09	0,010917
3,998	0,03	1,0156	0,9375	0,9844	0,01125	0,01111	0,01120	0,979	0,04	0,011187
6,998	0,03	1,0938	1,1250	1,0938	0,01140	0,01146	0,01140	1,104	0,02	0,011418
9,997	0,03	1,2813	1,0938	0,9844	0,01175	0,01140	0,01120	1,120	0,15	0,011447
13,997	0,03	1,0000	1,0469	0,9844	0,01123	0,01131	0,01120	1,010	0,03	0,011244
16,998	0,03	0,9844	1,0156	1,0938	0,01120	0,01125	0,01140	1,031	0,06	0,011283
20,997	0,03	1,1250	1,1406	1,1250	0,01146	0,01149	0,01146	1,130	0,01	0,011466
23,998	0,03	1,1094	1,1719	1,0156	0,01143	0,01154	0,01125	1,099	0,08	0,011408
27,998	0,03	1,4063	1,2813	1,1719	0,01198	0,01175	0,01154	1,286	0,12	0,011755
				Máxima	0,01	0,0117	0,0115	Máxima	0,15	0,011755

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLI. **Determinación de $[Ca^{++}]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)			$[Ca^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Ca^{++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Ca^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	1,4375	1,4688	1,4219	0,01203	0,01209	0,01201	1,443	0,02	0,012044
0,999	0,03	1,4844	1,5000	1,4844	0,01212	0,01215	0,01212	1,490	0,01	0,012131
3,998	0,03	1,4688	1,4688	1,4531	0,01209	0,01209	0,01206	1,464	0,01	0,012083
6,998	0,03	1,4844	1,5000	1,5938	0,01212	0,01215	0,01232	1,526	0,06	0,012198
9,997	0,03	1,4531	1,5000	1,4688	0,01206	0,01215	0,01209	1,474	0,02	0,012102
13,997	0,03	1,4531	1,5000	1,6719	0,01206	0,01215	0,01247	1,542	0,12	0,012227
16,998	0,03	1,4375	1,4531	1,6094	0,01203	0,01206	0,01235	1,500	0,10	0,012150
20,997	0,03	1,5625	1,7188	1,3281	0,01227	0,01255	0,01183	1,536	0,20	0,012218
23,998	0,03	1,4219	1,4531	1,5156	0,01201	0,01206	0,01218	1,464	0,05	0,012083
27,998	0,03	1,6094	1,3125	1,3281	0,01235	0,01180	0,01183	1,417	0,17	0,011996
				Máxima	0,01	0,0126	0,0125	Máxima	0,20	0,012227

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLII. Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,01875	0,01875	0,01875	0,0000	0,00000	0,01875
0,999	0,03	1,4375	1,3438	0,9688	0,02517	0,02482	0,02424	1,2500	0,24804	0,02474
3,998	0,03	1,5938	1,4219	1,6719	0,02563	0,02583	0,02549	1,5625	0,12790	0,02565
6,998	0,03	1,9844	1,7188	1,8594	0,02618	0,02609	0,02618	1,8542	0,13289	0,02615
9,997	0,03	1,6719	1,8281	1,7813	0,02630	0,02624	0,02609	1,7604	0,08018	0,02621
13,997	0,03	1,6250	1,5156	1,4844	0,02604	0,02577	0,02595	1,5417	0,07384	0,02592
16,998	0,03	1,7656	1,5625	1,7344	0,02612	0,02569	0,02664	1,6875	0,10938	0,02615
20,997	0,03	1,8594	1,8750	1,7813	0,02641	0,02661	0,02644	1,8385	0,05023	0,02649
23,998	0,03	1,7969	1,8125	1,8594	0,02641	0,02638	0,02670	1,8229	0,03253	0,02650
27,998	0,03	1,9219	1,5000	1,6094	0,02653	0,02592	0,02606	1,6771	0,21894	0,02617
				Máxima	0,02653	0,02661	0,02670	Máxima	0,24804	0,02650

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLIII. Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,2188	0,1250	0,1875	0,01973	0,02014	0,01979	0,1771	0,04774	0,01989
0,999	0,03	1,7969	1,9219	1,8438	0,02549	0,02502	0,02528	1,8542	0,06315	0,02526
3,998	0,03	1,5469	1,7188	1,7031	0,02537	0,02540	0,02554	1,6563	0,09504	0,02544
6,998	0,03	1,5156	1,4844	1,5469	0,02560	0,02566	0,02566	1,5156	0,03125	0,02564
9,997	0,03	1,5938	1,5625	1,7031	0,02644	0,02569	0,02554	1,6198	0,07384	0,02589
13,997	0,03	1,5781	1,5469	1,6563	0,02537	0,02549	0,02546	1,5938	0,05634	0,02544
16,998	0,03	1,9844	1,9844	1,9531	0,02606	0,02618	0,02641	1,9740	0,01804	0,02622
20,997	0,03	1,8750	1,9063	1,9531	0,02638	0,02650	0,02653	1,9115	0,03932	0,02647
23,998	0,03	1,6719	1,5781	1,9531	0,02595	0,02601	0,02612	1,7344	0,19516	0,02603
27,998	0,03	1,5781	1,7344	1,7969	0,02687	0,02670	0,02641	1,7031	0,11267	0,02666
				Máxima	0,02687	0,02670	0,02653	Máxima	0,19516	0,02666

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLIV. Determinación de $[Mg^{++}]$ para medio de curado inicial:
disolución saturada de $Ca(OH)_2$ (Ws)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)			$[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Mg^{++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Mg^{++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,1563	0,0781	0,2188	0,02436	0,02433	0,02442	0,1510	0,07046	0,02437
0,999	0,03	0,5156	0,5625	0,4844	0,02520	0,02534	0,02514	0,5208	0,03932	0,02523
3,998	0,03	0,5938	0,5938	0,4531	0,02528	0,02528	0,02497	0,5469	0,08119	0,02518
6,998	0,03	0,6094	0,5313	0,5469	0,02537	0,02528	0,02566	0,5625	0,04134	0,02544
9,997	0,03	0,4531	0,5938	0,5781	0,02497	0,02540	0,02525	0,5417	0,07708	0,02521
13,997	0,03	0,6406	0,6563	0,2656	0,02531	0,02551	0,02543	0,5208	0,22115	0,02542
16,998	0,03	0,7500	0,6406	0,4844	0,02546	0,02531	0,02560	0,6250	0,13350	0,02546
20,997	0,03	0,4844	0,2813	0,8438	0,02543	0,02563	0,02523	0,5365	0,28484	0,02543
23,998	0,03	0,7656	0,7500	0,5156	0,02543	0,02551	0,02531	0,6771	0,14005	0,02542
27,998	0,03	0,5625	0,8125	0,8594	0,02575	0,02511	0,02525	0,7448	0,15960	0,02537
				Máxima	0,02575	0,02563	0,02566	Máxima	0,28484	0,02546

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLV. Determinación de $[Al^{+++}]$ para medio de curado inicial: agua
desmineralizada (Wd)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[Al^{+++}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[Al^{+++}]$ (mmol/dm ³)			$[Al^{+++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)	S $[Al^{+++}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[Al^{+++}]_{prom}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
0,999	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
3,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
6,998	0,03	0,0000	0,0016	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0005	0,00090	0,00094
9,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
13,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
16,998	0,03	0,0031	0,0031	0,0063	0,00094	0,00094	0,00095	0,0042	0,00180	0,00095
20,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
23,998	0,03	0,0063	0,0000	0,0094	0,00095	0,00094	0,00095	0,0052	0,00477	0,00095
27,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
				Máxima	0,00095	0,00094	0,00095	Máxima	0,00477	0,00095

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLVI. **Determinación de [Al⁺⁺⁺] para medio de curado inicial: agua potable (Wc)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	[Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)			δ [Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)			[Al ⁺⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)	S[Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)	δ [Al ⁺⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
0,999	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
3,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
6,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
9,997	0,03	0,0031	0,0031	0,0063	0,00094	0,00094	0,00095	0,0042	0,00180	0,00095
13,997	0,03	0,0031	0,0063	0,0063	0,00094	0,00095	0,00095	0,0052	0,00180	0,00095
16,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
20,997	0,03	0,0031	0,0000	0,0063	0,00094	0,00094	0,00095	0,0031	0,00313	0,00094
23,998	0,03	0,0031	0,0063	0,0063	0,00094	0,00095	0,00095	0,0052	0,00180	0,00095
27,998	0,03	0,0031	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0010	0,00180	0,00094
				Máxima	0,00094	0,00095	0,00095	Máxima	0,00313	0,00095

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLVII. **Determinación de [Al⁺⁺⁺] para medio de curado inicial: disolución saturada de Ca(OH)₂ (Ws)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	[Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)			δ [Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)			[Al ⁺⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)	S[Al ⁺⁺⁺] (mmol/dm ³)	δ [Al ⁺⁺⁺] _{prom} (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
0,999	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
3,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
6,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
9,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
13,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
16,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
20,997	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00094	0,00094	0,00094	0,0000	0,00000	0,00094
23,998	0,03	0,0031	0,0031	0,0016	0,00094	0,00094	0,00094	0,0026	0,00090	0,00094
27,998	0,03	0,0063	0,0031	0,0031	0,00095	0,00094	0,00094	0,0042	0,00180	0,00095
				Máxima	0,00095	0,00094	0,00094	Máxima	0,00180	0,00095

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLVIII. Determinación de $[\text{CO}_3^{2-}]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	S $[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,0000	0,00000	0,00938
0,999	0,03	9,1563	9,2188	9,0000	0,02632	0,02643	0,02603	9,1250	0,11267	0,02626
3,998	0,03	9,7656	9,8438	9,5156	0,02744	0,02759	0,02698	9,7083	0,17140	0,02734
6,998	0,03	9,8281	9,8125	9,7813	0,02756	0,02753	0,02747	9,8073	0,02387	0,02752
9,997	0,03	8,9063	9,9063	9,9375	0,02585	0,02770	0,02776	9,5833	0,58658	0,02711
13,997	0,03	8,7031	7,9531	10,6875	0,02548	0,02409	0,02915	9,1146	1,41286	0,02624
16,998	0,03	8,3031	10,0313	10,8750	0,02474	0,02793	0,02950	9,7365	1,31103	0,02739
20,997	0,03	9,1250	10,0625	10,2656	0,02626	0,02799	0,02837	9,8177	0,60844	0,02754
23,998	0,03	9,9688	9,8594	9,8906	0,02782	0,02762	0,02767	9,9063	0,05634	0,02770
27,998	0,03	10,1719	10,6875	10,1406	0,02819	0,02915	0,02814	10,3333	0,30712	0,02849
				Máxima	0,02819	0,02915	0,02950	Máxima	1,41286	0,02849

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla XLIX. Determinación de $[\text{CO}_3^{2-}]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc)

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	S $[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	1,7188	1,7969	1,8750	0,01255	0,01270	0,01284	1,7969	0,07813	0,01270
0,999	0,03	8,5938	8,1250	8,1250	0,02527	0,02441	0,02441	8,2813	0,27063	0,02470
3,998	0,03	7,5000	8,5938	8,7500	0,02325	0,02527	0,02556	8,2813	0,68108	0,02470
6,998	0,03	7,9688	7,8125	7,8125	0,02412	0,02383	0,02383	7,8646	0,09021	0,02393
9,997	0,03	9,5313	9,0625	8,9063	0,02701	0,02614	0,02585	9,1667	0,32526	0,02633
13,997	0,03	9,8438	10,0000	10,0000	0,02759	0,02788	0,02788	9,9479	0,09021	0,02778
16,998	0,03	9,5313	9,0625	9,6875	0,02701	0,02614	0,02730	9,4271	0,32526	0,02682
20,997	0,03	9,6875	9,6875	10,0000	0,02730	0,02730	0,02788	9,7917	0,18042	0,02749
23,998	0,03	9,0625	9,3750	10,0000	0,02614	0,02672	0,02788	9,4792	0,47735	0,02691
27,998	0,03	9,0625	8,9063	9,0625	0,02614	0,02585	0,02614	9,0104	0,09021	0,02605
				Máxima	0,02759	0,02788	0,02788	Máxima	0,68108	0,02778

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla L. **Determinación de $[\text{CO}_3^{2-}]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)			$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	S $[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,0000	0,00000	0,00938
0,999	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,0000	0,00000	0,00938
3,998	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,0000	0,00000	0,00938
6,998	0,03	0,3281	0,3125	0,3125	0,00998	0,00995	0,00995	0,3177	0,00902	0,00996
9,997	0,03	0,3750	0,4844	0,4688	0,01007	0,01027	0,01024	0,4427	0,05916	0,01019
13,997	0,03	0,5000	0,3750	0,5313	0,01030	0,01007	0,01036	0,4688	0,08268	0,01024
16,998	0,03	0,9375	0,9375	1,0938	0,01111	0,01111	0,01140	0,9896	0,09021	0,01121
20,997	0,03	0,6250	0,7813	0,8125	0,01053	0,01082	0,01088	0,7396	0,10045	0,01074
23,998	0,03	0,9375	0,9063	1,0000	0,01111	0,01105	0,01123	0,9479	0,04774	0,01113
27,998	0,03	1,2500	1,0938	1,0000	0,01169	0,01140	0,01123	1,1146	0,12630	0,01144
				Máxima	0,01169	0,01140	0,01140	Máxima	0,12630	0,01144

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla LI. **Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: agua desmineralizada (Wd)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	S $[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,0000	0,0000	0,0000	0,00938	0,00938	0,00938	0,0000	0,00000	0,00938
0,999	0,03	7,3750	7,2500	7,4063	0,02302	0,02279	0,02308	7,3438	0,08268	0,02296
3,998	0,03	7,6250	7,5625	7,5781	0,02348	0,02337	0,02340	7,5885	0,03253	0,02341
6,998	0,03	7,9375	7,7813	7,6406	0,02406	0,02377	0,02351	7,7865	0,14851	0,02378
9,997	0,03	8,0313	7,9688	7,8125	0,02423	0,02412	0,02383	7,9375	0,11267	0,02406
13,997	0,03	7,2656	7,5781	6,9375	0,02282	0,02340	0,02221	7,2604	0,32034	0,02281
16,998	0,03	8,8125	7,6719	7,7969	0,02568	0,02357	0,02380	8,0938	0,62559	0,02435
20,997	0,03	8,5156	8,1875	7,9219	0,02513	0,02452	0,02403	8,2083	0,29742	0,02456
23,998	0,03	8,1875	8,5156	8,3594	0,02452	0,02513	0,02484	8,3542	0,16412	0,02483
27,998	0,03	8,5156	8,2969	8,4688	0,02513	0,02473	0,02504	8,4271	0,11517	0,02497
				Máxima	0,02568	0,02513	0,02504	Máxima	0,62559	0,02497

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla LII. **Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: agua potable (Wc)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	$S[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	2,1875	2,3438	2,2813	0,01342	0,01371	0,01360	2,2708	0,07864	0,01358
0,999	0,03	6,2500	6,4063	6,2500	0,02094	0,02123	0,02094	6,3021	0,09021	0,02103
3,998	0,03	6,9688	7,0313	6,9375	0,02227	0,02238	0,02221	6,9792	0,04774	0,02229
6,998	0,03	8,2813	7,9688	7,9688	0,02470	0,02412	0,02412	8,0729	0,18042	0,02431
9,997	0,03	8,5938	8,7500	8,7500	0,02527	0,02556	0,02556	8,6979	0,09021	0,02547
13,997	0,03	8,7500	8,0000	9,0625	0,02556	0,02418	0,02614	8,6042	0,54606	0,02529
16,998	0,03	7,9688	8,3125	8,0938	0,02412	0,02475	0,02435	8,1250	0,17399	0,02441
20,997	0,03	8,5938	8,5000	8,5938	0,02527	0,02510	0,02527	8,5625	0,05413	0,02522
23,998	0,03	8,6250	8,6094	8,5938	0,02533	0,02530	0,02527	8,6094	0,01563	0,02530
27,998	0,03	8,6094	8,5625	8,5625	0,02530	0,02522	0,02522	8,5781	0,02706	0,02525
				Máxima	0,02556	0,02556	0,02614	Máxima	0,54606	0,02547

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla LIII. **Determinación de $[\text{HCO}_3^-]$ para medio de curado inicial: disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ws)**

t(d)	δV_{tit} (mL)	$[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$\delta[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)			$[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)	$S[\text{HCO}_3^-]$ (mmol/dm ³)	$\delta[\text{HCO}_3^-]_{\text{prom}}$ (mmol/dm ³)
0,000	0,03	0,6250	0,6250	0,5625	0,01053	0,01053	0,01042	0,6042	0,03608	0,01049
0,999	0,03	1,0938	1,0313	1,0938	0,01140	0,01128	0,01140	1,0729	0,03608	0,01136
3,998	0,03	2,0625	2,1563	1,9531	0,01319	0,01336	0,01299	2,0573	0,10166	0,01318
6,998	0,03	2,3906	2,4063	2,4375	0,01380	0,01383	0,01388	2,4115	0,02387	0,01384
9,997	0,03	2,2813	2,3438	2,3438	0,01360	0,01371	0,01371	2,3229	0,03608	0,01367
13,997	0,03	2,3438	2,3594	2,3438	0,01371	0,01374	0,01371	2,3490	0,00902	0,01372
16,998	0,03	2,5000	2,4688	2,3438	0,01400	0,01394	0,01371	2,4375	0,08268	0,01388
20,997	0,03	2,2969	2,4063	2,3750	0,01362	0,01383	0,01377	2,3594	0,05634	0,01374
23,998	0,03	2,6875	2,5000	2,5000	0,01435	0,01400	0,01400	2,5625	0,10825	0,01412
27,998	0,03	2,6563	2,5000	2,5625	0,01429	0,01400	0,01412	2,5729	0,07864	0,01414
				Máxima	0,01435	0,01400	0,01412	Máxima	0,10825	0,01414

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 63, 70, 71 y 73).

Tabla LIV. **Determinación de cambio de masa porcentual, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Wd**

t(d)	δm (g)	% Δm	δ % Δm	δF (kg)	σ (psi)			σ_{prom} (psi)	$\delta\sigma$ (psi)	S σ (psi)	% ξ	$\delta\% \xi$	S% ξ
0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,999	0,001	1,55	0,1	5	881,8	901,1	738,5	840,50	2,76	88,83	21,01	0,069	2,221
6,998	0,001	3,78	0,1	5	1047,2	1047,2	1256,6	1117,00	2,76	120,92	27,92	0,069	3,023
13,997	0,001	1,20	0,1	5	1399,9	1344,8	1372,4	1372,36	2,76	27,56	34,31	0,069	0,689
20,997	0,001	2,03	0,1	10	1940,0	1829,8	2006,2	1925,35	5,51	89,10	48,13	0,138	2,227
27,998	0,001	2,23	0,1	10	1984,1	1907,0	2193,6	2028,23	5,51	148,30	50,71	0,138	3,707
		Máx.	0,1	10				Máx.	5,51	148,30	Máx.	0,138	3,707

Fuente: elaboración propia (cálculos dimensionales).

Tabla LV. **Determinación de cambio de masa, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Wc**

t(d)	δm (g)	% Δm	δ % Δm	δF (kg)	σ (psi)			σ_{prom} (psi)	$\delta\sigma$ (psi)	S σ (psi)	% ξ	$\delta\% \xi$	S% ξ
0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,999	0,001	2,73	0,1	5	826,7	746,8	937,0	836,83	2,76	95,48	20,92	0,069	2,387
6,998	0,001	3,96	0,1	5	1355,8	1364,1	1300,7	1340,21	2,76	34,46	33,51	0,069	0,861
13,997	0,001	3,21	0,1	5	1653,5	1642,4	1598,3	1631,40	2,76	29,16	40,79	0,069	0,729
20,997	0,001	3,89	0,1	10	2204,6	1995,2	1862,9	2020,88	5,51	172,30	50,52	0,138	4,308
27,998	0,001	1,55	0,1	10	2072,3	2138,5	2314,8	2175,21	5,51	125,36	54,38	0,138	3,134
		Máx.	0,1	10				Máx.	5,51	172,30	Máx.	0,138	4,308

Fuente: elaboración propia (cálculos dimensionales).

Tabla LVI. **Determinación de cambio de masa, esfuerzo máximo y avance porcentual para especímenes sumergidos en Ws**

t(d)	δm (g)	% Δm	δ % Δm	δF (kg)	σ (psi)			σ_{prom} (psi)	$\delta\sigma$ (psi)	S σ (psi)	% ξ	$\delta\% \xi$	S% ξ
0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,999	0,001	4,09	0,1	5	892,9	799,2	788,1	826,73	2,76	57,54	20,67	0,069	1,439
6,998	0,001	4,29	0,1	5	1466,1	1460,5	1557,0	1494,54	2,76	54,17	37,36	0,069	1,354
13,997	0,001	4,07	0,1	5	1763,7	1719,6	1801,7	1761,66	2,76	41,10	44,04	0,069	1,027
20,997	0,001	4,81	0,1	10	2125,2	2259,7	2182,6	2189,17	5,51	67,48	54,73	0,138	1,687
27,998	0,001	5,00	0,1	10	2369,9	2529,8	2678,6	2526,10	5,51	154,35	63,15	0,138	3,859
		Máx.	0,1	10				Máxima	5,51	154,35	Máx.	0,138	3,859

Fuente: elaboración propia (cálculos dimensionales).

Tabla LVII. Determinación de velocidad del proceso de curado ($d\% \xi / dt$)

Medio	t (d)	% ξ	Modelo % $\xi = f(t)$	R ²	Derivada $d(\% \xi) / dt = f'(t)$	d% ξ / dt	S% ξ	$\delta d\% \xi / dt$
Wd	0,000	0,000	$\% \xi = 2,3259 \times 10^{-3} t^3 - 0,14962 t^2 + 3,9219 t + 7,8237$	0,92103	$d(\% \xi) / dt = 6,9777 \times 10^{-3} t^2 - 0,29924 t + 3,9219$	3,922	0,000	0,0003
	0,999	21,013				3,630	2,221	0,0001
	6,998	27,925				2,169	3,023	0,0002
	13,997	34,309				1,100	0,689	0,0001
	20,998	48,134				0,715	2,227	0,0002
	27,997	50,706				1,013	3,707	0,0002
						Max:	3,707	0,0003
Wc	0,000	0,000	$\% \xi = 4,786 \times 10^{-3} t^3 - 0,26583 t^2 + 5,4020 t + 7,2407$	0,91429	$d(\% \xi) / dt = 1,4358 \times 10^{-2} t^2 - 0,53166 t + 5,402$	5,402	0,000	0,0003
	0,999	20,921				4,885	2,387	0,0001
	6,998	33,505				2,384	0,861	0,0002
	13,997	40,785				0,773	0,729	0,0001
	20,998	50,522				0,569	4,308	0,0002
	27,997	54,380				1,771	3,134	0,0002
						Max:	4,308	0,0003
Ws	0,000	0,000	$\% \xi = 6,7607 \times 10^{-3} t^3 - 0,34593 t^2 + 6,4290 t + 6,7435$	0,93282	$d(\% \xi) / dt = 2,0282 \times 10^{-2} t^2 - 0,69186 t + 6,429$	6,429	0,000	0,0003
	0,999	20,668				5,758	1,439	0,0001
	6,998	37,363				2,580	1,354	0,0002
	13,997	44,041				0,719	1,027	0,0001
	20,998	54,729				0,844	1,687	0,0003
	27,997	63,153				2,957	3,859	0,0002
						Max:	3,859	0,0003

Fuente: elaboración propia (ecuaciones 65 y 66).

Tabla LVIII. **Datos bibliográficos utilizados para determinar la solubilidad de las especies implicadas**

Sal	Ka	Kps	Carga "x"	Carga "y"
CaCO ₃	6,30957E-11	6,3096E-09	2	2
Ca(OH) ₂	-	8,0000E-06	2	1
MgCO ₃	6,30957E-11	0,003162	2	2
Mg(OH) ₂	-	1,9953E-11	2	1
Al(OH) ₃	-	5,01187E-33	3	1

Fuente: Morlaës, P. et J.-C. Morlaës. *Solutions Aqueuses*. Librairie Vuibert. Francia 1981.

Tabla LIX. **Determinación del porcentaje de Ca⁺⁺ disuelto**

M	t (d)	[Ca ⁺⁺] (mmol/dm ³)	d%ξ/dt	pH	Sb _(CaCO₃) (mol/dm ³)	Sb _{(Ca(OH)₂)} (mol/dm ³)	Sb _(Ca⁺⁺) (mmol/dm ³)	%Ca ⁺⁺ d	δ%Ca ⁺⁺ d
Wd	0,000	0,0010	3,922	7,003	0,353566701	0,015874011	369,4407111	0,0003	0,00254
	0,999	0,9948	3,630	9,473	0,022422104	0,015874011	38,29611471	2,5976	0,02929
	6,998	1,0729	2,169	11,820	0,009018774	0,015874011	24,8927845	4,3102	0,04564
	13,997	1,1667	1,100	11,430	0,00917116	0,015874011	25,04517047	4,6583	0,04605
	20,998	1,1667	1,013	11,357	0,009217948	0,015874011	25,09195895	4,6496	0,04600
	27,997	1,1719	0,715	11,533	0,009117004	0,015874011	24,99101488	4,6892	0,04615
								Max.	0,04615
Wc	0,000	0,2188	5,402	7,287	0,255229936	0,015874011	271,1039467	0,0807	0,00361
	0,999	0,8333	4,885	9,543	0,020969855	0,015874011	36,84386551	2,2618	0,02963
	6,998	1,0104	0,773	11,770	0,009031655	0,015874011	24,90566516	4,0570	0,04584
	13,997	1,1042	2,384	11,687	0,009056656	0,015874011	24,93066684	4,4289	0,04510
	20,998	1,1302	0,569	11,540	0,009113924	0,015874011	24,98793415	4,5230	0,04589
	27,997	1,2865	1,771	11,727	0,009044065	0,015874011	24,91807565	5,1628	0,04718
								Max.	0,04718
Ws	0,000	1,4167	2,957	11,577	0,009097783	0,015874011	24,97179309	5,6731	0,04823
	0,999	1,4427	6,429	11,423	0,009175104	0,015874011	25,04911427	5,7595	0,04843
	6,998	1,4896	5,758	11,823	0,009017966	0,015874011	24,89197677	5,9842	0,04901
	13,997	1,5260	2,580	11,790	0,009026326	0,015874011	24,90033654	6,1286	0,04911
	20,998	1,5365	0,844	11,703	0,009051271	0,015874011	24,92528138	6,1643	0,04902
	27,997	1,5417	0,719	11,660	0,009065707	0,015874011	24,939718	6,1816	0,04810
								Max.	0,04911

Fuente: elaboración propia (ecuación 41).

Tabla LX. Determinación del porcentaje de Mg⁺⁺ disuelto

Medio	t (d)	[Mg ⁺⁺] (mmol/dm ³)	d%ξ/dt	pH	Sb _(MgCO₃) (mol/dm ³)	Sb _{(Mg(OH)₂)} (mol/dm ³)	Sb _(Mg⁺⁺) (mmol/dm ³)	%Mg ⁺⁺ d	δ%Mg ⁺⁺ d
Wd	0,000	0,001	3,922	7,003	9,407438	0,000215	9407,65308	0,0000	0,00020
	0,999	1,250	3,630	9,473	0,596591	0,000215	596,80582	0,2094	0,00415
	6,998	1,542	1,100	11,820	0,239965	0,000215	240,18005	0,6419	0,01089
	13,997	1,677	1,013	11,430	0,244019	0,000215	244,23462	0,6867	0,01061
	20,998	1,839	0,715	11,357	0,245264	0,000215	245,47954	0,7490	0,01079
	27,997	1,854	2,169	11,533	0,242578	0,000215	242,79369	0,7637	0,01078
								Max.	0,01089
Wc	0,000	0,177	5,402	7,287	6,790967	0,000215	6791,18214	0,0026	0,00029
	0,999	1,516	2,384	9,543	0,557950	0,000215	558,16546	0,2715	0,00453
	6,998	1,594	0,773	11,770	0,240307	0,000215	240,52277	0,6626	0,01066
	13,997	1,703	1,771	11,687	0,240973	0,000215	241,18800	0,7061	0,01055
	20,998	1,854	4,885	11,540	0,242496	0,000215	242,71172	0,7639	0,01091
	27,997	1,911	0,569	11,727	0,240638	0,000215	240,85298	0,7936	0,01107
								Max.	0,10700
Ws	0,151	0,151	6,429	11,577	0,242067	0,000215	242,28225	0,0623	0,01006
	0,521	0,521	5,758	11,423	0,244124	0,000215	244,33956	0,2132	0,01032
	0,521	0,521	0,719	11,823	0,239943	0,000215	240,15856	0,2169	0,01059
	0,536	0,536	0,844	11,790	0,240166	0,000215	240,38099	0,2232	0,01057
	0,563	0,563	2,580	11,703	0,240829	0,000215	241,04471	0,2334	0,01055
	0,745	0,745	2,957	11,660	0,241214	0,000215	241,42882	0,3085	0,01051
							Max.	0,01059	

Fuente: elaboración propia (ecuación 41).

Tabla LXI. Determinación del porcentaje de CO_3^{2-} disuelto

Medio	t (d)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ (mmol/dm ³)	d%ξ/dt	pH	$\text{Sb}_{(\text{CaCO}_3)}$ (mol/dm ³)	$\text{Sb}_{(\text{MgCO}_3)}$ (mol/dm ³)	$\text{Sb}_{(\text{CO}_3^{2-})}$ (mmol/dm ³)	% CO_3^{2-} -d	δ% CO_3^{2-} -d
Wd	0,000	0,001	3,922	7,003	0,35357	9,40744	9761,00451	0,00001	0,00010
	0,999	9,115	1,100	9,473	0,02242	0,59659	619,01265	1,47244	0,00424
	6,998	9,125	3,630	11,820	0,00902	0,23996	248,98355	3,66490	0,01105
	13,997	9,807	2,169	11,430	0,00917	0,24402	253,19051	3,87348	0,01036
	20,998	9,818	0,715	11,357	0,00922	0,24526	254,48221	3,85792	0,01082
	27,997	10,333	1,013	11,533	0,00912	0,24258	251,69542	4,10549	0,01132
								Max.	0,01132
Wc	1,797	5,402	7,287	0,25523	6,79097	7046,19681	0,02550	1,797	0,00018
	7,865	2,384	9,543	0,02097	0,55795	578,92004	1,35849	7,865	0,00427
	8,281	4,885	11,770	0,00903	0,24031	249,33915	3,32128	8,281	0,00960
	9,010	1,771	11,687	0,00906	0,24097	250,02938	3,60374	9,010	0,01111
	9,792	0,569	11,540	0,00911	0,24250	251,61037	3,89160	9,792	0,01093
	9,948	0,773	11,727	0,00904	0,24064	249,68177	3,98424	9,948	0,01043
								Max.	0,01111
Ws	0,151	0,000	6,429	11,577	0,00910	0,24207	251,16476	0,00000	0,00373
	0,521	0,000	5,758	11,423	0,00918	0,24412	253,29939	0,00000	0,00370
	0,521	0,318	2,580	11,823	0,00902	0,23994	248,96125	0,12761	0,00400
	0,536	0,469	0,719	11,790	0,00903	0,24017	249,19204	0,18811	0,00411
	0,563	0,740	0,844	11,703	0,00905	0,24083	249,88070	0,29597	0,00430
	0,745	1,115	2,957	11,660	0,00907	0,24121	250,27926	0,44534	0,00457
								Max.	0,00457

Fuente: elaboración propia (ecuación 41).

ANEXOS



Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)¹

This standard is issued under the fixed designation C 109/C 109M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the compressive strength of hydraulic cement mortars, using 2-in. or [50-mm] cube specimens.

NOTE 1—Test Method C 349 provides an alternative procedure for this determination (not to be used for acceptance tests).

1.2 This test method covers the application of the test using either inch-pound or SI units. The values stated in either system shall be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

1.3 Values in SI units shall be obtained by measurement in SI units or by appropriate conversion, using the Rules for Conversion and Rounding given in Standard **IEEE/ASTM SI 10**, of measurements made in other units.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

C 91 Specification for Masonry Cement

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement

C 150 Specification for Portland Cement

C 230 Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)

C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes

C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements

C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C 778 Specification for Standard Sand

C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars

C 1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements

C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement

C 1328 Specification for Plastic (Stucco) Cement

C 1329 Specification for Mortar Cement

C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
IEEE/ASTM SI 10 Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System

3. Summary of Test Method

3.1 The mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass. Portland or air-entraining portland cements are mixed at specified water/cement ratios. Water content for other cements is that sufficient to obtain a flow of 110 ± 5 in 25 drops of the flow table. Two-inch or [50-mm] test cubes are compacted by tamping in two layers.

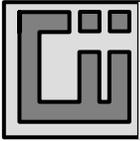
¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.

Current edition approved July 1, 2005. Published August 2005. Originally approved in 1934. Last previous edition approved in 2002 as C 109/C 109M – 02.

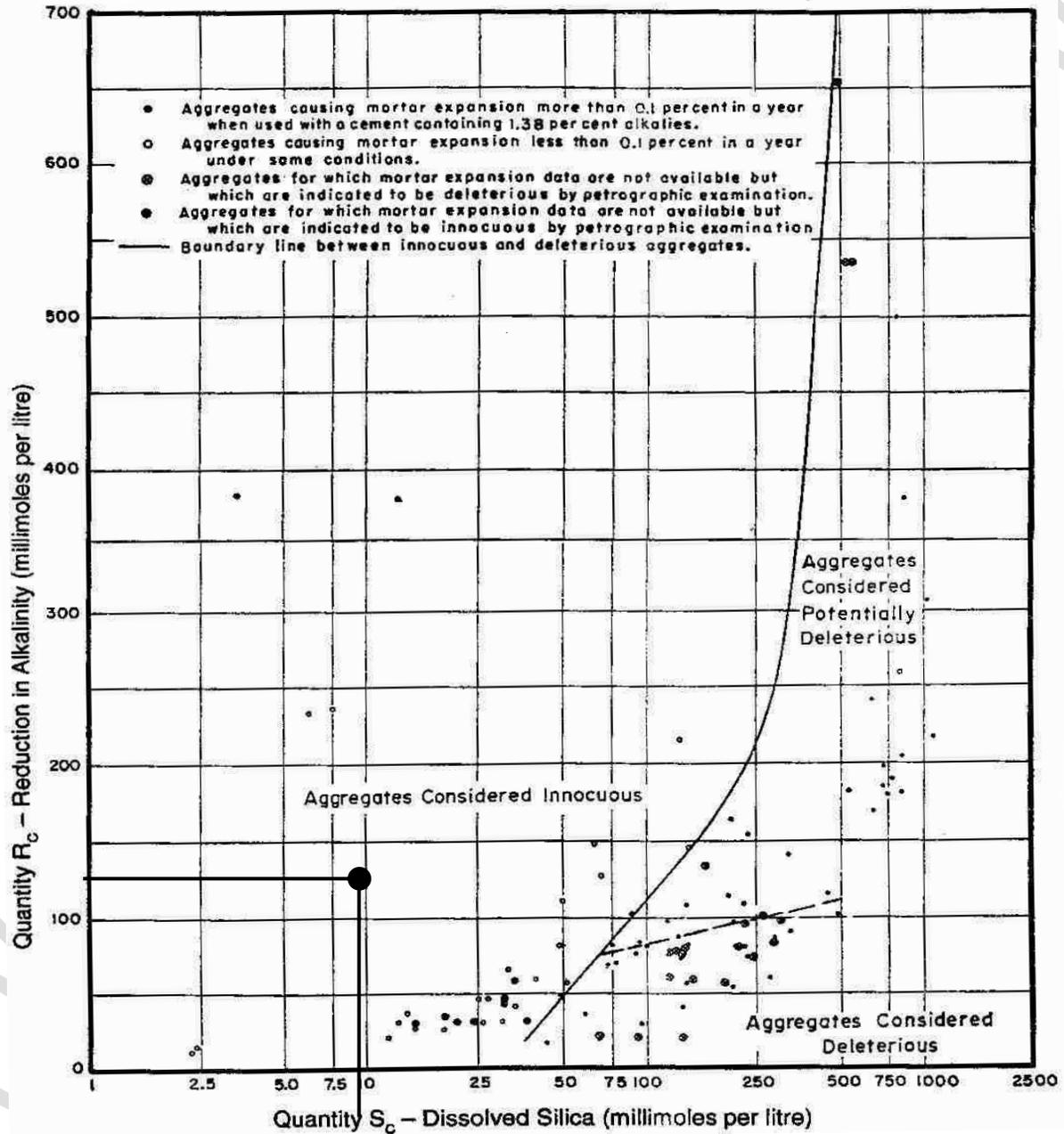
² See the section on Safety, Manual of Cement Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.



Gráfica tomada de la norma ASTM C- 289



- A. AGREGADO CONSIDERADO INOCUO:
B. AGREGADO CONSIDERADO DELETEREO:
C. AGREGADO CONSIDERADO POTENCIALMENTE DELETEREO

RESULTADO DE LA MUESTRA

A	■
B	□
C	□