



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**Maestría en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres**

**“Obtención y evaluación de un recubrimiento
geopolimérico ecológico para aumentar la
durabilidad en estructuras de concreto reforzado”**

**Tesis que para obtener el grado de Maestro
en Ingeniería presenta:**

Ing. Edwin Rojas Gutiérrez

Asesor:

M.A. Ing. Wilfrido Martínez Molina

Coasesor:

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta



Morelia, Michoacán, Agosto de 2013



RESUMEN.

Se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de un recubrimiento geopolimérico ecológico cuya finalidad es disminuir la corrosión en estructuras de concreto reforzado construidas en ambientes agresivos y aumentar su vida útil. El recubrimiento geopolimérico consta de metacaolín como material base e hidróxido de sodio como solución alcalina, activadora del proceso de geopolimerización. En ciertas mezclas se adiciona también, como nuevo agregado cemento Portland en diferentes proporciones, para observar el comportamiento del recubrimiento. Se presenta la realización de pruebas de tratamiento térmico a alta temperatura, resistencia a la compresión en elementos cúbicos y cilíndricos, resistividad eléctrica, adherencia (Pull Off), permeabilidad rápida de cloruros e intemperismo acelerado mediante ataques de sulfato de sodio. De los resultados obtenidos se pudo concluir que el recubrimiento con tratamiento térmico a alta temperatura es menos permeable y con mayor resistencia mecánica, el recubrimiento con sustituciones de cemento mejora las propiedades mecánicas del concreto y además le otorga mayor durabilidad. Adicionalmente se realizan varias propuestas para mejorar la adherencia y facilitar la aplicación del recubrimiento.

Palabras clave: (Geopolimérico, metacaolín, vida útil, geopolimerización, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, Pull Off, permeabilidad rápida de cloruros, intemperismo acelerado).

DEDICATORIAS.

**A mis padres *Ing. José Roberto Rojas Hernández y*
*Profra. Silvia Gutiérrez Pérez***

Con mucho cariño por haberme dado la vida y haber estado a mi lado en todo momento. Por haberme apoyado y alentado a crecer profesionalmente y como persona, por creer en mí y por darme todo su amor.

A mis hermanos *Hugo y Roberto*

Quienes siempre me apoyaron, me dieron su confianza y su cariño, en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS.**Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán.**

Por todo el apoyo que siempre me dio, por alentarme a crecer en el ámbito académico, por su amistad, por su calidad humana y por sus consejos.

M.A. Ing. Wilfrido Martínez Molina

Por haberme dado su apoyo para la elaboración de este trabajo, por su asesoría, por alentarme a mejorar en el ámbito académico, por su amistad y por su confianza.

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta.

Por su colaboración, apoyo y orientación como coasesor en esta investigación.

Dra. Angélica del Valle Moreno.

Por su disposición y apoyo para aportar consejos e ideas para la elaboración de este proyecto.

Dr. Hugo Luis Chávez García

Por su apoyo y por su aportación en la elaboración de esta investigación.

Al **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita** y al **M.C. Francisco Hernández Edison** por la capacitación otorgada.

Al personal del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial a la M. en I. Cindy Lara Gómez, al Tec. Jesús Zauno Zamudio y al Tec. Rubén Hernández Guzmán por su apoyo y comprensión durante el tiempo que realicé mi trabajo de Tesis de licenciatura y de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me brindo para continuar con mis estudios de posgrado.

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
DEDICATORIAS.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ESTADO DEL ARTE.....	2
2.1 CONCRETO.....	2
2.1.1 <i>Cemento</i>	5
2.1.1.1 Tipos de cemento según la Norma ASTM-C-150 (American Society for Testing and Materials).....	8
2.1.1.2 Tipos de cemento según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010 la cual clasifica al cemento de acuerdo a tres aspectos.....	8
2.1.2 <i>Agregados</i>	10
2.1.3 <i>Agua</i>	11
2.1.4 <i>Aditivos</i>	13
2.2 ACERO.....	14
2.3 DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.....	15
2.3.1 <i>Método ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE)</i>	16
2.4 DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	19
2.4.1 <i>Permeabilidad</i>	22
2.4.2 <i>Reacción álcali-agregado</i>	23
2.4.3 <i>Ataque de sulfatos</i>	24
2.4.4 <i>Ataque ácido</i>	26
2.4.5 <i>Agua de mar</i>	27
2.4.6 <i>Calentamiento y fuego</i>	28
2.4.7 <i>Congelamiento y deshielo</i>	29
2.5 CORROSIÓN.....	30
2.5.1 <i>Antecedentes</i>	30
2.5.2 <i>Definición</i>	34
2.5.3 <i>Tipos de corrosión</i>	37
2.5.3.1 Corrosión por picaduras.....	37
2.5.3.2 Corrosión generalizada.....	37
2.5.3.3 Corrosión bajo tensión.....	38
2.5.4 <i>Factores que desencadenan la corrosión</i>	38
2.5.4.1 Dosificación.....	39
2.5.4.2 Compacidad y homogeneidad.....	39
2.5.4.3 Espesor del recubrimiento.....	40
2.5.4.4 Humedad ambiental.....	41
2.5.4.5 Efecto del oxígeno.....	41
2.5.4.6 Efecto de la temperatura.....	42

2.5.4.7	Iones despasivantes.....	42
2.5.5	<i>Métodos para el control de la corrosión.</i>	46
2.6	GEOPOLÍMEROS.....	48
2.6.1	<i>Antecedentes.</i>	50
2.6.2	<i>Definición.</i>	50
2.6.3	<i>Geopolimerización.</i>	52
2.6.4	<i>Aplicaciones.</i>	56
2.7	MÉTODOS DE ENSAYO.....	57
2.7.1	<i>Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C 39/C 39M-03).</i>	57
2.7.2	<i>Resistividad eléctrica.</i>	58
2.7.3	<i>Método Pull Off [ASTM 1583-04].</i>	62
2.7.3.1	Significado y uso.....	62
2.7.3.2	Preparación de la superficie.....	63
2.7.3.3	Equipo.....	63
2.7.3.4	Preparación del espécimen de prueba	64
2.7.3.5	Procedimiento de prueba.....	65
2.7.3.6	Tipos de falla.....	66
2.7.4	<i>Ensayo de permeabilidad rápida de cloruros [ASTM C 1202-12].</i>	67
2.7.4.1	Equipo.....	68
2.7.4.2	Reactivos y materiales.....	69
2.7.4.3	Procedimiento de prueba.....	69
2.7.5	<i>Método estándar de durabilidad para agregados usando Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio [ASTM C 88-99a].</i>	71
2.7.5.1	Uso.....	71
2.7.5.2	Equipo.....	72
2.7.5.3	Soluciones especiales.....	72
2.7.5.4	Procedimiento de prueba.....	74
3	MARCO EXPERIMENTAL.....	75
3.1	RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO.....	75
3.1.1	<i>Componentes.</i>	75
3.1.1.1	Meta caolín.....	75
3.1.1.2	Hidróxido de Potasio.....	77
3.1.1.3	Nanosílice.....	78
3.1.1.4	Agua destilada.....	78
3.1.1.5	Cemento CPC 30R RS.....	79
3.1.1.6	Marmolina.....	79
3.1.1.7	Látex.....	80
3.1.1.8	Microesfera de vidrio.....	80
3.1.2	<i>Geopolímero base y sustituciones.</i>	81
3.1.3	<i>Agregados.</i>	82
3.1.4	<i>Caracterización.</i>	83
3.1.4.1	Absorción.....	85
3.1.4.2	Resistividad eléctrica.....	86
3.1.4.3	Resistencia a compresión.....	86
3.1.4.4	Tratamiento térmico.....	87
3.2	MORTERO DE CEMENTO CON METACALÍN Y NANOSÍLICE.....	88

3.2.1	<i>Caracterización</i>	89
3.2.1.1	Intemperismo acelerado	89
3.3	CONCRETO HIDRÁULICO	92
3.3.1	<i>Proporcionamiento</i>	92
3.3.2	<i>Elaboración de elementos</i>	94
3.3.2.1	Cilindros	94
3.3.2.2	Losa	95
3.4	ELEMENTOS RECUBIERTOS	96
3.4.1	<i>Cilindros</i>	96
3.4.2	<i>Pastillas</i>	97
3.4.3	<i>Losa</i>	98
3.4.4	<i>Caracterización</i>	98
3.4.4.1	Intemperismo acelerado	98
3.4.4.2	Permeabilidad rápida de doruros	104
3.4.4.3	Adherencia	105
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES	106
4.1	RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO	106
4.1.1	<i>Absorción</i>	106
4.1.2	<i>Resistividad eléctrica</i>	110
4.1.3	<i>Resistencia a compresión</i>	113
4.1.4	<i>Tratamiento térmico</i>	117
4.1.4.1	Absorción	117
4.1.4.2	Resistividad eléctrica	119
4.1.4.3	Resistencia a compresión	121
4.2	MORTERO DE CEMENTO CON METACAOLÍN Y NANOSÍLICE	123
4.2.1	<i>Intemperismo acelerado</i>	123
4.2.2	<i>Resistencia a compresión</i>	125
4.3	ELEMENTOS RECUBIERTOS	127
4.3.1	<i>Cilindros</i>	127
4.3.1.1	Intemperismo acelerado	127
4.3.1.2	Resistencia a compresión	131
4.3.2	<i>Pastillas</i>	134
4.3.2.1	Permeabilidad rápida de doruros	134
4.3.3	<i>Losa</i>	135
4.3.3.1	Adherencia	135
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
	REFERENCIAS	143

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Comportamiento del concreto y el acero [Mosley et al, 2007].	5
Tabla 2. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].	6
Tabla 3. Principales componentes del cemento Portland [Neville y Brooks, 2010].	7
Tabla 4. Clasificación de los cementos según su uso.	8
Tabla 5. Clasificación de los cementos por su tipo.	8
Tabla 6. Clasificación de los cementos por su resistencia.	9
Tabla 7. Clasificación de los cementos por características especiales.	9
Tabla 8. Datos necesarios para el diseño de un concreto por el método ACI.	16
Tabla 9. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.	16
Tabla 10. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.	17
Tabla 11. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.	17
Tabla 12. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.	18
Tabla 13. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	18
Tabla 14. Suma de volúmenes excepto arena, para determinar el agregado fino.	19
Tabla 15. Puentes prioritarios por corrosión [López et al, 2006].	33
Tabla 16. Valor crítico de cloruros en concretos reforzados [Del Valle et al, 2001].	43
Tabla 17. Técnicas de control de la corrosión [RED DURAR, 2000].	47
Tabla 18. Protección directa contra la corrosión [RED DURAR, 2000].	47
Tabla 19. Protección indirecta contra la corrosión [RED DURAR, 2000].	48
Tabla 20. Aplicaciones de los geopolímeros [Sanjay Kumar, 2008].	56
Tabla 21. Aplicaciones de los geopolímeros según su relación Si/Al [Hardjito y Rangan, 2005].	56
Tabla 22. Criterio general de valores de resistividad eléctrica del concreto [Mejía y Peña, 2010].	61
Tabla 23. Penetrabilidad del ión cloruro [Manual del equipo Provee'it].	68
Tabla 24. Geopolímero base.	81
Tabla 25. Sustitución del 10%.	82
Tabla 26. Sustitución del 20%.	82
Tabla 27. Sustitución del 30%.	82
Tabla 28. Sustitución del 40%.	82
Tabla 29. Agregados del recubrimiento.	82
Tabla 30. Características de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.	92
Tabla 31. Estimación del volumen de arena necesario para 1 m ³ .	93
Tabla 32. Estimación de la relación en volumen y en peso para 1 m ³ así como el material necesario para un bulto.	93
Tabla 33. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m ³ de concreto.	93
Tabla 34. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m ³ de concreto con adición de MK y NS.	94
Tabla 35. Absorción en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	107
Tabla 36. Absorción en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	108
Tabla 37. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	110
Tabla 38. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	111
Tabla 39. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	114

Tabla 40. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	115
Tabla 41. Absorción en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.	117
Tabla 42. Absorción en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.	117
Tabla 43. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.	119
Tabla 44. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.	119
Tabla 45. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.	121
Tabla 46. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.	121
Tabla 47. Absorción de los cubos de cemento con adiciones de MK y NS después del primer ciclo de ataque.	123
Tabla 48. Absorción de los cubos de cemento con adiciones de MK y NS antes del primer ciclo de ataque.	124
Tabla 49. Resistencia a la compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.	125
Tabla 50. Resistencia a la compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.	126
Tabla 51. Absorción de los cilindros después del primer ciclo de ataque.	128
Tabla 52. Absorción de los cilindros después del segundo ciclo de ataque.	128
Tabla 53. Absorción de los cilindros después del tercer ciclo de ataque.	129
Tabla 54. Absorción de los cilindros después del cuarto ciclo de ataque.	129
Tabla 55. Absorción de los cilindros después del quinto ciclo de ataque.	129
Tabla 56. Resumen de la absorción de los cilindros de concreto.	130
Tabla 57. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto sin recubrir.	132
Tabla 58. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto recubiertos.	132
Tabla 59. Permeabilidad rápida del ión cloruro.	134
Tabla 60. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 22 días.	136
Tabla 61. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 28 días.	136
Tabla 62. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 63 días.	136
Tabla 63. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 187 días.	137

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].	6
Figura 2. Ejemplo de nomenclatura de un cemento según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010.	9
Figura 3. Composición granulométrica en arenas y gravas de acuerdo a la ASTM C33-03.	10
Figura 4. Modelo de durabilidad [Torres y Martínez, 2001].	21
Figura 5. Proceso del efecto spalling en el concreto por presión en los poros.	29
Figura 6. Inventario de carreteras y puentes [Torres et al, 2010].	31
Figura 7. Puentes prioritarios para inspección detallada corrosión por cloruros [Torres et al, 2010].	32
Figura 8. Puentes prioritarios para inspección detallada corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].	32
Figura 9. Fotografías del estado de algunos puentes [Torres et al, 2010].	33
Figura 10. Elementos que componen la celda de corrosión en una estructura de acero reforzado [Red DURAR, 2000].	34
Figura 11. Reacciones anódica y catódica [Red DURAR, 2000].	35
Figura 12. Tipos más comunes de corrosión en el concreto reforzado [Lee et al, 2006].	38
Figura 13. Espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales [Lee et al, 2006].	40
Figura 14. Modelo conceptual de la geopolimerización [Duxson et al, 2006].	55
Figura 15. Resistometro Nilsson Modelo 400.	59
Figura 16. Equipo para prueba de adherencia marca PROCEQ.	62
Figura 17. Representación esquemática de la prueba Pull Off [ASTM 1583-04].	66
Figura 18. Tipos de falla en la prueba Pull Off.	67
Figura 19. Equipo de permeabilidad rápida de cloruros marca Provee'it.	70
Figura 20. Metacaolín.	76
Figura 21. Hidróxido de Potasio.	77
Figura 22. Nanosílice.	78
Figura 23. Agua destilada.	78
Figura 24. Cemento Cemex Tolteca CPC 30R RS.	79
Figura 25. Marmolina.	79
Figura 26. Látex de estireno butadieno.	80
Figura 27. Microesfera de vidrio.	81
Figura 28. Distribución de los 48 cubos elaborados.	83
Figura 29. Cubos con sustitución de 10 y 20% sin látex.	83
Figura 30. Cubos con sustitución de 30 y 40% sin látex.	84
Figura 31. Cubos con sustitución de 10 y 20% con látex.	84
Figura 32. Cubos con sustitución de 30 y 40% con látex.	84
Figura 33. Prueba de absorción en cubos.	85
Figura 34. Medición de resistividad eléctrica.	86
Figura 35. Prueba de absorción en cubos.	86
Figura 36. Tratamiento térmico.	87
Figura 37. Cubos de mortero con sustitución de metacaolín y nanosílice.	88
Figura 38. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cubos de mortero con sustitución.	89
Figura 39. Resistencia a la compresión en cubos de mortero con sustitución.	90

Figura 40. Falla de los cubos de mortero con sustitución después del primer ciclo de intemperismo acelerado.....	91
Figura 41. Segundo ciclo de intemperismo acelerado en cubos de cemento con sustitución.	91
Figura 42. Elaboración de cilindros de concreto.	95
Figura 43. Losa con recubrimientos.	95
Figura 44. Elaboración de los moldes para recubrir los cilindros de concreto.	96
Figura 45. Colocación del recubrimiento en los cilindros de concreto.	96
Figura 46. Colocación de recubrimiento en las pastillas de concreto para la prueba de permeabilidad rápida de cloruros.....	97
Figura 47. Colocación de recubrimiento en losa.....	98
Figura 48. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto testigo.	99
Figura 49. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto recubiertos.	100
Figura 50. Segundo ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.	101
Figura 51. Tercer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.	102
Figura 52. Cuarto ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.	103
Figura 53. Quinto ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.	104
Figura 54. Prueba de permeabilidad rápida de cloruros en pastillas de concreto.	105
Figura 55. Prueba de adherencia en losa.	106
Figura 56. Absorción en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	109
Figura 57. Absorción en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	109
Figura 58. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	112
Figura 59. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	113
Figura 60. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.	116
Figura 61. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex y sustituciones de cemento.	116
Figura 62. Absorción en geopolímero base sin tratamiento térmico.	118
Figura 63. Absorción en geopolímero base con tratamiento térmico.	118
Figura 64. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.	120
Figura 65. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.	120
Figura 66. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.	122
Figura 67. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex sin tratamiento térmico.	122
Figura 68. Resistencia a compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.	126
Figura 69. Variación de la resistencia a compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.....	127
Figura 70. Absorción de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.	130
Figura 71. Variación de la absorción de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.	131
Figura 72. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.....	133
Figura 73. Variación del esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.	133
Figura 74. Permeabilidad rápida del ión cloruro.	135
Figura 75. Esfuerzo de tensión del geopolímero sin látex a distintas edades.	137
Figura 76. Esfuerzo de tensión del geopolímero con látex a distintas edades.	138
Figura 77. Variación del esfuerzo de tensión del geopolímero sin látex a distintas edades.	139
Figura 78. Variación del esfuerzo de tensión del geopolímero con látex a distintas edades.	139

1 INTRODUCCIÓN.

El concreto reforzado es el material más utilizado en el área de la construcción, se utiliza para construir desde grandes obras como los puentes y las presas hasta banquetas, calles y carreteras. Es conocido que el problema más grave de deterioro que enfrenta el concreto reforzado, es debido a la corrosión que se presenta en ambientes agresivos que contienen cloruros o sulfatos. Este proceso de corrosión afecta al acero y/o al concreto, dependiendo del tipo de exposición, afectando su durabilidad.

El calentamiento global se ha vuelto un tema muy importante en los años recientes, bien se sabe que el exceso de producción de CO₂ es el principal causante del efecto invernadero. Por ello, cada potencial fuente de producción está siendo analizada, se estima que la industria del cemento es la segunda causante del incremento de CO₂, siendo sobrepasada solo por la producción de CO₂ de los vehículos.

Por lo tanto, es de gran valor preservar las estructuras de concreto ya existentes y utilizar nuevas tecnologías en materiales para disminuir la producción de cemento.

Los geopolímeros, tecnología propuesta por Davidovits, muestran una buena promesa para su aplicación en la industria del concreto como una alternativa de aglutinante para el cemento Portland. Están captando cada vez más la atención, debido a que son amigables con el medio ambiente, tiene alto rendimiento y pueden reemplazar al cemento Portland en diversas aplicaciones.

El método que mejor efectividad ha tenido para proteger de la corrosión a las estructuras de concreto reforzado, es la protección catódica. No es un método económico y ocupa de personal calificado. Por eso se busca un recubrimiento que proteja la estructura sin necesidad de personal calificado para su colocación.

2 ESTADO DEL ARTE.

2.1 Concreto.

El concreto es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante que tiene embebidas partículas o fragmentos de agregados, el aglutinante es formado por la mezcla de cemento y agua, según la Norma ASTM C 125.

Concreto en el sentido más amplio, es cualquier producto o masa elaborada con el uso de un medio cementante. Generalmente este medio cementante es producto de la reacción entre cemento hidráulico y agua. Pero en estos días ha surgido una definición que cubre todo un panorama de productos: el concreto se elabora con diferentes tipos de cementantes que contienen puzolanas, ceniza volante, micro sílice, aditivos, concretos reciclados, polímeros, fibras y además; estos concretos pueden ser calentados, curados con vapor, en autoclave, etc. [Neville y Brooks, 2010].

El concreto es una “roca artificial” que se obtiene mediante la mezcla de cemento, agregados (finos y gruesos) y agua. Cuando está en estado fresco puede ser moldeado de diferentes formas. Cabe destacar que después de la invención de cemento portland en el siglo XIX el uso del concreto se volvió muy popular llegando a ser hasta el día de hoy uno de los materiales más utilizados en la construcción.

En estos días, el concreto hidráulico y el acero son los dos materiales estructurales más utilizados. Las propiedades mecánicas inherentes de cada uno, permiten utilizarlos juntos como complemento o por separado según las necesidades propias del proyecto. En combinación, la resistencia al esfuerzo de compresión (del concreto) y la resistencia al esfuerzo de tensión (del acero)

permite crear muchas estructuras con diferente estilo y funcionalidad: casas, carreteras, puentes, edificios, etc.

Estudiándolos por separado, el acero es manufacturado en sofisticadas plantas de producción y con estándares de calidad muy altos; sus propiedades son determinadas en un laboratorio y respaldadas por un certificado de producción. Quien elabora el acero necesita cumplir con un estándar de calidad y quien construye con el acero sólo necesita asegurarse de utilizar el grado de acero correcto y de la correcta colocación del mismo en obra.

La empresa que manufactura el cemento también otorga una garantía de manera similar que la fábrica de acero de acuerdo al tipo cemento elegido para la obra, por lo que esto es difícilmente la causa de una falla estructural del concreto.

Existe la posibilidad de obtener concreto premezclado con una calidad específica, en este caso existen diversas variables que afectan la calidad del mismo como transporte, vaciado, vibrado, curado, entre otras. “El cemento es al concreto lo que la harina es al pastel de frutas, y la calidad del pastel depende del cocinado” (Adam M. Neville).

Ventajas del concreto reforzado [E. Harmsen, 2005].

1. Es durable a lo largo del tiempo y no requiere de una gran inversión para su mantenimiento. Tiene una vida útil extensa.
2. Tiene gran resistencia a la compresión en comparación con otros materiales.
3. Es resistente al efecto del agua.
4. En fuegos de intensidad media, el concreto reforzado sufre daños superficiales si se provee un adecuado recubrimiento al acero. Es más resistente al fuego que la madera y el acero estructural.

5. Se le puede dar la forma que uno desee haciendo uso del encofrado adecuado.
6. Le confiere un carácter monolítico a sus estructuras lo que les permite resistir más eficientemente las cargas laterales de viento o sismo.
7. No requiere mano de obra muy calificada.
8. Su gran rigidez y masa evitan problemas de vibraciones en las estructuras erigidas con él.
9. En la mayoría de lugares, es el material más económico.
10. Por su gran peso propio, la influencia de las variaciones de cargas móviles es menor.

Desventajas del concreto reforzado [E. Harmsen, 2005].

1. Tiene poca resistencia a la tensión, aproximadamente la décima parte de su resistencia a la compresión. Aunque el acero se coloca de manera que absorbe estos esfuerzos, la formación de grietas es prácticamente inevitable.
2. Requiere de encofrado lo cual implica su habilitación, vaciado, fraguado y desencofrado, con el tiempo que estas operaciones implican. El costo del encofrado puede alcanzar entre un tercio y dos tercios del costo total de la obra.
3. Su relación resistencia a la compresión versus peso está muy por debajo que la correspondiente al acero, el cual es más eficiente cuando se trata de cubrir grandes claros. El concreto requiere mayores secciones y por ende el peso propio es una carga muy importante en el diseño.
4. Requiere un permanente control de calidad, pues ésta se ve afectada por las operaciones de mezclado, colocación, curado, etc.
5. Presenta deformaciones variables con el tiempo. Bajo cargas sostenidas, las deflexiones en los elementos se incrementan con el tiempo.

El concreto reforzado es un material altamente durable que se puede crear en una amplia variedad de formas y tamaños desde una simple columna rectangular hasta una esbelta curva en un domo. Su utilidad y versatilidad se obtiene por la combinación de las mejores características del concreto y el acero. Algunas de las características de cada material se muestran en la tabla 1 [Mosley et al, 2007].

CARACTERÍSTICAS	COMPORTAMIENTO	
	Concreto	Acero
Esfuerzo a la tensión	Pobre	Bueno
Esfuerzo a la compresión	Bueno	Bueno, pero en barras delgadas se flexiona.
Esfuerzo al corte	Justo	Bueno
Durabilidad	Bueno	Se corroe si no se protege.
Resistencia al fuego	Bueno	Pobre, pérdida rápida de resistencia a grandes temperaturas.

Tabla 1. Comportamiento del concreto y el acero [Mosley et al, 2007].

2.1.1 Cemento.

El cemento Portland (en adelante se llamará solo cemento, a menos que se indique otra cosa), es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio. Las materias primas usuales a partir de las cuales se fabrica son calizas que proporcionan el CaO y arcillas que proveen el SiO₂ y el Al₂O₃. Estos materiales se muelen, se mezclan, se calcinan en hornos hasta obtener el llamado Clinker, se enfrían y se muelen de nuevo para lograr la finura requerida [Nilson Arthur, 1999].

La fabricación del cemento es esencialmente un proceso químico industrializado. Siendo necesario un estricto control de calidad en la química de los productos todo esto para tener una consistencia adecuada en las propiedades del mismo. Este control de calidad se aplica no solo en los componentes principales, sino también en las impurezas ya que estas pueden tener una marcada influencia en el proceso de fabricación y las propiedades del cemento. En

la tabla 2 y figura 1 se muestra el análisis químico del clinker que consiste principalmente de cuatro óxidos [Newman y Seng Choo, 2003].

COMPONENTES PRINCIPALES	%
SiO ₂ (dióxido de silicio)	21.10
Al ₂ O ₃ (óxido de aluminio)	5.60
Fe ₂ O ₃ (óxido férrico)	3.00
CaO (óxido de calcio)	65.50
Componentes menores	4.67
Total	99.87

Tabla 2. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].

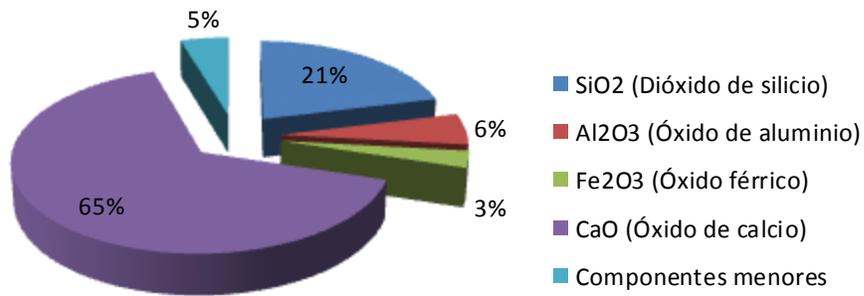


Figura 1. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].

Los principales componentes del cemento Portland son cuatro y se presentan en la siguiente tabla:

Nombre del componente	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 3. Principales componentes del cemento Portland [Neville y Brooks, 2010].

Las funciones de cada componente se describen a continuación [Harmsen, 2005]:

- Silicato tricálcico, el cual le confiere su resistencia inicial e influye directamente en el calor de hidratación.
- Silicato bicálcico, el cual define la resistencia a largo plazo y no tiene tanta incidencia en el calor de hidratación.
- Aluminato tricálcico, es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona fraguado violento. Para retrasar este fenómeno, es preciso añadirle yeso durante la fabricación del cemento.
- Aluminoferrito Tetracálcico, influye en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.
- Componentes menores: óxidos de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio.

Para satisfacer varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones determinadas se fabrican diferentes tipos de cemento de acuerdo a la especificación de la norma ASTM C 150 en Estados Unidos de Norteamérica y la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 en México.

2.1.1.1 Tipos de cemento según la Norma ASTM-C-150 (American Society for Testing and Materials).

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general, apropiado para todos los usos.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y concretos con aguas negras domésticas concentradas.

Tabla 4. Clasificación de los cementos según su uso.

2.1.1.2 Tipos de cemento según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010 la cual clasifica al cemento de acuerdo a tres aspectos.

De acuerdo a esta norma los cementos se deben identificar por el tipo de cemento (Tabla 5) y la clase resistente (Tabla 6); si el cemento tiene especificada una resistencia a tres días se coloca la letra R (resistencia rápida). En el caso que el cemento tenga una de las características especiales mostradas en la tabla 7 su designación se completa de acuerdo con la nomenclatura indicada en dicha tabla.

CLASIFICACIÓN POR TIPO	
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.

Tabla 5. Clasificación de los cementos por su tipo.

La clase resistente de un cemento de acuerdo con la **resistencia normal** se indica por la designación del tipo de cemento, seguida por los valores 20, 30 ó 40 y para especificar que un tipo de cemento debe cumplir con una **resistencia rápida** (en Megapascales) se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases 30R y 40R. La figura 2 muestra un ejemplo de nomenclatura de un cemento.

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPa		
	Mínimo a los 3 días	28 días	
		Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

Tabla 6. Clasificación de los cementos por su resistencia.

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos.
BRA	Baja Reactividad Álcali-Agregado.
BCH	Bajo Calor de Hidratación.
B	Blanco.

Tabla 7. Clasificación de los cementos por características especiales.



Figura 2. Ejemplo de nomenclatura de un cemento según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010.

2.1.2 Agregados.

La importancia del uso del tipo y calidad correcta del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto. [Kosmatka et al, 2004].

Los agregados naturales se clasifican generalmente en finos y gruesos. Un agregado fino o arena es cualquier material que pasa la Malla No. 4, es decir, un tamiz con cuatro aberturas por pulgada lineal. El material más grueso que no pasa por esta malla se clasifica como agregado grueso o grava. El tamaño máximo del agregado grueso para concreto reforzado está controlado por la facilidad con que éste debe entrar en los espacios entre barras de refuerzo. La norma ASTM C33-03 "Standard specification for concrete aggregates" presenta los requisitos para agregados de buena calidad. La figura 3 muestra la composición granulométrica de arenas y gravas de acuerdo a la norma ASTM C33-03.

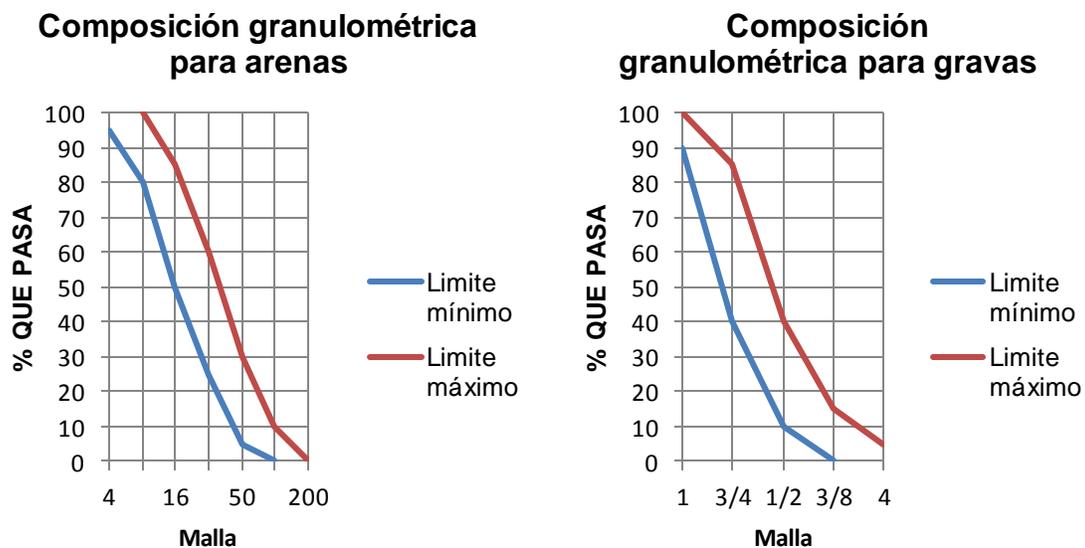


Figura 3. Composición granulométrica en arenas y gravas de acuerdo a la ASTM C33-03.

El agregado no es un material ciertamente inerte porque sus propiedades físicas, químicas e incluso térmicas influyen en el comportamiento del concreto. Desde el punto de vista económico es una ventaja usar una mezcla con mucho agregado y la menor cantidad de pasta de cemento posible, pero el costo-beneficio debe ser balanceado de acuerdo a las propiedades deseadas en el concreto fresco y endurecido [Neville y Brooks, 2010].

Actualmente se han venido utilizando concretos livianos y concretos pesados cada vez con más frecuencia. Los concretos livianos son utilizados en elementos no estructurales debido a su porosidad al estar conformados por arcillas, cenizas volantes, lutitas expandidas, que son materiales de bajo peso por la estructura porosa de sus partículas. Los concretos pesados, en cambio, son utilizados en estructuras que requieren protección adicional o que se utilizan como contrapeso; reactores nucleares y puentes colgantes. Para estos concretos se utilizan minerales pesados de hierro, rocas de sulfato de bario, aceros en forma de fragmentos, esquirlas o perdigones. Los pesos unitarios de estos concretos varían entre 3200 y 5300kg/m³ [Nilson Arthur, 1999].

2.1.3 Agua.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se le puede usar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para la preparación del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables.

Se puede emplear el agua dudosa en concreto, pero se debe verificar su desempeño. Por ejemplo, se aconseja que los cubos de mortero preparados con el agua dudosa tengan la resistencia a los 7 días igual a por lo menos 90% de la resistencia de los especímenes de referencia preparados con agua potable o agua destilada. Además, se debe garantizar a través de ensayos del tiempo de fraguado

que las impurezas en el agua de amasado no van a disminuir o aumentar adversamente el tiempo de fraguado del cemento [Kosmatka et al, 2004].

En México la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 establece los valores característicos y los límites máximos tolerables que debe cumplir el agua para su uso en la elaboración de concreto.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se deben establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas sobre varias propiedades. Algunas impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades [Kosmatka et al, 2004].

Los componentes de una mezcla se dosifican de manera que el concreto resultante tenga una resistencia adecuada, una manejabilidad apropiada para su vaciado y un bajo costo. Este último factor obliga a la utilización de la mínima cantidad de cemento (el más costoso de los componentes) que asegure unas propiedades adecuadas. Mientras mejor sea la gradación de los agregados, es decir, mientras menor sea el volumen de vacíos, menor será la pasta de cemento necesaria para llenar estos vacíos. Adicionalmente al agua requerida para la hidratación se necesita agua para humedecer la superficie de los agregados. A medida que se adiciona agua, la plasticidad y la fluidez de la mezcla aumentan (es decir, su manejabilidad mejora), pero su resistencia disminuye debido al mayor volumen de vacíos creados por el agua libre. Para reducir el agua libre y mantener la manejabilidad, es necesario agregar cemento; de esta manera, desde el punto de vista de la pasta de cemento, la relación agua-cemento es el factor principal que controla la resistencia del concreto. Para una relación agua-cemento dada se

selecciona la mínima cantidad de cemento que asegure la manejabilidad deseada [Nilson Arthur, 1999]

La importancia de la relación agua cemento radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menos cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) en donde se aloje la humedad, esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de una importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (como el oxígeno) como los agentes iniciadores (ión cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a través de la masa de concreto. La velocidad de difusión del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por lo tanto la porosidad [Del Valle et al, 2001].

2.1.4 Aditivos.

Las sustancias que se agregan al concreto para mejorar su manejo, acelerar su fraguado, endurecer su superficie e incrementar su impermeabilidad se conocen como aditivos. El término abarca todos los materiales diferentes al cemento, al agua y a los agregados, que se añaden justo antes o durante la mezcla. Muchos de los compuestos patentados contienen cal hidratada, cloruro de calcio y caolín. El cloruro de calcio es el aditivo que se utiliza con más frecuencia para acelerar el fraguado del concreto; sin embargo, su uso excesivo puede provocar la corrosión del acero de refuerzo, por lo que la mayoría de los países limitan su uso. Se debe tener cuidado con el uso de los aditivos, sobre todo con aquellos de composición desconocida [Parker y Ambrose, 2008].

Al evaluarse el efecto de las aguas sobre las propiedades, es importante que se analice el agua con los aditivos que serán usados en el concreto. Algunos

compuestos en el agua pueden influenciar el desempeño y la eficiencia de ciertos aditivos. Por ejemplo, algunas veces se necesita aumentar la cantidad de aditivo incluso (incorporador) de aire al usarse el aditivo con agua dura conteniendo altas concentraciones de ciertos compuestos o minerales [Kosmatka et al, 2004].

La norma ASTM C 494-11 trata sobre materiales para ser utilizados como aditivos químicos a ser agregados a mezclas para el concreto de cemento hidráulico en obra para un propósito o los propósitos particulares. Clasificándolos en ocho tipos diferentes:

1. TIPO A. Aditivos reductores de agua.
2. TIPO B. Aditivos retardadores.
3. TIPO C. Aditivos aceleradores.
4. TIPO D. Aditivos reductores de agua y retardadores.
5. TIPO E: Aditivos reductores de agua y aceleradores.
6. TIPO F. Aditivos reductores de agua de alto rango.
7. TIPO G. Aditivos reductores de agua de alto rango y retardadores.
8. TIPO S. Aditivos de comportamiento específico.

2.2 Acero.

El acero de refuerzo, es una aleación hierro/carbón que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado y una costilla llamada nervadura. El acero de refuerzo o armadura es el componente metálico embebido en la masa de concreto que le proporciona resistencia a la tracción [Torres et al, 2010].

Ventajas del acero como material estructural.

1. Alta resistencia
2. Uniformidad.
3. Elasticidad.
4. Durabilidad.
5. Ductilidad.
6. Tenacidad.

Desventaja del acero como material estructural.

1. Costo de mantenimiento.
2. Susceptibilidad de daños por fuego.
3. Susceptibilidad al pandeo.
4. Fatiga.
5. Falla frágil a temperaturas bajas.

2.3 Diseño de mezclas de concreto.

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir: propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

El proporcionamiento (dosificación) de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades [Kosmatka et al, 2004]:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

2.3.1 Método ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE).

Para diseñar una mezcla de concreto mediante este método es necesario conocer las características físicas de los materiales mostradas en la Tabla 8.

	CEMENTO	ARENA	GRAVA
Tipo de material			
Densidad			
P.V.S.S. (kg/m³)	✓		
P.V.S.V. (kg/m³)	✓		
Tamaño Máximo	✓	✓	
Módulo de Finura	✓		✓
% Absorción	✓		
P.V.S.S.=Peso volumétrico seco suelto, P.V.S.V.=Peso volumétrico seco varillado			

Tabla 8. Datos necesarios para el diseño de un concreto por el método ACI.

Los pasos a seguir para el diseño adecuado de una mezcla de concreto son:

1. Elegir un revenimiento para el concreto, ACI recomienda algunos de acuerdo al elemento estructural a construir (tabla 9).

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO EN CENTÍMETROS	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

* Puede incrementarse en 2.5 cm. cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado.

Tabla 9. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.

2. Determinar el contenido de agua para un m³ de concreto con la tabla 10.

Revenimiento (cm)	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de Tamaño Nominal Máximo (mm)							
	9.5	12.5	19.0	25.0	38.0	50.0	75.0	150.0
Concreto sin aire incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10.0	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido, en porcentaje	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10.0	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado de contenido de aire total, en porcentaje								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Tabla 10. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

3. Seleccionar la relación agua/cemento. Tomando en cuenta la resistencia requerida (tabla 11), la durabilidad y las propiedades del acabado.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Relación agua/cemento peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Tabla 11. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Para estructuras con exposiciones severas el método ACI recomienda las relaciones agua/cemento mostradas en la tabla 12.

Tipo de estructura	Relación agua/cemento	
	Estructura continua	Estructura expuesta al agua o sulfatos
Secciones esbeltas (barandales, guarniciones, umbrales, ménsulas, trabajos ornamentales) y secciones con menos de 3cm de recubrimiento sobre el acero de esfuerzo	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Tabla 12. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.

4. Calcular el contenido de cemento:

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Agua necesaria para } 1 \text{ m}^3}{\text{Relación agua/cemento}}$$

5. Obtener el volumen de agregado grueso utilizando la tabla 13 donde se muestra el volumen de agregado grueso, en m³, varillado en seco, para 1 m³ de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en 1 m³ de concreto, multiplicándolo por el peso unitario de varillado en seco por m³ de agregado grueso.

Tamaño máximo nominal del agregado en milímetros	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25.0 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1½")	0.75	0.73	0.71	0.69
50.0 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75.0 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150.0 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla 13. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

6. Determinar el contenido de arena mediante una diferencia.

Materiales	Peso (kg)	Densidades (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Cemento			
Agua			
Aire			
Grava			
Volumen total (excepto arena)=			✓

Tabla 14. Suma de volúmenes excepto arena, para determinar el agregado fino.

$$\text{Contenido de arena} = 1 - \text{Volumen total}$$

7. Hacer una corrección por humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y será necesario incrementar los pesos secos para compensar la humedad.

2.4 Durabilidad del concreto.

La durabilidad es una de las propiedades más importantes del concreto porque es esencial que sea capaz de soportar todas las condiciones para las que fue diseñado durante toda la vida de la estructura.

En los últimos veinte años el término "durabilidad" se ha estado escuchando con más frecuencia en la rama de la ingeniería civil. Países industrializados como los EEUU y algunos en Europa (España, Francia, Gran Bretaña, etc.), al igual que Japón, han tomado a la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudios de investigación específicos [Torres y Martínez, 2001].

La baja durabilidad del concreto puede ser causada por agentes externos derivados del medio ambiente o por agentes internos inmersos en el concreto. Estas causas están categorizadas en tres grupos: físicas, mecánicas y químicas. Las causas físicas están asociadas al congelamiento y a las diferencias en las propiedades térmicas del agregado y la pasta de cemento, mientras las mecánicas son causadas principalmente por abrasión y las químicas causadas por cloruros y sulfatos [Neville y Brooks, 2010].

En la actualidad las construcciones se calculan para que resistan con un cierto nivel de seguridad y funcionalidad durante una determinada vida de servicio o vida útil. Pero los niveles de seguridad y durabilidad no se dan de forma explícita y en general están basados más en la experiencia que en los cálculos rigurosos [Andrade, 2007].

El reporte de la Red Temática DURAR propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: “periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.” Es decir si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), ésta ya sobrepasó el periodo de su vida útil. En el diseño de estructuras por durabilidad el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el cliente, por lo que se le llamará vida útil de servicio. Ver figura 4. [Torres y Martínez, 2001].

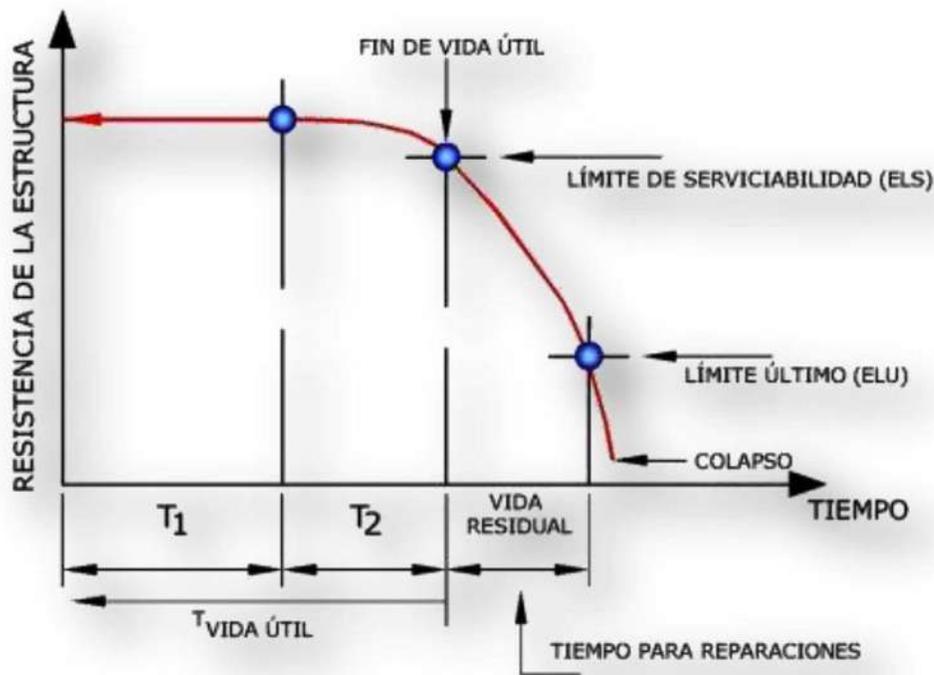


Figura 4. Modelo de durabilidad [Torres y Martínez, 2001].

Un concreto durable mantendrá su forma original, en cuanto a calidad y nivel de servicio cuando se expone a su entorno. Un correcto diseño, proporción, colocado, acabado, pruebas, inspección y curado hará que este sea capaz de proveer décadas de servicio con poco o nulo mantenimiento.

Las propiedades físicas del concreto se discuten a menudo en términos de penetración, o sea el movimiento de los agentes agresivos dentro y fuera del concreto. Las propiedades químicas se refieren a la cantidad y el tipo de productos de hidratación, principalmente los silicatos de calcio hidratados, los aluminatos de calcio hidratados e hidróxido de calcio del cemento fraguado.

Los agentes que penetran la estructura reaccionan con los hidratos y producen nuevos productos que pueden ser inertes, altamente solubles o expansivos. La naturaleza de los productos de esas reacciones son los que controlan la severidad del ataque químico.

2.4.1 Permeabilidad.

Se define como la facilidad con que pueden cruzar líquidos y gases a través de la microestructura del concreto. Esta propiedad es muy importante en relación al nivel de retención de los líquidos que transportan los agentes químicos en el concreto. Está ligada íntimamente con la porosidad del concreto.

Se define como porosidad a la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos en la masa del concreto como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia del aire naturalmente atrapado.

Los poros del concreto son burbujas de aire que quedan naturalmente atrapadas y/o intencionalmente incluidas (mediante un aditivo) en la masa de concreto. Se les conoce como poros de compactación y poros de aire incorporado. Su diámetro es mayor de 0,2 mm (200 micrómetros) y no suelen estar interconectados. Se subdividen en poros capilares o macroporos; y poros gel o microporos.

- a) **Los poros capilares o macroporos** se encuentran por fuera del gel cemento. Su forma es variable y su tamaño oscila entre 0,00002 mm (0,02 micrómetros) y 0,2 mm (200 micrómetros) de diámetro. Cuando están interconectados y abiertos al exterior, son susceptibles de ser saturados y por ellos ocurre la permeabilidad del concreto a los fluidos. En general, cuando aumenta la cantidad de poros capilares, se reduce significativamente la resistencia del concreto a los ataques físicos, químicos o biológicos

- b) **Los poros gel o microporos** son los poros que presenta la pasta de cemento hidratada y endurecida (poros intersticiales del gel de cemento) y su diámetro es menor de 0.00002mm (0.02 micrómetros). No intercambian

agua con el medio ambiente, a menos que la humedad que presenten se encuentre por debajo del 20%.

En cuanto a la facilidad del movimiento de los fluidos a través del concreto está determinada por tres mecanismos de transporte: permeabilidad, difusión y absorción.

La velocidad del flujo sigue la ley de Darcy para flujo laminar a través de un medio poroso. Depende del gradiente de presión y el tamaño de los poros interconectados en la pasta del cemento.

La difusión es el proceso mediante el cual los gases (por ejemplo, el dióxido de carbono u oxígeno) o iones en solución (por ejemplo, cloruros) entran al concreto bajo una diferencia de concentración. La difusión de estas especies puede ser descrita por la ley de Fick. El coeficiente de difusión se utiliza a menudo para referirse a la velocidad a la que estas especies entran al concreto. La difusión de los gases es muy lenta en estructuras saturadas, por lo que es una propiedad importante en las estructuras como edificios y puentes no cercanos a cuerpos de agua. Por durabilidad es importante considerar la difusión de iones de cloruro, CO₂ y sulfatos.

2.4.2 Reacción álcali-agregado.

Las reacciones álcali-agregado pueden provocar la degradación del concreto a través de las denominadas “reacciones expansivas de origen interno”. Las reacciones álcali-agregado engloban las **reacciones álcali-silicato y álcali-carbonato**, siendo las álcali-silicato las de mayor relevancia.

En los concretos con agregados pétreos, la alteración de las propiedades del concreto debido a la RAS (reacciones álcali-silicato) originan principalmente la disminución de la capacidad de flexión y tensión, reducción del módulo de

elasticidad y aunque en menor escala, la resistencia a la compresión. La reacción causa además otros efectos en el concreto como son, por ejemplo, el aumento del volumen o la fisuración de la superficie del concreto, abriendo un camino preferente para la entrada de los agentes externos agresivos que aumentan la susceptibilidad de las estructuras a los problemas de corrosión del acero, ciclos de deshielo, entre otros [Barreto et al, 2009].

La RAS requiere presencia de humedad, de ahí que es más susceptible de detectarse en estructuras hidráulicas o marinas. La reacción es estimulada por ciclos de secado y humedad. El fenómeno ha sido conocido desde hace varios años.

En México, se ha considerado el requisito de evitar el desarrollo de la reacción álcali-sílice, sobretodo en estructuras de concreto hidráulicas de importancia que tengan contacto con el agua, como son, obras hidráulicas para riego, control de ríos y generación de energía eléctrica, obras marítimas y centrales nucleoelectricas. En este caso se ha prevenido con el uso de cemento Portland con bajos contenidos de álcalis, puzolanas administradas en forma individual o cementos puzolánicos [Hernández y Mendoza, 2005].

2.4.3 Ataque de sulfatos.

Una de las formas más frecuentes de ataque químico al concreto es la acción de los sulfatos. El ión sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido del ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales. El ataque de sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario.

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio, de sodio y calcio y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad. Muchos de estos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado.

La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio C_3A y el ferroaluminato tetracálcico C_3FA .

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfoaluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

Los sulfatos también se utilizan ampliamente en la industria y los fertilizantes estos pueden causar contaminación del suelo y aguas subterráneas. El ataque de sulfatos puede tomar una de las siguientes formas:

1. Ataques físicos debido a la cristalización de las sales.

Este tipo de ataque es probable que ocurra en el concreto permeable con la superficie superior expuesta en un ambiente seco, mientras que la superficie inferior está en contacto con el suelo con soluciones de salinas. En estas condiciones las soluciones suben a la superficie por capilaridad.

2. Ataque químico externo de sulfatos entre iones de sulfato de fuentes externas con los compuestos del cemento fraguado.

El cemento portland normal es el más vulnerable a los ataques químicos del sulfato. La extensión del daño depende de la calidad del concreto, el tipo de compuestos de sulfato involucrados y sus concentraciones. En un concreto permeable, los iones de sulfato migran de fuentes externas y reaccionan con los productos de hidratación del cemento. El uso de concretos con baja permeabilidad parece ser un paso esencial en la limitación de la penetración de los iones de sulfato en el concreto.

Estructuras subterráneas como túneles, cimentaciones, tuberías y pilas son vulnerables al ataque de sulfatos. El concreto dañado a menudo presenta un aspecto blanquecino en la superficie. Los daños por lo general comienzan por los bordes y las esquinas.

3. Ataque químico interno debido a la liberación tardía de sulfato en el concreto.

Este es un ataque químico que se presenta cuando las fuentes de sulfatos son internas. Debido a la liberación tardía de sulfatos la etringita se forma en el concreto endurecido causando la expansión y el agrietamiento.

2.4.4 Ataque ácido.

Ningún cemento Portland es resistente al ataque de ácidos. En condiciones húmedas, el dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de carbono (CO_2), así como otros gases presentes en la atmósfera, forman ácidos que atacan al concreto disolviendo y quitando una parte de la pasta de cemento hidratada, dejando una suave y muy débil masa. Esta forma de ataque se encuentra en

varias condiciones industriales, tales como chimeneas, y en algunas condiciones de agricultura, tales como los pisos de las industrias lácteas [Neville y Brooks, 2010].

Todos los cementos que contienen cal son susceptibles al ataque de ácidos. En soluciones acidas, donde el pH es inferior a 3.5, se producirá una erosión en la matriz de cemento. Aguas con baja dureza, que contienen dióxido de carbono disuelto y con valores de pH en el rango de 4-7 pueden ser agresivas para el concreto. El agua pura de deshielo y la condensación contienen dióxido de carbono y disolverá el hidróxido de calcio causando erosión en el cemento, en estas situaciones la calidad del concreto es de suma importancia [Newman y Seng Choo, 2003].

En el ataque ácido del concreto hay disolución de la pasta de cemento y de los agregados calcáreos. Además del uso de concreto con baja permeabilidad, los tratamientos de superficie pueden ayudar a evitar que las sustancias agresivas entren en contacto con el concreto [Kosmatka et al, 2004].

2.4.5 Agua de mar.

El concreto se ha usado en ambientes marinos por décadas con buen desempeño. Sin embargo, son necesarios cuidados especiales en el diseño de las mezclas y en la selección de los materiales para estos ambientes severos. Una estructura expuesta al agua del mar o la salpicadura del agua del mar es más vulnerable en la zona de marea o salpicadura, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. Los sulfatos y los cloruros presentes en el agua del mar requieren el uso de concretos de baja permeabilidad para minimizar la corrosión de la armadura (refuerzo) y el ataque de sulfatos [Kosmatka et al, 2004].

Las sales de cloruros pueden estar presentes en el concreto ya sea porque se le agregó cloruro de calcio al momento de realizar la construcción como aditivo acelerante o debido a la penetración de sales de deshielo usadas de manera particular en las estructuras carreteras, el ingreso del agua de mar o la brisa en el caso de estructuras marinas, impurezas en los agregados o en el agua de mezclado [E & FN Spon, 2003].

En algunos casos, la acción del agua de mar sobre el concreto está acompañada por acciones destructivas como congelamiento, o por abrasión con el impacto de las olas. Este daño adicional causa la ruptura de la protección que da el concreto al acero de refuerzo que se ve corroído por una acción electroquímica al absorber las sales a través del concreto [Neville y Brooks, 2010].

2.4.6 Calentamiento y fuego.

Como en todos los materiales de la construcción, el concreto está directamente relacionado con la temperatura y el cambio de su longitud o volumen. Este hecho se conoce desde hace tiempo para estructuras tales como carreteras, puentes, muros y edificios. Solamente las temperaturas muy altas o muy bajas pueden generar este fenómeno de expansión. Una característica favorable del concreto es el aislamiento térmico que presenta [Lamond y Pielert, 2006].

Existen dos problemas con el concreto ante el fuego: deterioro en las propiedades mecánicas y el efecto spalling o desconchamiento del concreto.

El deterioro de las propiedades mecánicas puede ser atribuido a 3 factores: cambios fisicoquímicos en la mezcla de cemento, cambios fisicoquímicos en el agregado e incompatibilidad térmica entre el agregado y la mezcla de cemento; y están influenciados por factores tales como: nivel de temperatura, rango de calentamiento, carga aplicada, sellamiento externo.

El efecto spalling es la interrupción violenta o no violenta de capas o pedazos de concreto en la superficie de un elemento estructural al ser expuesto a temperaturas altas y que se incrementan rápidamente. Ver figura 5.

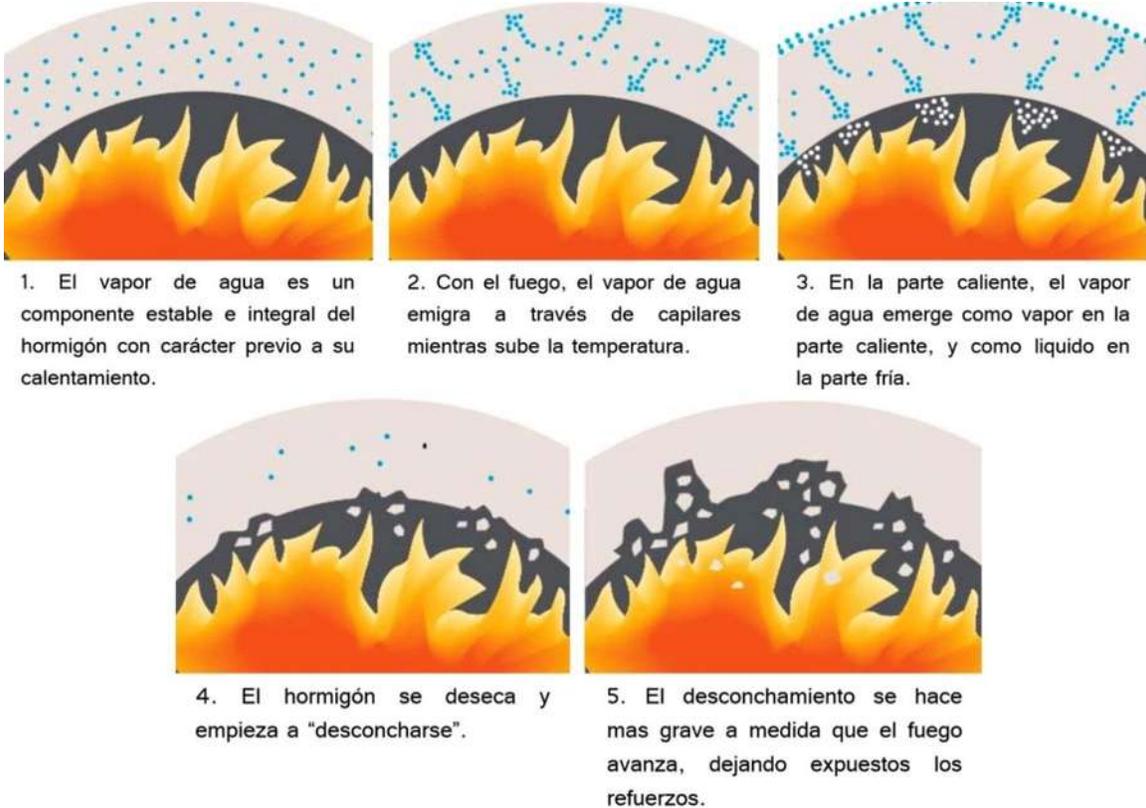


Figura 5. Proceso del efecto spalling en el concreto por presión en los poros.

2.4.7 Congelamiento y deshielo.

El deterioro del concreto expuesto a condiciones de congelación ocurre cuando hay presencia de suficiente humedad interna que se congela bajo ciertas condiciones de exposición. Esta humedad puede ser interna (al agua en los poros del concreto y en un alto grado de saturación puede causar daño) o externa (el agua que entra al concreto por medio de una fuente externa, como la lluvia). El concreto seco (por lo general debajo de un 75 a 80 % de humedad relativa interna) es normalmente inmune a los daños por congelación [ACI Committee 201, 2008].

El concreto con aire incluido es más resistente a los ciclos de congelamiento y deshielo que un concreto sin aire incluido, el concreto con baja relación agua-cemento es más durable que un concreto con alta relación agua-cemento y un periodo de secado antes de la exposición a la congelación y deshielo beneficia grandemente la resistencia al congelamiento y deshielo del concreto con aire incluido. El concreto con aire incluido y baja relación agua-cemento, con un contenido de aire del 5% al 8% va a resistir a un gran número de ciclos de congelación y deshielo sin presentar fallas [Kosmatka, 2004].

2.5 Corrosión.

2.5.1 Antecedentes.

En 1993, la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes instrumentó un sistema de administración de puentes denominado Sistema Integral de Puentes Mexicanos (SIPUMEX). Esta base de datos contempla, entre lo más importante desde el punto de vista estructural, las características geométricas, ubicación con coordenadas geográficas, material y tipo de estructura, fecha de construcción, etc. Además posee la información de las reparaciones realizadas, así como una calificación de 0 a 5 que define el estado que guarda el puente desde el punto de vista estructural. Esta calificación informa si el puente está en excelentes condiciones (calificación 0) o si ha rebasado su límite último y requiere de atención urgente (calificación 5) [Torres et al, 2010].

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), dentro del marco del Plan Nacional de Evaluación de la Degradación por Corrosión en Puentes, en el año 2002 realizó inspecciones para conocer el grado de deterioro que guarda la infraestructura del transporte en México por efectos de la corrosión.

En dicho estudio se generaron modelos cartográficos de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, de prioridad para inspección detallada de corrosión por cloruros y de prioridad para inspección detallada por corrosión por carbonatación, entre otros. Ver figuras 6 a 8.

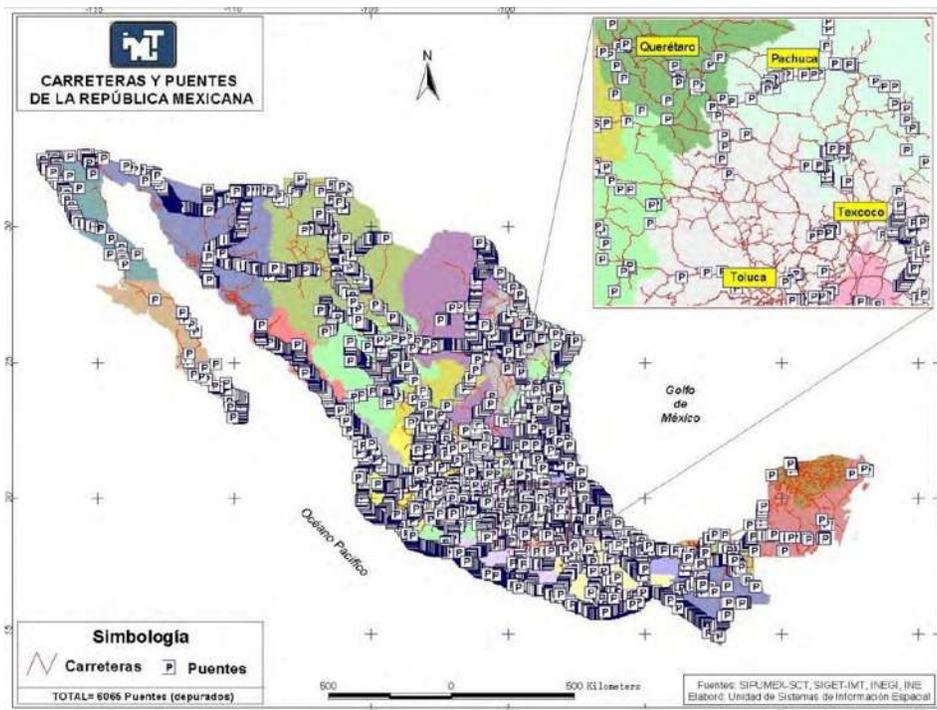


Figura 6. Inventario de carreteras y puentes [Torres et al, 2010].

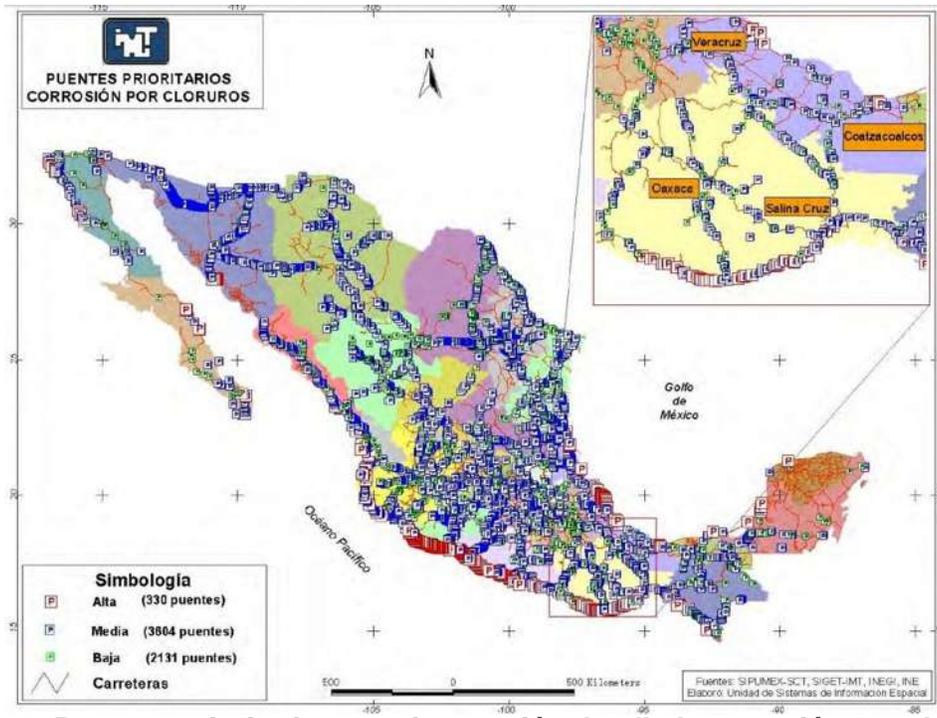


Figura 7. Puentes prioritarios para inspección detallada corrosión por cloruros [Torres et al, 2010].

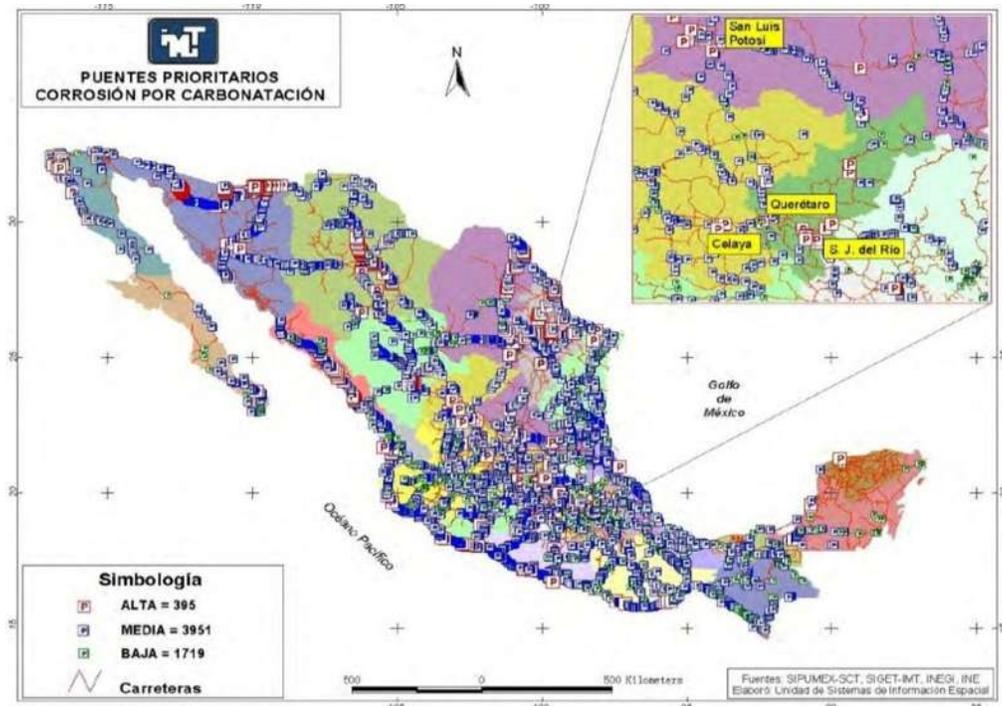


Figura 8. Puentes prioritarios para inspección detallada corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].

En la figura 9 se observa el estado del Muelle Progreso en Yucatán (superior izquierdo), del Puente Cuto del Porvenir en Michoacán (superior derecho), del Puente Tecolutla en Veracruz (inferior izquierdo) y del Puente La Misión en Baja California (inferior derecho). Fotografías del año 2001 y 2002.

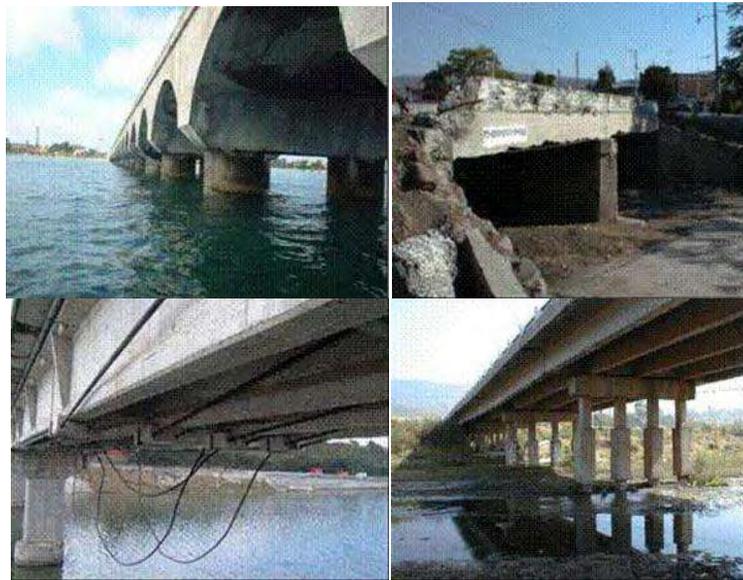


Figura 9. Fotografías del estado de algunos puentes [Torres et al, 2010].

Los problemas de corrosión por carbonatación y/o cloruros no se presentan en igual proporción en las estructuras, como se puede observar en el resumen que se presenta en la tabla 15.

Prioridad	Por penetración de cloruros	Por carbonatación
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Tabla 15. Puentes prioritarios por corrosión [López et al, 2006].

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los mayores problemas en las estructuras de concreto, es por esto que los ingenieros deben tomar atención en la construcción o el mantenimiento de estructuras tales como los puentes y las carreteras.

2.5.2 Definición.

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como *ánodo* y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama *cátodo*; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se conoce como *electrolito*. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones. [Cortés y Ortiz, 2004].

1. **Ánodo.** Es el lugar en donde ocurre la oxidación, varilla de refuerzo en su zona menos activa.
2. **Cátodo.** Es el lugar donde se lleva a cabo la reducción varilla de refuerzo pero su zona más activa.
3. **Conductor eléctrico.** Varilla de refuerzo que se encuentra embebida en el concreto y donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
4. **Electrolito.** El electrolito es la solución de poro que se queda dentro del concreto (conductor de iones). Ver figura 10.

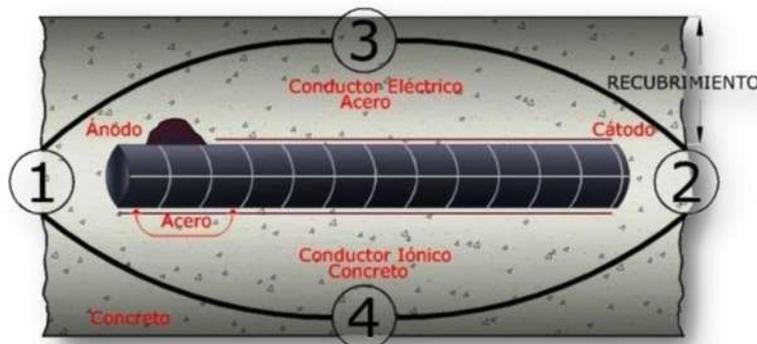


Figura 10. Elementos que componen la celda de corrosión en una estructura de acero reforzado [Red DURAR, 2000].

Cuando el acero de refuerzo comienza a oxidarse, se disuelve en el agua contenida en los poros del concreto cediendo electrones:



Para mantener un equilibrio eléctrico los dos electrones creados ($2e^{-}$) en la reacción anódica son consumidos en otros lugares de la varilla. Para ser consumidos deben reaccionar con el agua y el oxígeno contenidos en los poros del concreto.



Los átomos liberados por la varilla se convierten en iones de hierro Fe^{2+} , quedando en una solución acuosa alrededor del acero. Los electrones liberados se depositan sobre la superficie del acero provocando un aumento de su potencial eléctrico. Estos fluyen a través del acero a los sitios de bajo potencial o hacia las áreas catódicas donde se realiza la reacción, los electrones se combinan con las moléculas de oxígeno disueltos y agua formando iones hidroxilo (OH^{-}). Para que la corrosión continúe su proceso, el número de electrones aceptados por el cátodo necesita ser igual al número de electrones cedidos por el ánodo, por lo que, dos átomos de hierro deben ser ionizados y disueltos en el ánodo. Ver figura 11.

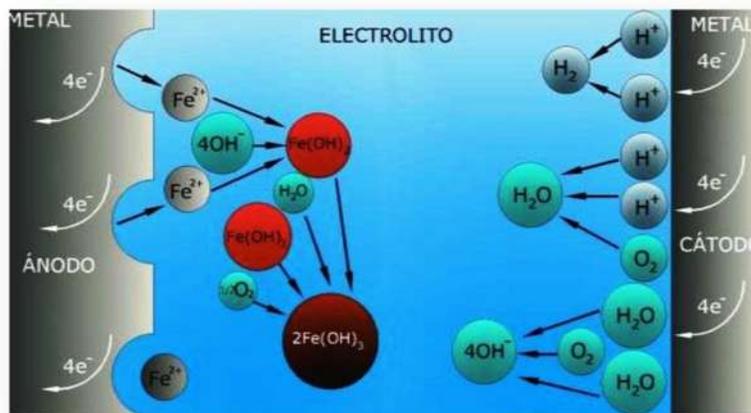
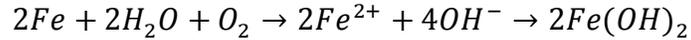
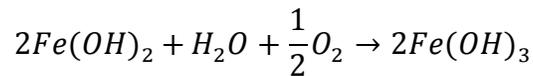


Figura 11. Reacciones anódica y catódica [Red DURAR, 2000].

Al momento de transportarse los iones de hierro (Fe^{2+}), se encuentran con los iones hidroxilo (OH) y reaccionan formando hidróxido ferroso.



El hidróxido ferroso reaccionará más adelante con iones de hidróxido adicionales y oxígeno para formar lo que conocemos como herrumbe.



La diferencia de potencial entre los dos electrodos de una celda de corrosión proporciona la fuerza motriz que empuja los electrones a través del circuito externo. A esto se le conoce como fuerza electromotriz.

El concreto es un medio alcalino. La alcalinidad es lo opuesto a la acidez. Cuando se habla del concreto como un medio alcalino es porque el concreto contiene poros microscópicos que contienen altas concentraciones de calcio soluble, hidróxidos de sodio y potasio. Estas formas de hidróxidos son muy alcalinas en presencia de agua. Esto crea una condición muy alcalina de pH 12-13 [Broomfield, 2007].

La pasivación de un metal es un proceso de transición de un estado activo a un estado pasivo debido a la formación de una película. Esta película de pasivación se genera desde que el acero de refuerzo queda en contacto con una solución de poro de alta alcalinidad, quedando así protegida contra la corrosión de manera indefinida.

2.5.3 Tipos de corrosión.

Fontana M. G. (Corrosion Engineering, 1985) ha clasificado los diferentes tipos de corrosión de acuerdo a la apariencia física del ataque. Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse con más frecuencia son los siguientes:

2.5.3.1 Corrosión por picaduras.

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa de hormigón.

De manera que se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras (representación visual en la figura 12).

2.5.3.2 Corrosión generalizada.

Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre la superficie. Ejemplos de este tipo se pueden apreciar cuando se exponen piezas de acero en soluciones diluidas ácidas o expuestos a agentes atmosféricos normales. En el área de la construcción se presenta comúnmente en los marcos de estructuras metálicas. Sin embargo, es también común cuando la capa pasiva del acero de refuerzo ha sido destruida como resultado de la carbonatación del concreto, o cuando hay una cantidad suficiente de cloruros a lo largo de la barra (representación visual en la figura 12).

2.5.3.3 Corrosión bajo tensión.

Este tipo de corrosión ocurre cuando se presentan conjuntamente dos circunstancias específicas: esfuerzos de tensión sobre el acero y un medio agresivo. Ocurre principalmente cuando se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través del metal. El hidrógeno puede provenir de diferentes fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. Este daño produce el fenómeno de fragilización por hidrógeno (representación visual en la figura 12) [Lee et al, 2006].

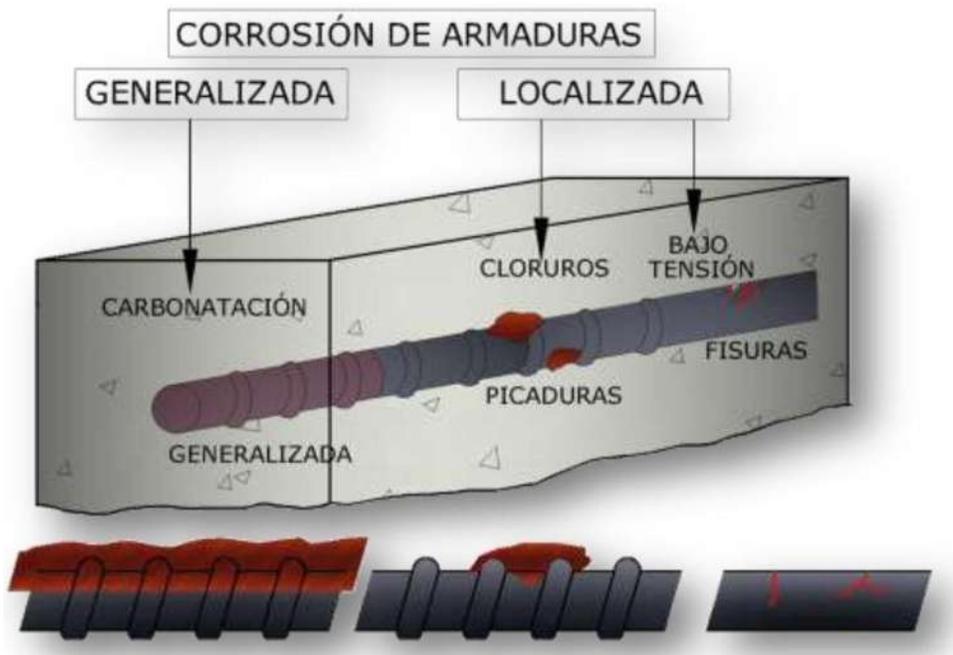


Figura 12. Tipos más comunes de corrosión en el concreto reforzado [Lee et al, 2006].

2.5.4 Factores que desencadenan la corrosión.

Se denomina así al conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el concreto. Ya se mencionó con anterioridad, que la corrosión sólo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (<8), por lo que serán

pues factores que afectan o desencadenan todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del concreto o bien, como es el caso de las fisuras y coqueas, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el concreto.

2.5.4.1 Dosificación.

La dosificación del concreto es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de éste, como elemento protector del acero de refuerzo.

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos.

La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos externos, razón por la cual la relación agua/cemento, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el concreto.

2.5.4.2 Compacidad y homogeneidad.

La compacidad es función, principalmente, de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, cumpliéndose con esta condición, la compacidad puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del concreto, propiciando la segregación de los materiales. De igual manera, la segregación puede producirse por un procedimiento deficiente en la colocación del concreto y/o inadecuado proceso de compactación.

Las mezclas con relación a/c baja ($<0,4$) son usadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad). Sin embargo, un curado deficiente de estas mezclas impide la hidratación del cemento, principalmente en la superficie del concreto, lo cual se manifestará en un incremento de la porosidad y por lo tanto en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.

2.5.4.3 Espesor del recubrimiento.

El espesor de esta capa de concreto es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto. Existen normas internacionales en las que se especifican los espesores adecuados de acuerdo con la agresividad ambiental.

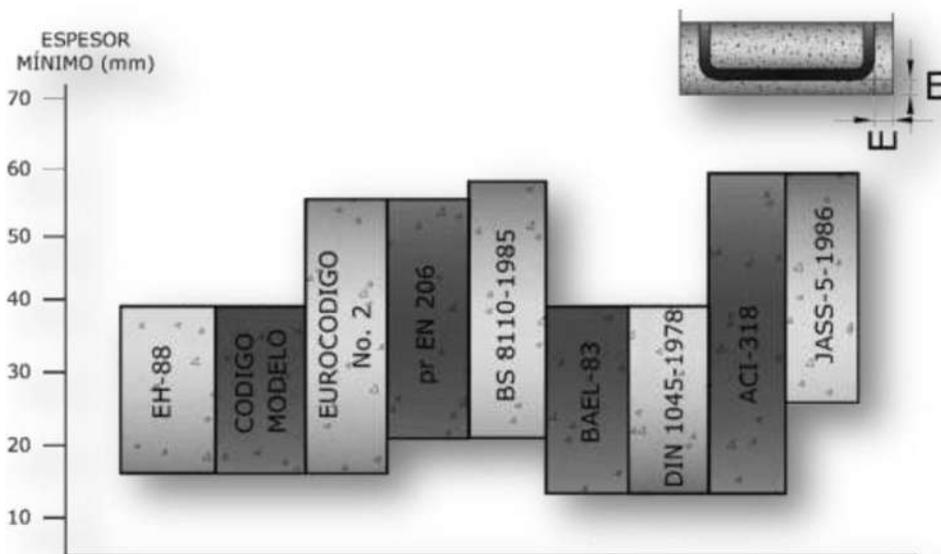


Figura 13. Espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales [Lee et al, 2006].

Sin embargo, estructuralmente es recomendable que el espesor sea el mínimo indispensable, ya que por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse, afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a

esfuerzos de tensión. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de a/c, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas (5,0 - 7,5 cm) permitan una alta durabilidad de la estructura.

2.5.4.4 Humedad ambiental.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno. Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivante sobre el acero; sólo la existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del concreto permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad en los poros del concreto, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión.

2.5.4.5 Efecto del oxígeno.

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta "aireación" de las mismas. Cuando el concreto tiene los poros completamente saturados de agua, el oxígeno se tiene que disolver en ella antes de alcanzar las cercanías de la armadura. En este caso el flujo de oxígeno es el factor controlante, ya que la cantidad que fluye es muy limitada. En todos los demás casos, el acceso de oxígeno siempre es suficiente para soportar la velocidad de corrosión que permita la resistividad del concreto.

2.5.4.6 Efecto de la temperatura.

La temperatura juega también un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.

2.5.4.7 Iones despasivantes.

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

a) Cloruros.

Provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos.

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas:

- I. porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos), o
- II. porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

En el caso de los cloruros que pueden ser adicionados durante el mezclado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de las estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables, como se muestra en la tabla 16 [Del Valle et al, 2001].

PAIS	NORMA	LIMITE MAX. DE Cl ⁻	REFERIDO A
USA	ACI 318	≤ a 0.15% en ambiente de Cl	Cemento
USA	ACI 318	≤ a 0.3% en ambiente normal	Cemento
USA	ACI 318	≤ a 1% en ambiente seco	Cemento
INGLATERRA	CP-110	≤ a 0.35% al menos en un 95%	Cemento
AUSTRALIA	AS 3600	≤ al 0.22%	Cemento
NORUEGA	NS 3474	≤ al 0.60%	Cemento
ESPAÑA	EH 91	≤ al 0.40%	Cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	≤ al 0.22%	Cemento
JAPON	JSCE-SP 2	≤ al 0.60 Kg/m ³	Concreto
BRASIL	NBR 6118	≤ al 0.05%	Agua

Tabla 16. Valor crítico de cloruros en concretos reforzados [Del Valle et al, 2001].

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior:

- I. El tiempo que tardan en llegar hasta el acero de refuerzo.
- II. La proporción que induce la despasivación.
- III. La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

El proceso de ingreso de los cloruros.

Cuando el concreto se encuentra expuesto a los cloruros (agua de mar o sales de deshielo), la penetración del ion cloruro ocurre mediante el sistema de poros capilares, grietas y defectos del concreto.

Los mecanismos de transporte generalmente se dividen en los siguientes grupos:

- I. **Difusión**, cuando el transporte de cloruros sucede por la diferencia de concentración en varias zonas. De zonas de mayor a menor concentración.
- II. **Penetración**, cuando el transporte de cloruros sucede por la diferencia de presión hidráulica en varias zonas. De zonas de mayor a menor presión. Este mecanismo de transporte ocurre en concretos con un alto número de grietas y defectos.
- III. **Migración**, cuando el transporte de cloruros sucede por diferencia de potencial eléctrico. De zonas de menor a mayor potencial. La migración ocurre cuando el concreto está expuesto a una fuga de corriente (por ejemplo en los túneles del metro). Los iones negativos de cloruro migran a través de las zonas anódicas del refuerzo. esto incrementa la velocidad de corrosión y causa corrosión por picaduras.
- IV. **Convección**, cuando el transporte de cloruros sucede por diferencia en el contenido de humedad (presión). El agua que contiene cloruros se mueve de zonas de mayor a menor humedad. Un caso especial cuando se seca la superficie del concreto. Entonces el líquido de los poros del concreto se mueve hacia la superficie y se evapora. En caso de que el concreto contenga cloruros, la evaporación implica una concentración de cloruros en la superficie. Otro caso especial es en el mojado y secado repetido del concreto, implicando muy altas concentraciones de cloruros en la superficie [Poulsen y Mejlbro, 2006].

b) Sulfatos.

El ion sulfato (SO_4^{-2}) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos. El ion sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, cálcico, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásico, cúprico y alumínico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos bóricos y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto.

Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el anión sulfato del agua con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado por el cemento, el cual se deposita en los poros del concreto en donde se cristaliza con absorción de dos moléculas de agua. Este proceso de reacción química y cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del concreto - especialmente en los de las capas superficiales - y termina por lograr su desmoronamiento. Se ha indicado que este aumento de volumen es del 17.7%.

El concreto expuesto a sulfatos, usualmente en el suelo o en aguas freáticas, puede desintegrarse en solo unos cuantos años debido a una reacción física o química, o ambas. El concreto sometido a suelos secos que contiene sulfatos no será atacado. Pero puede ocurrir una desintegración severa si el concreto inadecuadamente proporcionado es expuesto a agua conteniendo sulfatos disueltos, o si se encuentra sometido a una alternancia frecuente de mojado y secado por las aguas con sulfatos [Red DURAR, 2000].

c) Carbonatación.

Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material. El cambio abrupto de pH que se produce en el interior del concreto es el que da lugar a la aparición de un "frente carbonatado", que se revela muy bien con el indicador fenolftaleína. Cuando este frente llega hasta la armadura, ésta se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH. La velocidad de avance de este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará éste en llegar hasta la armadura.

La velocidad de avance es función fundamentalmente de [Red DURAR, 2000]:

- a) el contenido de humedad del concreto,
- b) su porosidad (relación a/c) y
- c) su contenido en materia alcalina carbonátable.

2.5.5 Métodos para el control de la corrosión.

Los métodos de protección y control de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda electroquímica de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor eléctrico).

En la siguiente tabla se listan las técnicas de protección contra la corrosión, directas cuando se aplican al acero de refuerzo e indirectas cuando se aplican al concreto.

Protección directa			Protección indirecta.			
Protección catódica.	Galvanizado.	Recubrimientos epóxicos.	Revestimientos o recubrimientos.	Inhibidores.	Realcalinización electroquímica.	Extracción electroquímica de cloruros.

Tabla 17. Técnicas de control de la corrosión [RED DURAR, 2000].

A continuación se describen brevemente las características de cada una de las técnicas de control de corrosión.

Protección.	Aplicación.	Ventajas.	Desventajas.
Protección catódica.	Cualquier estructura.	Única y eficaz en corrosión ya iniciada.	-Personal calificado. -Mantenimiento cuando es por corriente impresa.
Galvanizado.	Estructuras carbonatadas.	-Facilidad de aplicación. -Costo relativo en mantenimiento.	Deterioros locales por manipulación y mantenimiento.
Recubrimientos epóxicos	Cualquier estructura	Sin mantenimiento	-Costo elevado en la puesta en obra. -Deterioro local por manipulación.

Tabla 18. Protección directa contra la corrosión [RED DURAR, 2000].

Protección.	Aplicación.	Ventajas.	Desventajas.
Revestimientos o recubrimientos.	Cualquier estructura.	Facilidad de aplicación.	Pueden acelerar la corrosión en concreto carbonatado.
Inhibidores.	Cualquier estructura.	-Facilidad de aplicación sin mantenimiento. -Funciona en concretos elaborados con agua contaminada por cloruros.	No hay garantía de efectividad.
Realcalinización electroquímica.	Estructuras en ambientes húmedos y carbonatadas.	No necesita remoción de concreto contaminado.	Costo y dificultad de aplicación en campo.
Extracción electroquímica de cloruros.	Estructuras en ambiente húmedo y con cloruros.	No necesita remoción de concreto contaminado.	Costo y dificultad de aplicación en campo.

Tabla 19. Protección indirecta contra la corrosión [RED DURAR, 2000].

2.6 Geopolímeros.

El cemento es un componente básico en las economías emergentes; en muchos países, desde Asia hasta la Europa del Este, el cemento es el cohesionador del progreso, elemento fundamental para la construcción de edificios y carreteras. Razón por la cual, el 80% del cemento que se hace es utilizado en los países en desarrollo. Solamente China emplea el 45% de la producción mundial y en Ucrania se dobla la fabricación de cemento cada cuatro años.

Datos de la Agencia de Investigaciones Geológicas del Departamento del Interior de EU revelaron, que en el 2004, la industria del cemento mexicano alcanzó “un nivel sin precedentes” ante la producción de 35 millones de toneladas, mientras que en el 2006, la producción aumentó a 40 millones y para el año 2009 bajo a 37 millones de toneladas. Por lo anterior se hace evidente, que cada año,

no sólo aumenta la producción cementera, sino también el impacto ambiental que provoca dicha manufactura.

Existen alrededor de 30 plantas cementeras ubicadas a lo largo y ancho del país, siendo los dos consorcios cementeros más grandes Cementos de México (CEMEX) y Cementos Apasco, por encima de Cruz Azul, Moctezuma y Cementos de Chihuahua.

Si bien el uso del cemento Portland sigue siendo inevitable hasta el futuro previsible, se hacen muchos esfuerzos que incluyen la utilización de materiales cementantes complementarios, como cenizas volantes, humo de sílice, escoria de alto horno granulada, metacaolín y la búsqueda de aglutinantes como alternativa al cemento Portland.

Los geopolímeros son una nueva clase de materiales cerámicos considerados revolucionarios debido a sus ventajas técnicas, como: resistencia mecánica elevada y excelente estabilidad frente a medios agresivos. Además, su producción coadyuva a la utilización de tecnologías verdes, mitigando problemas ambientales como consecuencia del tipo de materias primas utilizadas: minerales naturales tales como el caolín calcinado a 800 °C, el metacaolín, procedente de la deshidroxidación del caolín, que es una arcilla blanca muy pura empleada para fabricar cerámica, porcelana y papel producido en los estados de Hidalgo, Zacatecas y Veracruz; de igual manera contribuye a la utilización de subproductos industriales y/o desechos –como cenizas volantes (producidos en termoeléctricas), escorias de alto horno (siderurgia) y residuos industriales de aluminosilicatos, como es la ceniza volante generada en las plantas carboeléctricas–. Sobre el empleo de este tipo de desechos, numerosos estudios se han llevado a cabo.

2.6.1 Antecedentes.

En un comienzo, los geopolímeros fueron preparados mediante la mezcla de minerales derivados de arcillas, es decir, caolinita con soluciones alcalinas de NaOH o KOH a temperaturas entre el rango de 25 a 120 °C. Con el fin de lograr una mayor reactividad, la caolinita se convierte en metacaolinita a través de la calcinación a 650 °C durante unas horas. La metacaolinita resultante tiene un alto contenido de aluminosilicatos amorfos y partículas de tamaño más pequeñas, lo que se traduce en una mayor reactividad al contacto con la solución alcalina. En este caso, geopolímeros a base de metacaolinita han sido encontrados con propiedades mecánicas superiores (resistencia a la compresión y al fuego) en comparación con cualquier otro ligante orgánico. Los materiales geopoliméricos son formados rápidamente a bajas temperaturas, sólo unas pocas horas a 30 °C, o unos pocos minutos a 85 °C, o unos pocos segundos en un horno de microondas [Davidovits, 1999].

Para geopolímeros Davidovits muestra la resistencia a la compresión de 60 MPa después de sólo un día de curado, la resistencia seguirá aumentando hasta 100 MPa. También muestra una dureza de 4-7 en la escala de Mohs y son térmicamente estables al someterse a muy altas temperaturas (1000-1200 °C), donde todas las resinas orgánicas o cemento no pueden soportar [Davidovits y Davidovics, 1998].

Estos hallazgos han hecho que los geopolímeros sean potencialmente útiles para la cerámica, materiales de revestimiento refractario, así como para los materiales de construcción.

2.6.2 Definición.

Geopolímero es un término acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de

aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización. Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos y tiene un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cementos portland. Los geopolímeros tienen la ventaja de tener bajas emisiones de CO₂ en su producción, una gran resistencia química y térmica, y buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas extremas [Davidovits, 1988].

Al igual que los polímeros orgánicos, los geopolímeros son largas cadenas poliméricas inorgánicas que están constituidas principalmente por minerales.

Los geopolímeros son una nueva clase de materiales cerámicos considerados revolucionarios debido a las ventajas técnicas que exhiben, dentro de las que se destacan: la resistencia mecánica elevada a edades tempranas y una excelente estabilidad frente a medios agresivos.

Por otra parte, su producción contribuye a la mitigación de problemas medio ambientales como consecuencia de las materias primas a partir de las cuales se obtienen (minerales, subproductos industriales y/o desechos) y a las tecnologías de proceso asociadas a un bajo consumo energético, explotación de recursos minerales y a la emisión baja CO₂ [Rodríguez et al, 2009].

Algunas ventajas que pueden obtenerse del empleo de materiales desechos o subproductos de desecho, con respecto a materiales basados en cemento Portland son:

- Propiedades mecánicas similares o en muchos casos superiores.
- Durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (p. ej., agua de mar, pisos en plantas químicas).

- Extensión de la capacidad de producción del cemento cuando se usan como reemplazo (10-90%) sin requerir de procesamiento térmico adicional (ahorro de energía y menor contaminación).
- Reducción de la acumulación de desechos en tiraderos o rellenos.

Dependiendo de la selección de la materia prima y las condiciones de procesamiento, los geopolímeros pueden exhibir una gran variedad de propiedades y características, incluyendo una alta resistencia a la compresión, baja contracción, rápido o lento ajuste, resistencia a los ácidos, resistencia al fuego y baja conductividad térmica. A pesar de esta amplia variedad de atributos, estas propiedades no son necesariamente inherentes a todas las formulaciones geopoliméricas. Los polímeros inorgánicos o geopolímeros no deben ser considerados una solución universal para todos los problemas de selección de materiales, sino más bien una solución que puede ser adoptada por la composición y el diseño adecuado para optimizar el procesamiento de las propiedades y/o reducir el costo para cada aplicación dada [Duxson et al, 2006]

2.6.3 Geopolimerización.

La geopolimerización es una reacción química de minerales (geosíntesis) cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alúmina (aluminosilicatos), y presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina (sustancia activante), la cual debe estar constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica. La alcalinidad de las soluciones activantes induce que cierta cantidad de átomos de Al y Si se disuelvan o se hidrolicen a partir de la fuente primaria de aluminosilicato (MK), para formar geonómeros (monómeros inorgánicos) en la solución y luego ser policondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales [Rodríguez et al, 2009].

En 1959 Glukhovsky propuso de manera general un mecanismo para la activación álcali de materiales compuestos principalmente de sílice y alúmina reactiva. Dividió el proceso en las siguientes etapas:

1. Disolución de los materiales sólidos de aluminosilicatos en una solución altamente alcalina. Durante esta etapa los Si y Al son transferidos de una fase sólida a una acuosa. Algunos autores hablan que en esta fase se forman especies de monómeros Si y Al, mientras que para otros autores la disolución resulta en la formación de unidades moleculares de oligómeros donde su composición dependerá del tipo de materiales, tales como la caolinita [Dimas et al, 2009].

La figura 15 presenta un mecanismo de reacción muy simplificado para la geopolimerización. El mecanismo de reacción describe los principales procesos que ocurren en la transformación de una fuente sólida de aluminosilicato en un álcali aluminosilicato sintético. Aunque en la figura se muestran de manera lineal, estos procesos están en gran parte acoplados y se producen al mismo tiempo. La disolución de la fuente sólida de aluminosilicato es por hidrólisis alcalina (consumo de agua) produciendo especies de aluminato y silicato.

Es importante tener en cuenta que la disolución de las partículas sólidas en la superficie resulta en la liberación de las especies de aluminato y silicato (probablemente en forma de oligómeros y/o monómeros) y siempre se ha asumido como el mecanismo responsable de la conversión de las partículas sólidas durante la geopolimerización [Duxson et al, 2006].

2. Formación de oligómeros Si y/o Si-Al en una fase acuosa. En esta fase las reacciones químicas tienen lugar entre las especies monoméricas de Si y Al y dan como resultado la formación de especies oligoméricas que consisten en enlaces poliméricos del tipo Si-O-Si y Si-O-Al [Dimas et al, 2009]. Formando así una compleja mezcla en un proceso de equilibrio y espaciado de silicato, aluminato y aluminosilicato. La disolución de los

aluminosilicatos amorfos es rápida en pH alto creando una solución sobresaturada de aluminosilicato. Resultando así en la formación de un gel, con oligómeros en la fase acuosa para formar grandes redes por la condensación [Duxson et al, 2006].

3. Policondensación de las unidades o especies oligoméricas en la fase acuosa para formar un polímero inorgánico mineral. Independientemente del tipo de disolución la policondensación es un proceso químico básico en el que se forma principalmente una fase gelatinosa la cual representa la parte fundamental de los materiales poliméricos [Dimas et al, 2009]. El Tiempo para que una solución sobresaturada de aluminosilicato pueda formar un gel continuo varía considerablemente con las condiciones de procesamiento de las materias primas, la composición de la solución y la síntesis. A pesar de todo esto algunos sistemas nunca gelifican, es decir, estos sistemas pueden estar diluidos y la concentración de silicio y aluminio disuelto puede mostrar una lenta respuesta y alejarse del equilibrio. Después de la gelificación el sistema continúa reordenándose y reorganizándose, la conectividad de la red se incrementa en el gel, dando por resultado una red de aluminosilicato tridimensional comúnmente atribuida a los geopolímeros. La presencia de dos etapas de “gel”, se debe a recientes observaciones y modelos numéricos para geopolímeros a base de metacaolín y la ceniza volante [Duxson et al, 2006].
4. Unión de las partículas sólidas disueltas en una estructura geopolimérica final. El endurecimiento es la etapa durante la cual los núcleos alcanzan un tamaño crítico y los cristales comienzan a desarrollarse. Este proceso de reorganización estructural determina la microestructura y la distribución de los poros del material, que son críticos en la determinación de muchas propiedades físicas [Duxson et al, 2006].

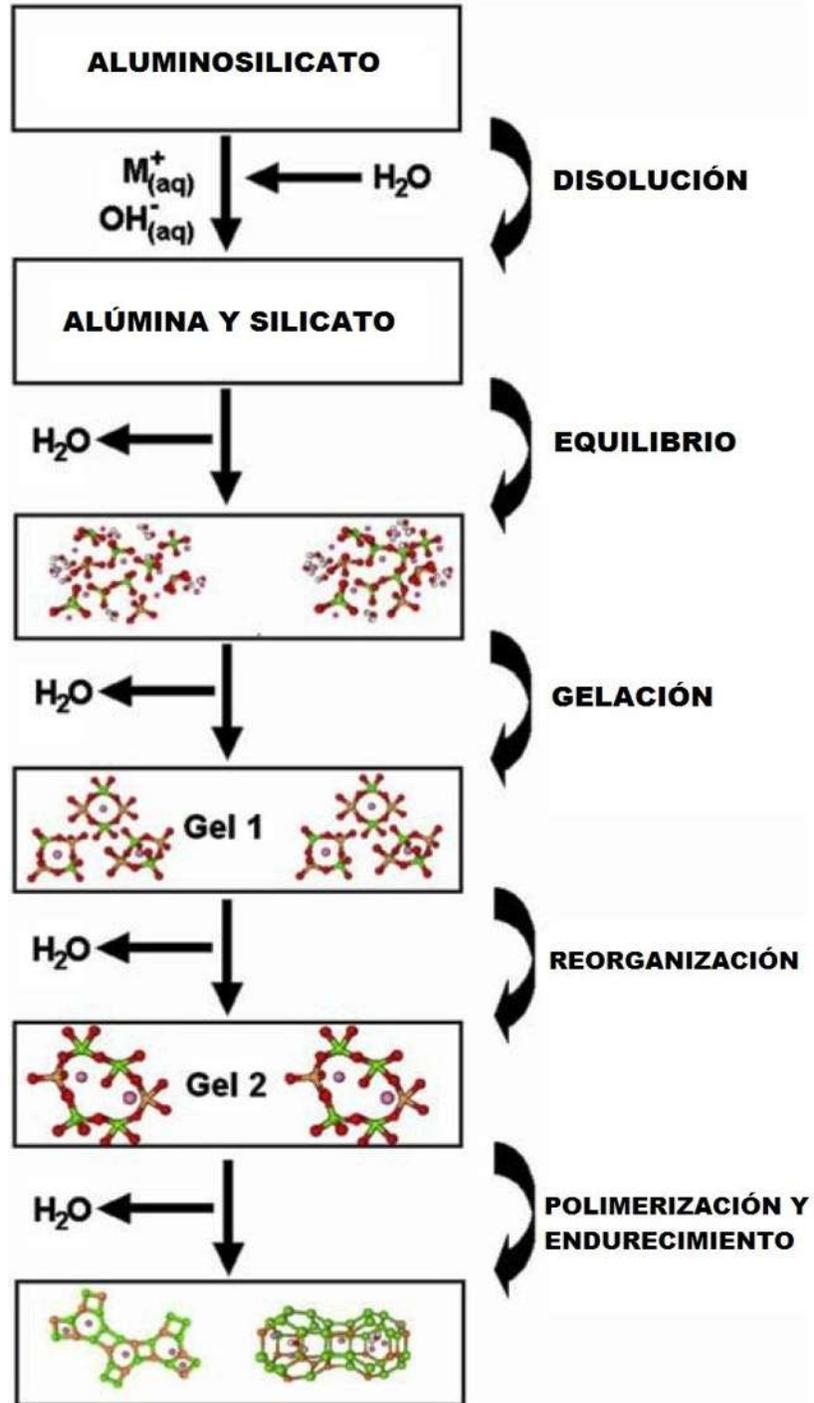


Figura 14. Modelo conceptual de la geopolimerización [Duxson et al, 2006].

2.6.4 Aplicaciones.

Las aplicaciones potenciales de los geopolímeros son las siguientes:

Area	Aplicación
Ingeniería Civil	Fraguado rápido del concreto, productos prefabricados de concreto y mezcla de concreto.
Materiales para la construcción	Ladrillos, bloques, adoquines, azulejos, paneles acústicos, tuberías.
Arqueología	Reparaciones y restauración de monumentos históricos.
Materiales compuestos	Herramientas para funciones aeronáuticas, compuestos para aplicaciones de cerámica estructural.
Materiales resistentes al fuego	Materiales compuestos para fuego y calor.
Para refractarios	Moldes refractarios para la fundición de metales.
Utilización de residuos	Uso de ceniza volante, escoria de alto horno y otros, para los productos geopoliméricos.
Inmovilización de residuos tóxicos	Encapsulación de materiales domésticos, peligrosos, radiactivos y contaminados, en materiales muy impermeables y de alta resistencia.
Otras	Pinturas, recubrimientos y adhesivos.

Tabla 20. Aplicaciones de los geopolímeros [Sanjay Kumar, 2008].

Según la relación Si/Al se recomienda el uso para:

Relación Si/Al	Aplicación
1	Ladrillos, cerámicos, protección contra el fuego.
2	Cementos de bajo CO ₂ , concretos, encapsulación de material radiactivo y tóxico.
3	Compuestos resistentes al fuego, equipos de fundición, compuestos de fibra de vidrio.
>3	Selladores industriales.
20<Si/Al<35	Resistencia al fuego, compuestos de fibra con resistencia al calor.

Tabla 21. Aplicaciones de los geopolímeros según su relación Si/Al [Hardjito y Rangan, 2005].

2.7 Métodos de ensayo.

2.7.1 Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM C 39/C 39M-03).

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que está dentro de un rango prescrito hasta que ocurra una falla. La resistencia a la compresión de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba entre el área de la sección transversal de la muestra.

Se debe tener cuidado en la interpretación de la importancia en las determinaciones de resistencia a la compresión por este método de prueba ya que el esfuerzo no es una propiedad fundamental o intrínseca de concreto a partir de determinados materiales. Los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño de la muestra, de la dosificación, de procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo y la fabricación, de la edad, la temperatura y las condiciones de humedad durante el curado.

Las pruebas de compresión en los especímenes deberán ser realizadas tan pronto como sea posible después de que estos sean retirarlos del curado. Las muestras deberán mantener la humedad por cualquier método conveniente durante el periodo comprendido entre la salida del curado y la prueba. Estas deberán ser ensayadas en condiciones húmedas.

Limpie las caras del espécimen y los bloques de apoyo superior e inferior. Coloque el espécimen sobre el bloque de apoyo (inferior) con su cara de colado hacia arriba sobre la mesa o platina de la máquina de prueba directamente debajo del asiento esférico (superior). Alinee con cuidado el eje de la muestra con el centro de empuje del bloque esférico superior.

Para máquinas de accionado hidráulico, la carga se aplicará a un ritmo de movimiento que corresponda a una tasa de carga de la muestra dentro de un rango de 0.15 a 35 MPa/s y deberá mantenerse al menos durante la segunda mitad de la carga prevista en el ciclo de la prueba. Durante la aplicación de la primera mitad de la etapa de carga se permitirá una tasa de carga mayor.

Aplicar la carga hasta que el espécimen falle y registrar la carga máxima soportada por el espécimen durante la prueba. Tenga en cuenta el tipo de falla y apariencia del concreto.

La resistencia a la ruptura por compresión se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba, entre el área promedio de la sección transversal de la muestra.

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Dónde:

$f'c$ = Esfuerzo de ruptura por compresión del cilindro de concreto (kg/cm²).

P = Carga máxima obtenida en la máquina de prueba (kg).

A = Área de la sección transversal del cilindro de concreto (cm²).

2.7.2 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material [Pérez et al, 2010].

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponden al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. [Red DURAR, 2000]. La figura 16 muestra el equipo para medir la resistividad en concreto.

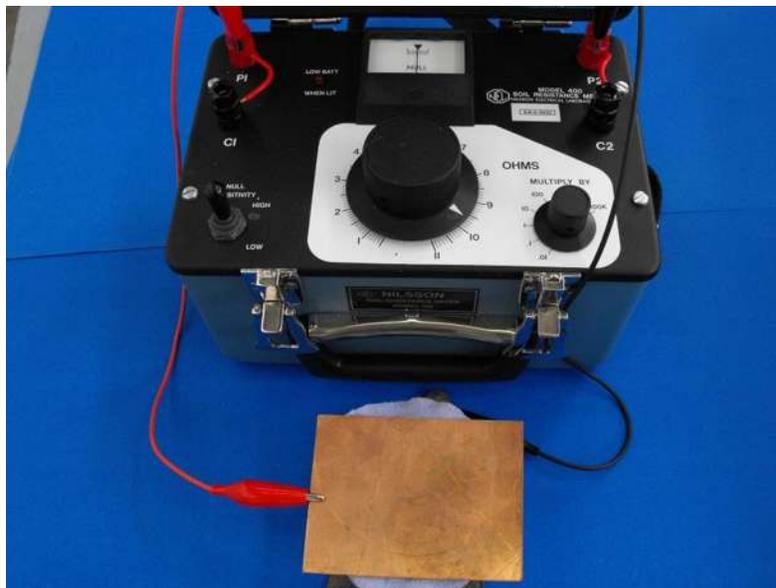


Figura 15. Resistometro Nilsson Modelo 400.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo está determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección “s” y longitud “l”, la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

A partir de esta ecuación se despeja la resistividad quedando de la siguiente manera:

$$\rho = R \frac{s}{l}$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica (Ohm-cm).

l = Longitud (cm).

s = Área o sección (cm).

R = Resistencia eléctrica (Ohm).

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro (Ω -m) u ohm por centímetro (Ω -cm).

Esta medida puede además valorar los siguientes aspectos del concreto:

- a) El endurecimiento en estado fresco.
- b) El grado de curado
- c) La resistencia a la penetración de los cloruros y la carbonatación
- d) La velocidad de corrosión de la armadura.

Resulta pues muy atractivo estudiar más a fondo sus posibilidades para tratar de conseguir un ensayo que permita una valoración de la calidad del concreto en todos sus aspectos. La Resistividad eléctrica, ρ , es capaz de informar al fabricante y al usuario de la microestructura del concreto, de su porosidad y de su contenido en agua. Con ello se tiene un control completo de las etapas por las que pasa el material. Al ser un ensayo no destructivo que se puede repetir muchas

veces sin perturbar el material, es muy adecuado para el autocontrol del fabricante y para el control de calidad del usuario [Andrade y Andrea, 2011].

La resistividad eléctrica depende principalmente del grado de saturación de los poros del concreto, y de la hidratación de la pasta; y, se ve afectada por el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otros.

La velocidad de corrosión del acero en el concreto se ve afectada por su resistividad, de ahí la importancia del análisis de dicha propiedad.

Acorde a varias investigaciones realizadas sobre los valores de resistividad eléctrica, no existe aún un acuerdo general acerca del límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión en las estructuras se pueda considerar despreciable. Pero de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, es factible emplear como criterio general el siguiente [Mejía y Peña, 2010]:

Valor	Criterio
$\rho > 200 \text{ k}\Omega - \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega - \text{cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega - \text{cm}$	Alto riesgo

Tabla 22. Criterio general de valores de resistividad eléctrica del concreto [Mejía y Peña, 2010].

2.7.3 Método Pull Off [ASTM 1583-04].

2.7.3.1 Significado y uso.

Un requisito fundamental en un material de reparación es el desarrollo de una fuerte unión con el sustrato de concreto que se mantiene intacta a lo largo de su vida útil. La fuerza y la integridad de la unión dependerán de las características físicas y químicas de los componentes (material de reparación, soporte y adhesivos), debe ser capaz de soportar las tensiones impuestas y los procesos de degradación asociados con estructuras de concreto.

El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla. Se han hecho numerosas investigaciones sobre la unión en sistemas cementicios y muchas de ellas se han preocupado por el desarrollo de una prueba adecuada. La prueba Pull Off se ha ido incrementando favorablemente y se ha convertido en una prueba in situ para el control de calidad [Austin et al, 1995].

Esta prueba sirve para medir de manera cuantitativa el esfuerzo a tensión necesario para desprender un recubrimiento que se ha colocado en un sustrato. El equipo utilizado en esta investigación corresponde a un modelo PROCEQ. Ver figura 16.



Figura 16. Equipo para prueba de adherencia marca PROCEQ.

Este método de ensayo determina la resistencia a la tensión del concreto cerca de la superficie preparada, que puede ser utilizado como un indicador de la suficiencia de la preparación de superficie antes de aplicar una reparación o un material de revestimiento.

Cuando la prueba se realiza en la superficie de una reparación o un material de revestimiento, se determina la fuerza de adherencia con el sustrato o la resistencia a la tensión de cualquiera, del recubrimiento o del sustrato, lo que sea más débil.

El método también puede utilizarse para evaluar la fuerza de adherencia de los agentes adhesivos.

2.7.3.2 Preparación de la superficie.

- Eliminar todos los contaminantes y concreto suelto o deteriorado para obtener una superficie limpia y en buen estado.
- Preparar la superficie con el mismo método que se utilizará en la reparación a gran escala o de superposición.
- La superficie debe estar en las mismas condiciones con respecto a la limpieza y deberá estar seca como sería para un trabajo real.

2.7.3.3 Equipo.

- Sacabocados, de diamante con diámetro nominal interior de 50 mm o 20 mm.
- Disco de acero, de diámetro nominal de 50 mm o 20 mm y al menos 23 mm de espesor.

- Dispositivo de carga a la tensión con un sistema de carga nominal de 22kN (5,000 lbf) capaz de aplicar la carga a una velocidad específica. El dispositivo de carga incluye un trípode o un anillo de rodamiento para la distribución de la fuerza en la superficie de apoyo. Ver figura 17.
- Dentro de un rango de operación, la fuerza de tensión indicada, será dentro de un $\pm 2\%$ de la fuerza medida por la máquina de ensayo calibrada o celda de carga.
- Comprobar que el dispositivo de carga a la tensión se calibre por lo menos una vez al año y después de las reparaciones y ajustes.
- El dispositivo de acoplamiento se utiliza para conectar el disco de acero en el dispositivo de carga a la tensión. El dispositivo de acoplamiento deberá estar diseñado para soportar la capacidad de carga de tensión sin ceder, y para transmitir la fuerza de tensión en paralelo y en línea con el eje de la probeta cilíndrica sin impartir torsión o flexión de la probeta de ensayo.

2.7.3.4 Preparación del espécimen de prueba.

- Usando el equipo de extracción de muestras, haga un corte circular perpendicular a la superficie. Para las pruebas de sustratos de concreto, la perforación será a una perforación de al menos 10 mm. Para las pruebas de los materiales de reparación o revestimiento la perforación será de al menos 10 mm por debajo de la interfaz de concreto de recubrimiento. La muestra de ensayo se deja intacta, unida al sustrato. Mida el diámetro de la probeta en dos direcciones perpendiculares entre sí. Registrar el diámetro promedio con una precisión de 0.2 mm.
- Elimine cualquier agua estancada, limpie la superficie de cualquier residuo del taladro y deje secar.
- Coloque el disco de acero en la parte superior de la probeta de ensayo utilizando el adhesivo epóxico. Asegúrese de que el disco se centra en la muestra de prueba y que el eje del disco es paralelo al eje de la probeta. El curado será de acuerdo a las instrucciones del fabricante del adhesivo

epóxico. No permita que el adhesivo epóxico se corra por el lado del corte circular de la probeta. Si esto ocurre la probeta no será probada y deberá prepararse otra. A temperaturas inferiores a 20 ° C, se permite calentar suavemente el disco de acero para facilitar la difusión del adhesivo y para acelerar el curado. La muestra de ensayo no se calienta con llama directa.

2.7.3.5 Procedimiento de prueba.

- Conecte el dispositivo de carga a la tensión en el disco de acero con el dispositivo de acoplamiento.
- Aplicar la carga de tensión a la probeta de ensayo de modo que la fuerza sea paralela y coincidente con el eje de la muestra.
- Aplicar la carga de tensión a una velocidad constante, de manera que los aumentos de tensión sean de una velocidad de 35 ± 15 kPa/s (5 ± 2 psi/s).
- Registrar la carga de falla y el tipo de falla.
- Informar de los resultados como fuerza de adherencia, cuando se produce el fallo en la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento. Informe de resultados de resistencia a la tensión cuando el fallo se produce en el sustrato o el material de reparación o revestimiento.
- Calcule la fuerza de adherencia o resistencia a la tensión mediante la división de la carga de tensión de falla y el área del espécimen de prueba.

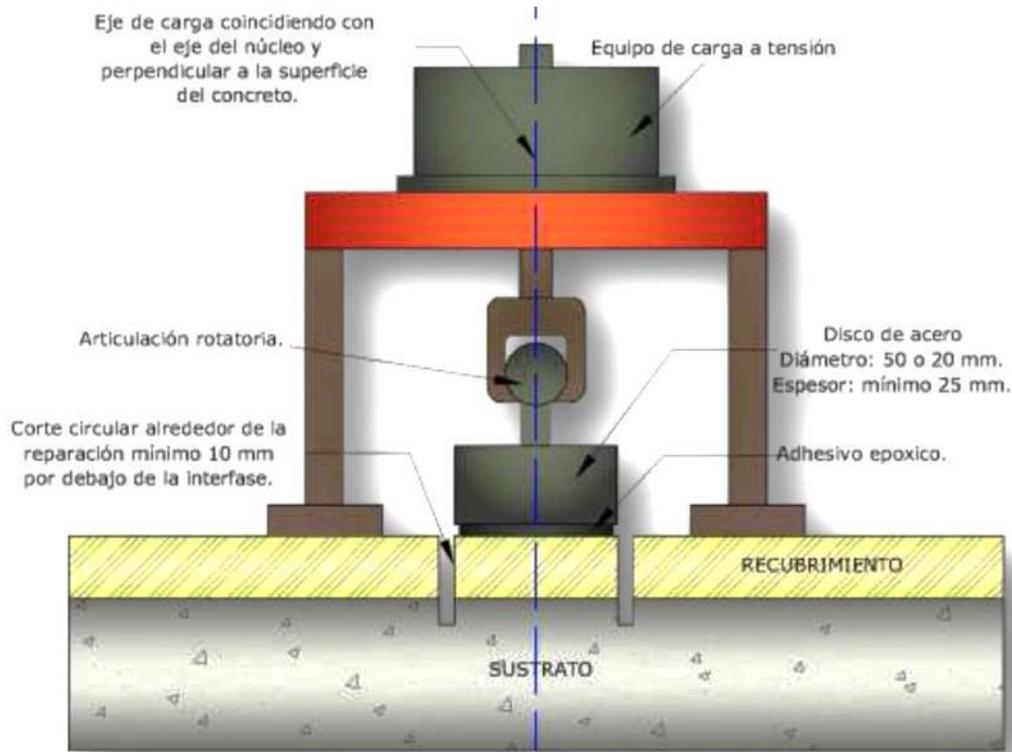


Figura 17. Representación esquemática de la prueba Pull Off [ASTM 1583-04].

2.7.3.6 Tipos de falla.

- I. En el sustrato.
- II. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
- III. En el material de reparación o revestimiento.
- IV. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero. Si se produce un fallo en la línea de unión entre el epóxico y el disco de acero, se deberá desechar el resultado y realizar otra prueba.

En la figura 19 se muestra de manera esquemática cada tipo de falla.

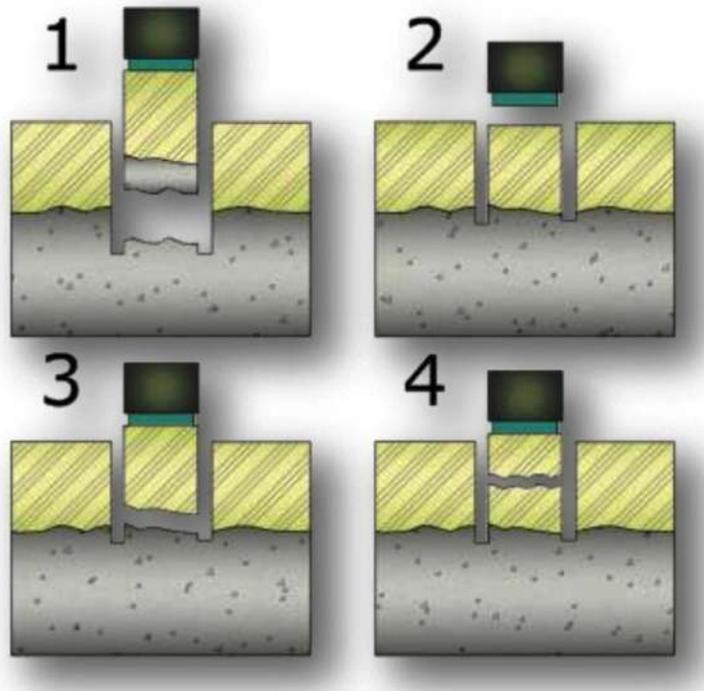


Figura 18. Tipos de falla en la prueba Pull Off.

2.7.4 Ensayo de permeabilidad rápida de cloruros [ASTM C 1202-12].

Este método comprende la determinación de la conductividad eléctrica del concreto para proporcionar un índice rápido de resistencia a la penetración del ión cloruro.

Los resultados numéricos (carga eléctrica total, en coulombs) de este método deben ser utilizados con precaución, especialmente en aplicaciones como control de calidad y pruebas de aceptación. Para lo que se proporcionan los siguientes criterios cualitativos:

Carga eléctrica total (coulombs)	Penetrabilidad del ión cloruro	Tipo de concreto
> 4,000	Alta	a/c > 0.5
2,000 – 4,000	Moderada	a/c = 0.4 a 0.5
1,000 – 2,000	Baja	a/c < 0.4
100 – 1,000	Muy baja	Concreto modificado con látex
< 100	Despreciable	Concreto polimérico

Tabla 23. Penetrabilidad del ión cloruro [Manual del equipo Proove'it].

Especial cuidado debe tenerse en la interpretación de estos resultados cuando se utilizan concretos con inhibidores. En muchos casos los concretos muestran poca resistencia a la penetrabilidad del ión cloruro, pero después de 90 días pasada la prueba muestran resistencias muy altas.

Este método se aplica en especímenes de 4" (102mm) hasta 3.75" (95mm) de diámetro nominal (figura 19). Para especímenes de diámetros menores debe modificarse la celda conforme a la norma según el apartado 7.5, además debe aplicarse una corrección al resultado de acuerdo al apartado 11.2 de la misma.

Conforme pasa el tiempo, los especímenes muestran cambios significativos. La mayoría de los concretos, si se curan adecuadamente, se vuelven menos permeables con el tiempo.

2.7.4.1 Equipo.

- Bomba de vacío con trampa para agua.
- Desecador con dos válvulas y manómetro.
- Celdas para prueba.
- Fuente de poder con microprocesador.
- Mangueras
- Cortadora de concreto.

2.7.4.2 Reactivos y materiales.

- Solución de Cloruro de Sodio al 3% en masa (agua destilada).
- Solución de Hidróxido de Sodio 0.3 Normal (agua destilada).
- Empaques para las celdas.
- Medidor de temperatura (opcional).
- Voltímetro.
- Cables No. 14, aislados y con capacidad de 600V.
- Sellador (aceite de silicón).

2.7.4.3 Procedimiento de prueba.

- Hervir durante 15 minutos el agua necesaria para el desecador (4 litros) para asegurarse que esté libre de aire.
- Dejar enfriar el agua y colocarla cerca del desecador.
- Cortar especímenes cilíndricos de concreto de 10cm de diámetro y 5cm de espesor.
- Colocar los especímenes dentro del desecador (6 máximo).
- Limpiar el sello o empaque del desecador y humedecerlo con el aceite de silicón.
- Colocar la tapa del desecador.
- Conectar la manguera de la bomba de vacío a una de las válvulas del desecador.
- Prender la bomba de vacío y abrir la válvula, manteniendo cerrada la segunda válvula del desecador.
- Esperar unos segundos para alcanzar el máximo vacío posible.
- Cerrar la válvula, apagar la bomba de vacío y mantener el vacío durante 3 hrs.
- Conectar una segunda manguera a la segunda válvula del desecador y colocar el otro extremo dentro del recipiente que contiene el agua libre de aire.

- Abrir la segunda válvula y dejar que fluya el agua hacia el desecador hasta cubrir totalmente los especímenes. No debe entrar aire al desecador.
- Cerrar la válvula que va al recipiente con agua, prender la bomba de vacío y abrir la válvula que está conectada a la bomba de vacío.
- Esperar hasta llegar al máximo vacío posible y apagar la bomba de vacío. Mantener el vacío durante 1 hr.
- Quitar las dos mangueras y abrir una de las válvulas lentamente para que entre aire al desecador.
- Dejar los especímenes sumergidos durante 18hrs, con una de las válvulas abiertas y sin destapar el desecador.
- Colocar los especímenes en las celdas y proceder con la prueba.

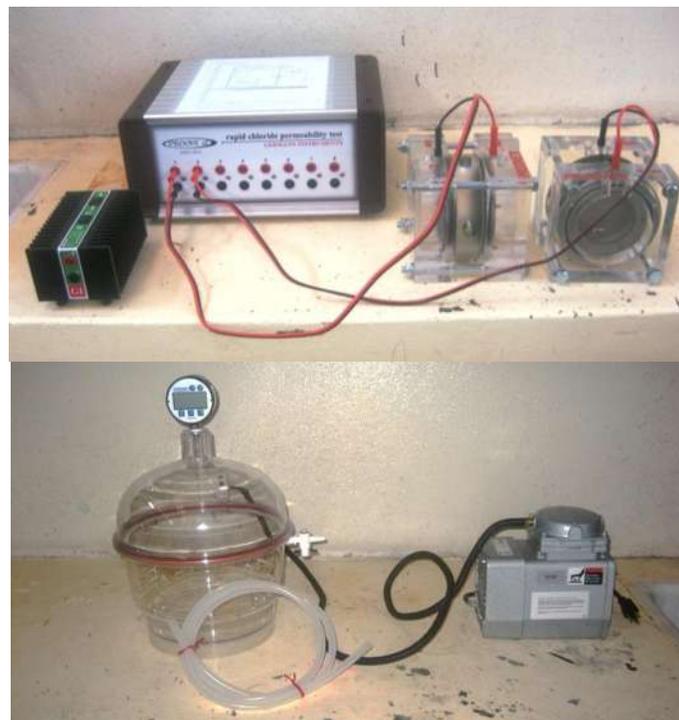


Figura 19. Equipo de permeabilidad rápida de cloruros marca Proove'it.

2.7.5 Método estándar de durabilidad para agregados usando Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio [ASTM C 88-99a].

Esta norma es para agregados, pero para fines de esta investigación y suponiendo que el concreto es una roca artificial se realizaron algunas modificaciones para su utilización en concreto.

Este método comprende la estimación de la durabilidad de los agregados sujetos a la acción de la humedad en concreto y otras aplicaciones. Esto se logra mediante repetidas inmersiones en soluciones de sulfato de sodio o magnesio saturadas, seguidas de secado en horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros del concreto. La fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal después de la re-inmersión, simula la expansión del agua cuando se congela.

2.7.5.1 Uso.

Los valores obtenidos pueden ser comparados con la especificación de la norma C 33 donde recomienda para uso en concreto: 18% para agregados sometidos a ciclos de sulfato de magnesio y 12% para agregados sometidos a ciclos de sulfato de sodio. Este método no es adecuado para el rechazo de los agregados sin antes confirmar con otros métodos más específicos de acuerdo al uso que se le dará al agregado.

Los valores de porcentaje de pérdida permitidos de este método son generalmente diferentes para los agregados finos y gruesos, y llama la atención el hecho de que los resultados de las pruebas mediante el uso de las dos sales difieren considerablemente y se debe tener cuidado en la fijación de límites apropiados en las especificaciones que incluyen requisitos para estas pruebas. La prueba es generalmente más severa cuando se utiliza sulfato de magnesio; en consecuencia, los límites para la pérdida por ciento permitidos

cuando se utiliza sulfato de magnesio son normalmente más altos que los límites cuando se utiliza sulfato de sodio.

2.7.5.2 Equipo.

- Recipientes. Para sumergir los agregados en la solución de acuerdo al procedimiento de prueba. Será perforado de tal manera que permita el libre acceso de la solución y el drenaje de la misma sin pérdida de agregado.
- Regulador de temperatura. Adecuado para regular la temperatura de las muestras que facilitara su inmersión en el sulfato de sodio o magnesio.
- Balanza. Para agregado fino, se requiere una balanza con precisión de 0.1gr; para agregado grueso, se requiere una balanza con precisión de 1gr o mayor.
- Horno. Debe mantener una temperatura constante de 110 ± 5 °C y la velocidad de evaporación a esta temperatura debe ser al menos de 25g/h durante las primeras 4 h, con las puertas del horno cerradas.
- Medidor de gravedad específica.

2.7.5.3 Soluciones especiales.

El volumen de solución debe ser al menos cinco veces el volumen de la muestra. Si el agregado contiene carbonatos de calcio o magnesio, debe mantenerse la gravedad específica de la solución después de cada ciclo de inmersión para evitar medidas de pérdida erróneas.

- Sulfato de sodio. Preparar una solución saturada de sulfato de sodio disolviendo sal USP (sal que cumple con las especificaciones que exigen las normas de los Estados Unidos de Norteamérica) o de igual grado, en agua a una temperatura de 25 a 30 °C. Agregar suficiente sal asegurando no solo la saturación de la solución sino también la presencia de cristales a la hora de su uso en la prueba. Agite la mezcla mientras agrega la sal y

también en intervalos frecuentes después de preparada la mezcla y antes de usarla en la prueba. Para reducir la evaporación y prevenir contaminación mantener la solución cubierta cuando no se utilice. Mantener la solución en reposo y a una temperatura de 21 ± 1 °C durante 48 h antes de su uso. Antes de cada uso romper los cristales, agitar de nuevo y determinar la gravedad específica de la solución. La solución debe tener una gravedad específica no menor a 1.151 y no más de 1.174. Quitar la solución descolorida o filtrarla y checar la gravedad específica.

Para la solución, 215g de sal anhidra o 700g de sal decahidratada (contiene 10 moléculas de agua por cada unidad de sal en la red cristalina) por litro de agua son suficientes para la saturación a 22°C. Sin embargo, como estas sales no son completamente estables y se desea la presencia de cristales en la solución, se recomienda no menos de 350g de sal anhidra o 750g de sal decahidratada por litro de agua.

- Sulfato de magnesio. Preparar una solución saturada de sulfato de magnesio disolviendo sal USP o de igual grado, en agua a una temperatura de 25 a 30 °C. Agregar suficiente sal asegurando no solo la saturación de la solución sino también la presencia de cristales a la hora de su uso en la prueba. Agite la mezcla mientras agrega la sal y también en intervalos frecuentes después de preparada la mezcla y antes de usarla en la prueba. Para reducir la evaporación y prevenir contaminación mantener la solución cubierta cuando no se utilice. Mantener la solución en reposo y a una temperatura de 21 ± 1 °C durante 48h antes de su uso. Antes de cada uso romper los cristales, agitar de nuevo y determinar la gravedad específica de la solución. La solución debe tener una gravedad específica no menor a 1.295 y no más de 1.308. Quitar la solución descolorida o filtrarla y checar la gravedad específica.

Para la solución, 350g de sal anhidra o 1230g de sal heptahidratada (contiene 7 moléculas de agua por cada unidad de sal en la red cristalina) por litro de agua son suficientes para la saturación a 23°C. Sin embargo, como estas sales no son completamente estables, siendo la sal anhidra la

más estable y se desea la presencia de cristales en la solución, se recomienda no menos de 1400g de sal heptahidratada por litro de agua.

2.7.5.4 Procedimiento de prueba.

- Secar las muestras a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta peso constante.
- Sumergir las muestras en la solución de sulfato no menos de 16h y no más de 18h y de manera que queden cubiertas al menos por $\frac{1}{2}$ " de solución. Cubrir los recipientes para reducir la evaporación y prevenir la adición accidental de otras sustancias. Mantener las muestras inmersas a una temperatura de 21 ± 1 °C.
- Después de la inmersión, sacar las muestras de la solución y dejarlas secar a temperatura ambiente durante 15 ± 5 minutos y colocarlas dentro del horno. El horno debe estar a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Sacar las muestras del horno dejarlas enfriar durante 15 ± 5 minutos y registrar su peso.
- Se repite otras 4 veces el ciclo de inmersión, secado y registro de peso, para completar los 5 ciclos de prueba.

El porcentaje de peso final de la muestra se determina mediante la siguiente formula:

$$W\% = \frac{W_2}{W_1} * 100$$

Dónde;

$W\%$ =Porcentaje de peso final.

W_1 =Peso inicial de la muestra (g).

W_2 =Peso final de la muestra (g).

3 MARCO EXPERIMENTAL.

En este capítulo se tratan los materiales, la elaboración y evaluación del recubrimiento geopolimérico ecológico, con base en diferentes pruebas que permitan caracterizar su comportamiento en cuanto a adherencia, porosidad, resistencia a la compresión y trabajabilidad.

3.1 Recubrimiento geopolimérico.

Se tenía un geopolímero base de referencia (Medina, 2011) que constaba de los siguientes componentes:

3.1.1 Componentes.

3.1.1.1 Metacaolín.

Se denomina caolín a la arcilla que está compuesta de silicatos hidratados de aluminio y que es producto de la descomposición e intemperismo en condiciones climáticas especiales de las rocas y minerales con alto contenido de aluminio.

Es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500 y 600 °C; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina al romper los enlaces de Van der Waals (OH) que unen los tetraedros de sílice, SiO_2 y los octaedros de alúmina, Al_2O_3 , es decir, al perder el agua combinada por la acción térmica se destruye la estructura cristalina del caolín [Restrepo et al, 2006].

El metacaolín, (figura 20) después de ser sometido a dicha transformación, posee una gran cantidad de energía interna lo que lo hace

altamente reactivo. Es por esto que ha sido utilizado últimamente en adiciones y sustituciones del cemento Portland con resultados muy favorables en resistencia mecánica e impermeabilidad.

La caolinita y otras arcillas fueron inicialmente usadas en 1975 como finos para la encapsulación de los desechos radioactivos dentro de un sólido monolítico. Davidovits utilizó de manera preliminar la caolinita y la caolinita calcinada (metacaolín) como fuente de óxidos de aluminosilicatos para sintetizar los geopolímeros.

De la naturaleza del material base, se afirma que los materiales calcinados, como cenizas volantes, escorias, caolín calcinado (metacaolín) han demostrado una mayor resistencia a la compresión, en comparación con los elaborados de materiales que no están calcinados, por ejemplo la arcilla de caolín, minerales de origen natural. Sin embargo la combinación de material calcinado y material no calcinado, produjo una mejora significativa en la resistencia a la compresión y la reducción del tiempo de reacción [Hardjito y Rangan, 2005].

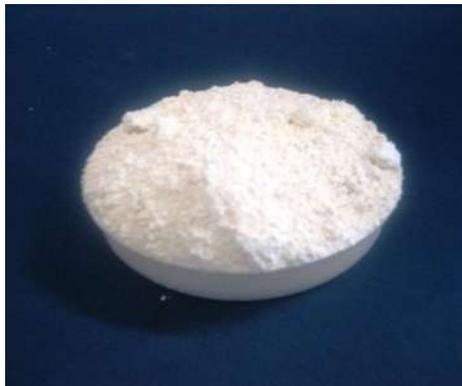


Figura 20. Metacaolín.

3.1.1.2 Hidróxido de Potasio.

En teoría, cualquier álcali y alcalinotérreo se puede utilizar como elemento alcalino en las reacciones de geopolimerización, sin embargo la mayoría de los estudios se han concentrado en el efecto de los iones de sodio (Na^+) y potasio (K^+). La elección del tipo de alcalino utilizado depende de muchos factores, el más importante es el tipo de materiales base, así como la aplicación prevista para la producción de los geopolímeros [Komnistas y Zaharaki, 2007].

Los líquidos alcalinos más comunes usados en la geopolimerización es una combinación de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (figura 21) (KOH) y silicato de sodio o silicato de potasio.

De diversas investigaciones se ha concluido que el tipo de líquido alcalino juega un papel importante y se ha confirmado que la adición de una solución de silicato de sodio a la solución de hidróxido de potasio como líquido alcalino mejora la reacción entre el material de origen y la solución. Además se encontró que en general la solución de NaOH causó un mayor grado de disolución de minerales que la solución de KOH [Hardjito y Rangan, 2005].



Figura 21. Hidróxido de Potasio.

3.1.1.3 Nanosílice.

Es un subproducto de la reducción de cuarzo para la producción de silicio y ferrosilicio. Es un polvo muy fino que consiste en esferas de sílice no cristalinas con un diámetro medio aproximado de 0.1 micras y se produce a temperaturas aproximadamente de 2050°K. Debido a su pequeño tamaño de partícula es altamente reactivo [Lázaro y Brouwers, 2010]. Ver figura 22.



Figura 22. Nanosílice.

3.1.1.4 Agua destilada.

Es agua libre de iones y minerales, compuesta sólo de moléculas de H₂O. Ver figura 23.



Figura 23. Agua destilada.

3.1.1.5 Cemento CPC 30R RS.

Cemento Portland compuesto con resistencia de 20 MPa a los 3 días y 30 MPa a los 28 días resistente a los sulfatos. Para esta investigación se utilizó Cemento Cemex Tolteca Extra. Ver figura 24.



Figura 24. Cemento Cemex Tolteca CPC 30R RS.

3.1.1.6 Marmolina.

Es un material industrial proveniente de la molienda más fina de materiales carbonáticos (mármoles) que proporcionan excelentes propiedades físico-químicas, ideales para productos expuestos a humedad permanente. Combinada con cemento otorga resistencia y durabilidad. Ver figura 25.



Figura 25. Marmolina.

3.1.1.7 Látex.

El látex estireno-butadieno, frecuentemente abreviado SBL (del inglés Styrene-Butadiene Latex) es un elastómero sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. Es el látex sintético con mayor volumen de producción mundial. Su principal aplicación es en la fabricación de neumáticos. Ver figura 26.

Presenta excelente resistencia a la abrasión, al impacto, excelente resistencia eléctrica, muy baja permeabilidad a los gases y buena resistencia al agua.



Figura 26. Látex de estireno butadieno.

3.1.1.8 Microesfera de vidrio.

Es un componente esférico de granulometría controlada que es utilizado para lograr un alto índice de reflectancia sobre las pinturas de señalización vial. Su forma esférica permite un mejor acomodo, disminuyendo la permeabilidad del recubrimiento. Ver figura 27.



Figura 27. Microesfera de vidrio.

3.1.2 Geopolímero base y sustituciones.

Se observó un buen comportamiento en el geopolímero base pero buscando lograr una mayor adherencia, una mejor resistencia mecánica y mayor durabilidad, se propuso sustituir porcentajes de metacaolín por cemento Portland y evaluar las características de adherencia, durabilidad, absorción y resistencia mecánica. Las sustituciones realizadas y evaluadas son de 10, 20, 30 y 40% en peso. De tal manera que los recubrimientos quedaron conformados de la siguiente forma.

El geopolímero base del recubrimiento está compuesto de la siguiente forma:

Recubrimiento base (g)	
MK	55.53
H ₂ O	76.56
KOH	28.05
SiO ₂	15.02

Tabla 24. Geopolímero base.

Las sustituciones propuestas de cemento por metacaolín y que fueron utilizadas para elaborar cubos para su posterior caracterización son las siguientes:

Sustitución del 10% (g)	
MK	49.98
CPC 30R RS	5.55
H₂O	76.56
KOH	28.05
SiO₂	15.02
Total	175.17

Tabla 25. Sustitución del 10%.

Sustitución del 30% (g)	
MK	38.87
CPC 30R RS	16.66
H₂O	76.56
KOH	28.05
SiO₂	15.02
Total	175.17

Tabla 27. Sustitución del 30%.

Sustitución del 20% (g)	
MK	44.43
CPC 30R RS	11.11
H₂O	76.56
KOH	28.05
SiO₂	15.02
Total	175.17

Tabla 26. Sustitución del 20%.

Sustitución del 40% (g)	
MK	33.32
CPC 30R RS	22.21
H₂O	76.56
KOH	28.05
SiO₂	15.02
Total	175.17

Tabla 28. Sustitución del 40%.

3.1.3 Agregados.

Los porcentajes de los agregados son los siguientes y no varían, el único cambio es la presencia de látex. Se fabricaron recubrimientos con látex y sin látex.

Agregado.	Peso (g)	Porcentaje del total de geopolímero base.
Marmolina.	350.34	200
Microesfera.	35.03	20
Látex.	52.55	30

Tabla 29. Agregados del recubrimiento.

3.1.4 Caracterización.

Se elaboraron 60 cubos de 5cm, 12 cubos sin látex para la prueba de alta temperatura y 48 para las pruebas de absorción, resistividad eléctrica y resistencia a compresión. Los cubos se elaboraron conforme a la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004.

Los 48 cubos están distribuidos de la siguiente forma, obteniéndose 8 mezclas distintas:

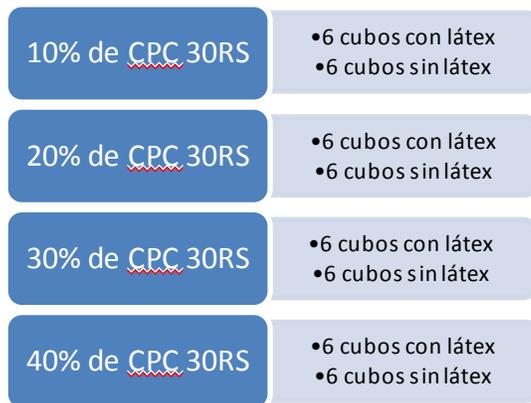


Figura 28. Distribución de los 48 cubos elaborados.



Figura 29. Cubos con sustitución de 10 y 20% sin látex.



Figura 30. Cubos con sustitución de 30 y 40% sin látex.



Figura 31. Cubos con sustitución de 10 y 20% con látex.



Figura 32. Cubos con sustitución de 30 y 40% con látex.

Estos cubos fueron caracterizados mediante las siguientes pruebas:

3.1.4.1 Absorción.

Esta prueba tiene como objetivo medir el incremento en la masa de un espécimen cuando es sumergido en agua durante 24hrs, a temperatura ambiente. Este aumento de masa tiene lugar debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca, y es el índice de porosidad del material.

Para obtener la absorción se colocaron los 48 especímenes dentro de un horno a 100°C por un lapso de 24h, se registraron los pesos secos de las muestras. Después se sumergieron en agua durante 24h, se secaron superficialmente y se registraron los pesos húmedos. Mediante la siguiente formula se determina el porcentaje de absorción.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$



Figura 33. Prueba de absorción en cubos.

3.1.4.2 Resistividad eléctrica.

Esta prueba tiene como objetivo medir la capacidad de oposición al paso de una corriente eléctrica que tiene el geopolímero.

Después de saturar los especímenes para la prueba de absorción, se aprovechó para medir la resistencia eléctrica de los cubos con un resistometro marca Nilsson modelo 400.



Figura 34. Medición de resistividad eléctrica.

3.1.4.3 Resistencia a compresión.

Esta prueba tiene como objetivo determinar el esfuerzo máximo a compresión que resisten los cubos de geopolímero. La prueba se realizó en la maquina universal Tinius Olsen.



Figura 35. Prueba de resistencia a compresión en cubos.

Se observó (Kong et al, 2007) que el geopolímero mejora su comportamiento si se aplica un tratamiento térmico a alta temperatura después de 24h de fraguado.

Por ello se estudiaron dos mezclas más; una novena mezcla de geopolímero base con 175% de marmolina y una décima mezcla con 250% de marmolina.

3.1.4.4 Tratamiento térmico.

Para evaluar el comportamiento del recubrimiento a altas temperaturas se utilizaron 12 cubos de 5 cm. A las 24hrs de elaborados, 6 cubos (3 con 175% de marmolina y 3 con 250% de marmolina) fueron sometidos a 400°C en una mufla durante 1 hr y los 6 restantes (3 con 175% de marmolina y 3 con 250% de marmolina) se dejaron a temperatura ambiente. Después a los 12 cubos se les realizaron pruebas de absorción, resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Se decidió que los cubos elaborados para esta prueba no contengan látex debido a que después de los 70 °C el látex de estireno butadieno comienza a calcinarse.



Figura 36. Tratamiento térmico.

3.2 Mortero de cemento con metacaolín y nanosílice.

Para evaluar el comportamiento en conjunto del cemento, el metacaolín y el nanosílice se elaboraron 60 cubos con relación 1:3 y conforme a las normas NMX-C-159-ONNCCE-2004 y NMX-C-329-ONNCCE-2010. Cuarenta para someterse a intemperismo acelerado y 20 para resistencia a compresión a 14, 21 y 28 días de edad.

Se observó (Tróchez et al, 2009) que los morteros que contienen adiciones de metacaolín y humo de sílice aumentan 40% su resistencia a compresión y tienen un excelente desempeño en presencia de cloruros y sulfatos.

Por ello se fabricaron 30 cubos de cemento con 20% de MK y 5% de NS en adición con respecto al peso del cemento y 30 cubos con 15% de MK y 3% de NS.



Figura 37. Cubos de mortero con sustitución de metacaolín y nanosílice.

3.2.1 Caracterización.

3.2.1.1 Intemperismo acelerado.

Primer ciclo.

El primer ciclo consistió en la inmersión de 40 cubos en la solución de sulfato de sodio, durante un tiempo de 17 h, aprovechando que se encontraban saturados se intentó medir la resistencia eléctrica pero los cubos fallaron en el primer ciclo por lo que no se pudo medir. Se secaron superficialmente y se pesaron para registrar el peso saturado. Transcurrido dicho tiempo se llevaron las muestras al horno a una temperatura de 100 °C durante 24h, se dejaron enfriar un tiempo de 15 minutos y se pesaron para registrar su peso seco.



Figura 38. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cubos de mortero con sustitución.

Nótese en la figura anterior que los cubos identificados con marcador azul se encuentran en mejores condiciones, que corresponden a los que contienen 20% de metacaolín y 5% de nanosílice.



Figura 39. Resistencia a la compresión en cubos de mortero con sustitución.

La prueba de resistencia a compresión se realizó después de secar los especímenes en el horno a 100 °C durante 24h.

Los cubos que contenían 15% de metacaolín y 2% de nanosílice no resistieron el primer ciclo, al momento de sacarlos del recipiente se disgregaban (ver figura 40).



Figura 40. Falla de los cubos de mortero con sustitución después del primer ciclo de intemperismo acelerado.

Segundo ciclo.

El segundo ciclo consistió en la inmersión de los 17 cubos que no se destruyeron, a la solución de sulfato de sodio, durante un tiempo de 17h. Se secaron superficialmente y se pesaron para registrar el peso saturado. Transcurrido dicho tiempo se llevaron las muestras al horno a una temperatura de 100 °C durante 24h, se dejaron enfriar un tiempo de 15 minutos y se pesaron para registrar su peso seco.



Figura 41. Segundo ciclo de intemperismo acelerado en cubos de cemento con sustitución.

Para este ciclo ya no se pudo realizar ninguna prueba, debido a que los especímenes no resistieron el ataque de los sulfatos (ver figura 41).

3.3 Concreto hidráulico.

Para las pruebas de intemperismo acelerado con sulfato de sodio y de adherencia se requirió elaborar cilindros de concreto y una losa de concreto. La dosificación para dichos elementos se muestra a continuación.

3.3.1 Proporcionamiento.

El diseño de la mezcla de concreto utilizada en los especímenes para las pruebas que se realizaron, fue siguiendo el método de ACI (American Concrete Institute) para un concreto $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, con un revenimiento de 15 cm y relación A/C de 0.5. Se utilizó cemento Tolteca CPC-30R RS. Las características de los materiales y las estimaciones de la dosificación se muestran en las tablas siguientes.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES			
Material	Cemento	Arena	Grava
Tipo	Tolteca CPC-30R RS	Río	Volcánica
Densidad		2.33	2.13
P.V.S.S. (kg/m^3)	3.10	1397.25	1148.51
P.V.S.V. (kg/m^3)	1490.00	1522.29	1252.24
Tamaño Máximo			1"
Módulo de Finura		1.93	
% Absorción		3.20	3.10
P.V.S.S.=Peso volumétrico seco suelto, P.V.S.V.=Peso volumétrico seco varillado			

Tabla 30. Características de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.

ESTIMACIÓN DEL AGREGADO FINO			
Materiales	Peso (kg)	Densidades (g/cm ³)	Volumen (m ³)
Cemento	358.43	3.1	0.116
Agua	202.00	1	0.202
Aire	---	---	0.015
Arena	---	---	---
Grava	947.95	2.13	0.445
		Suma=	0.778

Tabla 31. Estimación del volumen de arena necesario para 1 m³.

Materiales	Volumen (l/m ³)	Densidad	Peso (kg)	Rel. en Peso	Bulto
Cemento	115.62	3.10	358.43	1.00	50.00
Agua	202.00	1.00	202.00	0.56	28.18
Arena	222.33	2.33	517.09	1.44	72.13
Grava	445.04	2.13	947.95	2.64	132.24
Aire	15.00	---	---	---	---
Total	1000.00		2025.46		

Tabla 32. Estimación de la relación en volumen y en peso para 1 m³ así como el material necesario para un bulto.

Material	Peso (kg)
Cemento	358.43
Agua	202.00
Arena	517.09
Grava	947.95
Total	2025.46

Tabla 33. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m³ de concreto.

Después de caracterizar el mortero de cemento con adiciones de MK y NS, se decidió adicionar 20% de MK y 5% de NS (mezcla con mejor comportamiento) al concreto para evaluar su desempeño en resistencia a compresión e intemperismo acelerado.

Material	Peso (kg)
Cemento	358.43
Metacaolín	71.67
Nanosílice	17.92
Agua	202.00
Arena	517.09
Grava	947.95
Total	2025.46

Tabla 34. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m³ de concreto con adición de MK y NS.

3.3.2 Elaboración de elementos.

3.3.2.1 Cilindros.

Para evaluar la porosidad, la durabilidad y la permeabilidad a los cloruros del recubrimiento y el concreto, se elaboraron 35 cilindros de 10x20cm conforme a la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004, de los cuales 15 funcionaron como testigos, otros 15 se recubrieron con el geopolímero que mostro mejor comportamiento (10% de sustitución con látex), para ser sometidos a intemperismo acelerado y los últimos 5 se cortaron y recubrieron con el mismo geopolímero para la prueba de permeabilidad rápida de cloruros.



Figura 42. Elaboración de cilindros de concreto.

3.3.2.2 Losa.

Para evaluar la adherencia del recubrimiento sobre el concreto, se elaboró una losa de concreto con $f_c=150\text{kg/cm}^2$. Para cumplir con el área de estudio mínima y la profundidad de núcleo de 1cm que marca la norma ASTM-1583-04, se determinó que la losa fuera de 1m^2 y 10cm de espesor.



Figura 43. Losa con recubrimientos.

3.4 Elementos recubiertos.

3.4.1 Cilindros.

Para colocar el recubrimiento en los cilindros de concreto se elaboraron moldes de fibra de vidrio con diámetro interior de 11.6cm para cumplir con un espesor de 7-8mm.



Figura 44. Elaboración de los moldes para recubrir los cilindros de concreto.

La trabajabilidad del recubrimiento no permite su colocación con llana o cuchara de albañilería, por lo tanto se requieren moldes lo más impermeables posible, sobre todo para las mezclas que contienen látex.



Figura 45. Colocación del recubrimiento en los cilindros de concreto.

3.4.2 Pastillas.

Para la prueba de permeabilidad rápida de cloruros primero se cortaron 5 cilindros de concreto para obtener 3 especímenes de 10cm de diámetro y 4.93cm de altura por cada cilindro. Enseguida se procedió a recubrir una de las caras del espécimen con el recubrimiento verificando un espesor entre 7-8mm y se dejaron secando durante 24h.



Figura 46. Colocación de recubrimiento en las pastillas de concreto para la prueba de permeabilidad rápida de cloruros.

Se recubrieron 12 pastillas y 3 se dejaron sin recubrir. Son 3 pastillas por cada sustitución de cemento, es decir, tres para sustitución del 10% sin látex, tres para sustitución del 10% con látex, tres para sustitución del 20% sin látex y tres para sustitución del 20% con látex (las 4 mezclas con mejor comportamiento). Las pastillas sin recubrir son para fines comparativos.

3.4.3 Losa.

Después de curar la losa de concreto durante 7 días, se limpió la superficie y se dividió en 4 partes. La losa se recubrió con las 4 mezclas que mostraron mejor comportamiento en absorción, resistividad y resistencia a compresión. Geopolímero base con 10 y 20% de sustitución, con látex y sin látex. El espesor del recubrimiento se verificó usando un clavo marcado a 7mm.



Figura 47. Colocación de recubrimiento en losa.

3.4.4 Caracterización.

3.4.4.1 Intemperismo acelerado.

Para evaluar la durabilidad del recubrimiento, se sometieron a intemperismo acelerado con sulfato de sodio, 15 cilindros de concreto recubiertos con el geopolímero base con 10% de sustitución y látex, y 15 cilindros sin recubrir para fines comparativos.

Primer ciclo.

La metodología es igual a la utilizada en el capítulo 3.2.1.1 para los cubos de mortero, el único cambio es que estos especímenes se secaron en horno a 50 °C durante 48h para que el látex no se calcine. En las siguientes figuras se muestra el resultado del primer ciclo de ataque.



Figura 48. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto testigo.



Figura 49. Primer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto recubiertos.

En los cilindros testigo se alcanza a observar la formación de los cristales en la superficie del concreto (figura 48), mientras que en los cilindros recubiertos no se observa la formación de los cristales ni la aparición de grietas.

Segundo ciclo.

Para este ciclo se saturaron 12 cilindros recubiertos y 12 sin recubrir.



Figura 50. Segundo ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.

En la figura 50 se observa la falla en el cilindro recubierto no. 3, el desprendimiento de la cara superior del espécimen. En los cilindros sin recubrir no se observa algún cambio significativo.

Tercer ciclo.

Para este ciclo se saturaron 9 cilindros recubiertos y 9 sin recubrir.



Figura 51. Tercer ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.

Los cilindros no. 2, no. 4, no. 6, no. 7 y no. 9 ya no registraron lectura de resistencia a la compresión (ver figura 51).

Cuarto ciclo.

Para este ciclo se saturaron 4 cilindros recubiertos y 6 sin recubrir.



Figura 52. Cuarto ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.

En los cilindros sin recubrir se observa la aparición de fisuras en el concreto y en los recubiertos empieza a ocurrir desprendimiento del recubrimiento, quedando expuesta la superficie del concreto (ver figura 52).

Quinto ciclo.

Para este ciclo se saturaron 3 cilindros recubiertos y 3 sin recubrir.



Figura 53. Quinto ciclo de intemperismo acelerado en cilindros de concreto.

Los cilindros sin recubrir ya no se pudieron cabecear para la prueba de resistencia a compresión, en cambio los cilindros recubiertos perdieron la gran mayoría de recubrimiento pero el concreto se encuentra en buen estado (ver figura 53).

3.4.4.2 Permeabilidad rápida de cloruros.

Para esta prueba se utilizaron 12 pastillas recubiertas con el geopolímero y 3 pastillas sin recubrir para fines comparativos. El concreto contiene 20% de metacaolín y 5% de nanosílice en adición. En la figura siguiente se muestra el procedimiento de prueba.



Figura 54. Prueba de permeabilidad rápida de cloruros en pastillas de concreto.

En esta prueba no se logra observar cambio a simple vista en el recubrimiento ni en el concreto, los resultados cuantitativos se muestran en el capítulo siguiente.

3.4.4.3 Adherencia.

Después de recubrir la losa con el geopolímero en sus diferentes sustituciones, se realizó el corte de los núcleos con una pulidora de 7" habilitada con un sacabocados diamantado. Se limpió la superficie y se colocó el dolly (pieza de acero que se pega a la superficie del recubrimiento) con pegamento epóxico marca Sika. Se dejó secar el pegamento durante 24 h y se procedió a realizar las mediciones con el equipo. En la figura siguiente se muestra el procedimiento de prueba.

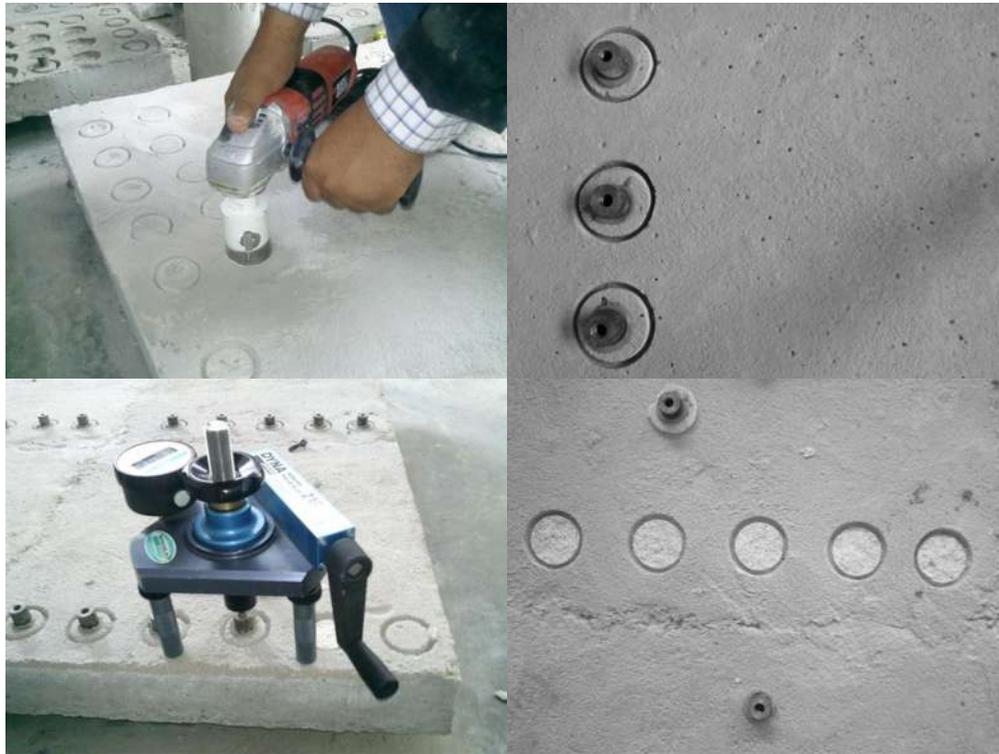


Figura 55. Prueba de adherencia en losa.

Se realizaron mediciones a los 22, 28, 63 y 187 días de edad. Todas las fallas corresponden a la no. 4 según la norma ASTM C 1583-04, falla del recubrimiento.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES.

4.1 Recubrimiento geopolimérico.

4.1.1 Absorción.

Los resultados obtenidos en el geopolímero base sin látex y con látex, con sustituciones del 10, 20, 30 y 40% de cemento, se muestran en las tablas siguientes. El peso seco se obtuvo después de secar las muestras en un horno a 100 °C durante 24h y el peso saturado después de estar sumergidas en agua durante 24h y ser secadas superficialmente. El porcentaje de absorción se calcula con la fórmula descrita en el capítulo 3.1.4.1.

Adición	Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Absorción	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	246.9	272.0	10.17	10.27
	2	246.3	270.9	9.99	
	3	248.4	273.8	10.23	
	4	246.3	271.7	10.31	
	5	245.6	272.2	10.83	
	6	249.4	274.6	10.10	
0.2 CPC 30R RS	1	243.7	267.5	9.77	9.55
	2	243.6	266.8	9.52	
	3	256.1	280.0	9.33	
	4	256.8	281.3	9.54	
	5	255.1	278.8	9.29	
	6	246.7	271.0	9.85	
0.3 CPC 30R RS	1	248.9	272.1	9.32	9.38
	2	253.2	275.5	8.81	
	3	251.1	274.4	9.28	
	4	241.8	265.6	9.84	
	5	245.6	268.3	9.24	
	6	242.9	266.6	9.76	
0.4 CPC 30R RS	1	255.1	277.9	8.94	8.77
	2	251.3	273.5	8.83	
	3	251.7	272.8	8.38	
	4	240.2	261.1	8.70	
	5	241.8	263.5	8.97	
	6	244.3	265.8	8.80	
Promedio sin adición [Medina, 2011]					12.42

Tabla 35. Absorción en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

Adición	Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Absorción	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	243.2	263.6	8.39	8.43
	2	234.4	254.0	8.36	
	3	244.3	265.1	8.51	
	4	240.9	260.9	8.30	
	5	243.1	263.9	8.56	
	6	241.7	262.2	8.48	
0.2 CPC 30R RS	1	229.6	251.7	9.63	8.79
	2	238.2	258.4	8.48	
	3	245.9	267.4	8.74	
	4	241.1	261.5	8.46	
	5	244.6	266.4	8.91	
	6	249.6	270.9	8.53	
0.3 CPC 30R RS	1	246.2	270.8	9.99	9.95
	2	240.0	264.6	10.25	
	3	240.2	265.5	10.53	
	4	244.5	268.5	9.82	
	5	244.0	267.6	9.67	
	6	247.3	270.6	9.42	
0.4 CPC 30R RS	1	226.6	248.9	9.84	10.67
	2	227.4	250.1	9.98	
	3	219.7	245.1	11.56	
	4	225.8	250.4	10.89	
	5	224.0	247.2	10.36	
	6	222.4	247.7	11.38	
Promedio sin adición [Medina, 2011]					12.60

Tabla 36. Absorción en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

Como se puede observar en las tablas anteriores, cuando el geopolímero no contiene látex, el incremento en el contenido de cemento disminuye la porosidad del recubrimiento, logrando mayor impermeabilidad. En cambio, cuando existe la presencia de látex el incremento en la cantidad de cemento hace menos impermeable el recubrimiento.

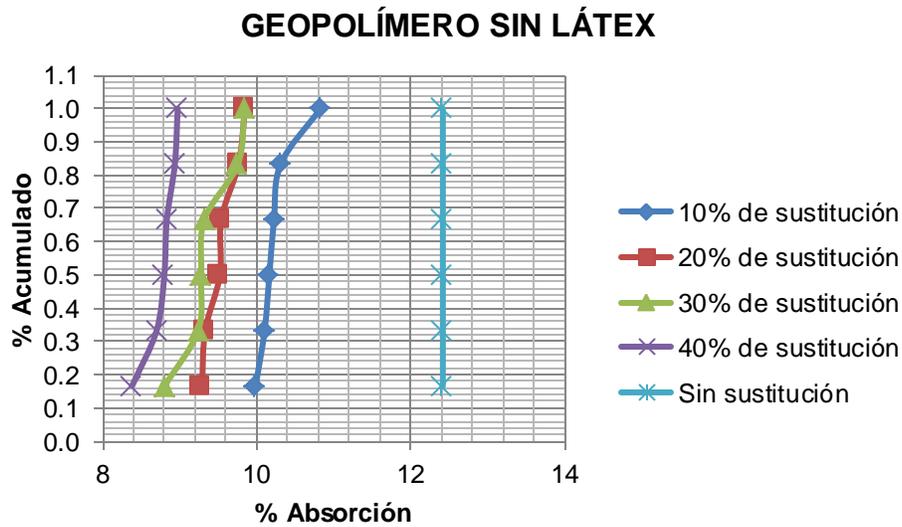


Figura 56. Absorción en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

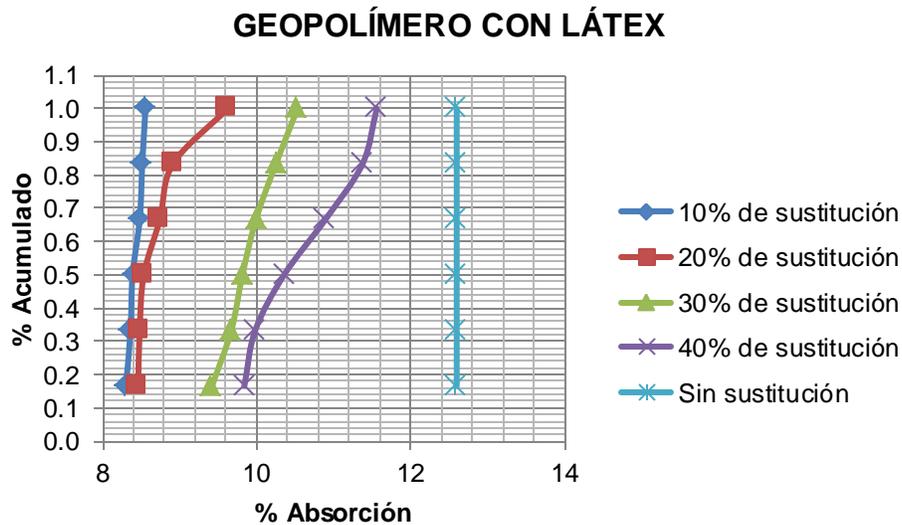


Figura 57. Absorción en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

El recubrimiento que mostro mejor comportamiento (menor variación) y menor porcentaje de absorción fue el geopolímero que contiene látex y 10% de cemento en sustitución de MK. El látex proporciona impermeabilidad al geopolímero. En estudios posteriores es recomendable probar porcentajes menores de cemento, entre 1 y 10%, para el geopolímero con látex.

4.1.2 Resistividad eléctrica.

Para el cálculo de la resistividad eléctrica se determina el área del espécimen y su longitud, en este caso el área es de 25 cm² y la longitud de 5 cm. La resistencia eléctrica se midió con un resistometro marca Nilsson modelo 400, y la fórmula para el cálculo de la resistividad eléctrica está expuesta en el capítulo 2.7.2. Los resultados de la prueba se muestran en las siguientes tablas.

Adición	Muestra	Resistencia eléctrica (ohm)	Resistividad eléctrica (ohm-cm)	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	86	430	421
	2	83	415	
	3	84	420	
	4	88	440	
	5	81	405	
	6	82	410	
0.2 CPC 30R RS	1	86	430	419
	2	83	415	
	3	82	410	
	4	81	405	
	5	86	430	
	6	85	425	
0.3 CPC 30R RS	1	81	405	410
	2	84	420	
	3	83	415	
	4	83	415	
	5	79	395	
	6	82	410	
0.4 CPC 30R RS	1	75	375	383
	2	77	385	
	3	75	375	
	4	76	380	
	5	77	385	
	6	80	400	
Promedio sin adición [Medina, 2011]				500

Tabla 37. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

Adición	Muestra	Resistencia eléctrica (ohm)	Resistividad eléctrica (ohm-cm)	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	100	500	545
	2	130	650	
	3	106	530	
	4	98	490	
	5	120	600	
	6	100	500	
0.2 CPC 30R RS	1	97	485	509
	2	120	600	
	3	95	475	
	4	104	520	
	5	97	485	
	6	98	490	
0.3 CPC 30R RS	1	84	420	432
	2	85	425	
	3	86	430	
	4	83	415	
	5	85	425	
	6	95	475	
0.4 CPC 30R RS	1	71	355	338
	2	74	370	
	3	63	315	
	4	64	320	
	5	72	360	
	6	62	310	
Promedio sin adición [Medina, 2011]				483

Tabla 38. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

La resistividad eléctrica es lo opuesto a la conductividad eléctrica, por lo que entre mayor es su magnitud es menor el riesgo de corrosión en la estructura de concreto. Es una forma de medir la porosidad del concreto, es decir, la interconexión entre los poros del concreto.

De acuerdo al criterio de la Red DURAR para concreto, todos los recubrimientos están en alto riesgo de corrosión, debido a que todos están por debajo de los 10,000 Ohm-cm.

La resistividad eléctrica es mayor en el geopolímero que contiene látex, y al igual que en la absorción, en el que contiene menor cantidad de cemento, aunque presenta mucha variación (ver figura 59). En las siguientes gráficas se observa mejor.

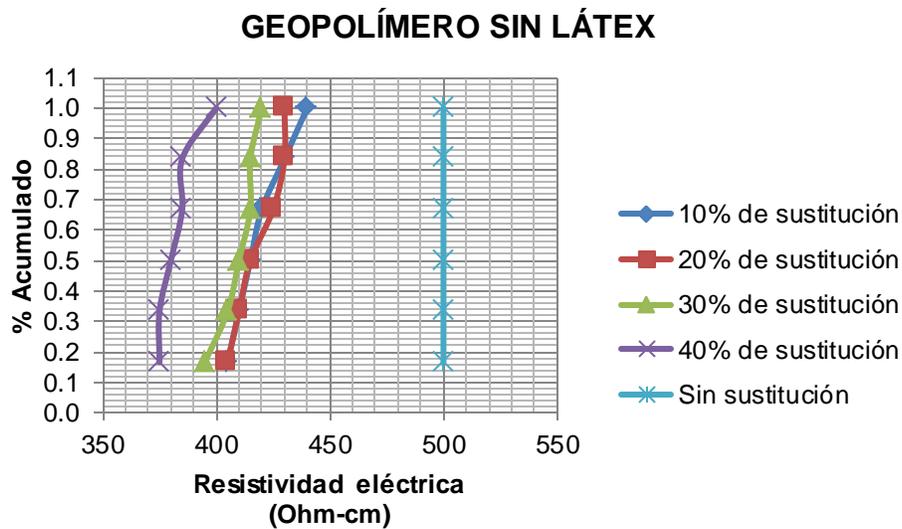


Figura 58. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

GEOPOLÍMERO CON LÁTEX

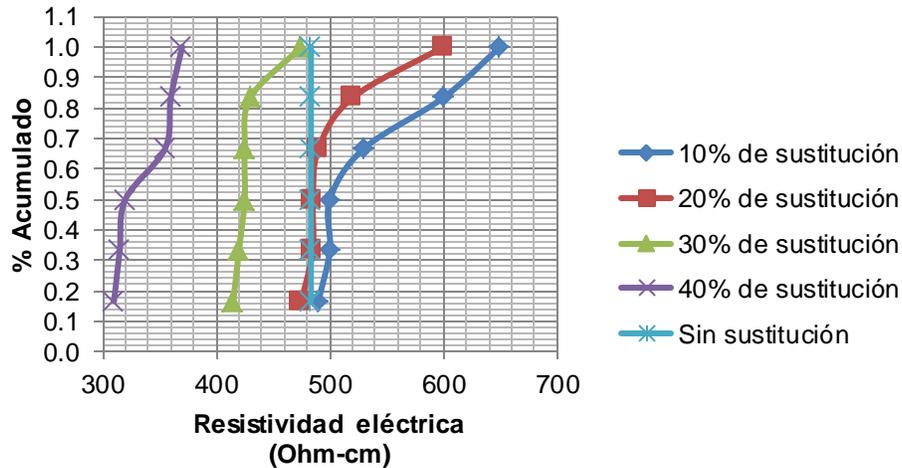


Figura 59. Resistividad eléctrica en cubos de geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

El geopolímero con látex y 10% de sustitución es el que mejor comportamiento mostro en cuanto a resistividad eléctrica se refiere. En el recubrimiento sin látex se incrementó el riesgo de corrosión con la adición del cemento. El látex hace más impermeable al geopolímero, por lo que la resistividad es mayor debido a la mayor resistencia que presenta al flujo de corriente eléctrica, es decir, la porosidad del recubrimiento disminuye con la adición del látex. En las figuras 58 y 59 se puede notar que el látex provoca variaciones más grandes en los resultados.

4.1.3 Resistencia a compresión.

Para el cálculo del esfuerzo de compresión se determina el área del espécimen, en este caso el área es de 25 cm². La fórmula para el cálculo del esfuerzo de compresión está expuesta en el capítulo 2.7.1. Los resultados de la prueba se muestran en las siguientes tablas.

Adición	Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm ²)	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	8955	358.2	351
	2	8435	337.4	
	3	8860	354.4	
	4	8815	352.6	
0.2 CPC 30R RS	1	7525	301.0	279
	2	6000	240.0	
	3	6820	272.8	
	4	7575	303.0	
0.3 CPC 30R RS	1	7770	310.8	316
	2	8395	335.8	
	3	8405	336.2	
	4	7055	282.2	
0.4 CPC 30R RS	1	5520	220.8	212
	2	5290	211.6	
	3	5090	203.6	
	4	5305	212.2	
Promedio sin adición [Medina, 2011]				166

Tabla 39. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

	Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm ²)	Promedio
0.1 CPC 30R RS	1	6260	250.4	258
	2	5895	235.8	
	3	7125	285.0	
	4	6475	259.0	
0.2 CPC 30R RS	1	7140	285.6	288
	2	7855	314.2	
	3	6835	273.4	
	4	7005	280.2	
0.3 CPC 30R RS	1	4505	180.2	182
	2	4510	180.4	
	3	4530	181.2	
	4	4675	187.0	
0.4 CPC 30R RS	1	3450	138.0	143
	2	3525	141.0	
	3	3625	145.0	
	4	3745	149.8	
Promedio sin adición [Medina, 2011]				143

Tabla 40. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

El geopolímero sin látex y 10% de sustitución es el que más resistió, 200% más que el promedio del geopolímero sin adiciones. A continuación se muestra de forma gráfica.

GEOPOLÍMERO SIN LÁTEX

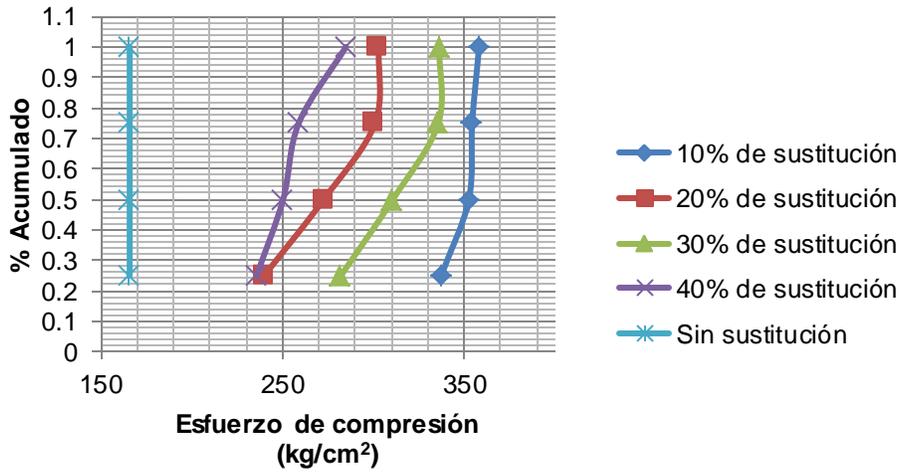


Figura 60. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex y sustituciones de cemento.

GEOPOLÍMERO CON LÁTEX

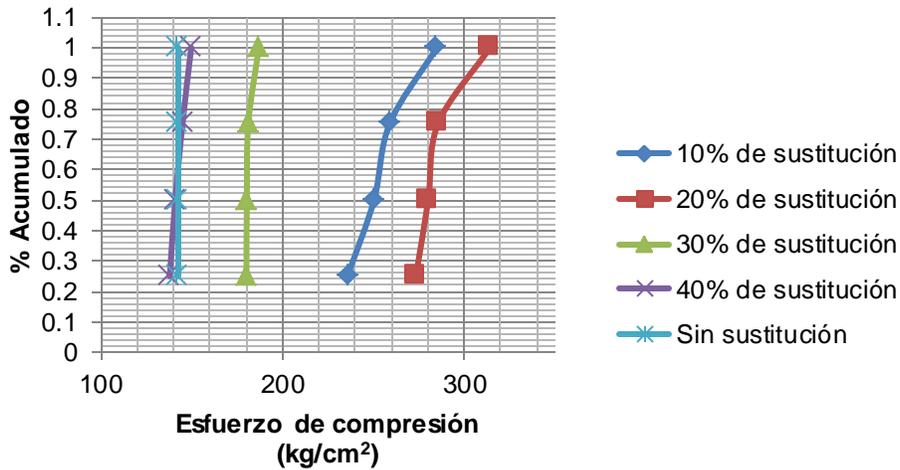


Figura 61. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex y sustituciones de cemento.

La incorporación de látex al geopolímero en cantidades mayores al 20%, disminuye su resistencia a compresión, debido a que el látex al secar se vuelve quebradizo. En las figuras 60 y 61 se puede observar que el geopolímero sin látex

y con 10% de sustitución es el que más resistió y es de los que menores variaciones tienen en los resultados.

4.1.4 Tratamiento térmico.

4.1.4.1 Absorción.

Para la prueba a alta temperatura solo se utilizó recubrimiento sin látex porque el látex solo resiste 70 °C de temperatura, y el secado de los cubos se realizó a 400 °C. El peso seco se obtuvo después de sacar los cubos del horno y el peso saturado se obtuvo después de sumergir los cubos en agua durante 24h. La fórmula para calcular el porcentaje de absorción se describe en el capítulo 3.1.4.1. Los resultados de la prueba de absorción se muestran en las tablas siguientes.

Sin tratamiento térmico				
Muestra	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	% Absorción	Promedio
1	223.2	260.6	16.76	17.17 Con 175% de marmolina
2	226.5	266.0	17.44	
3	225.1	264.1	17.33	
I	237.9	262.7	10.42	10.39 Con 250% de marmolina
II	239.9	264.6	10.30	
III	244.1	269.6	10.45	

Tabla 41. Absorción en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.

Con tratamiento térmico				
Muestra	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	% Absorción	Promedio
1	220.5	261.4	18.55	18.36 Con 175% de marmolina
2	217.1	256.3	18.06	
3	219.8	260.4	18.47	
I	236.2	263.2	11.43	11.57 Con 250% de marmolina
II	233.9	261.2	11.67	
III	240.2	268.1	11.62	

Tabla 42. Absorción en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.

En la tabla anterior se observa que los resultados son muy buenos, debido a que solo aumentó 1% la absorción después de someterse a una temperatura de 400 °C. En las gráficas siguientes se observa con más detalle.

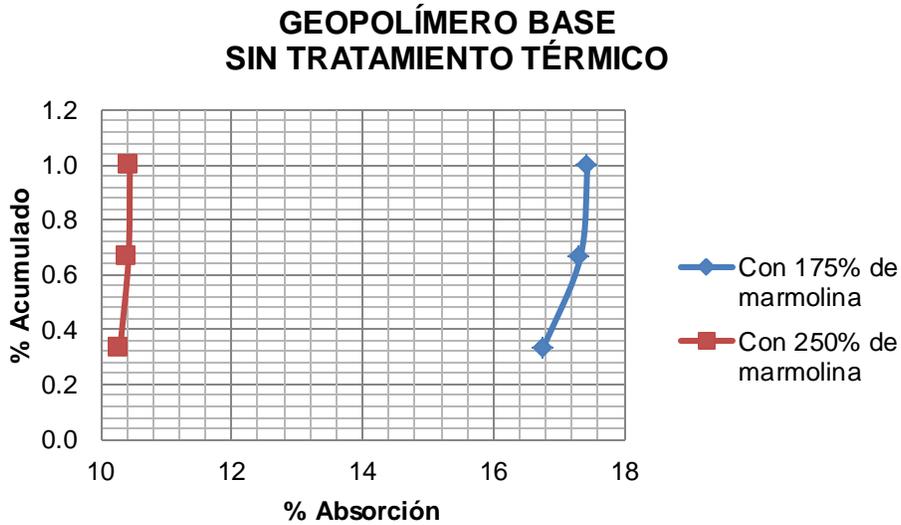


Figura 62. Absorción en geopolímero base sin tratamiento térmico.

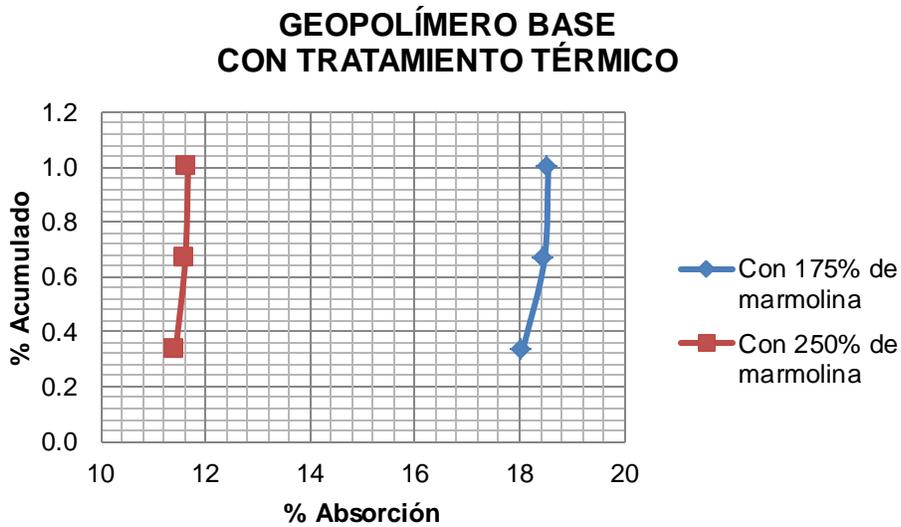


Figura 63. Absorción en geopolímero base con tratamiento térmico.

En ambos casos aumentó 1% la absorción después del secado a 400 °C. El tratamiento térmico muestra resultados satisfactorios, aunque para la funcionalidad del recubrimiento no es rentable.

4.1.4.2 Resistividad eléctrica.

Para el cálculo de la resistividad eléctrica se determina el área del espécimen y su longitud, en este caso el área es de 25 cm² y la longitud de 5 cm. La resistencia eléctrica se midió con un resistómetro marca Nilsson modelo 400, y la fórmula para el cálculo de la resistividad eléctrica está expuesta en el capítulo 2.7.2. Los resultados de la prueba se muestran en las siguientes tablas.

Sin tratamiento térmico			
Muestra	Resistencia eléctrica (Ohm)	Resistividad eléctrica (Ohm-cm)	Promedio
1	80	400	383 Con 175% de marmolina
2	70	350	
3	80	400	
I	90	450	483 Con 250% de marmolina
II	110	550	
III	90	450	

Tabla 43. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.

Con tratamiento térmico			
Muestra	Resistencia eléctrica (Ohm)	Resistividad eléctrica (Ohm-cm)	Promedio
1	170	850	883 Con 175% de marmolina
2	200	1000	
3	160	800	
I	250	1250	1050 Con 250% de marmolina
II	150	750	
III	230	1150	

Tabla 44. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.

La resistividad eléctrica es mucho mejor en el geopolímero que se secó a una temperatura de 400 °C, aumento su resistividad eléctrica 200% en comparación al secado a temperatura ambiente. Se observa de manera más clara en las siguientes gráficas.

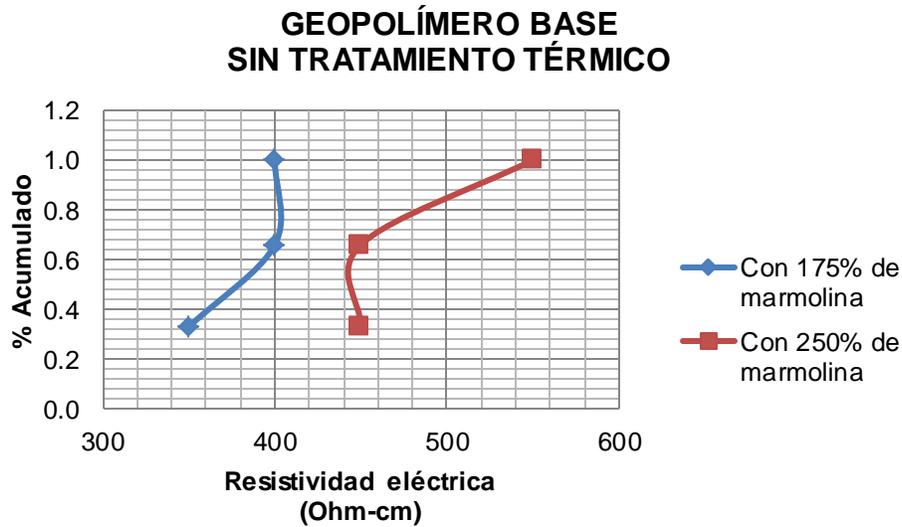


Figura 64. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.

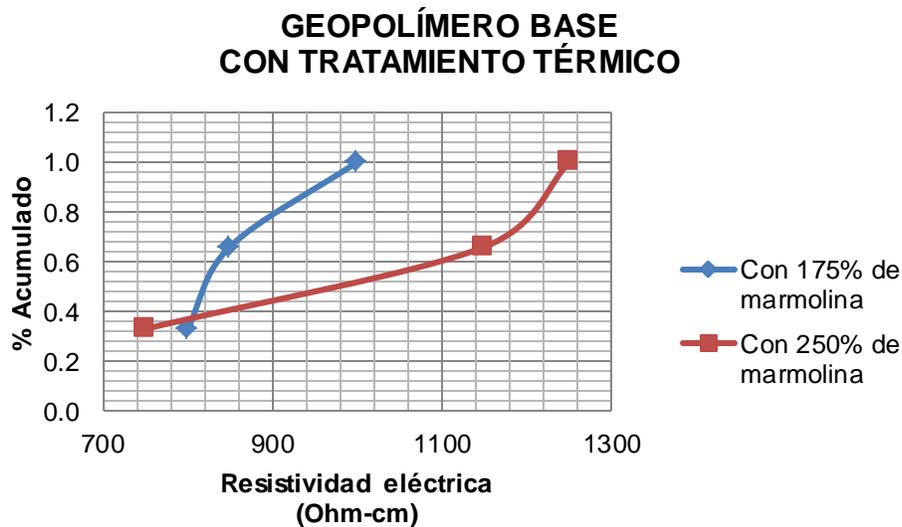


Figura 65. Resistividad eléctrica en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.

En los cubos sometidos a tratamiento térmico la resistividad eléctrica incremento de manera considerable, pero tiene variaciones muy grandes en los resultados (ver figura 65), el mínimo es de 750 Ohm-cm y el máximo de 1250 Ohm-cm.

4.1.4.3 Resistencia a compresión.

Para el cálculo del esfuerzo de compresión se determina el área del espécimen, en este caso el área es de 25 cm². La fórmula para el cálculo del esfuerzo de compresión está expuesta en el capítulo 2.7.1. Los resultados de la prueba se muestran en las siguientes tablas.

Sin tratamiento térmico			
Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²)	Promedio
1	4540.6	182	179 Con 175% de marmolina
2	4672.0	187	
3	4226.7	169	
I	4358.6	174	173 Con 250% de marmolina
II	4462.4	178	
III	4235.4	169	

Tabla 45. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.

Con tratamiento térmico			
Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²)	Promedio
1	6482.5	259	253 Con 175% de marmolina
2	6207.5	248	
3	6312.5	253	
I	5500	220	215 Con 250% de marmolina
II	5652.5	226	
III	4985	199	

Tabla 46. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex con tratamiento térmico.

Ambas mezclas incrementaron un 40% la resistencia a compresión en el geopolímero que se sometió a 400 °C. En las siguientes gráficas se muestra más claramente la diferencia.

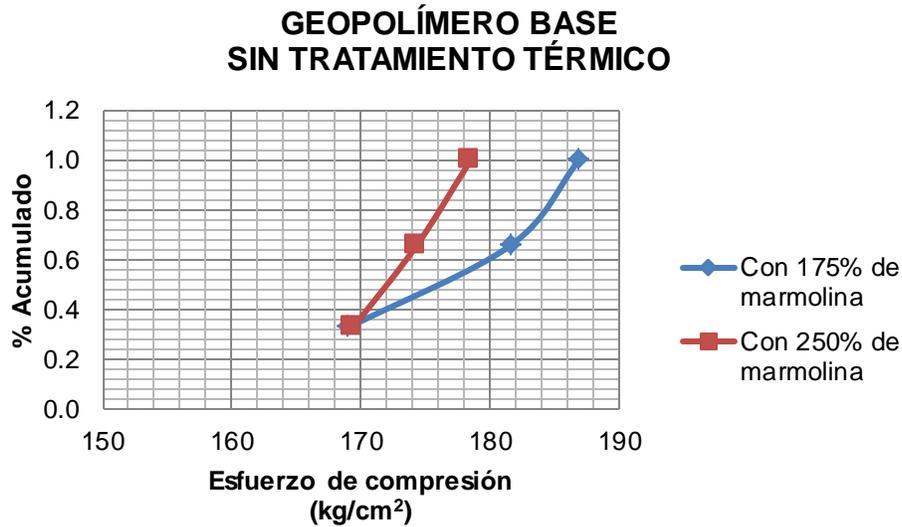


Figura 66. Resistencia a la compresión en geopolímero sin látex sin tratamiento térmico.

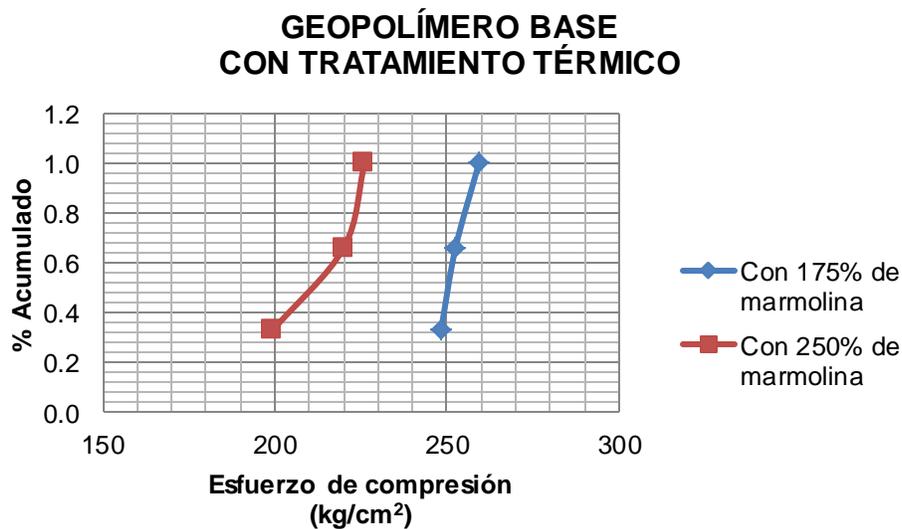


Figura 67. Resistencia a la compresión en geopolímero con látex sin tratamiento térmico.

La temperatura influye notablemente en la transformación del caolín, al colapsar la fase cristalina de la caolinita. Por esto al aplicar tratamiento térmico se logran resultados satisfactorios. La variación de resultados en los cubos sometidos a tratamiento térmico es más pequeña (ver figuras 66 y 67). En la producción del metacaolín,

4.2 Mortero de cemento con metacaolín y nanosílice.

4.2.1 Intemperismo acelerado.

Primer ciclo.

El peso húmedo se midió después de saturar los cubos durante 17h en la solución de sulfato de sodio, el peso seco se midió después de secar los cubos en el horno a 100 °C durante 24h y la fórmula para calcular el porcentaje de absorción se describe en el capítulo 3.1.4.1.

Cubos con 20% de MK y 5% de NS en adición			
Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% Absorción
1	230	-	-
2	227.6	-	-
3	226.2	169.7	33.29
4	228.4	175.4	30.22
5	229.3	170.8	34.25
6	227.4	173.8	30.84
7	228.2	174.9	30.47
8	229.3	175.6	30.58
9	229.0	174.2	31.46
10	230.4	176.9	30.24
11	227.7	-	-
12	229.9	172.9	32.97
13	225.9	172.7	30.80
14	226.2	-	-
15	227.6	-	-
16	212.5	161	31.99

Tabla 47. Absorción de los cubos de cemento con adiciones de MK y NS después del primer ciclo de ataque.

En la tabla anterior se puede observar que los cubos tienen un porcentaje de absorción muy alto, es decir, permiten con mucha facilidad el ingreso de los sulfatos para formar la etringita, producir grietas y provocar la falla de los cubos. Por ello los cubos con 20% de MK y 5% de NS solo resistieron el primer ciclo de ataque.

Los cubos que contienen 15% de metacaolín y 2% de nanosílice no resistieron el primer ciclo de ataque por lo que no se obtuvieron datos de peso húmedo ni peso seco después del primer ciclo de ataque. Pero observando los resultados de absorción previos al primer ciclo de ataque, sumergidos en agua, se aprecia absorción muy alta (ver tabla 48).

Cubos con 15% de MK y 2% de NS en adición			
Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% Absorción
1	230.5	181.6	26.9
2	229.9	181.2	26.9
3	230.1	182.3	26.2
4	229.4	182.1	26.0
5	231.3	182.5	26.7
6	231.3	182.6	26.7
7	231.1	181.5	27.3
8	232.3	182.9	27.0
9	232.1	182.8	27.0
10	232.5	183.6	26.6
11	232.4	183.3	26.8
12	233.5	184.6	26.5
13	232.3	182.9	27.0
14	231.4	182.0	27.1
15	232.0	181.7	27.7
16	232.5	184.5	26.0

Tabla 48. Absorción de los cubos de cemento con adiciones de MK y NS antes del primer ciclo de ataque.

En ambos casos los cubos mostraron porcentajes de absorción muy altos, por lo que no se obtuvieron resultados satisfactorios en morteros.

La adición de MK y NS en porcentajes mayores al 10% en el mortero de cemento, provocó porcentajes de absorción muy altos, se incrementó la demanda de agua y para cumplir con el índice de fluidez conforme a la norma NMX-C-144-ONNCCE-2002 se dejó evaporar el agua de la mezcla durante 6h.

4.2.2 Resistencia a compresión.

Para el cálculo del esfuerzo de compresión se determina el área del espécimen, en este caso el área es de 25 cm². La fórmula para el cálculo del esfuerzo de compresión está descrita en el capítulo 2.7.1.

Se realizaron pruebas a 7, 14, 21 y 28 días de edad a las dos diferentes adiciones; 20% de MK y 5% de NS, 15% de MK y 2% de NS. Los resultados se muestran en las tablas siguientes.

Cubos con 15% de MK y 2% de NS en adición				
Edad	Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio
7 días	1	1703.0	68.1	69.7
	2	1619.0	64.8	
	3	1905.0	76.2	
14 días	1	1728.5	69.1	72.9
	2	1757.0	70.3	
	3	1980.5	79.2	
21 días	1	1757.5	70.3	73.6
	2	1709.5	68.4	
	3	2055.0	82.2	
28 días	1	1770.5	70.8	74.1
	2	1715.5	68.6	
	3	2070.0	82.8	

Tabla 49. Resistencia a la compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.

Cubos con 20% de MK y 5% de NS				
Edad	Muestra	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio
7 días	1	875.0	35.0	36.9
	2	1045.0	41.8	
	3	845.0	33.8	
14 días	1	895.0	35.8	38.1
	2	964.0	38.6	
	3	1000.0	40.0	
21 días	1	1050.0	42.0	45.2
	2	1060.0	42.4	
	3	1280.0	51.2	
28 días	1	1064.0	42.6	46.1
	2	1310.0	52.4	
	3	1080.0	43.2	

Tabla 50. Resistencia a la compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.

Los cubos con menor adición de metacaolín y nanosilíce resistieron desde 60.7 hasta 91.3% (75.9% en promedio). A continuación se muestra en forma gráfica la diferencia.

CUBOS DE CEMENTO CON ADICIONES DE MK Y NS

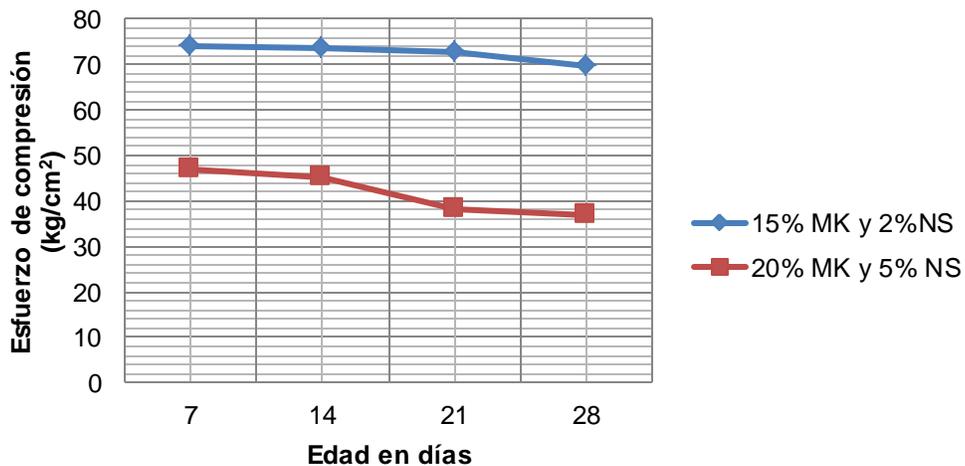


Figura 68. Resistencia a compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.

CUBOS DE CEMENTO CON ADICIONES DE MK Y NS

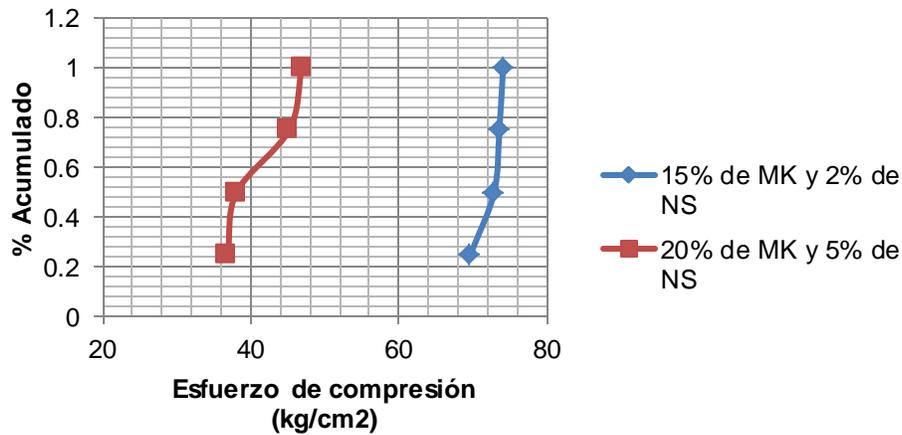


Figura 69. Variación de la resistencia a compresión en cubos de cemento con adiciones de MK y NS.

La variación de los cubos con menor adición es menor que los cubos con mayor adición (ver figura 69). Los cubos muestran bajo desempeño a compresión, esperado de acuerdo a la alta absorción que presentaron.

4.3 Elementos recubiertos.

4.3.1 Cilindros.

4.3.1.1 Intemperismo acelerado.

El peso húmedo se midió después de saturar los cilindros durante 17h en la solución de sulfato de sodio, el peso seco se midió después de secar los cilindros en el horno a 50 °C durante 48h y la fórmula para calcular el porcentaje de absorción se describe en el capítulo 3.1.4.1.

Los resultados obtenidos durante los ciclos de ataque de intemperismo acelerado con una solución saturada de sulfato de sodio anhidro, se muestran en las tablas siguientes.

Primer ciclo						
Muestra	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto
1	3,475	4,276	3,319	4,110	4.7	4.0
2	3,525	4,342	3,357	4,079	5.0	6.4
3	3,521	4,379	3,325	4,131	5.9	6.0
4	3,523	4,278	3,355	4,025	5.0	6.3
5	3,514	4,364	3,345	4,209	5.1	3.7
6	3,496	4,346	3,324	4,104	5.2	5.9
7	3,443	4,368	3,278	4,103	5.0	6.5
8	3,474	4,280	3,307	4,110	5.0	4.1
9	3,469	4,383	3,308	4,084	4.9	7.3
10	3,469	4,219	3,279	4,061	5.8	3.9
11	3,498	4,593	3,307	4,426	5.8	3.8
12	3,509	4,396	3,314	4,152	5.9	5.9
13	3,493	4,220	3,325	4,083	5.1	3.4
14	3,505	4,636	3,350	4,523	4.6	2.5
15	3,525	4,311	3,336	3,914	5.7	10.1

Tabla 51. Absorción de los cilindros después del primer ciclo de ataque.

Segundo ciclo						
Muestra	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto
1	3,519	4,338	3,301	4,179	6.6	3.8
2	3,525	4,096	3,363	3,633	4.8	12.7
3	3,494	4,168	3,262	3,621	7.1	15.1
4	3,531	4,415	3,359	4,230	5.1	15.1
5	3,502	4,298	3,322	3,759	5.4	4.4
6	3,485	4,375	3,338	3,877	4.4	14.3
7	3,512	4,349	3,260	4,151	7.7	12.8
8	3,522	4,223	3,292	3,717	7.0	4.8
9	3,546	4,268	3,336	4,109	6.3	13.6
10	3,491	4,608	3,295	4,400	5.9	3.9
11	3,527	-	3,315	-	6.4	-
12	3,552	-	3,346	-	6.2	-

Tabla 52. Absorción de los cilindros después del segundo ciclo de ataque.

Tercer ciclo						
Muestra	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto
1	3,497	4,173	3,217	3,775	8.7	10.5
2	3,513	4,296	3,278	3,800	7.2	13.1
3	3,490	4,400	3,258	4,178	7.1	5.3
4	3,527	4,210	3,319	3,837	6.3	9.7
5	3,508	-	3,246	-	8.1	-
6	3,492	-	3,253	-	7.3	-
7	3,494	-	3,240	-	7.8	-
8	3,504	-	3,280	-	6.8	-
9	3,556	-	3,312	-	7.4	-

Tabla 53. Absorción de los cilindros después del tercer ciclo de ataque.

Cuarto ciclo						
Muestra	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto
1	3,516	3,325	3,213	3,230	9.4	2.9
2	3,525	3,303	3,276	3,210	7.6	2.9
3	3,513	3,296	3,205	3,196	9.6	3.1
4	3,586	-	3,296	-	8.8	-
5	3,524	-	3,247	-	8.5	-
6	3,500	-	3,235	-	8.2	-

Tabla 54. Absorción de los cilindros después del cuarto ciclo de ataque.

Quinto ciclo						
Muestra	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto	Sin recubrir	Recubierto
1	3,433	3,246	3,117	3,156	10.1	2.9
2	3,694	3,144	3,380	3,061	9.3	2.7
3	3,631	-	3,248	-	11.8	-

Tabla 55. Absorción de los cilindros después del quinto ciclo de ataque.

Ciclo de ataque	% Absorción	
	Sin recubrir	Recubierto
1	5.3	5.3
2	6.1	10.1
3	7.4	9.7
4	8.7	3.0
5	10.4	2.8

Tabla 56. Resumen de la absorción de los cilindros de concreto.

En los ciclos donde se destruye la muestra, no se obtiene lectura, es por eso que aparecen guiones en las celdas de las tablas anteriores. A continuación se muestra de manera gráfica el comportamiento del porcentaje de absorción a lo largo de los 5 ciclos de ataque.

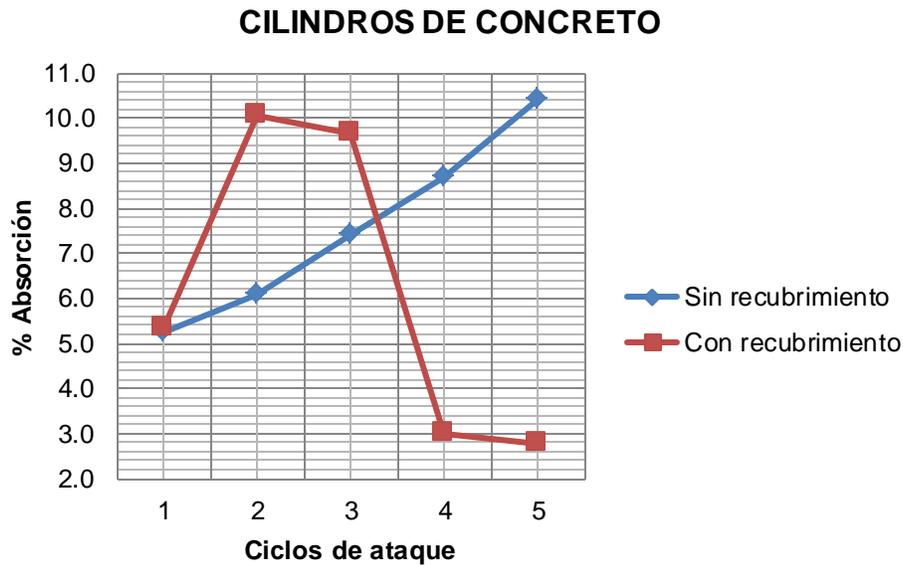


Figura 70. Absorción de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.

CILINDROS DE CONCRETO

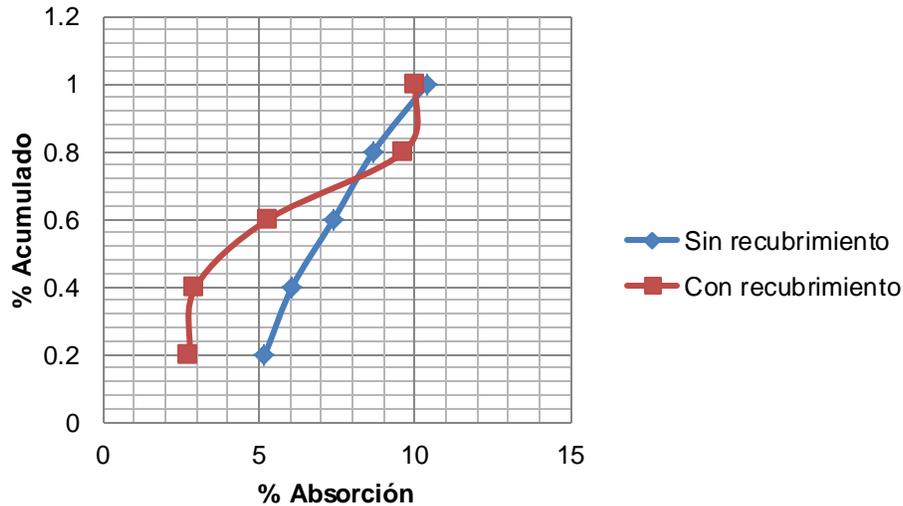


Figura 71. Variación de la absorción de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.

En los cilindros sin recubrir se observa una tendencia de incremento en absorción después de cada ciclo de ataque, en cambio, en los que están recubiertos solo hasta el segundo ciclo hay incremento (ver figura 70). En los cilindros recubiertos se incrementa el porcentaje de absorción hasta su máximo de manera muy rápida (1° y 2° ciclo) para después comenzar a disminuir y terminar con absorciones muy bajas. En los cilindros sin recubrir el porcentaje de absorción es gradual hasta llegar a su máximo en el 5° ciclo.

Existe mucha variación en los resultados de cada ciclo, probablemente por la falta de datos debida a la falla prematura de los cilindros (ver figura 71).

4.3.1.2 Resistencia a compresión.

Para el cálculo del esfuerzo de compresión se determina el área del espécimen, en este caso el área es de 25 cm². La fórmula para el cálculo del esfuerzo de compresión está expuesta en el capítulo 2.7.1.

A continuación se muestran los resultados del esfuerzo de compresión a lo largo de los 5 ciclos de la prueba de intemperismo acelerado.

Esfuerzo de compresión en cilindros de concreto sin recubrir (kg/cm ²)					
	Ciclo de ataque				
Muestra	1	2	3	4	5
1	99.31	98.04	94.86	85.46	28.39
2	165.65	70.54	49.27	52.47	62.39
3	137.00	59.97	49.91	45.23	64.68
Promedio	133.99	76.18	64.68	61.05	51.82

Tabla 57. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto sin recubrir.

Esfuerzo de compresión en cilindros de concreto recubiertos (kg/cm ²)					
	Ciclo de ataque				
Muestra	1	2	3	4	5
1	344.92	295.39	290.30	262.54	334.35
2	358.16	-	-	-	356.76
3	142.22	-	-	-	-
Promedio	281.77	295.39	290.30	262.54	345.56

Tabla 58. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto recubiertos.

El recubrimiento otorga el doble de resistencia a la compresión a los cilindros, y los protege contra el ataque de los sulfatos (ver figura 72). A continuación se muestra la gráfica comparativa de los esfuerzos de compresión de los cilindros durante la prueba de intemperismo acelerado.

CILINDROS DE CONCRETO

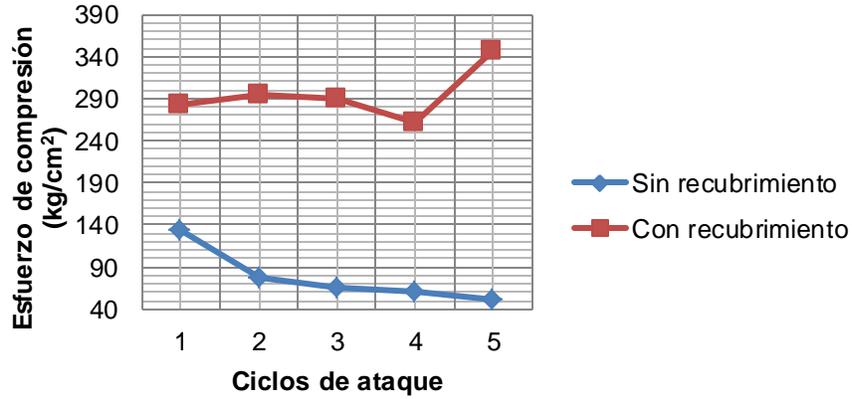


Figura 72. Esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.

CILINDROS DE CONCRETO

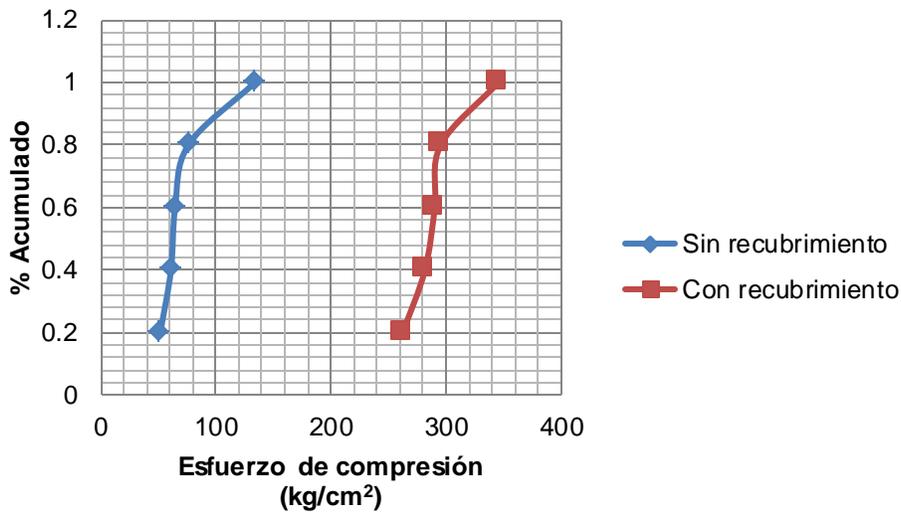


Figura 73. Variación del esfuerzo de compresión de los cilindros de concreto durante la prueba de intemperismo acelerado.

La variación es casi simétrica para los cilindros con recubrimiento y sin recubrimiento, aunque ambas tienen variaciones muy grandes, probablemente debidas a la falta de datos por falla prematura de los cilindros.

4.3.2 Pastillas.

4.3.2.1 Permeabilidad rápida de cloruros.

Para evaluar la permeabilidad del ión cloruro se realizaron 3 mediciones de permeabilidad rápida para cada tipo de recubrimiento y 3 mediciones más sin recubrimiento para fines comparativos. Las mediciones se realizaron con el equipo Proove'it. Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla siguiente.

Muestra	0.1 CPC 30R RS sin látex	0.1 CPC 30R RS con látex	0.2 CPC 30R RS sin látex	0.2 CPC 30R RS con látex	Sin recubrir
	Coulombs	Coulombs	Coulombs	Coulombs	Coulombs
1	4150	4005	4350	4483	4895
2	4035	3985	4158	4125	5215
3	4189	3754	4545	4369	7653
Promedio	4125	3915	4351	4326	5921

Tabla 59. Permeabilidad rápida del ión cloruro.

La penetrabilidad más baja se presenta en el geopolímero que contiene látex y 10% de sustitución de cemento, siendo el único que presentó permeabilidad moderada del ión cloruro según la norma ASTM C1202-12, los demás presentaron permeabilidad alta del ión cloruro ya que sobrepasan los 4000 coulombs. En la siguiente gráfica se observa con mejor detalle.

PASTILLAS DE CONCRETO

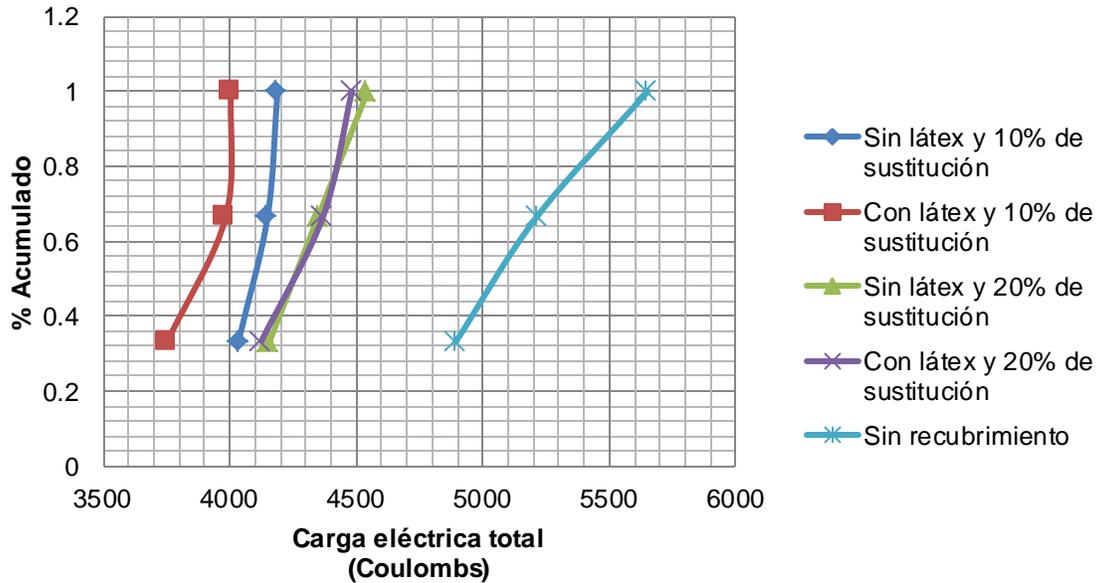


Figura 74. Permeabilidad rápida del ión cloruro.

En la gráfica anterior se puede observar que el recubrimiento disminuye la permeabilidad del concreto y proporciona un comportamiento más uniforme (con menor variación) en el paso de la carga eléctrica.

4.3.3 Losa.

4.3.3.1 Adherencia.

Los resultados obtenidos de las mediciones a 22, 28, 63 y 187 días, en los 4 geopolímeros, se muestran en las tablas siguientes. Las mediciones de esfuerzo de tensión se realizaron con el equipo marca PROCEQ y se afectaron por un factor de área (2.835), debido a que el dolly del equipo es más grande al utilizado en esta investigación.

Prueba de adherencia a los 22 días				
Prueba	0.1 CPC 30R RS sin látex	0.1 CPC 30R RS con látex	0.2 CPC 30R RS sin látex	0.2 CPC 30R RS con látex
	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	0.90	1.11	0.69	0.69
2	0.76	2.91	0.97	0.97
3	0.76	3.05	0.90	0.90
4	0.76	2.35	0.97	0.97
5	0.83	2.56	0.62	0.62
Prome dio	0.80	2.40	0.83	0.83

Tabla 60. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 22 días.

Prueba de adherencia a los 28 días				
Prueba	0.1 CPC 30R RS sin látex	0.1 CPC 30R RS con látex	0.2 CPC 30R RS sin látex	0.2 CPC 30R RS con látex
	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	0.21	2.01	1.38	1.66
2	0.35	2.22	0.90	1.80
3	1.25	1.87	1.18	1.52
4	1.11	2.15	0.48	1.80
5	0.90	1.59	0.62	1.11
Prome dio	0.76	1.97	0.91	1.58

Tabla 61. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 28 días.

Prueba de adherencia a los 63 días				
Prueba	0.1 CPC 30R RS sin látex	0.1 CPC 30R RS con látex	0.2 CPC 30R RS sin látex	0.2 CPC 30R RS con látex
	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	1.04	2.28	1.45	1.87
2	0.21	1.73	1.18	1.32
3	0.55	2.56	1.18	1.38
4	1.11	2.35	0.55	1.94
5	1.04	1.80	0.42	2.01
Prome dio	0.79	2.15	0.96	1.70

Tabla 62. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 63 días.

Prueba de adherencia a los 187 días				
-------------------------------------	--	--	--	--

Prueba	0.1 CPC 30R RS sin látex	0.1 CPC 30R RS con látex	0.2 CPC 30R RS sin látex	0.2 CPC 30R RS con látex
	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	0.62	2.63	0.55	0.76
2	0.48	1.45	0.76	1.18
3	0.21	2.08	0.62	1.66
4	0.83	1.52	1.11	1.38
5	0.35	2.28	1.04	0.90
Prome dio	0.50	1.99	0.82	1.18

Tabla 63. Esfuerzo de tensión del recubrimiento a los 187 días.

GEOPOLÍMERO SIN LÁTEX

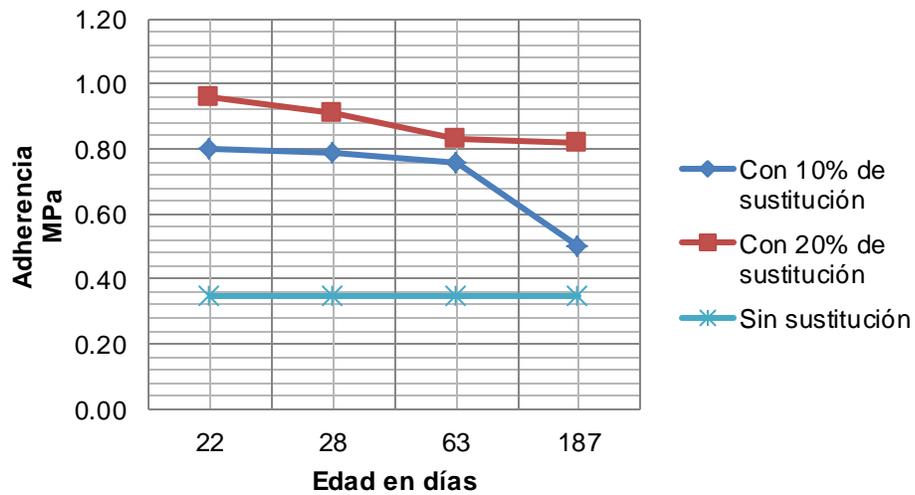


Figura 75. Esfuerzo de tensión del geopolímero sin látex a distintas edades.

GEOPOLÍMERO CON LÁTEX

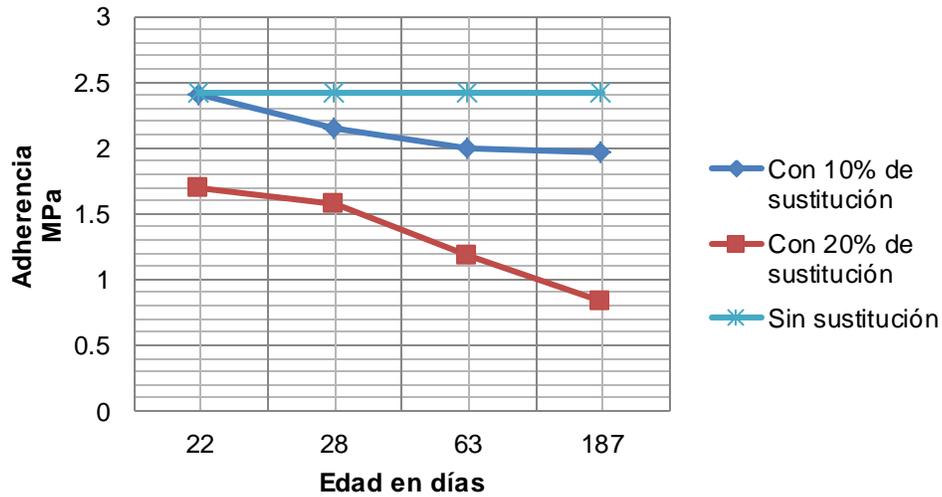


Figura 76. Esfuerzo de tensión del geopolímero con látex a distintas edades.

En las figuras 75 y 76 se logra observar que la mejor resistencia a tensión es la del geopolímero testigo, es decir, sin adición. Pero el que contiene látex y 10% de adición de cemento queda a menos de 0.5MPa. La adherencia disminuye con el paso del tiempo en las 4 mezclas.

GEOPOLÍMERO SIN LÁTEX

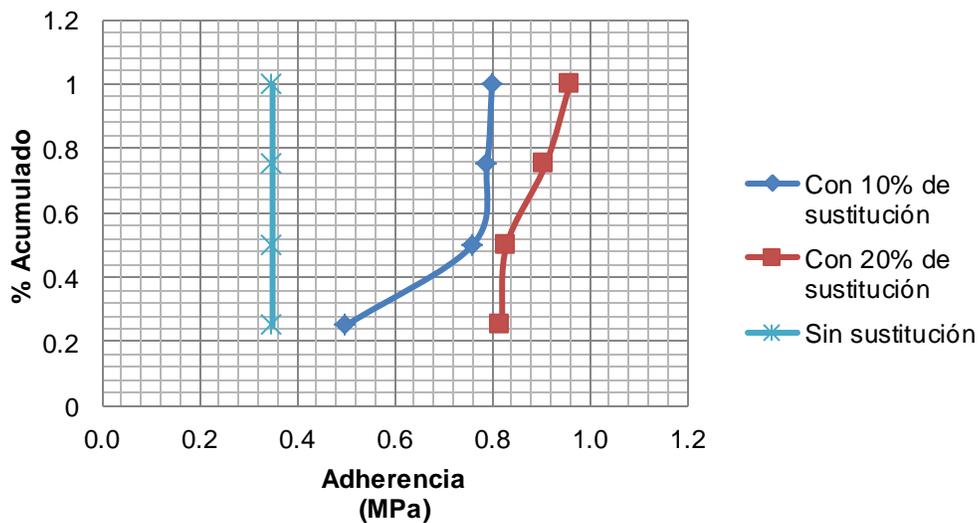


Figura 77. Variación del esfuerzo de tensión del geopolímero sin látex a distintas edades.

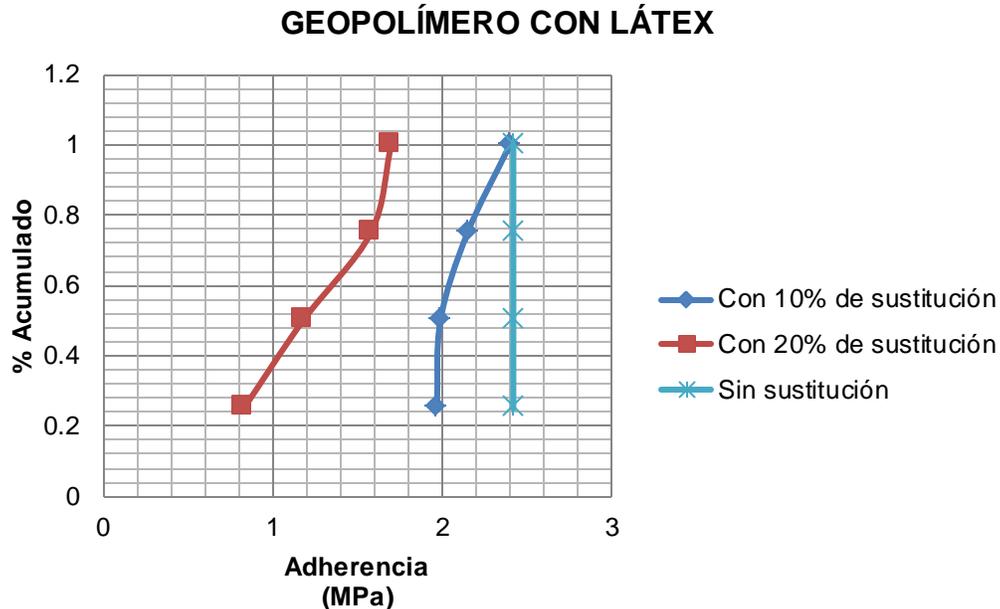


Figura 78. Variación del esfuerzo de tensión del geopolímero con látex a distintas edades.

En las figuras 77 y 78 se puede observar las variaciones en los resultados obtenidos en las diferentes edades de prueba. La variación es mayor en las mezclas que contienen látex.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En los resultados de la prueba de absorción, se observó, en el caso de los cubos que contienen el geopolímero con adiciones de cemento, que los elaborados con látex y 10% de sustitución de cemento son los que tienen menor absorción, 8.43% en promedio. Se recomienda hacer más pruebas de absorción en este recubrimiento con sustituciones menores al 10%, debido a que los resultados predicen una menor absorción. En cuanto al geopolímero sometido a tratamiento térmico (400 °C), la absorción solo se incrementó 1% con respecto al

que no se sometió al tratamiento, es un resultado muy alentador debido a las ventajas que trae consigo en cuanto a resistencia mecánica se refiere y que se discutirá más adelante.

En cuanto a resistividad eléctrica, en los cubos de geopolímero base con sustituciones de cemento, todos están en alto riesgo de corrosión de acuerdo a los criterios de la Red DURAR. Si revisamos los componentes del geopolímero podemos observar que el hidróxido de potasio posee una cierta conductividad al contener aniones de OH^- y cationes de K^+ . Para determinar mejor la permeabilidad del recubrimiento es mejor utilizar la prueba de permeabilidad rápida del ión cloruro, que nos permite medir la carga eléctrica total que pasa por el recubrimiento y el concreto, es decir se mide la conductividad directamente y no la resistividad, sin embargo las dos pruebas pueden ser complementarias para determinar la porosidad en el concreto. En los cubos sometidos a tratamiento térmico, la resistividad se incrementó al doble con respecto a los que estuvieron a temperatura ambiente, se recomienda hacer pruebas para observar los cambios en la microestructura del geopolímero después de estar sometido a $400\text{ }^\circ\text{C}$.

En las pruebas de resistencia a la compresión, en los cubos con sustituciones de cemento, los elaborados sin látex y 10% de sustitución son los que más resistieron, más del doble que los cubos que no contienen. En el caso del geopolímero sometido a alta temperatura hubo un incremento del 40% aproximadamente con respecto al que estuvo a temperatura ambiente. En los cubos de cemento con adiciones de metacaolín y nanosílice, los de mayor adición resistieron mucho más en todas las edades de prueba.

Los resultados de la prueba de intemperismo acelerado con sulfato de sodio anhidro muestran; en el primer ciclo la absorción es igual para los cilindros recubiertos y sin recubrir, para el segundo ciclo la absorción de los recubiertos aumenta 5% más que los no recubiertos, para el tercer ciclo comienza a disminuir la absorción de los recubiertos pero aún tienen 2% más de absorción que los no

recubiertos y para el cuarto y quinto ciclo los recubiertos disminuyen su absorción hasta situarse 5% por debajo de los no recubiertos. En las pruebas de resistencia a la compresión realizadas después de cada ciclo, los resultados muestran que los cilindros recubiertos logran más del doble de resistencia a la compresión en todos los ciclos. El recubrimiento aumenta la durabilidad del concreto.

Los cubos de cemento con adiciones de MK y NS tienen absorción muy alta, arriba del 26%. Por lo anterior, no soportaron los ataques de intemperismo acelerado con sulfato de sodio anhidro; la dificultad radicó en lograr trabajabilidad en la mezcla, lo que ocasiono tener una relación $a/c=1.5$ y que derivo en cubos muy porosos.

Los resultados de la prueba de adherencia demuestran que el geopolímero que contiene látex y sin adiciones de cemento es el que tiene más resistencia a la tensión. Se recomienda hacer pruebas con adiciones de cemento menores al 10% y con látex, debido a que muestra valores cercanos al testigo sin adiciones, 0.5MPa de diferencia.

Los resultados de la prueba de permeabilidad rápida del ión cloruro demuestran que el geopolímero que contiene látex y 10% de cemento en adición, es el que presenta la penetrabilidad más baja, permeabilidad moderada.

Analizando todos los factores anteriormente señalados, se concluye sobre el estudio del recubrimiento geopolimérico ecológico, lo siguiente:

El mejor comportamiento se obtuvo en el geopolímero que contiene látex y 10% de sustitución de cemento; la prueba de adherencia mostró resistencias abajo del geopolímero testigo, pero se propone realizar pruebas con adiciones menores al 10%. El geopolímero sometido a alta temperatura mostró mayor resistencia a la compresión y mayor resistividad eléctrica, se propone analizar la microestructura del geopolímero y realizar pruebas de adherencia y permeabilidad

rápida del ión cloruro. Para incrementar la adherencia del recubrimiento se puede aumentar el contenido de látex, siempre y cuando, se agreguen fibras sintéticas o naturales para evitar las fisuras por contracción en el secado del látex. Las fibras también permitirán una aplicación más fácil, sin moldes. También se recomienda hacer pruebas de adherencia sin microesfera de vidrio, porque su forma redondeada y lisa disminuye la unión de los agregados. La losa se mantuvo protegida del sol y el agua, se recomienda hacer pruebas de adherencia en una losa a intemperie para probar la durabilidad del recubrimiento.

REFERENCIAS.

- [1] Álvarez Mantilla Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades físico mecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Proyecto de grado para optar al título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.
- [2] American Concrete Institute, Guide to Durable Concrete. Reported by ACI Committee 201. 2008.
- [3] American Society for Testing and Materials. ASTM 1583-04.
- [4] American Society for Testing and Materials. ASTM C1202-12.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM C125-03
- [6] American Society for Testing and Materials. ASTM C150-04
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM C33-03.
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C39/C39M-03.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C494-11.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C88-99a.
- [11] Andrade C., Andrea R.D. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. Revista ALCONPAT, volumen 1, número 2, Mayo de 2011.

- [12] Andrade María Carmen. Seguridad y durabilidad estructural: la necesidad de integrar varias disciplinas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Anales de la Mecánica de fractura Vol. 1, 2007.
- [13] Austin Simon, Robins Peter, Pan Youguang. Tensile bond testing of concrete repairs. Structures and Materials Research Group. Loughborough , UK, 1995.
- [14] Barreto Santos Miguel, de Brito Jorge, Santos Silva Antonio. Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. Revista Ingeniería de Construcción vol. 24, Agosto de 2009.
- [15] Broomfield John P. Corrosión of Steel in concrete. Understanding, investigation and repair. 2nd Edition. Taylor & Francis. London and New York. 2007. ISBN 10: 0-415-33404-7.
- [16] Cortés M. María Teresa, Ortiz H. Pablo. Corrosión. Apuntes científicos uniandinos No. 4. Diciembre, 2004.
- [17] Daniel L.Y. Kong, Jay G.Sanjayan, Kwesi Sagoe-Crentsil. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. Cement and concrete research. ELSEVIER, August 2007.
- [18] Davidovits, J. (1988). Soft Mineralurgy and Geopolymers. In: Davidovits, J., Orlinski, J. (Eds.), Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer 88, vol. 1, Compiègne, France, 1–3 June, pp. 19–23.

- [19] Davidovits, J. and Davidovics, M., Geopolymer: room-temperature ceramic matrix for composites, *Ceramics Engineering Science Process*, 9, 7-8, 835-842, (1998).
- [20] Davidovits, J., Chemistry of geopolymeric systems, terminology, in: *The Proceedings of Geopolymere '99*, St. Quentin, France, 9-39, (1999).
- [21] Del Valle Moreno Angélica, Pérez López Tezozómoc, Martínez Madrid Miguel. *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Sanfandila, Queretaro. 2001. ISSN 0188-7297.
- [22] Dimas D. Giannopoulou I.Panias D. polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. Springer Science+business Media, 2009. Querétaro. 2001. ISSN 0188-7297.
- [23] *Durability of concrete structures investigation, repair, protection*. E & FN Spon. Chapman & jall, 2003. London, UK. ISBN: 0-419-15620-8.
- [24] Duxson P. Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A., Van Deventer J. S. J. *geopolymer tchnology: the current state of the art*. *Advances in geopolymer science & technology*. Springer Science+Business Media, LLC 2006.
- [25] E. Harmsen, Teodoro. *Diseño de estructuras de concreto armado*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial, 4ª. Edición, 2005.
- [26] Fontana Mars Guy. *Corrosion engineering*. McGraw-Hill, 3rd edition. November, 1985. ISBN-13 978-0070214637.

- [27] Hardjito D y Rangan B. V. development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete. Research Report GC 1, Faculty of Engineering, Curtin universite of technology Perth, Australia. 2005.
- [28] Hernández Castañeda O., Mendoza Escobedo C.J. Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. Ingeniería, investigación y tecnología vol. 1, México, 2006.
- [29] Komnistas Kostas y Zaharaki Dimitra. Geopolimerization: A review and prospects for minerals industry. ScienceDirect. Minerals engineering. Greece 2007.
- [30] Kostmatka Steven H, Kerkhoff Beatrix, Panarese William C, Tanesi Jussara. Diseño y control de mezclas de concreto. Portland cement association. Primera edición, 2004. ISBN 0-89312-233-5.
- [31] Lamond Joseph F. and Pielert James H. Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials. ASTM Stock. STP169D. 2006.
- [32] Lázaro A., Brouwers J. H. Nano-silica production by a sustainable process; application in building materials. 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark. June 20-23, 2010.
- [33] Lee Orantes Francisco, Torres Acosta Andrés Antonio, Terán Guillén Jorge, Martínez Madrid Miguel. Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos de fibra de carbón. Sanfandila, Querétaro.2006. ISSN 0188-7297.

- [34] López Celis Raquel, Pérez Quiroz José Trinidad, Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel, Martínez Molina Wilfrido, Ariza Aguilar Luis Eduardo, Zamudio Cántora Emilio, Genescá Llongueras Joan, Valdez Salas Benjamín. Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Publicación técnica 292, Sanfandila, Querétaro, 2006. ISSN 0188-7297.
- [35] Medina Olvera Sergio. Diseño, elaboración y evaluación de un recubrimiento geopolimérico para aumentar la durabilidad del concreto utilizado en las vías terrestres, sometido a intemperismo acelerado. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Agosto, 2011.
- [36] Mejía Orellana Vicky, Peña Estrella Julián. Determinación de la resistencia y resistividad eléctrica de probetas de varios diseños de hormigón sometidas a ataques contaminantes. Escuela superior politécnica del litoral. Centro de investigación científica y tecnológica. Guayaquil, Ecuador, 2010.
- [37] Mosley Bill, Bungey John and Hulse Ray. Reinforced concrete design to eurocode 2, Sixth edition. Palgrave Macmillan, 2007. ISBN 0-230-50071-4.
- [38] Neville A. M. y Brooks J. J. Concrete technology. Prentice Hall, 2nd ed., 2011. ISBN 978-0-273-73219-8.
- [39] Newman John, Seng Choo Ban. Advanced Concrete Technology: constituent materials. Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-5103-2
- [40] Nilson Arthur H. Diseño de estructuras de concreto. McGraw-Hill 1999. ISBN: 958-600-953-X. Colombia.

- [41] Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S. C. NMX-C-414-ONNCCE-2004
- [42] Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S. C. NMX-C-122-ONNCCE-2004
- [43] Parker Harry, James Ambrose. Diseño simplificado de concreto reforzado. LIMUSA. México, D.F., 2008. ISBN 13-978-968-18-5190-3.
- [44] Pérez García Natalia, Garnica Anguas Paul, Hugo Delgado Victor, Landaverde Noe. Publicación técnica no. 325. Sanfandila, Querétaro, 2010. ISSN 0188-7297.
- [45] Poulsen Ervin, Mejlbro Leif. Diffusion of chloride in concrete. Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-419-25300-9.
- [46] Red iberoamericana XV.B. —DURARII (Durabilidad de la armadura) Manual de inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Tercera edición, Agosto de 2000. ISBN 980-296-541-3.
- [47] Restrepo Gutiérrez Juan Camilo, Restrepo Baena Oscar Jaime, Iván Tobón Jorge. Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland. Dyna 150, 2006.
- [48] Riva López Enrique. Ensayo: durabilidad y patología del concreto. Perú, 2006.
- [49] Rodríguez Erich, Mejía de Gutiérrez Ruby, Bernal Susan y Gordillo Marisol, suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales, síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a

partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza, Cartagena de Indias, Colombia, 2009.

[50] Rodríguez Erick, Mejía de Gutiérrez Ruby, Bernal Susan, Gordillo Marisol. Efecto de los módulos $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. Revista de la facultad de Ingeniería de la Universidad Antioquia no. 49. Septiembre de 2009.

[51] Sanjay Kumar, Geopolymers: New Generation Materials by Mimicking Rock Formation. National Metallurgical Laboratory, Council of Scientific & Industrial Research, Jamshedpur 831007, India. Last updated on 31 July 2008.

[52] Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Sanfandila, Querétaro.2001. ISSN 0188-7297.

[53] Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Molina Wilfrido, Lomelí González María Guadalupe, Pérez Gallardo Alejandro. Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto. Sanfandila, Querétaro.2010. ISSN 0188-7297.

[54] Torres Acosta Andrés, Del valle Moreno Angélica, Martínez Madrid Miguel, Pérez Quiroz José Trinidad, Backhoff Polhs Miguel. Plan nacional de evaluación de puentes federales, libres de peaje dañados por corrosión (2000-2005). Una cuantificación de resultados, proyectos y colaboraciones. Publicación técnica 327, Sanfandila, Queretaro, 2010. ISSN 0188-7297.

[55] Tróchez Jenny, Maturana Harry, M. de Gutiérrez Ruby, Guerrero Carmen E. Desempeño de mezclas cementicias binarias y ternarias basadas en metacaolín y humo de sílice. 2009.