



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN
LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

**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 INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

ING. SERGIO MEDINA OLVERA

ASESOR:

M. A. ING. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

DICIEMBRE 2011



MORELIA MICH.

AGRADECIMIENTOS.

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán.

Quien siempre me ha brindado su apoyo incondicional además de darme la confianza y motivación para desarrollarme y superarme en un ámbito académico y profesional.

M. en A. Ing. Wilfrido Martínez Molina.

Por apoyo, asesoramiento y estímulo para seguir creciendo en el de igual manera en el ámbito profesional y académico, así como por todas las facilidades que me brindó para la elaboración de este trabajo.

Al Laboratorio de Materiales “Luís 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 en el que realicé mi trabajo de Tesis de licenciatura y maestría.

Por ultimo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que se me brindo ya que sin éste no hubiera sido posible continuar con mis estudios de posgrado.

DEDICATORIA.

A mi padre *Ing. Sergio Medina López.* †

Quien me dio todo su cariño, comprensión y por llenar mi vida de alegría. Además de ser el motivo de mi más grande admiración y quien llevo siempre dentro de mi corazón.

A mi madre *Profa. Celia Olvera Torres.*

A mi madre quien al igual que mi padre me ha dado todo su apoyo y quien me ha demostrado su amor y cariño en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis hermanas.

Quienes me han tendido su mano y me han brindado su amistad, su paciencia y cariño.

RESUMEN.

Se presentan los resultados preliminares del diseño de un recubrimiento geopolimérico inorgánico-orgánico, el cual pretende utilizarse contra la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Se diseña una mezcla de concreto, por el método del ACI, para una resistencia media $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, la cual es utilizada como sustrato y estructura para recubrimientos. Se muestran los resultados de resistencia a compresión y Módulo de Elasticidad en cubos de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$, de diferentes tipos de geopolímero, así como su resistividad eléctrica. Se muestra la caracterización electroquímica en vigas de $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}$, de concreto reforzado armados, por medio de un corrosímetro (Gcorr-8), determinado los parámetros de velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica. Todas las vigas, recubiertas y sin recubrir, fueron sometidas a cinco ciclos de ataque con Sulfato de Sodio (Na_2SO_4). Se presentan los resultados de la determinación de resistividad eléctrica a especímenes cilíndricos de $10 \times 20 \text{ cm}$, sin armar con un resistómetro de cuatro puntas (Nillson 400). Todos los especímenes de concreto, sin recubrir y recubiertos, fueron igualmente atacados con Na_2SO_4 . La conclusión de este trabajo se puede decir que la corrida 16-M, presento pocas fisuras, una gran adherencia sustrato/recubrimiento. En cuanto a la corrida 18-M es la que presento un comportamiento mecánico más uniforme, una alta resistividad y una baja absorción que son factores que pueden ayudar a reducir la corrosión.

Palabras clave: (Geopolimero, corrosión, electroquímica, resistividad eléctrica, potencial de corrosión, velocidad de corrosión, módulo de elasticidad)

ÍNDICE.

AGRADECIMIENTOS.....	1
DEDICATORIA.....	2
RESUMEN.....	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	2
2.1. CONCRETO REFORZADO.....	2
2.1.1. CEMENTO.....	4
2.1.1.1. Según la norma ASTM-C-150 (American Society for Testing and Materials). 6	
2.1.1.2. Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 la cual clasifica al cemento de acuerdo a tres aspectos.....	6
2.1.2. AGREGADOS.....	7
2.1.3. AGUA (RELACIÓN AGUA/CEMENTO).....	10
2.1.4. ADITIVOS.....	11
2.2. ACERO.....	12
2.3. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.....	13
2.3.1. MÉTODO POR LAS CURVAS DE ABRAMS.....	13
2.3.2. MÉTODO ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE).....	20
2.4. DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	24
2.4.1. PROPIEDADES DE PERMEABILIDAD.....	27
2.4.2. REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO.....	29
2.4.3. ATAQUE DE SULFATOS.....	29
2.4.4. ATAQUE ACIDO.....	30
2.4.5. AGUA DE MAR.....	31
2.4.6. ACCIÓN DEL CALENTAMIENTO Y FUEGO.....	31
2.4.7. CONGELADO Y DESCONGELADO DEL CONCRETO.....	31
2.5. CORROSIÓN.....	32
2.5.1. ANTECEDENTES.....	32
2.5.2. DEFINICIÓN.....	36
2.5.3. TIPOS DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO.....	40
2.5.3.1. Corrosión generalizada.....	40

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

2.5.3.2.	Corrosión por picaduras.....	41
2.5.3.3.	Corrosión bajo tensión.....	42
2.5.4.	<i>FACTORES QUE DESENCADENAN LA CORROSIÓN.</i>	42
2.5.4.1.	Dosificación, compacidad y homogeneidad del concreto.	43
2.5.4.2.	Espesor de recubrimiento del concreto.	43
2.5.4.3.	Humedad ambiental.....	44
2.5.4.4.	La penetración de iones despasivantes, como son:	45
2.5.4.5.	El proceso de carbonatación en el concreto.....	47
2.5.4.6.	Existencia de fisuras y coqueas en el concreto.....	47
2.5.5.	<i>MÉTODOS PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN.</i>	50
2.5.5.1.	Aislamiento eléctrico del material.	50
2.5.5.2.	Polarización del mecanismo electroquímico.....	51
2.5.5.3.	Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición.	52
2.5.5.4.	Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión.	52
2.6.	GEOPOLÍMEROS.....	54
2.6.1.	<i>ANTECEDENTES.</i>	55
2.6.2.	<i>DEFINICIÓN.</i>	56
2.6.2.1.	Geopolimerización.....	59
2.6.3.	<i>COMPONENTES DE LOS GEOPOLÍMEROS.</i>	62
2.6.3.1.	Materiales fuente.....	62
2.6.3.2.	Soluciones alcalinas.....	64
2.6.4.	<i>APLICACIONES.</i>	65
2.7.	MÉTODOS DE ENSAYO.....	67
2.7.1.	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO (ASTM C 39/C 39 M – 03).	67
2.7.2.	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	68
2.7.3.	MÉTODO PULL OFF.....	71
2.7.3.1.	Significado y uso.....	71
2.7.3.2.	Preparación de la superficie.....	72
2.7.3.3.	Aparatos.....	73
2.7.3.4.	Preparación de la superficie.....	73
2.7.3.5.	Preparación del espécimen de prueba.....	73
2.7.3.6.	Procedimiento de prueba.....	74
3.	MARCO EXPERIMENTAL.....	77
3.1.	DISEÑO DE UN RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO.....	77
3.1.1.	<i>METACAOLÍN (CAOLÍN CALCINADO).</i>	77

3.1.2.	CENIZA DE TERMOELÉCTRICA (PRODUCTO DE DESHECHO).	78
3.1.3.	AGREGADOS Y SOLUCIONES.....	79
3.2.	RECUBRIMIENTO A BASE DE METACAOLÍN.....	80
3.2.1.	SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN. 80	
3.3.	RECUBRIMIENTO A BASE DE CENIZA DE TERMOELÉCTRICA.	85
3.3.1.	SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN. 85	
3.4.	RECUBRIMIENTO A BASE POLVO DE GRAVA TRITURADA.	89
3.4.1.	SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN. 89	
3.5.	RECUBRIMIENTO A BASE PERLITA NATURAL.	94
3.5.1.	SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN. 94	
3.6.	SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	97
3.7.	PRUEBA DE ADHERENCIA (PULL-OFF) SOBRE SUSTRATOS DE CONCRETO.	100
3.8.	ELABORACIÓN DE CUBOS 5x5x5 CM.	104
3.9.	ABSORCIÓN DE LOS CUBOS.	108
3.10.	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL RECUBRIMIENTO.	109
3.11.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	110
3.12.	DISEÑO UN CONCRETO F'C=150 KG/CM ²	110
3.13.	ELABORACIÓN DE CILINDROS.....	113
3.14.	APLICACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO PRELIMINAR A CILINDROS. 114	
3.15.	ATAQUE DE INTEMPERISMO ACCELERADO.....	114
3.15.1.	PRIMER CICLO.....	115
3.15.2.	SEGUNDO CICLO.....	116
3.15.3.	TERCER CICLO.....	118
3.15.4.	CUARTO CICLO.....	120
3.15.5.	QUINTO CICLO.....	121
4.	RESULTADOS.....	123
4.1.	FLUORESCENCIA EN MATERIALES BASE.....	123
4.2.	PRUEBA PULL-OFF EN SUSTRATOS DE CONCRETO.....	125

4.3.	ABSORCIÓN EN RECUBRIMIENTOS.....	129
4.4.	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN RECUBRIMIENTOS.	133
4.5.	INTEMPERISMO ACELERADO.....	137
4.5.1.	<i>ABSORCIÓN.</i>	137
4.5.2.	<i>RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.</i>	145
4.5.3.	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.</i>	152
5.	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	155
6.	REFERENCIAS.....	157

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Comportamiento del concreto y acero [Mosley et al, 2007].....	4
Tabla 2. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003]..	5
Tabla 3. Principales componentes del cemento Portland [Neville y Brooks, 1998].	5
Tabla 4. Clasificación de los cementos según su uso.	6
Tabla 5. Clasificación de los cementos por su tipo.....	7
Tabla 6. Clasificación de los cementos por su resistencia.	7
Tabla 7. Clasificación por características especiales.	7
Tabla 8. Datos necesarios para comenzar un Diseño por curvas de Abrams.	13
Tabla 9. Corrección por revenimiento.	16
Tabla 10. Proporciones en peso.....	17
Tabla 11. Proporciones de los materiales en peso y volumen.	18
Tabla 12. Datos necesarios para el diseño de un concreto por el método ACI.	20
Tabla 13. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.	21
Tabla 14. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.	21
Tabla 15. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.	22
Tabla 16. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.	22
Tabla 17. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	23
Tabla 18. Suma de volúmenes excepto arena, para determinar el agregado fino.	23
Tabla 19. Reporte de daños en puentes de la Red Federal de Carreteras	35
Tabla 20. Valor crítico de cloruros en concretos reforzados.	46
Tabla 21. Aplicaciones potenciales de los geopolímeros [Sanjay Kumar, 2008]... ..	66
Tabla 22. Aplicaciones de los geopolímeros respecto a su relación sílice/aluminio [Hardjito y Rangan, 2005].....	67
Tabla 23. Recubrimiento a base de metacaolín y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.	80
Tabla 24. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	80
Tabla 25. Recubrimiento a base de metacaolín y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.	83
Tabla 26. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	83
Tabla 27. Recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.	86

Tabla 28. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	86
Tabla 29. Recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.	88
Tabla 30. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	88
Tabla 31. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.	89
Tabla 32. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	90
Tabla 33. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.	92
Tabla 34. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	92
Tabla 35. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.	95
Tabla 36. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.	95
Tabla 37. Características de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.	111
Tabla 38. Estimación del volumen de arena necesario para 1 m ³	111
Tabla 39. Estimación de las relaciones en volumen y en peso necesarios para 1m ³ así como el material necesario para un bulto.	112
Tabla 40. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m ³ de concreto.	112
Tabla 41. Resultados de la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.	124
Tabla 42. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín, sin látex.	126
Tabla 43. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín, con látex.	126
Tabla 44. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica, sin látex.	127
Tabla 45. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica, con látex.	128
Tabla 46. Resultados de la absorción en los cubos a base de metacaolín sin látex.	130
Tabla 47. Resultados de la absorción en los cubos a base de metacaolín con látex.	130

Tabla 48. Resultados de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex.....	132
Tabla 49. Resultados de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica con látex.	132
Tabla 50. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de metacaolín sin látex.....	134
Tabla 51. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de metacaolín con látex.	134
Tabla 52. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex.....	135
Tabla 53. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de ceniza de la termoeléctrica con látex.	136
Tabla 54. Absorción que presentan los cilindros en el primer ciclo de ataque. ...	138
Tabla 55. Absorción que presentan los cilindros en el segundo ciclo de ataque. ...	139
Tabla 56. Absorción que presentan los cilindros en el tercer ciclo de ataque.	140
Tabla 57. Absorción que presentan los cilindros en el cuarto ciclo de ataque. ...	141
Tabla 58. Absorción que presentan los cilindros en el quinto ciclo de ataque. ...	141
Tabla 59. Resistividad en cilindros saturados en agua.	146
Tabla 60. Resistividad que presentan los cilindros en el primer ciclo de ataque. ...	146
Tabla 61. Resistividad que presentan los cilindros en el segundo ciclo de ataque.	147
Tabla 62. Resistividad que presentan los cilindros en el tercer ciclo de ataque.. ...	148
Tabla 63. Resistividad que presentan los cilindros en el cuarto ciclo de ataque. ...	148
Tabla 64. Resistividad que presentan los cilindros en el quinto ciclo de ataque. ...	149
Tabla 65. Resistencia a la compresión durante el primer ciclo de intemperismo acelerado.....	152
Tabla 66. Resistencia a la compresión durante el segundo ciclo de intemperismo acelerado.....	152
Tabla 67. Resistencia a la compresión durante el tercer ciclo de intemperismo acelerado.....	153
Tabla 68. Resistencia a la compresión durante el cuarto ciclo de intemperismo acelerado.....	153
Tabla 69. Resistencia a la compresión durante el quinto ciclo de intemperismo acelerado.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].	5
Figura 2. Composición granulométrica en arenas y gravas de acuerdo a la ASTM C33-03.	9
Figura 3. Nomograma 1	14
Figura 4. Nomograma 2	15
Figura 5. Nomograma 3	16
Figura 6. Modelo de durabilidad [Torres y Martínez, 2001].	25
Figura 7. Descripción esquemática de los poros en el concreto.	28
Figura 8. Proceso de delaminación por el efecto de la temperatura [Thomas y Folliard, 2007].	32
Figura 9. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].	33
Figura 10. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por cloruros [Torres et al, 2010].	34
Figura 11. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].	34
Figura 12. Problemática que presentan algunos puentes debido al proceso de corrosión en el que están envueltos [www.imt.mx].	35
Figura 13. Muelle Progreso, Yucatán [Torres et al, 2006]. Puerto de Manzanillo [Martínez Molina, 2010].	36
Figura 14. Representación esquemático de los elementos que componen una celda de corrosión en las armaduras de concreto reforzado [Red DURAR, 2000].	37
Figura 15. Reacciones anódica y catódica de manera esquemática [Castro et al, 2008].	38
Figura 16. Descripción esquemática de los tipos de corrosión en el concreto reforzado [Lee et al, 2006].	40
Figura 17. Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación [Red DURAR, 200].	41
Figura 18. Mecanismo de corrosión por picadura en la armadura [Red DURAR, 2000].	42
Figura 19. Valores de espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales [Red DURAR, 2000].	44
Figura 20. Efecto del contenido de humedad en los poros del concreto, en la corrosión de la armadura [Red DURAR, 2000].	45

Figura 21. Perfil de concentración de cloruros en el concreto [Red DURAR, 2000].	46
Figura 22. Carbonatación en el concreto [Castro et al, 2008].	47
Figura 23. Corrosión provocada por la existencia de fisuras en el recubrimiento. 48	
Figura 24. Corrosión severa de la armadura en una losa de un puente.....	49
Figura 25. Consecuencias de la corrosión en el acero de refuerzo [Lee et al, 2006].	49
Figura 26. Técnicas de control de corrosión [Red DURAR, 2000].	50
Figura 27. Aplicación de recubrimientos epóxicos en barras de acero de refuerzo	51
Figura 28. Extracción de los iones de cloruro que han penetrado el concreto.	52
Figura 29. Protección catódica en elementos de acero, por corriente impresa y por ánodos de sacrificio [Ávila y Genescá, 2002].	53
Figura 30. Implementación de ánodos galvánicos o de sacrificio en una estructura de concreto, en este caso un pasó superior vehicular.	54
Figura 31. Estructura de la baquelita.....	56
Figura 32. Representación esquemática de las tres formas básicas de los geopolímeros [Davidovits, 2008].	58
Figura 33. Representación esquemática de los monómeros en los geopolímeros [Muntingh, 2006].....	60
Figura 34. Modelo conceptual para la geopolimerización [Duxson et al, 2006].....	62
Figura 35. Metacaolín como material base en la elaboración de geopolímeros....	63
Figura 36. Hidróxido de Potasio presentación en forma de lentejas.	65
Figura 37. Resistometro Nilsson Model 400.....	69
Figura 38. Representación esquemática de la prueba de resistividad.	70
Figura 39. Equipo para prueba Pull Off marca CONTROLS.	72
Figura 40. Representación esquemática de la prueba Pull Off [ASTM 1583-04]. .	75
Figura 41. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.	76
Figura 42. Caolín presente en la región de los Azufres, Michoacán.	78
Figura 43. Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles.	78
Figura 44. Diagrama ternario.....	79
Figura 45. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.	81
Figura 46. Sustratos y recubrimiento a un 250% y 300% solución KOH en baja concentración y sin látex.	81
Figura 47. Sustratos y recubrimiento a un 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.	81
Figura 48. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.	82

Figura 49. Sustratos y recubrimiento a un 250% y 300% solución KOH en baja concentración y con látex.	82
Figura 50. Sustratos y recubrimiento a un 350% solución KOH en baja concentración y con látex.	83
Figura 51. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y sin látex.	84
Figura 52. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y sin látex.	84
Figura 53. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.	85
Figura 54. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.	85
Figura 55. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.	86
Figura 56. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.	87
Figura 57. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.	87
Figura 58. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.	87
Figura 59. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.	88
Figura 60. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.	89
Figura 61. Sustratos y recubrimiento a un 100%, y 150% solución KOH en baja concentración y sin látex.	90
Figura 62. Sustratos y recubrimiento a un 200%, y 250% solución KOH en baja concentración y sin látex.	90
Figura 63. Sustratos y recubrimiento a un 300%, y 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.	91
Figura 64. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.	91
Figura 65. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.	92
Figura 66. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 150% solución NaOH en baja concentración y sin látex.	93
Figura 67. Sustratos y recubrimiento a un 200% y 250% solución NaOH en baja concentración y sin látex.	93

Figura 68. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.	94
Figura 69. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.	94
Figura 70. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.	95
Figura 71. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.	96
Figura 72. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.	96
Figura 73. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.	97
Figura 74. Sustratos sumergidos durante 24 h en agua.....	98
Figura 75. Resultados de la prueba en sustratos de perlita y polvo de grava triturada con una solución de NaOH.	98
Figura 76. Resultados de la prueba en sustratos de metacaolín con una solución de NaOH.	99
Figura 77. Resultados de la prueba en sustratos de ceniza de escoria con una solución de NaOH.	100
Figura 78. Recubrimiento a base de metacaolín una solución de hidróxido de potasio en alta concentración con látex.	101
Figura 79. Muestras elaboradas a base de metacaolín sin látex e hidróxido de sodio en alta concentración.....	102
Figura 80. Muestras elaboradas a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex e hidróxido de potasio en alta concentración.	103
Figura 81. Muestras elaboradas a base de ceniza de la termoeléctrica, con látex e hidróxido de potasio en alta concentración.	104
Figura 82. Colado de cubos con una solución a base de metacaolín y una solución de baja concentración.	105
Figura 83. Cubos a las 24 h de su elaboración.	105
Figura 84. Cubos descimbrados a los 5 días de haber sido colados.	106
Figura 85. Elaboración de cubos a base de metacaolín y una solución con una alta concentración.	107
Figura 86. Elaboración de cubos a base de ceniza de escoria y una solución con una alta concentración.	108
Figura 87. Procedimiento para obtener la absorción en cubos de 5x5x5 cm.	109
Figura 88. Procedimiento para obtener la resistividad de los cubos de 5x5x5. ...	110
Figura 89. Cilindros elaborados para comprobar que la resistencia proyectada fue físicamente parecida.	113

Figura 90. Elaboración y curado de cilindros.....	113
Figura 91. Cilindros sin recubrimiento (testigos) y cilindros recubiertos.....	114
Figura 92. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO ₄ durante el primer ciclo.....	115
Figura 93. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el primer ciclo.	116
Figura 94. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO ₄ durante el segundo ciclo.	117
Figura 95. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el segundo ciclo.....	118
Figura 96. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO ₄ durante el tercer ciclo.....	119
Figura 97. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el tercer ciclo.	119
Figura 98. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO ₄ durante el cuarto ciclo.	120
Figura 99. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 24 h en el cuarto ciclo.	121
Figura 100. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO ₄ durante el quinto ciclo.....	122
Figura 101. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el cuarto ciclo.	122
Figura 102. Resultados de la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.....	125
Figura 103. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín.....	127
Figura 104. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica.....	129
Figura 105. Comparativa de la absorción en los cubos a base de metacaolín. ..	131
Figura 106. Comparativa de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica.....	133
Figura 107. Comparativa de la resistividad eléctrica en los cubos a base de metacaolín.....	135
Figura 108. Comparativa de la resistividad eléctrica en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica.	137
Figura 109. Absorción que presentan los cilindros a lo largo del ataque por sulfato de sodio en cilindros sin recubrimiento.	142
Figura 110. Absorción que presentan los cilindros a lo largo del ataque por sulfato de sodio en cilindros con recubrimiento.	143
Figura 111. Resistividad que presentan los cilindros sin recubrimiento en los cinco ciclos de ataque.	149

Figura 112. Resistividad que presentan los cilindros con recubrimiento en los cinco ciclos de ataque. 150

Figura 113. Resultados de la resistencia a la compresión durante los cinco ciclos de intemperismo acelerado. 154

1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad se sabe que en el área de la construcción el material más usado es el concreto reforzado. También se conoce que el concreto reforzado es susceptible a degradarse con el tiempo. Uno de los problemas que puede llevar a esta situación es la corrosión que se presenta en ambientes que son agresivos y presentan las condiciones idóneas para que se lleve a cabo dicho proceso. De tal manera que puede repercutir en la resistencia para la cual fue diseñada cualquier estructura e incluso en la estética y sensación de seguridad.

En estos días también existe una tendencia mundial en el uso de tecnologías que ayuden a reducir o eliminar fuentes de contaminación o desechos. Tratando así de implementar métodos que reduzcan el uso de energía, agua y otros recursos.

El calentamiento global es causado por gases de efecto invernadero, como el CO_2 a la atmósfera por actividades humanas. Entre los gases de efecto invernadero se estima que el CO_2 contribuye aproximadamente con el 65% del calentamiento global. La industria del cemento es responsable de alrededor del 6% de las emisiones de CO_2 , debido a que la producción de una tonelada de cemento portland emite aproximadamente una tonelada de CO_2 en la atmósfera.

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.

En este sentido, la tecnología propuesta por Davidovits, los geopolímeros, muestra una promesa considerable para su aplicación en la industria del concreto como una alternativa de aglutinante para el cemento Portland. En cuanto a la reducción del calentamiento global, ésta tecnología podría reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera causadas por la producción del cemento Portland y agregados en un 80% [Wallah y Rangan, 2006].

Los geopolímeros están captando cada vez más la atención debido al gran potencial que presentan ya que son amigables con el medio ambiente, tienen un alto rendimiento y pueden reemplazar al cemento Portland en una amplia gama de aplicaciones.

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. CONCRETO REFORZADO.

El concreto es definido en términos relativos al concreto y agregados del mismo por la ASTM (C 125) como “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”.

El concreto reforzado es uno de los materiales más usados en las construcciones modernas. El concreto es una “roca artificial” que se obtiene mediante la mezcla de cemento, agregados (finos y gruesos) y agua. El mismo en estado fresco puede ser moldeado en casi todas las formas posibles. El concreto se hizo muy popular después de la invención de cemento portland en el siglo XIX.

Sin embargo está muy limitado por su resistencia a la tensión y es por esta razón que se le suele colocar barras acero como refuerzo. En la actualidad el concreto reforzado es extensamente usado en una amplia variedad de aplicaciones ingenieriles (por ejemplo, edificios, puentes, presas, etc.) [Yakut, 2011].

El concreto reforzado es considerado como el material universal en la construcción y esto puede entenderse fácilmente si se enumeran las ventajas:

1. Tiene un esfuerzo a la compresión considerablemente mayor si es comparado con otros materiales.
2. El concreto reforzado tiene una gran resistencia a la acción del fuego y agua, y en consecuencia, es el mejor material estructural para situaciones donde el agua está presente. Durante los incendios de gran intensidad, elementos estructurales con un recubrimiento adecuado sobre el acero de refuerzo únicamente reciben un daño superficial sin presentar falla.
3. Las estructuras de concreto reforzado son muy rígidas.
4. Es un material que requiere poco mantenimiento.
5. Comparado con otros materiales tiene una larga vida de servicio o vida útil. Bajo condiciones adecuadas, el concreto reforzado puede ser usado sin reducción de carga. Esto puede ser explicado por el hecho de que el concreto no disminuye su resistencia con el tiempo al contrario esta sigue incrementando, a lo largo de los años, debido al lento proceso de solidificación en la pasta del cemento.
6. Usualmente es un material económico para zapatas, muros de cimentaciones, muelles y aplicaciones similares.

7. Una característica especial, es su habilidad para moldearse en una variedad de formas como: losas, vigas, columnas, arcos, etc.
8. En muchas regiones, el concreto tiene la ventaja de aprovechar los materiales locales (arena, grava y agua) lo que disminuye su costo.
9. Requiere mano de obra menos calificada en comparación de otros materiales como el acero estructural.

Para el uso adecuado del concreto es necesario conocer también los puntos débiles, algunas desventajas son las siguientes:

1. El concreto tiene una muy baja resistencia a la tensión, por lo que requiere del uso de refuerzo por tensión.
2. El bajo esfuerzo por unidad de peso del concreto tiene como consecuencia elementos pesados. Y esto se vuelve cada vez más importante en estructuras con grandes claros, generando un gran peso muerto de concreto que a su vez genera un gran efecto en los momentos a flexión de las estructuras.
3. Del mismo modo, la baja resistencia por unidad de volumen de los elemento de concreto genera que estos sean relativamente grandes, una consideración importante para grandes construcciones y grandes claros.
4. Las propiedades del concreto varían ampliamente en los propocionamientos y mezclas. Además de que su colado y curado no es muy controlado en comparación de la producción de otros materiales como el acero estructural y la madera laminada.
5. Otras dos características que pueden causar problemas son la contracción y la fluencia del concreto [McCormac y Nelson, 2005]

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, sufre una rápida pérdida resistencia a grandes temperaturas

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

2.1.1. CEMENTO.

El cemento hidráulico es definido por la ASTM (C 219) como “un cemento que fragua y endurece por su interacción con el agua y que es capaz de endurecer también bajo el agua” [Lamond y Pielert, 2006].

El cemento portland 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 funden en hornos hasta obtener el llamado Clinker, y 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 producto. 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 ferroso)	3.00%
CaO (óxido de calcio)	65.50%
COMPONENTES MENORES	
TOTAL	99.87%

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

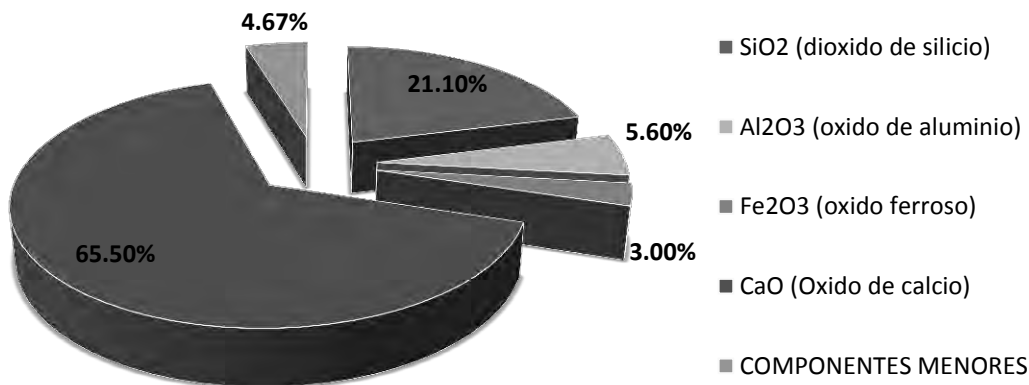


Figura 1. Composición química típica en el clinker para la elaboración del cemento Portland [Newman y Seng Choo, 2003].

Los componentes menores deben ser controlados por el impacto que tienen en las propiedades del cemento y la durabilidad del concreto. En relación a esto existen regulaciones que limitan estos niveles [Newman y Seng Choo, 2003].

Los componentes principales del cemento son cuatro y se presentan en la tabla 3 [Neville y Brooks, 1998].

Nombre del componente	Composición oxida	Abreviatura
Silicato de tricálcio	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato de bicálcio	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato de tricálcio	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrito tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabla 3. Principales componentes del cemento Portland [Neville y Brooks, 1998].

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

Sus propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar [Sánchez de Guzmán, 1997].

En lo que se refiere a la parte de comercialización del cemento se tiene una amplia variedad de cementos portland, existiendo una normativa mexicana y también la americana (ASTM) para controlar la calidad de los mismos.

2.1.1.1. Según la norma ASTM-C-150 (American Society for Testing and Materials).

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general.
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. Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 la cual clasifica al cemento de acuerdo a tres aspectos.

A. Tipo de cemento.

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.

B. Clase resistente.○ **Resistencia normal.**

Es la resistencia a la compresión a los 28 días, en Megapascales (N/mm²). 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.

○ **Resistencia Rápida.**

Es la resistencia a la compresión a los 3 días. Para especificar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia rápida se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases 30 R y 40 R.

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN N/mm ²	
	3 DÍAS MÍNIMO	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.

C. Características especiales.

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

Tabla 7. Clasificación por características especiales.

2.1.2. AGREGADOS.

Las rocas naturales en forma de partículas y como agregados normalmente representan entre un 70 y un 80 por ciento del volumen de un concreto normal. La palabra “agregado” quizá suena familiar porque los fragmentos de roca o gravas son de los materiales más comunes, particularmente en la industria de la

construcción. La arena natural y la grava, forman parte importante y fundamental de los concretos y morteros, pero también son componentes importantes en la construcción de carreteras, asfaltos y son ampliamente usados como filtros, capas de drenaje y balasto en la industria férrea [Newman y Seng Choo, 2003].

Los agregados naturales se clasifican generalmente en finos y gruesos. Un agregado fino o arena es cualquier material que pasa el tamiz No. 4, es decir, un tamiz con cuatro aberturas por pulgada lineal. El material más grueso que éste se clasifica como agregado grueso o grava. Cuando se desea una graduación óptima, los agregados se separan mediante tamizado, en dos o tres grupos de diferente para las arenas y en varios grupos de diferente tamaño para las gravas. Con posterioridad éstos pueden combinarse de acuerdo a tablas de graduación que permiten un agregado densamente empaquetado. 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 "Standard Specification for concrete aggregates" presenta los requisitos para agregados de buena calidad figura 2.

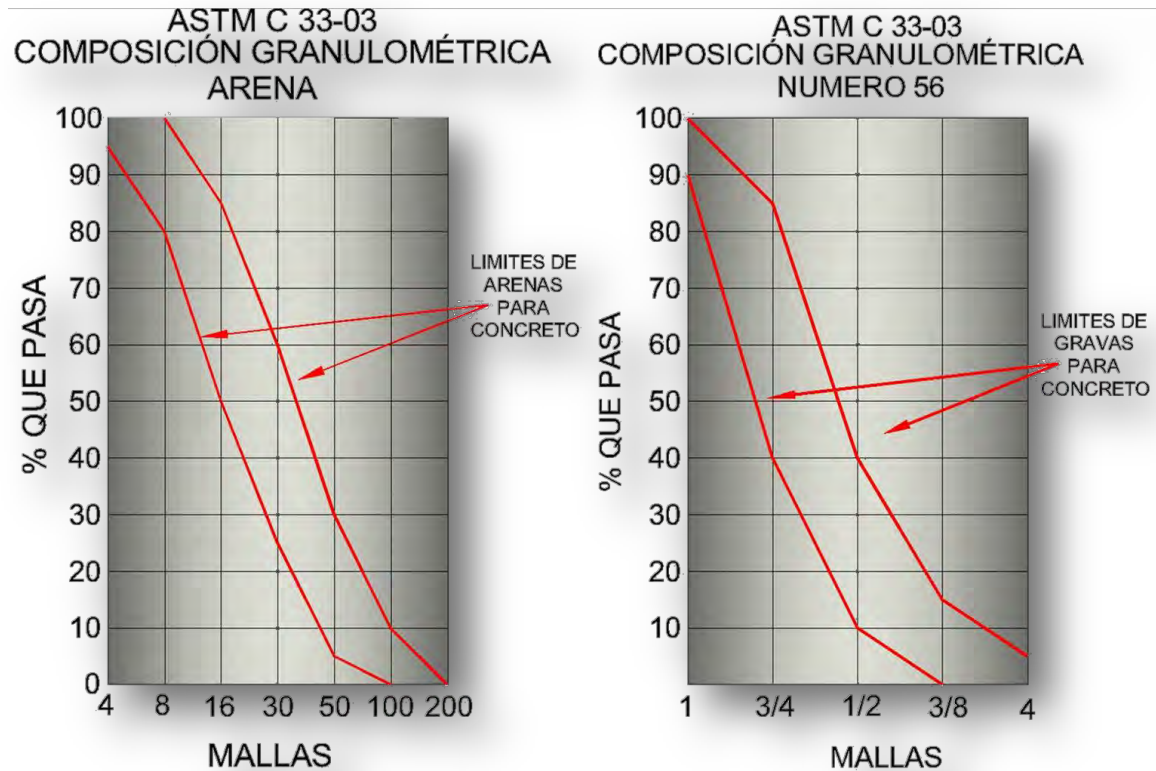


Figura 2. Composición granulométrica en arenas y gravas de acuerdo a la ASTM C33-03.

El peso unitario del concreto normal, es decir, el concreto con agregados de piedras naturales, varía aproximadamente entre 2250 y 2450 kg/cm². Los concretos livianos y concretos pesados se han venido utilizando cada vez con mayor frecuencia para propósitos especiales.

Existen varios tipos de agregados livianos. Algunos agregados no procesados tales como la piedra pómez o las cenizas son adecuados para concretos de aislamiento, pero para concreto estructural ligero se utilizan preferiblemente los agregados procesados debido a su mejor control. Estos pueden ser lutitas expandidas, arcillas, pizarras escoria o cenizas volantes en trozos. Son de bajo peso por la estructura porosa de las partículas individuales del agregado.

Los concretos pesados se requieren en algunos casos para protección contra rayos gamma y rayos X en reactores nucleares e instalaciones similares, para estructuras de protección y propósitos especiales tales como contrapesos en puentes colgantes. Para estos concretos se utilizan agregados pesados que consisten en minerales pesados de hierro o rocas de sulfato de bario (baritas)

trituradas en tamaños adecuados. También se utilizan aceros en forma de fragmentos, esquirlas o perdigones (a manera de finos). Los pesos unitarios para los concretos pesados con agregados naturales de roca pesada varían aproximadamente entre 3200 y 3690 kg/cm²; si se agregan fragmentos de hierro a los minerales de alta densidad pueden alcanzarse pesos hasta de 4330 kg/cm². El peso puede llegar casi hasta los 5300 kg/cm² si se utilizan únicamente minerales de hierro para los finos y aceros para los agregados gruesos [Nilson Arthur, 1999].

Originalmente se consideraban materiales inertes, que se utilizaban por razones económicas, sin embargo ahora se piensa que estos son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento. De hecho, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el desempeño del concreto [Del Valle et al, 2001].

2.1.3. AGUA (RELACIÓN AGUA/CEMENTO).

La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua que se utiliza debe estar libre de impurezas, como son: grasas, aceites, azúcares, ácidos y materia vegetal, ya que estos impiden o retardan la hidratación [López et al, 2006].

La estructura en la pasta de cemento se desarrolla como resultado de una reacción química generada por la mezcla entre el cemento portland y el agua. El concreto entra en una etapa temprana de hidratación, después que los límites externos de la masa, son más o menos fijos [Bentur et al, 1997].

La cantidad de agua necesaria para que se lleve a cabo completamente esta reacción química es alrededor de un 40% del peso del cemento. Un 23% de esta agua se combina químicamente para dar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie del gel que se forma en los poros [Staff-PCA., 1981].

Como muchas reacciones químicas, la hidratación de los compuestos del cemento es una reacción química exotérmica [Neville y Brooks, 1998].

La relación agua/cemento no es otra cosa que la cantidad de agua utilizada con respecto a la cantidad de cemento. Juega un papel muy importante en la preparación del concreto, ya que la mezcla debe ser lo suficientemente semifluida, para manejarla cómodamente [Torres et al, 2010].

La cantidad de agua añadida inicialmente a la mezcla de cemento y agregados para obtener un concreto fresco con trabajabilidad conveniente es siempre superior a la cantidad de agua necesaria para la hidratación completa. Este exceso de agua es el responsable del grado de porosidad y permeabilidad del concreto endurecido.

El agua que no reaccionó tiene características alcalinas debido a que en ella se disuelven los iones productos de las reacciones del cemento como son Ca^{2+} , HO^- , Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} .

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].

La hidratación del cemento es la reacción entre las partículas del cemento y el agua, incluyendo procesos químicos y físicos. Las propiedades del concreto fresco, como fraguado y endurecimiento son resultado directo de la hidratación [Li Zongjin, 2011].

2.1.4. ADITIVOS.

Además de los principales componentes del concreto, usualmente se utilizan aditivos para mejorar el comportamiento del mismo. Existen aditivos para acelerar el fraguado y el endurecimiento, para mejorar la manejabilidad, para aumentar la resistencia, para mejorar la durabilidad, para disminuir la permeabilidad y para proporcionar o afectar otras propiedades [Nilson Arthur, 1999].

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 siguientes:

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 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].

El acero al carbono, constituye el principal producto de los aceros que se producen, estimando que un 90% de la producción total producida mundialmente corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. Estos aceros son también conocidos como aceros de construcción, La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, y hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente como son: azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno [IMCYC, 2009].

El uso del acero de refuerzo ordinario es común en elementos de concreto. Este acero es muy útil para:

- Aumentar ductilidad.
- Aumentar resistencia.
- Resistir esfuerzos de tensión, compresión, momentos y cortante.
- Restringir agrietamientos.

- Reducir deformaciones.
- Confinar el concreto.

2.3. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.

El fin de diseñar una mezcla de concreto, es determinar las cantidades de cemento, agua y agregados necesarios para obtener un concreto con ciertas características de manera práctica y económica

En nuestro caso se hace indispensable comentar la existencia de dos métodos para el diseño de las mezclas de concreto:

2.3.1. MÉTODO POR LAS CURVAS DE ABRAMS.

Para obtener un concreto que sea resistente, durable y económico a la vez, es necesario proyectar una mezcla que tenga la máxima densidad. Para ello es necesario el dosificar los materiales de manera que el volumen de vacíos que deje el agregado grueso, sea llenado con el agregado fino y que el volumen de vacíos que éste deje, sean llenados por la lechada de cemento debidamente proporcionada para obtener la resistencia deseada [Ibarra, 2011].

La secuencia de cálculo para el diseño de mezcla de concreto por el método tradicional es el siguiente:

1. Para iniciar con el diseño de la mezcla de concreto es necesario tener los siguientes datos que se muestran en la tabla 8.

MATERIALES	CEMENTO	ARENA	GRAVA
Tipo de material:			
Densidad.			
P.V.S.S. (kg./ m³)			
P.V.S.S. (kg./ m³)	---		
T. M.	---	---	
M. F.	---		---
Absorción	---		

Tabla 8. Datos necesarios para comenzar un Diseño por curvas de Abrams.

2. Mediante la figura 3 se determinará la relación agua/cemento en peso. Entrando a la figura con el $f'c$ de diseño en el eje de las ordenadas y interceptando alguna de las dos curvas (condiciones comunes o bajo control).

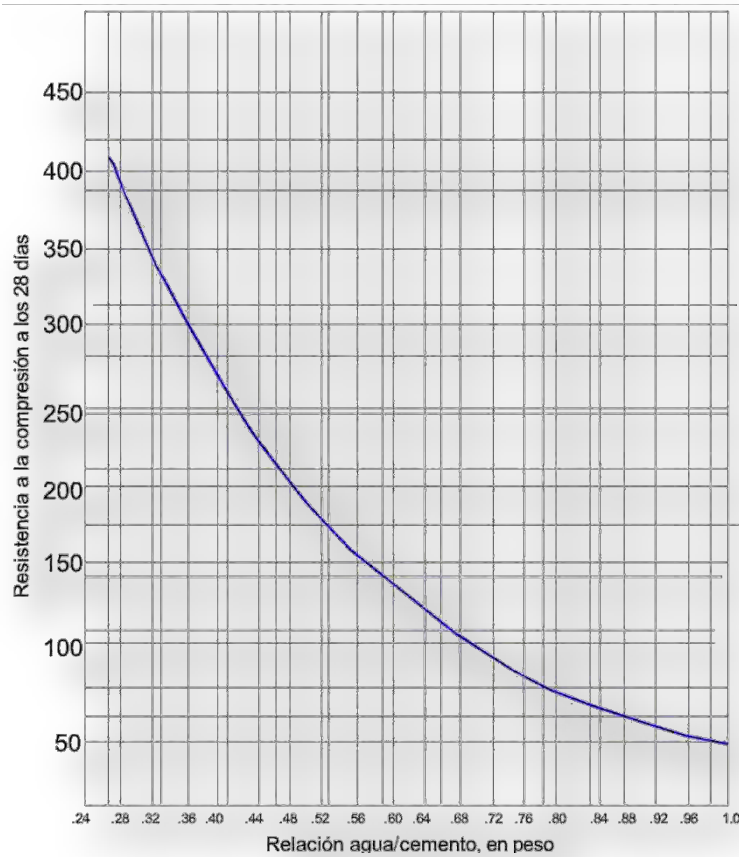


Figura 3. Nomograma 1.

3. En la figura 4 se determinará la relación grava/arena en peso. Esta se encuentra con el módulo de figura (M.F.) del agregado fino en el eje de las ordenadas, se proyecta sobre la curva correspondiente al tamaño máximo (T.M.) del agregado grueso y el punto de intersección se proyecta sobre el eje de las abscisas para obtener dicha relación.

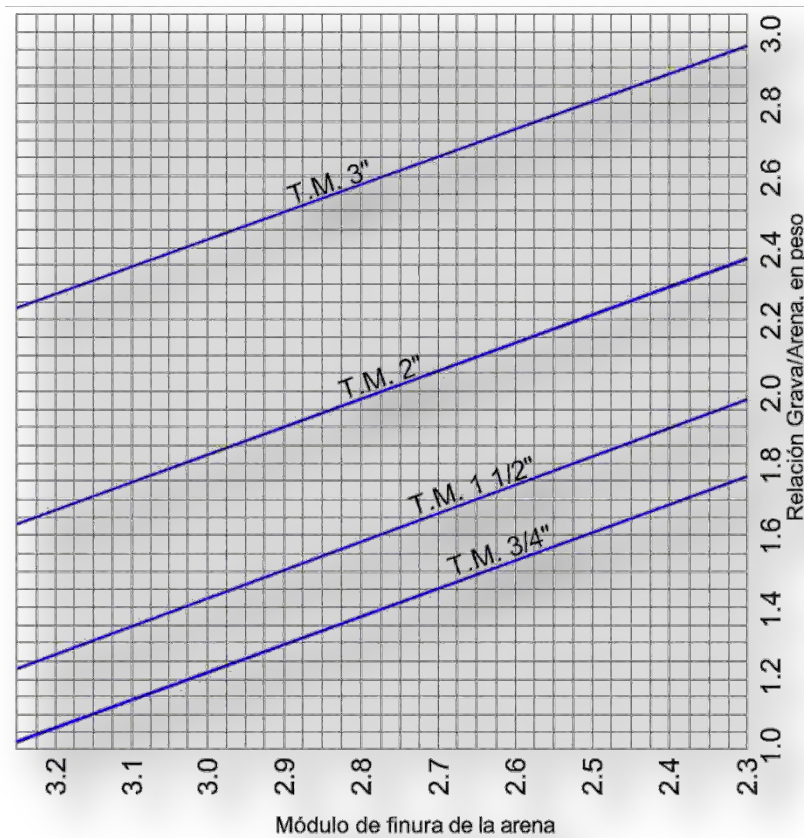


Figura 4. Nomograma 2.

- Se determinan las relaciones A/C y G/A en volumen, utilizando las densidades de los materiales:

$$A/C (\text{volumen}) = \frac{A/C (\text{en peso}) * (\text{Densidad del cemento})}{\text{Densidad del agua}}$$

$$G/A (\text{volumen}) = \frac{G/A (\text{en peso}) * (\text{Densidad del Arena})}{\text{Densidad del agua}}$$

- Se determinara mediante la figura 5, el contenido neto de agua por m³ de concreto. Para obtener la cantidad de agua necesaria para un m³ de concreto; se entra con el valor de la relación G/A* (en peso) en el eje de las abscisas, y el punto de intersección con la curva correspondiente al tamaño máximo del agregado grueso, se proyecta horizontalmente al eje de las ordenadas.

Este contenido de agua se considera para un revenimiento de 4". Para revenimientos diferentes, se corrige el agua en un 3% por cada pulgada de diferencia en el revenimiento tabla 5.

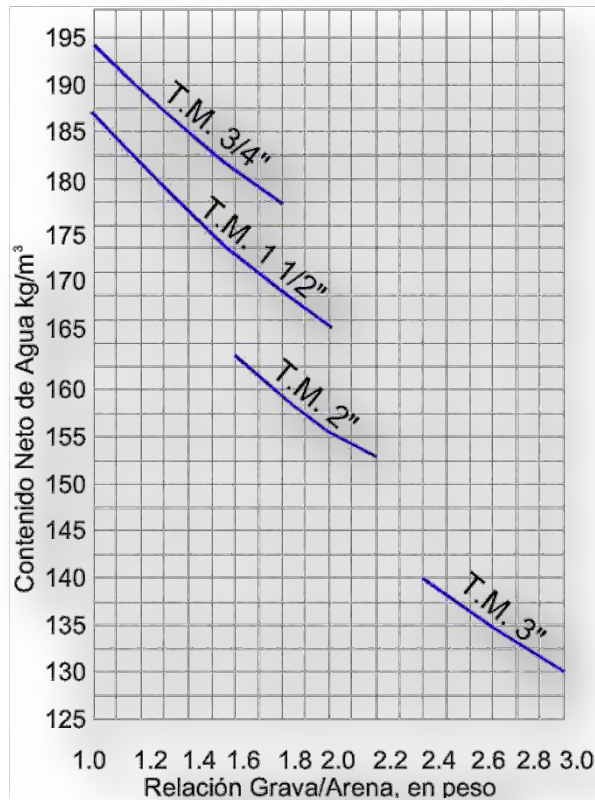


Figura 5. Nomograma 3.

REVENIMIENTO	CORRECCIÓN DE AGUA
2"	-6
3"	-3
4"	0
5"	3
6"	6

Tabla 9. Corrección por revenimiento.

- Se determina el contenido neto de cemento por m³ de concreto en volumen, aplicando la siguiente expresión:

$$Cemento = \frac{Cantidad\ de\ agua\ (l/m^3)}{Valor\ de\ A/C\ (vol.)}$$

7. Se determina el volumen de lechada de cemento (L_c) con la expresión siguiente:

$$L_c = Agua + Cemento\ (l)$$

8. Determinación del volumen de agregado (V_a) con la siguiente expresión:

$$V_a = 1,000\ l - L_c$$

9. Determinación del volumen de arena, aplicando las siguientes expresiones:

$$\frac{G}{A}\ (vol) = cantidad\ determinada\ en\ el\ paso\ 3$$

$$V_a\ (vol)\ (obtenido\ en\ el\ paso\ 7) = G + A$$

10. Determinación del volumen de grava, con la siguiente expresión:

$$G = V_a - A$$

11. Se calculan las proporciones en peso de cada componente, multiplicando cada uno de los componentes de los volúmenes absolutos encontrado en el paso 10 por su densidad correspondiente, se hace el valor del cemento igual a 1 tabla 11.

MATERIALES	LITROS	DENSIDAD	PESO	REL. EN PESO
	1	2	3	4
Cemento	Paso 5	Dato	Col 1 * col 2 = a	a/a
Agua	Paso 4	Dato	Col 1 * col 2 = b	b/a
Arena	Paso 8	Dato	Col 1 * col 2 = c	c/a
Grava	Paso 9	Dato	Col 1 * col 2 = d	d/a
Total	1000 l.			

Tabla 10. Proporciones en peso.

12. Cálculo de la tabla 11 para obtener la proporción de los materiales.

FILA	MATERIALES	CEMENTO	AGUA	ARENA	GRAVA
A	Proporciones en peso (kg.):				
B	Materiales en peso por saco de cemento (lt.):				
C	Materiales en volumen por saco de cemento (lt.):				
D	Proporciones en volumen (lt.):				
E	Volúmenes absolutos por saco de cemento (lt.):				
F	Cantidades por metro cúbico de concreto (kg. / m ³)				

Tabla 11. Proporciones de los materiales en peso y volumen.

- A. Se determina el dividir las proporciones del material en peso entre del cemento, como se observa en el paso 11 anterior.
- B. Se determina multiplicando las cantidades encontradas en él "a", por 50 Kg que es el peso de un saco de cemento.
- C. Se determina dividiéndose el peso de los materiales encontrados en el paso "b", entre el peso volumétrico seco suelto correspondiente.
- D. Se determina dividiendo los volúmenes del paso "c", entre el volumen y los litros de un saco de cemento de 50 kg.
- E. Se determina dividiendo los pesos de los materiales indicados en el paso "b", entre su densidad correspondiente.
- F. Se determina dividiéndose las cantidades del paso "b", entre la suma total de volúmenes absolutos del paso "e", multiplicando cada cantidad resultante por 1000 (un metro cúbico).

13. Ajuste al momento de efectuar el colado.

Normalmente, los agregados a usar en la elaboración de concreto, son almacenados a la intemperie; por lo tanto, estarán expuestos a cambios de humedad a la hora de ser usados (humedad actual); siendo así, será necesario hacer una corrección en el agua de mezclado para no alterar la fluidez para la cual fue diseñado.

- Humedad de absorción mayor que la humedad actual.

Se obtiene el porcentaje de agua faltante para la mezcla (según diseño), de acuerdo con las humedades de los agregados:

$$\% \text{ Agua faltante}_A = \% H. \text{ Actual} - H. \text{ Absorción}$$

$$\% \text{ Agua faltante}_G = \% H. \text{ Actual} - H. \text{ Absorción}$$

Determinación del peso de agua faltante, correspondiente a los porcentajes obtenidos para cada uno de los agregados:

$$\% \text{ Agua faltante}_A = (\% \text{ Agua faltante}_A) * (\text{Peso arena})$$

$$\% \text{ Agua faltante}_G = (\% \text{ Agua faltante}_G) * (\text{Peso grava})$$

La suma de las cantidades (en peso), del paso anterior, será la cantidad total a incrementarse en la mezcla de concreto.

- Humedad de absorción menor que la humedad actual.

Se obtiene el porcentaje de agua en exceso para la mezcla (según diseño), de acuerdo con las humedades de los agregados:

$$\% \text{ Agua exceso}_A = \% H. \text{ Actual} - H. \text{ Absorción}$$

$$\% \text{ Agua exceso}_G = \% H. \text{ Actual} - H. \text{ Absorción}$$

Determinación del peso de agua en exceso, correspondiente a los porcentajes obtenidos para cada uno de los agregados:

$$\% \text{ Agua exceso}_A = (\% \text{ Agua faltante}_A) * (\text{Peso arena})$$

$$\% \text{ Agua exceso}_G = (\% \text{ Agua faltante}_G) * (\text{Peso grava})$$

La suma de las cantidades (en peso), del paso anterior, será la cantidad total a reducirse en la mezcla de concreto.

14. Se modifican las cantidades (peso) de cada uno de los agregados, restándoles el peso de agua faltante correspondiente. Este paso se realiza para mantener un mismo valor del peso volumétrico de concreto.

- Corrección por revenimiento.

Suponiendo que el agua ya corregida en cualquiera de lo*de diseño, quedando escaso o excedido, se tendrá que hacer una corrección por revenimiento de la siguiente manera:

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

- I. Se aumenta o reduce en un 3% el contenido de agua, por cada 2.5 cm. (1") de diferencia, correspondiente.
- II. Una vez modificada la cantidad de agua; se modifica el contenido de cemento, de acuerdo a la relación A/C, con el fin de mantener a esta constante.
- III. Finalmente, se corrigen las cantidades de los agregados, de acuerdo a las proporciones de éstos para mantener el peso volumétrico del concreto.

2.3.2. MÉTODO ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE).

Para diseñar una mezcla de concreto es necesario conocer las características físicas de los materiales a emplear en la elaboración del concreto:

MATERIALES	CEMENTO	ARENA	GRAVA
Tipo de material:			
Densidad.			
P.V.S.S. (kg./ m ³)			
P.V.S.S. (kg./ m ³)	---		
T. M.	---	---	
M. F.	---		---
Absorción	---		

Tabla 12. Datos necesarios para el diseño de un concreto por el método ACI.

1. El primer paso es elegir un revenimiento, para el concreto que se desea diseñar, el ACI recomienda algunos de acuerdo al elemento estructural para el que se requiera el concreto tabla 13.

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 comparación no sean mediante vibrado.

Tabla 13. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.

- Una vez que se elige el revenimiento y con el tamaño máximo nominal del agregado se determinara el contenido de agua para un m³ de concreto con la tabla 14.

AGUA, KG. / M ³ DE CONCRETO								
Tamaños máximos nominales de agregado, en (mm).	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Revenimiento en centímetros	Concreto sin aire incluido							
De 2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Revenimiento en centímetros	Concreto con aire incluido							
De 2.5 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	--
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición.								
Exposición ligera	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00
Exposición moderada	6.00	5.50	5.00	4.50	4.50	4.00	3.50	3.00
Exposición severa	7.50	7.00	6.00	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00

Tabla 14. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

3. Se selecciona la relación agua/cemento. No solo por la resistencia requerida, también influyen otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado tabla 15.

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg./cm ²	Relación Agua/Cemento por peso	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Tabla 15. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

El método ACI también recomienda relaciones agua/cemento permisibles para estructuras con exposiciones severas tabla 16.

TIPO DE ESTRUCTURA	Estructura continua o frecuentemente	Estructura expuesta al agua o a sulfatos.
Secciones esbeltas (barandales, guarniciones, umbrales, ménsulas, trabajos ornamentales) y secciones con menos de 3 cm de recubrimiento sobre el acero de esfuerzo.	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Tabla 16. Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.

4. Una vez conocida la relación agua/cemento y la cantidad de agua necesaria para elaborar un m³ de concreto, se calcula el contenido de cemento:

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

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

5. .En la tabla 17 se muestra el volumen de agregado, en m^3 , con base en varillado en seco, para un m^3 de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un m^3 de concreto, multiplicándolo por el peso unitario de varillado en seco por m^3 de agregado grueso.

Tamaño máximo del Agregado (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de figura de la arena. +			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5(1 1/2 ")	0.75	0.73	0.71	0.69
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75(3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla 17. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

6. Para la estimación del agregado fino se suman todos los volúmenes necesarios y ya conocidos para elaborar $1 m^3$ y simplemente se determina por una diferencia. Como se muestra a continuación:

MATERIALES	PESO (Kg.)	DENSIDADES	VOLUMEN (M^3)
Cemento			
Agua			
Aire			
Arena			
Grava			
Total de volúmenes, excepto arena (Volumen total)=			-----

Tabla 18. Suma de volúmenes excepto arena, para determinar el agregado fino.

Contenido de arena = 1 - volumen total

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

2.4. DURABILIDAD DEL CONCRETO.

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.

Estos países han estado intentando incluís en sus códigos de diseño recomendaciones básicos [Torres y Martínez, 2001].

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].

La vida útil es un periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento como se muestra en la figura 6 [Torres y Martínez, 2001].

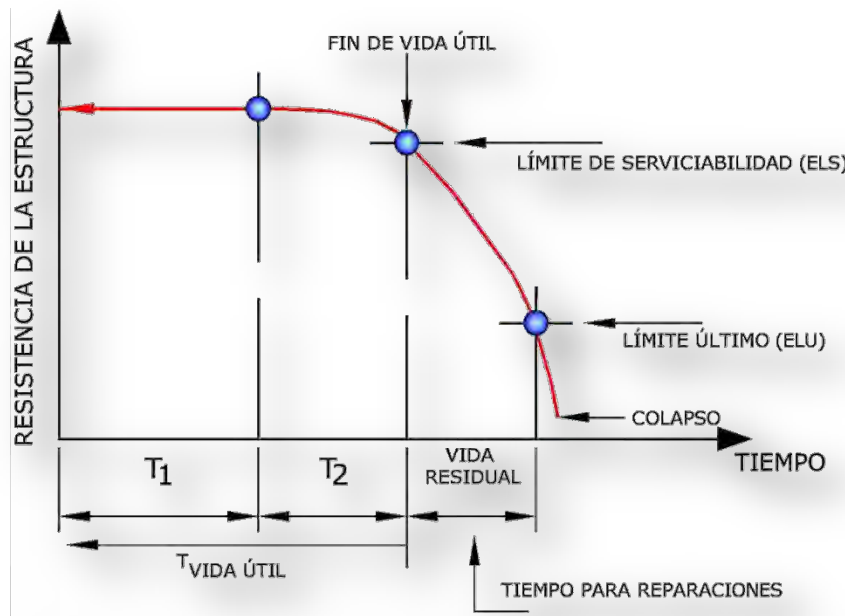


Figura 6. Modelo de durabilidad [Torres y Martínez, 2001].

La durabilidad representa una de las características clave del concreto y esto lo ha llevado a su uso generalizado. La durabilidad de un concreto hidráulico se determina por su capacidad de resistir a la acción de la intemperie, ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

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

Determinadas condiciones o ambientes existentes conducirán a un deterioro del concreto. Los mecanismos de ataque pueden ser químicos, físicos o de naturaleza mecánica y se originan por fuentes internas o externas. Los ataques físicos y químicos actúan de manera conjunta.

Dependiendo de la naturaleza del ataque el daño puede concentrarse en la pasta, los agregados o en el refuerzo del concreto (o una combinación de todos).

Los diversos factores que influyen en la durabilidad y en particular los mecanismos del deterioro deben ser considerados en el contexto de las condiciones

ambientales a las que está sometido el concreto. Además se debe considerar el microclima al que está expuesto el elemento estructural específico. El deterioro de una determinada estructura puede ser afectada por su orientación al viento, las precipitaciones o la temperatura. Por ejemplo, las vigas exteriores de una estructura pueden estar expuestas a un entorno muy diferente y más agresivo que las vigas interiores [ACI Committee 201, 2008].

Las propiedades físicas del concreto se discuten a menudo en términos de penetración, 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.

Los daños físicos a los concretos pueden ocurrir debido a la restricción en la expansión y contracción (por ejemplo en el secado el agrietamiento por contracción, ciclos de saturación y secado) o como resultado de la exposición a la abrasión, erosión o fuego durante su servicio. En general se considera que el recubrimiento o zona de cobertura juega un papel importante en la durabilidad ya que actúa como primera línea de defensa contra ataques físicos y químicos del medio ambiente [D.W.S. Ho, 2003].

Las estructuras de concreto, apropiadamente diseñadas y construidas, tienen una larga duración y requerirán poco mantenimiento. La durabilidad del concreto está influenciada por:

- Las condiciones de exposición.
- El tipo de cemento.
- La calidad del concreto.
- El recubrimiento en el acero de refuerzo.
- La abertura de cualquier grieta.

2.4.1. PROPIEDADES DE PERMEABILIDAD.

La permeabilidad se define como la facilidad con que los fluidos, líquidos y gases, pueden entrar y moverse a través del concreto. Tres fluidos relevantes en la durabilidad del concreto son: el agua, el dióxido de carbono y el oxígeno.

El concreto es un medio poroso con propiedades de permeabilidad controlada por la microestructura de la pasta endurecida de concreto y ésta a su vez está determinada por el material cementicio usado y el agua [D.W.S. Ho, 2003].

La porosidad del concreto se define como los espacios vacíos que quedan entra la masa del concreto y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño (ver figura 7) y características se dividen en:

- **Poros de gel:** son de menor tamaño ($<15 - 25 \text{ \AA}$) y corresponden a espacios intersticiales del gel del cemento. Estos poros solo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades $<20\%$.
- **Poros capilares:** se de forma variable y tamaño del orden de 2 nm a 1 μm . cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad.
- **Poros de aire:** son generados por las burbujas de aire atrapado en la masa del concreto, en el proceso de manipulación. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores a 0.05 mm. Aunque afectan la resistencia mecánica, en cuanto a durabilidad pueden, inducir según el caso efectos beneficiosos [Red DURAR, 2000].

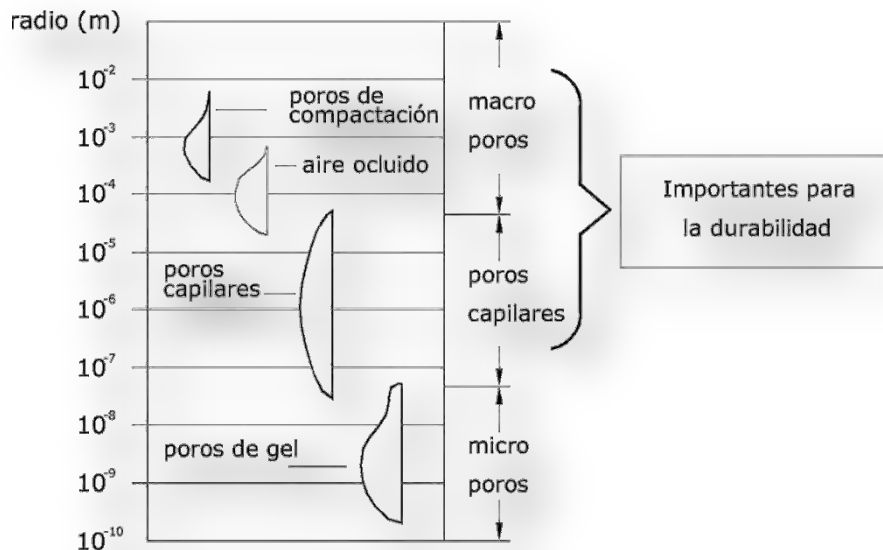


Figura 7. Descripción esquemática de los poros en el concreto.

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 permeabilidad se refiere al flujo de agua a través del concreto sometida a una diferencia de presión. 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 permeabilidad es una propiedad relevante para medir la durabilidad y mantenimiento en presas, cimentaciones y estructuras subterráneas, que se encuentran en contacto permanente con el agua.

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) que 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 sobre la superficie como edificios y puentes. Por durabilidad es importante considerar la difusión de iones de cloruro y sulfato.

Para lograr un concreto de calidad con baja permeabilidad, es necesario especificar una relación agua cemento baja, un adecuado curado inicial así como una compactación adecuada [D.W.S. Ho, 2003].

2.4.2. REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO.

La reacción álcali-agregado es una reacción entre los hidróxidos álcali presentes en la solución de poro del concreto y ciertos constituyentes de algunos agregados; bajo ciertas condiciones la reacción puede producir de expansiones y agrietamientos perjudiciales en el concreto. En el concreto se presentan dos tipos de reacciones álcali-agregado:

1. La reacción álcali-sílice que envuelve la reacción de cierto tipo de minerales compuestos por sílice en el agregado. El producto de la reacción es un gel álcali-sílice (de composición variable), que tiene una tendencia a absorber agua e hincharse. Las presiones de esta expansión pueden ser suficientes para inducir la expansión y agrietamiento del concreto. El dióxido de silicio SiO_2 es un componente de muchas rocas, pero no todas las formas de sílice reaccionan significativamente con la solución de poro del concreto. Por ejemplo el cuarzo es muy estable, en cambio los agregados que contienen opalina de sílice reaccionaran rápidamente con la solución de poro del concreto.
2. La reacción álcali-carbonato que consiste en la reacción de los minerales de carbonato. Esta reacción se produce entre hidróxidos álcali y ciertas calizas dolomíticas arcillosas. La reacción se manifiesta por la rápida expansión y agrietamiento extensivo del concreto. Las estructuras afectadas por esta reacción suelen mostrar grietas en los primeros cinco años o menos [Thomas y Folliard, 2007].

2.4.3. ATAQUE DE SULFATOS.

De manera natural podemos encontrar en suelos sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio, agua de mar o en aguas subterráneas. Los sulfatos también se utilizan ampliamente en la industria y 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.

Este fenómeno ha sido reportado en los productos curados por vapor y utilizando cementos con alto contenido de sulfato. La etringita no es estable a temperaturas superiores a los 65 °C [D.W.S. Ho, 2003].

2.4.4. ATAQUE ACIDO.

Todos los cementos contienen cal son susceptibles al ataque de ácidos. En soluciones acidas, donde en 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].

2.4.5. AGUA DE MAR.

Los cloruros pueden provenir de muchas fuentes. Primero es importante restringir el contenido de cloruros en los componentes del concreto al mínimo [Newman y Seng Choo, 2003].

Las sales de cloruros pueden estar presentes en el concreto ya sea porque se le agrego 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].

2.4.6. ACCIÓN DEL 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].

El concreto tiene una baja conductividad termal (50 veces menor que el acero) y por lo tanto se calienta muy lentamente en el fuego. Se trata de la baja conductividad térmica que proporciona buena resistencia al fuego en las estructuras de concreto [Colin, 2011].

2.4.7. CONGELADO Y DESCONGELADO DEL CONCRETO.

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 externos (el agua que entra al concreto por medio de una fuente externa, como la lluvia). El concreto seco (por lo general a bajo de un 75 a 80 % de humedad relativa interna) es normalmente inmune a los daños por congelación en la figura 18 se muestra el proceso de delaminación cuando la temperatura del aire baja [ACI Committee 201, 2008].

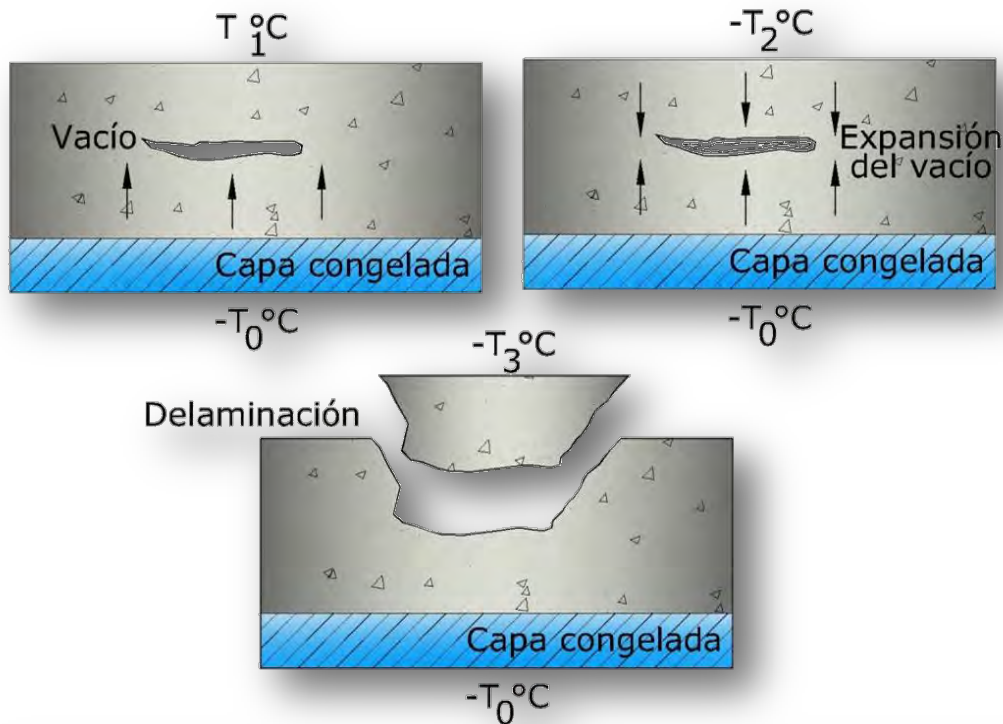


Figura 8. Proceso de delaminación por el efecto de la temperatura [Thomas y Folliard, 2007].

Así, el concreto que es curado y alcanza la madurez suficiente antes de ser expuesto a la congelación, puede tolerar la congelación. Concreto similar que no está bien curado y está expuesto a condiciones de congelación a una edad temprana, puede mostrar deterioro después de algunos años de exposición a ciclos repetidos de congelación y descongelación [D.W.S. Ho, 2003].

2.5. CORROSIÓN.

2.5.1. ANTECEDENTES.

En el medio marino se aceleran los procesos de corrosión en las estructuras de concreto armado, por la acción directa del mar o la actividad de la brisa marina.

La república mexicana se encuentra rodeada de grandes zonas costeras con el océano pacífico, el golfo de México, el mar de Cortes y el mar Caribe con una extensión total de 11,122 km.

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.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 9, 10, 11 y 12.

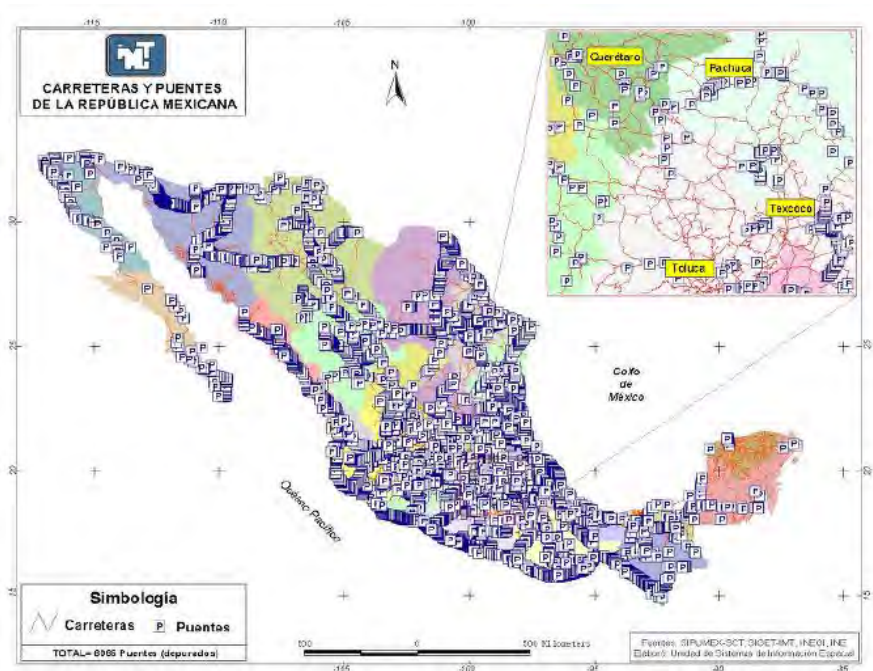


Figura 9. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].

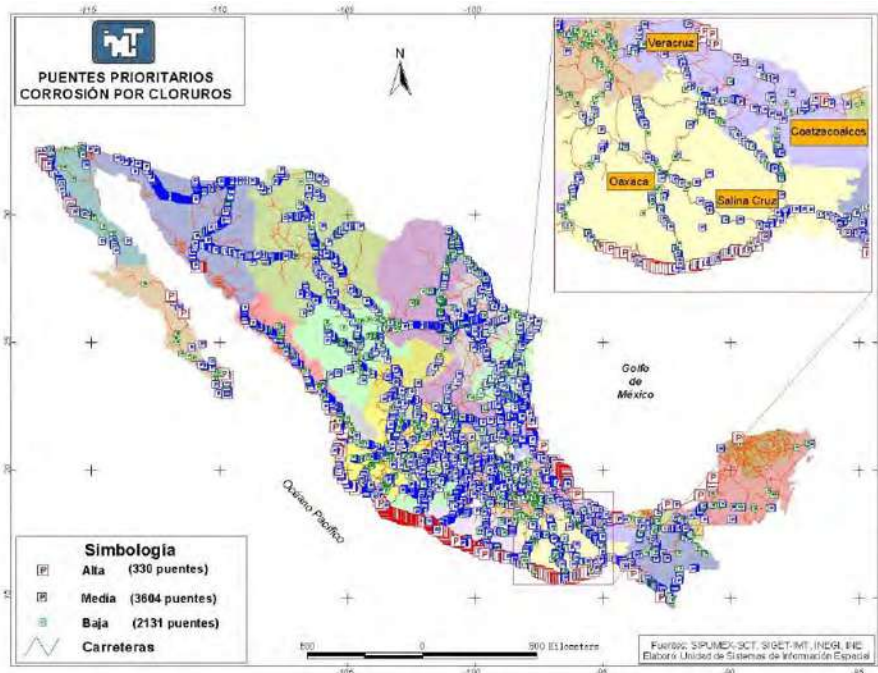


Figura 10. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por cloruros [Torres et al, 2010].

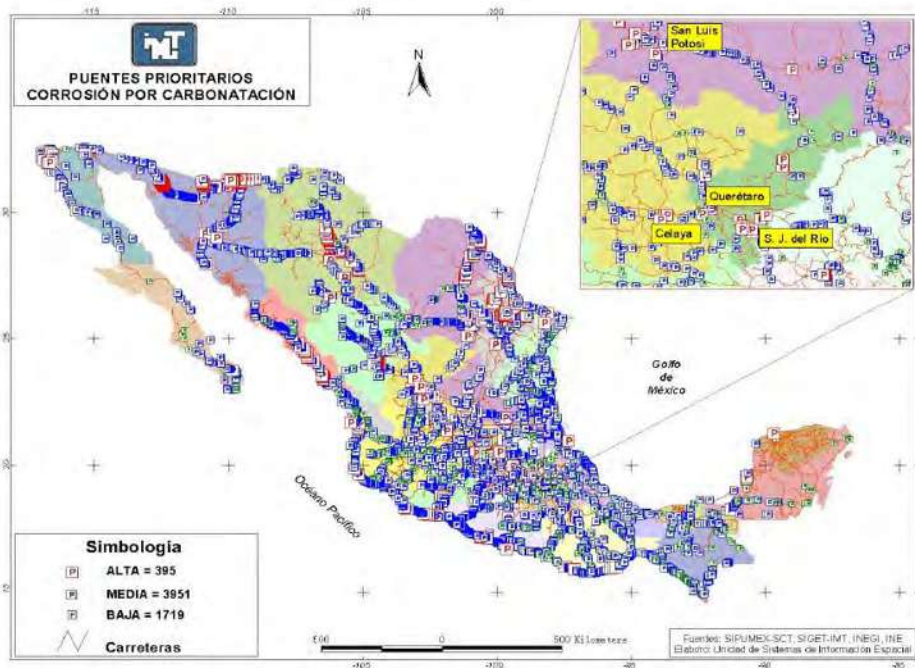


Figura 11. Levantamiento de puentes en la red federal de carreteras libres de peaje, que presentan corrosión por carbonatación [Torres et al, 2010].



Figura 12. Problemática que presentan algunos puentes debido al proceso de corrosión en el que están envueltos [www.imt.mx].

Como se puede observar de las figuras anteriores, existe una cantidad considerable de puentes en la red federal de carreteras que presentan problemas por corrosión. En la tabla 19 se presenta un reporte de daños en dichos puentes.

PUENTES PRIORITARIOS POR CORROSIÓN		
Prioridad	Por penetración de cloruros	Por carbonatación
Alta	330	395
Media	3604	3951
Baja	2131	1719

Tabla 19. Reporte de daños en puentes de la Red Federal de Carreteras

La corrosión es un problema general en las estructuras de concreto reforzado. Lo que se muestra en la figura 13 son los casos de corrosión en el muelle de progreso Yucatán [Torres et al, 2006] y el puerto de manzanillo [Martínez Molina, 2010].



Figura 13. Muelle Progreso, Yucatán [Torres et al, 2006]. Puerto de Manzanillo [Martínez Molina, 2010].

La corrosión del refuerzo metálico embebido es reconocida como uno de los mayores problemas en estructuras de concreto convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros de mantenimiento en estructuras de concreto, tales como carreteras y puentes [Del Valle et al, 2001].

2.5.2. DEFINICIÓN.

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que la rodea, así la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica o celda de corrosión la cual está formada por cuatro elementos principales figura 14.

1. **Ánodo.** Es el lugar en donde ocurre la oxidación, y que para el caso sería la varilla de refuerzo en su zona menos activa.
2. **Cátodo.** Es el lugar donde se lleva a cabo la reducción, de igual manera sería la varilla de refuerzo pero su zona más activa.

3. **Conductor eléctrico.** Para nuestro caso sería la 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.

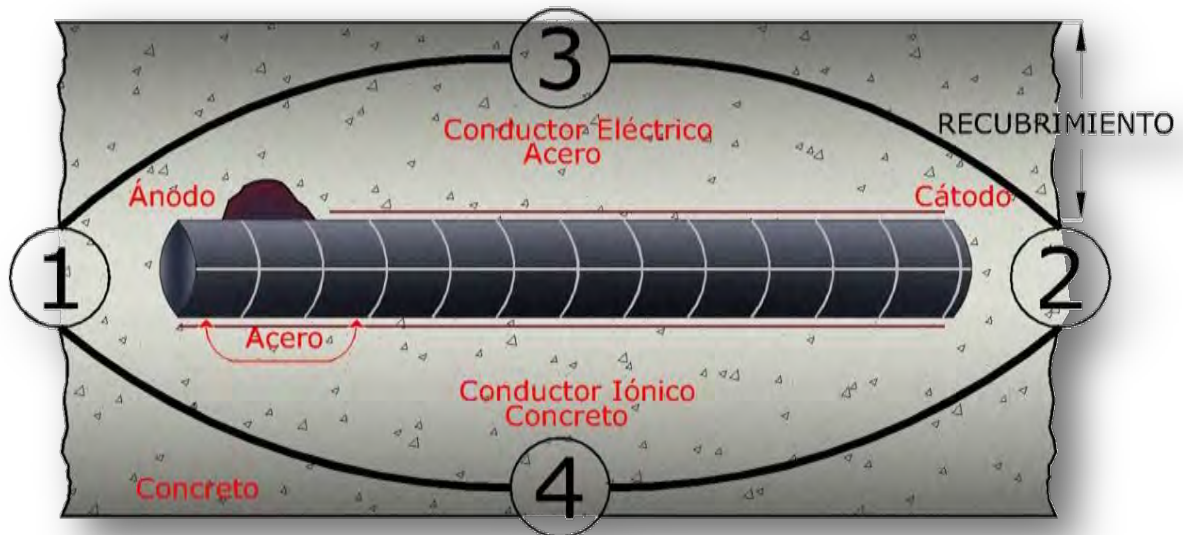


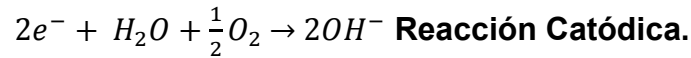
Figura 14. Representación esquemático de los elementos que componen una celda de corrosión en las armaduras de concreto reforzado [Red DURAR, 2000].

Cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse. La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro.

Las reacciones químicas son las mismas si se produce una corrosión por ataque de cloruros o por carbonatación. Cuando el acero en el concreto se corroe, este se disuelve en el agua de los poros cediendo electrones:



Los dos electrones ($2e^-$) creados en la reacción anódica son consumidos en otras partes de la superficie del acero para mantener un equilibrio eléctrico. En otras palabras se necesita otras reacciones que los consuma junto con agua y oxígeno.



Los átomos metálicos se convierten en iones de hierro (Fe^{2+}), y estos quedan disueltos en una solución acuosa alrededor del acero. Los electrones liberados son depositados en la superficie del acero y aumentan su potencial eléctrico. Estos fluyen a través del acero a los sitios de bajo potencial o hacia las áreas catódicas y aquí es donde la reacción se lleva a cabo, los electrones se combinan con las moléculas de oxígeno disuelto y el agua en forma de iones de hidroxilo (OH^-). Para que el proceso de corrosión pueda seguir, el número de electrones aceptados en el sitio catódico necesita ser igual al número de electrones donados del sitio anódico. Así, para cada molécula de oxígeno disuelta que reacciona en el sitio catódico, dos átomos de hierro deben ser ionizados y disueltos en el sitio anódico. Figura 15.

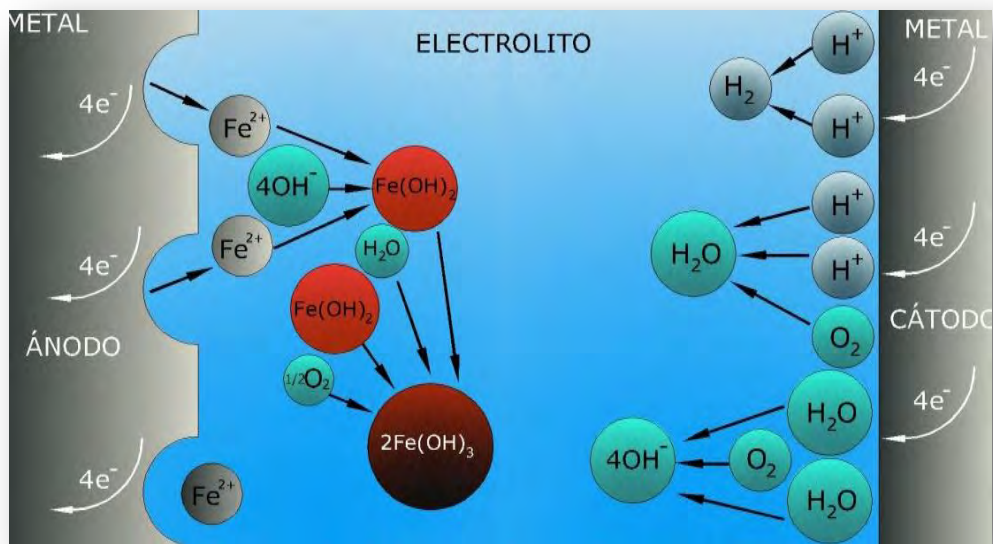
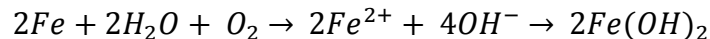
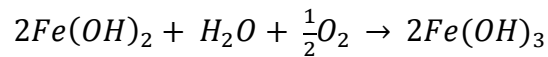


Figura 15. Reacciones anódica y catódica de manera esquemática [Castro et al, 2008].

Cuando el movimiento de los iones de hierro (Fe^{2+}) y los iones de hidroxilo fluyen uno hacia el otro, se encuentran y reaccionan para formar hidróxido ferroso, $Fe(OH)_2$.



Este compuesto reaccionará más adelante con iones de hidróxidos adicionales, y algunas veces con el oxígeno, para formar un producto insoluble que nosotros conocemos como herrumbre o productos derivados de la corrosión.



Hay dos tipos primarios de herrumbre, la herrumbre roja que es Fe_2O_3 , y la herrumbre negra Fe_2O_4 . La herrumbre es sólo una sustancia química producto del proceso de corrosión, y está a menudo se acumula en sitios distintos donde se lleva a cabo la corrosión del metal. El proceso de corrosión, es realmente, el proceso de convertir átomos metálicos a iones ferrosos disueltos en la solución acuosa circundante [Bentur et al, 1997].

Para que se lleven a cabo las reacciones anódica y catódica es necesario el movimiento de electrones por un hilo conductor en este caso la varilla. Este desplazamiento es debido a la diferencia de potencial que existe entre ambos metales.

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, oxido de sodio y potasio. Esta forma de hidróxidos son muy alcalinos 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.

Un pedazo de metal puede permanecer estable por un periodo indefinido, si a este se le mantiene en el vacío, es decir, en donde el metal no entre en contacto con ningún medio o sustancia, incluyendo el aire [Ávila y Genescá, 2002].

2.5.3. TIPOS DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO.

En el concreto armado las formas que puede adoptar la corrosión del acero de refuerzo son diversas. Se han clasificado los diferentes tipos o formas de corrosión de acuerdo con la apariencia física del ataque. Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden se muestran en la figura 16 [Lee et al, 2006].

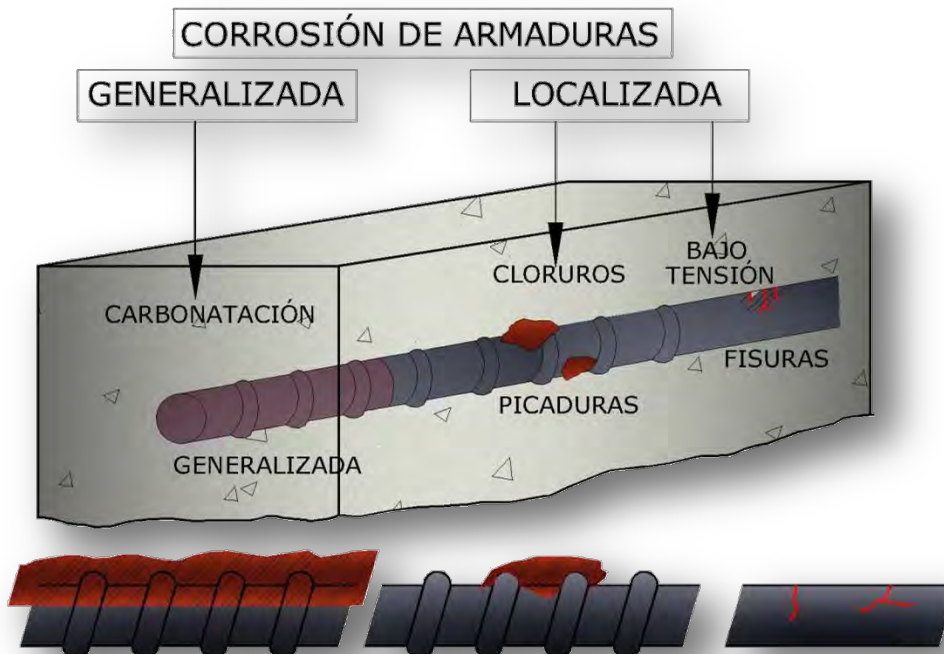


Figura 16. Descripción esquemática de los tipos de corrosión en el concreto reforzado [Lee et al, 2006].

2.5.3.1. Corrosión generalizada.

Este tipo de corrosión se presenta como consecuencia del proceso de carbonatación que sufre el concreto reforzado que está expuesto a CO_2 .

La principal consecuencia de la carbonatación es la caída abrupta de pH de la disolución de poro y por tanto aparece un “frente de carbonatación” figura 17.

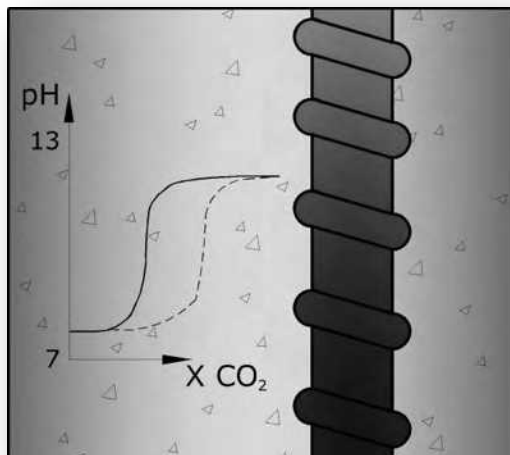


Figura 17. Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación [Red DURAR, 200].

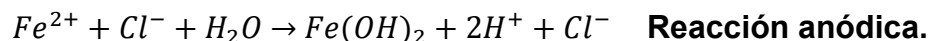
Cuando este frente de carbonatación llega al refuerzo, la capa pasiva se vuelve inestable rompiendo la protección que le confería al acero e iniciándose el proceso de corrosión. En éste caso, es generalizado y homogéneo tal y como si el refuerzo estuviera simplemente expuesto a la atmosfera sin ninguna protección [Castro et al, 1998].

También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del concreto producida por la precolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas que provocan la precipitación de calcio [Lee et al, 2006].

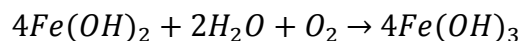
2.5.3.2. Corrosión por picaduras.

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 del concreto figura 18 [Red DURAR, 2000].

Las reacciones que se presentan son las siguientes:



Y esta sigue reaccionando para formar óxido férrico o herrumbre.



De esta manera, 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 que ocurre la disolución del acero [Red DURAR, 2000].

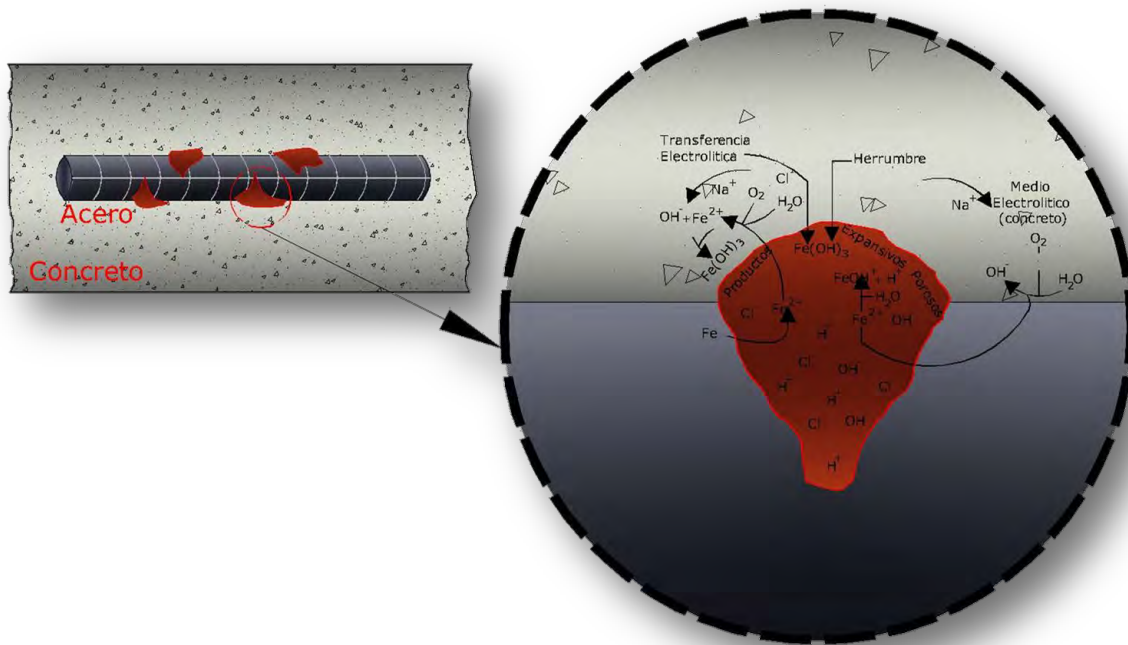


Figura 18. Mecanismo de corrosión por picadura en la armadura [Red DURAR, 2000].

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 [Lee et al, 2006].

2.5.4. FACTORES QUE DESENCADENAN LA CORROSIÓN.

Existen diversos factores que desencadenan la corrosión en estructuras de concreto reforzado, como son:

2.5.4.1. Dosificación, compacidad y homogeneidad del concreto.

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

El concreto que envuelve las barras de acero de una armadura debe cumplir una doble función protectora:

- a) Como una barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos.
- b) Creando una capa pasivante sobre el acero (debido a su alcalinidad).

La compacidad del concreto es una propiedad importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Esta es inversamente proporcional a la porosidad.

La compacidad está expresada por la cantidad de materia sólida contenida en una unidad cubica. Para el caso del concreto una buena compacidad está ligada con una relación agua-cemento por debajo del 0.4, en peso.

La homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la estructura fabricada con el mismo concreto, resulten prácticamente iguales [Red DURAR, 2000].

2.5.4.2. Espesor de recubrimiento del concreto.

La protección que confiere el concreto que recubre las barras de acero de una estructura de concreto armado o pretensado dependerá del grado de impermeabilidad de éste, que a su vez estará dada por su compacidad y homogeneidad en la zona.

El espesor del recubrimiento del concreto es otro factor importante en la corrosión, ya que su espesor sirve para garantizar la protección de la estructura (ver figura 19) dependiendo de la agresividad ambiental [Red DURAR; 200].

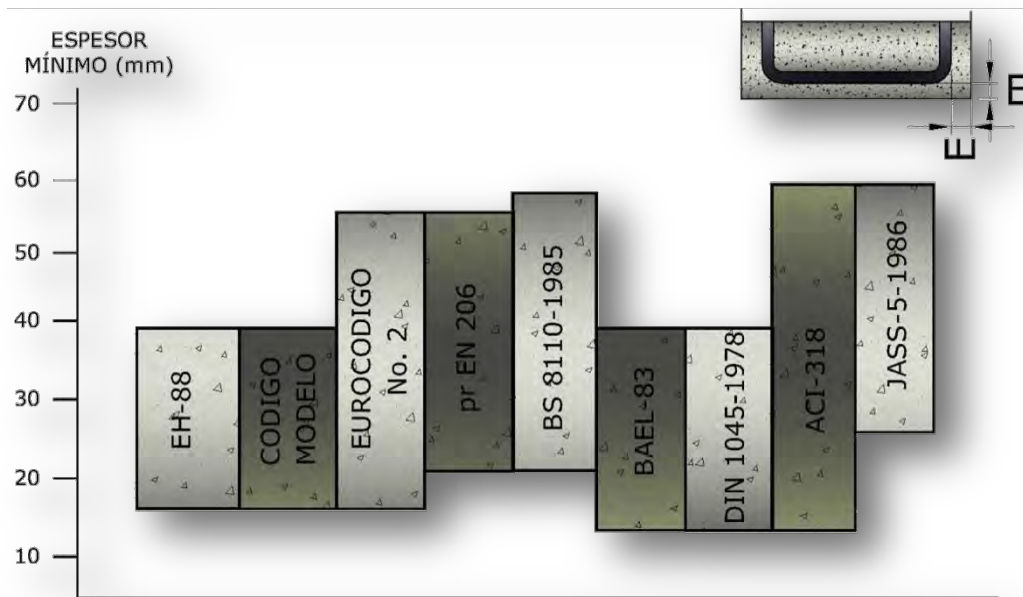
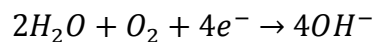


Figura 19. Valores de espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales [Red DURAR, 2000].

2.5.4.3. Humedad ambiental.

La humedad del concreto juega un papel importante en la corrosión de las armaduras ya que favorece la penetración y disolución de los agentes agresivos y proporciona el vehículo para que la corrosión avance.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno:



El agua se hace necesaria también para la movilidad de los iones a través del electrolito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca en ausencia de la capa pasivante, solo la presencia de cierta cantidad de agua en los poros del concreto permitirá que se desarrolle el fenómeno de la corrosión [Red DURAR, 2000].

La humedad relativa más agresiva o con la que la corrosión se llevará a cabo de manera rápida oscila entre un 70-80% (ver figura 20).

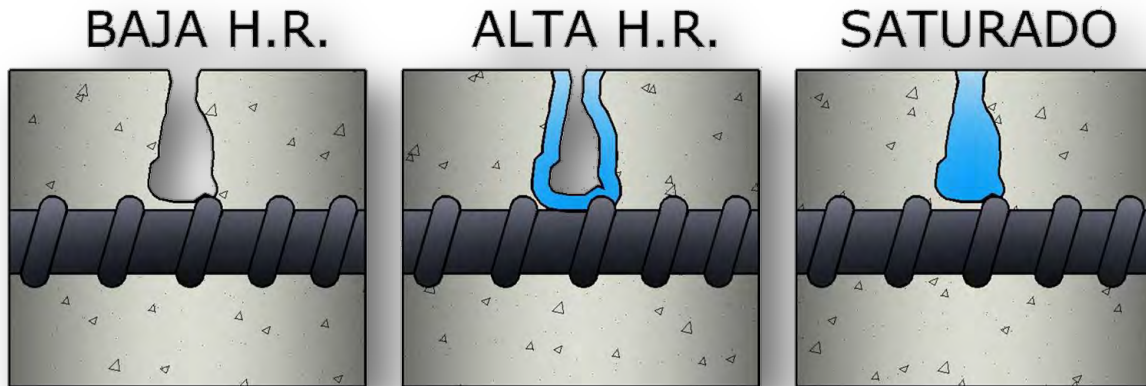


Figura 20. Efecto del contenido de humedad en los poros del concreto, en la corrosión de la armadura [Red DURAR, 2000].

2.5.4.4. La penetración de iones despasivantes, como son:

▪ Cloruros

La situación más agresiva y común que puede desencadenar la corrosión localizada en el acero de refuerzo del concreto es la presencia de cloruros.

Los cloruros pueden provenir de varias fuentes. Pueden ser lanzados en el concreto o que se puede difundir desde el exterior. Los cloruros que se encuentran difundidos en el concreto pueden deberse a:

- La adición deliberada de un conjunto de acelerantes con cloruros (cloruro de calcio CaCl_2) que fueron ampliamente usados hasta mediados de los 70's.
- La presencia de cloruros en el agua de la mezcla.
- Agregados contaminados.

Los cloruros pueden difundirse en el concreto debido a:

- El rocío salino del mar y la humedad del agua de mar directa.
- Sales usadas en el deshielo.
- Uso de productos químicos (estructuras que se utilizan para el almacenamiento de sal, tanques de salmuera, acuarios, etc.).

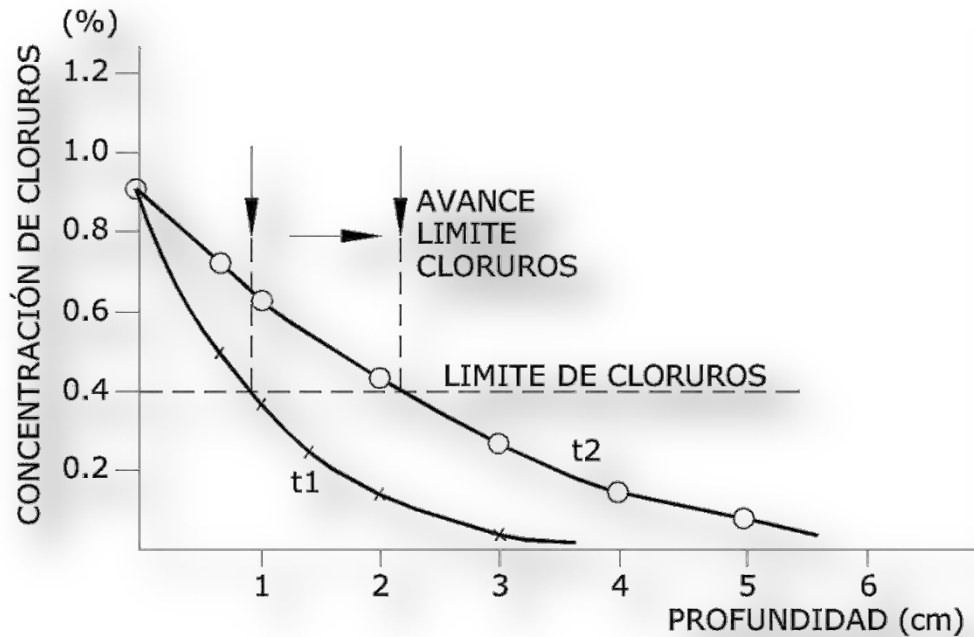


Figura 21. Perfil de concentración de cloruros en el concreto [Red DURAR, 2000].

PAÍS	NORMA	LIMITE MAX. DE Cl ⁻	REFERIDO A
USA	ACI 318	≤ A 0.15% EN AMBIENTE DE Cl	CEMENTO
USA	ACI 318	≤ A 0.30% 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 0.6%	CEMENTO
ESPAÑA	EH 91	≤ AL 0.40%	CEMENTO
EUROPA	EUROCODIGO 2	≤ AL 0.22%	CEMENTO
JAPON	JSCE-SP 2	≤ AL 0.6 Kg/m ³	CONCRETO
BRASIL	NBR 6118	≤ AL 0.05%	AGUA

Tabla 20. Valor crítico de cloruros en concretos reforzados.

▪ **Sulfatos.**

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].

2.5.4.5. El proceso de carbonatación en el concreto.

Este se da por la penetración del bióxido de carbono presente en el medio reaccionando así con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio figura 22.

Solo cuando los poros

La velocidad de avance del frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará en llegar al acero. La velocidad de avance está en función fundamentalmente de [Red DURAR, 200]:

- El contenido de humedad del concreto. Solo cuando los poros están parcialmente llenos de agua (50 % - 80 %) es cuando se dan las condiciones óptimas para la carbonatación.
- Su porosidad (relación agua/cemento).
- Su contenido en materia alcalina carbonatable.

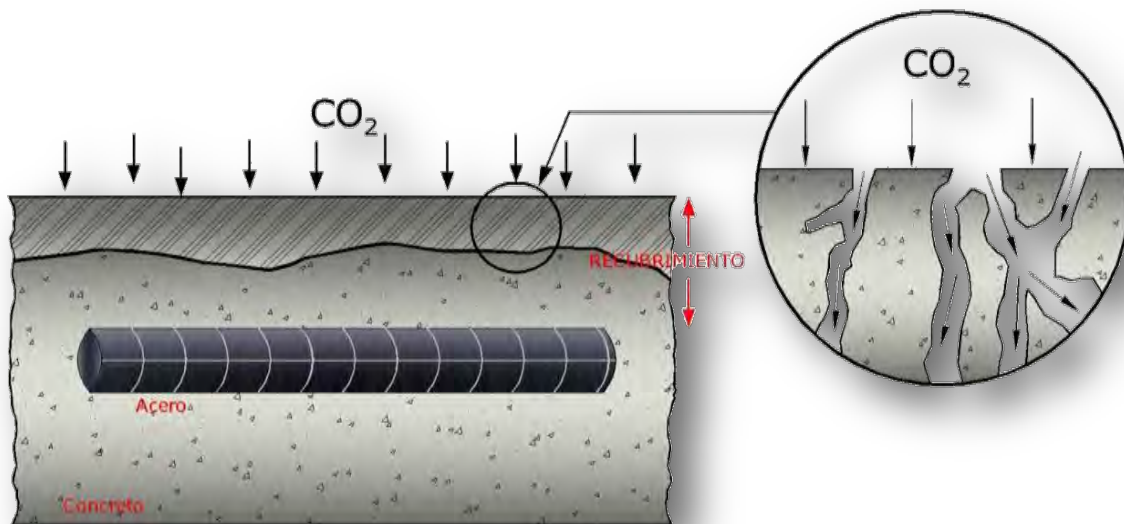
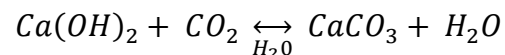


Figura 22. Carbonatación en el concreto [Castro et al, 2008].

2.5.4.6. Existencia de fisuras y coqueas en el concreto.

Las grietas en el concreto constituyen un camino para que los agentes externos lleguen rápidamente hasta el acero de refuerzo (ver figura 23). A través de las

grietas, tanto la carbonatación como los cloruros tienden a penetrar más de prisa hacia el acero: una vez que éstos alcanzan el refuerzo se forman macropilas de corrosión de manera que el acero queda expuesto en la fisura actúe anódicamente mientras que el proceso catódico ocurre en áreas sin fisuras [Castro et al, 2008].

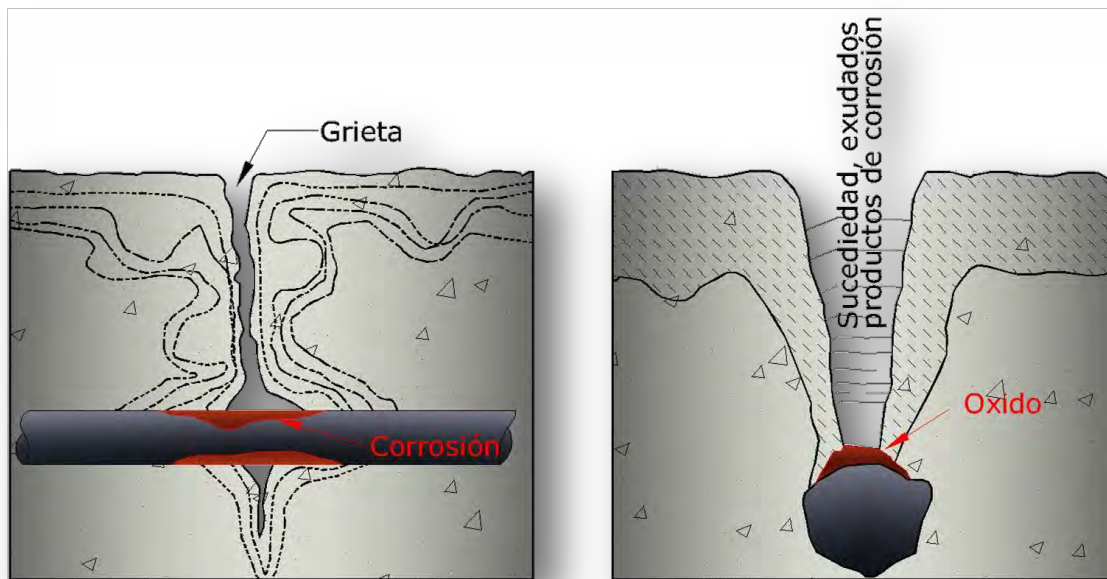


Figura 23. Corrosión provocada por la existencia de fisuras en el recubrimiento.

La tendencia actual relacionada con la abertura máxima de fisuras para estructuras de concreto armado es pues, acortarla por el valor de 0,4 mm al considerarse que por debajo de este valor, el riesgo de ataque no se incrementa. Igualmente se limita indirectamente la abertura por recomendaciones constructivas: recubrimientos del acero de refuerzo, diámetros y espaciamentos entre barras, y calidad del concreto (*a/c*, adiciones).

En cuanto a las fisuras longitudinales debidas a asentamientos tradicionales del concreto o a retracción plástica, se puede considerar que se comportarán en cuanto a la durabilidad, de forma más agresiva que las transversales, dado que el área del acero de refuerzo expuesta al ataque es mayor en las fisuras longitudinales [Red DURAR, 2000].

Las discontinuidades producidas por la formación de coqueas interiores hacen que haya zonas de la armadura sometida a la elevada humedad del interior del concreto, pero sin estar en contacto con alcalinidad alguna (ver figura 24). Estas

zonas se corroerán de la misma forma que si estuvieran sometidas a una atmosfera de elevada humedad [Red DURAR, 2000].



Figura 24. Corrosión severa de la armadura en una losa de un puente

Cuatro son las consecuencias de la corrosión de la armadura, tal y como se muestra en la figura 25 [Lee et al, 2006].

- Perdida de la sección del acero.
- Fisuración del recubrimiento y su posible desprendimiento.
- Perdida de adherencia acero/concreto.
- Posible pérdida de ductilidad del acero.
- Pérdida de las propiedades necesarias y originales del concreto.



Figura 25. Consecuencias de la corrosión en el acero de refuerzo [Lee et al, 2006].

2.5.5. MÉTODOS PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN.

Los sistemas y métodos para la reparación, prevención y protección contra la corrosión son muy variados y constantemente aparecen nuevos productos que tratan de evitar y controlar este fenómeno. Existen diversas maneras de luchar contra la corrosión como se muestra en la figura 26:



Figura 26. Técnicas de control de corrosión [Red DURAR, 2000].

Básicamente los métodos tratan de eliminar alguno de los elementos que componen la celda de corrosión.

2.5.5.1. Aislamiento eléctrico del material.

Mediante empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos diversos figura 27.



Figura 27. Aplicación de recubrimientos epóxicos en barras de acero de refuerzo

2.5.5.2. Polarización del mecanismo electroquímico.

Esto se puede lograr eliminando el oxígeno disuelto mediante la adición en el medio agresivo de ciertas sustancias llamadas inhibidores, las cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión y por lo tanto, llegar a detener o cuando menos disminuir sus efectos (ver figura 28). En la práctica, lo anterior conlleva una modificación del entorno o medio ambiente, al cual está expuesto el metal.



Figura 28. Extracción de los iones de cloruro que han penetrado el concreto.

2.5.5.3. Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición.

2.5.5.4. Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión.

Por ejemplo, al unir acero con un metal más activo (zinc o magnesio) se puede llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (zinc o magnesio). Este es el principio de la protección catódica [Del Valle et al, 2006].

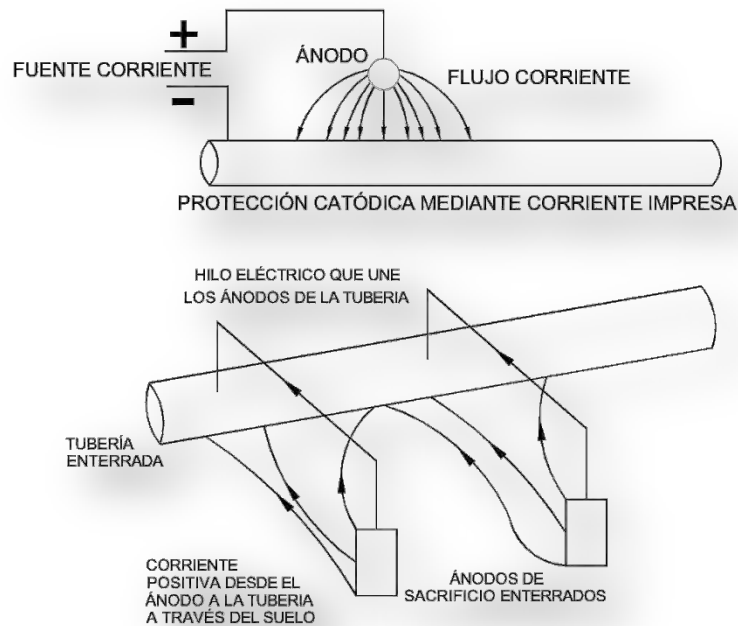


Figura 29. Protección catódica en elementos de acero, por corriente impresa y por ánodos de sacrificio [Ávila y Genescá, 2002].

En la figura 30 se muestra la implementación de ánodos de sacrificio en un paso superior vehicular.



Figura 30. Implementación de ánodos galvánicos o de sacrificio en una estructura de concreto, en este caso un pasó superior vehicular.

2.6. GEOPOLÍMEROS.

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el mundo y es comúnmente asociado con el cemento portland, el principal componente para hacer concretos. La demanda del concreto como material de construcción se ha incrementado. Se estima que la producción del cemento incremento de 1.5 billones de toneladas a 2.2 billones de toneladas en el 2010.

Por otro lado, el cambio climático debido al calentamiento global (uno de los más principales problemas ambientales) se ha convertido en un problema importante en las últimas décadas.

El calentamiento global es causado por gases de efecto invernadero, como el CO_2 a la atmósfera por actividades humanas. Entre los gases de efecto invernadero se estima que el CO_2 contribuye aproximadamente con el 65% del calentamiento global. La industria del cemento es responsable de alrededor del 6% de las emisiones de CO_2 , debido a que la producción de una tonelada de cemento portland emite aproximadamente una tonelada de CO_2 en la atmósfera.

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.

En este sentido, la tecnología propuesta por Davidovits, los geopolímeros, muestra una promesa considerable para su aplicación en la industria del concreto como una alternativa de aglutinante para el cemento Portland. En cuanto a la reducción del calentamiento global, ésta tecnología podría reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera causadas por la producción del cemento Portland y agregados en un 80% [Wallah y Rangan, 2006].

Los geopolímeros están captando cada vez más la atención debido al gran potencial que presentan ya que son amigables con el medio ambiente, tienen un alto rendimiento y pueden reemplazar al cemento Portland en una amplia gama de aplicaciones.

Sin embargo para que estos materiales puedan lograr todo su potencial tecnológico y comercial en cualquiera de sus aplicaciones, se necesita de una comprensión más profunda de los factores físico-químicos para controlar su estructura y formación [Lloyd Provis, 2006].

2.6.1. ANTECEDENTES.

En 1930, los álcalis como son los hidróxidos de sodio y potasio, fueron usados para determinar si el hierro de alto horno o escoria podía trabajar cuando eran adheridos al cemento portland. Durante dicho estudio se descubrió que la adición de álcalis produjo un nuevo aglutinante de rápido endurecimiento. Primeramente lo llamaron como un “cemento de escoria alcalino activado”.

En 1957, Victor Gluckhovsky científico que trabajó en Ucrania para el instituto de Kiev en el área de ingeniería civil de la USSRS. Investigo dichos aglutinantes y en 1970 hizo su mayor contribución identificando que las rocas y arcillas minerales reaccionaban durante un tratamiento alcalino para formar sodio alumino-silicato hidratado (zeolitas). Llamando así al cemento “suelo cemento” y al concreto “concreto de suelo silicato”.

De 1970 a 1980, se elaboran las primeras aplicaciones construyendo aglomerado de madera con recubrimientos resistentes al fuego. Además en esta misma década se obtienen resultados interesantes al elaborar fusibles eléctricos con

geopolímeros. Un equipo de “cerámicos o ceramistas” conformado por Jean Paul Latapie y Michael Davidovics confirmaron la resistencia al agua de azulejos cerámicos que podían ser fabricados a temperaturas por debajo de los 450°C. Con un componente de las arcillas, la caolinita reaccionando con sosa caustica a 150°C. Provocando así que la reacción entre la caolinita y un álcali comenzará a usarse en la industria de la cerámica [Davidovits, 2008].

Joseph Davidovits investigando sobre tecnologías en polímeros inorgánicos, observó que por un lado bajo condiciones similares con las que se controlaba la síntesis de los plásticos orgánicos y por otro lado los minerales como el feldespato y zeolitas requerían de valores elevados de pH para ser sintetizados, es decir, un álcali concentrado, presión atmosférica y temperaturas por debajo de los 150°C [Davidovits, 1994].

De 1981 a 1990, En la década de los 80's Joseph Davidovits utiliza el término de geopolímero para designar la reacción de un aluminosilicato con una solución alcalina altamente concentrada. Se elabora el primer cemento geopolimérico de gran resistencia [Davidovits, 2002].

2.6.2. DEFINICIÓN.

El término polímero se usa frecuentemente para hacer referencia a una extensa molécula orgánica con unidades o secuencias repetidas. Como ejemplo clásico en los polímeros orgánicos tenemos la baquelita figura 31. La baquelita fue la primera sustancia plástica totalmente sintética, creada en 1907 y nombrada así en honor a su creador, el belga Leo Baekeland. Fue también uno de los primeros polímeros sintéticos termoestables conocidos. Este producto puede moldearse a medida que se forma y endurece al solidificarse. No conduce la electricidad, es resistente al agua y los solventes.

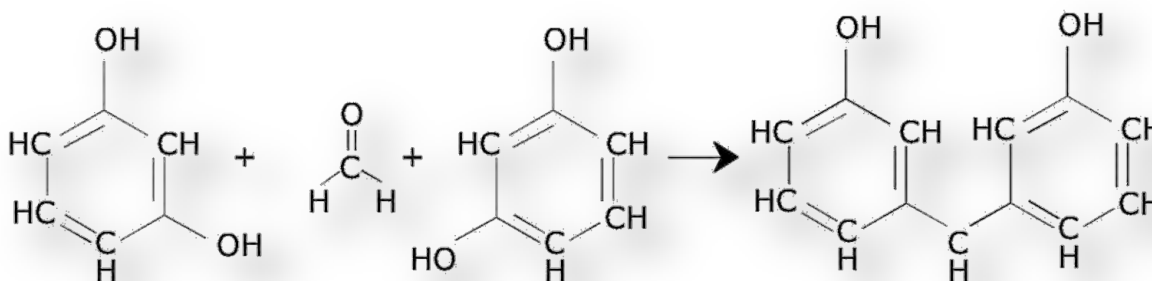


Figura 31. Estructura de la baquelita.

Al igual que los polímeros orgánicos, los geopolímeros son largas cadenas poliméricas inorgánicas que están constituidas principalmente por minerales por lo que sería conveniente llamarlos también polímeros 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].

Una de las características principales es que sus precursores provienen de arcillas y rocas e incluso desechos industriales.

Los concretos geopoliméricos no necesitan del cemento portland como aglomerante. Estos en cambio utilizan materiales de desecho, como son las cenizas volantes activadas con líquidos alcalinos a temperaturas que pueden ser inferiores a los 50 grados centígrados. Por lo tanto este concreto puede producirse sin la necesidad de grandes cantidades de combustible optimizando el uso de la energía y evitando la mayor parte de los contaminantes ambientales asociados con la producción tradicional del cemento portland.

La superioridad que presentan los geopolímeros respecto a plásticos, cerámicas y otros compuestos orgánicos refuerza la aparente necesidad de esta tecnología. Algunas cualidades son [Muntingh, 2006].

- La facilidad de producción y manejo, a bajas temperaturas.
- Una tolerancia al calor superior a la de los compuestos orgánicos (hasta 1300°C).
- Ajuste rápido (sobre todo en aplicaciones de prefabricados).

Los geopolímeros se forman a través de la mezcla de un silicato-aluminato sólido como materia prima con una solución álcali o álcali silicato. Como entrada principal usualmente activada por arcillas calcinadas como la caolinita. Es común incluir como materia secundaria material de depósitos volcánicos, cenizas volantes, desechos de mampostera, ladrillo, chatarra, residuos de la industria del vidrio,

materiales cerámicos de residuos (por ejemplo, azulejos de porcelana) y otras fuentes con aluminosilicatos con $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 80\%$ en peso [Obonyo et al, 2011].

Los geopolímeros pueden ser definidos en un número de formas, relacionadas a sus principales constituyentes (aluminio y sílice), su estructura tetraédrica (unidades tetraédricas de Al-O y Si-O, figura 32) en estructuras tridimensionales no muy bien definidas balanceadas con respecto a su carga por iones alcalis.

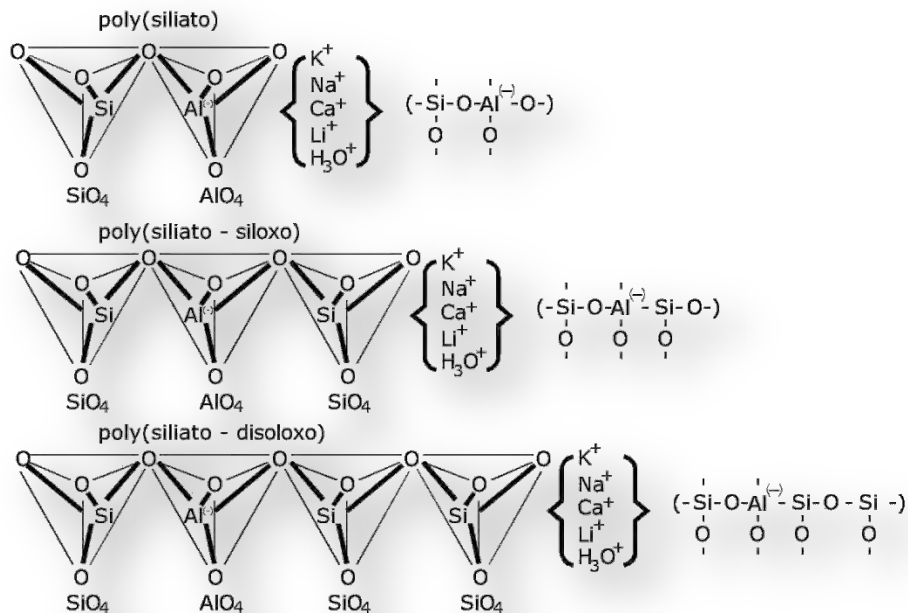


Figura 32. Representación esquemática de las tres formas básicas de los geopolímeros [Davidovits, 2008].

Muchas características macroscópicas de los geopolímeros preparados de diferentes fuentes de aluminosilicato pueden parecer similares, su microestructura, sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas varían en gran medida dependiendo predominantemente de la materia prima de la cual están derivados.

Otras propiedades importantes son: menor permeabilidad que el cemento portland y la resistencia que presentan al ataque de ácidos es mayor que la del cemento portland.

También dependiendo de las condiciones de síntesis, la resistencia a la compresión se alcanza en un tiempo muy corto. En la mayoría de los casos el 70% de la resistencia final a la compresión se desarrolla en las primeras cuatro horas de su elaboración [Van Jaarseveld et al 1997].

La fuerza de compresión en los geopolímeros depende de la naturaleza de los materiales de origen. Un geopolímero hecho de materiales calcinados, como metacaolín (caolín calcinado), la ceniza volcánica, la escoria etc., tienen una fuerza de compresión más alta comparada a aquellos que son sintetizados de materiales no calcinados, como la arcilla de caolín. El precursor usado para la geopolimerización puede ser un solo material o una combinación de varios tipos de materiales [Xu et al, 2002].

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].

2.6.2.1. Geopolimerización.

La geopolimerización es una reacción exotérmica y se ha asumido que la síntesis se realiza a través de oligómeros (figura 33) que proporcionan la unidad de redes en una estructura macromolecular [Davidovits, 1994].

La geopolimerización es una reacción química de minerales cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alumina (silicoaluminatos), 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, para formar monómeros inorgánicos en la solución y luego ser polícondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales [Rodríguez et al, 2008].

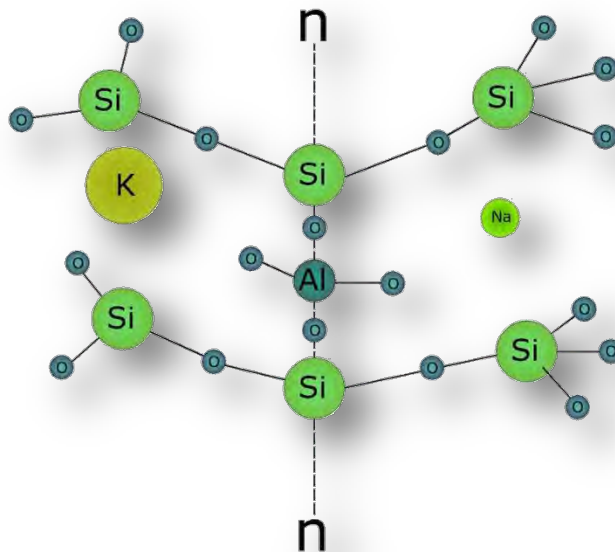


Figura 33. Representación esquemática de los monómeros en los geopolímeros [Muntingh, 2006].

La geopolimerización es un mecanismo que no está bien entendido. El mecanismo que comprende la mayoría de las propuestas comprende las siguientes etapas, que siempre se llevan a cabo en forma paralela y por lo tanto son imposibles de distinguir (ver figura 34).

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 17 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 disueltos 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 numerosos para el 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].

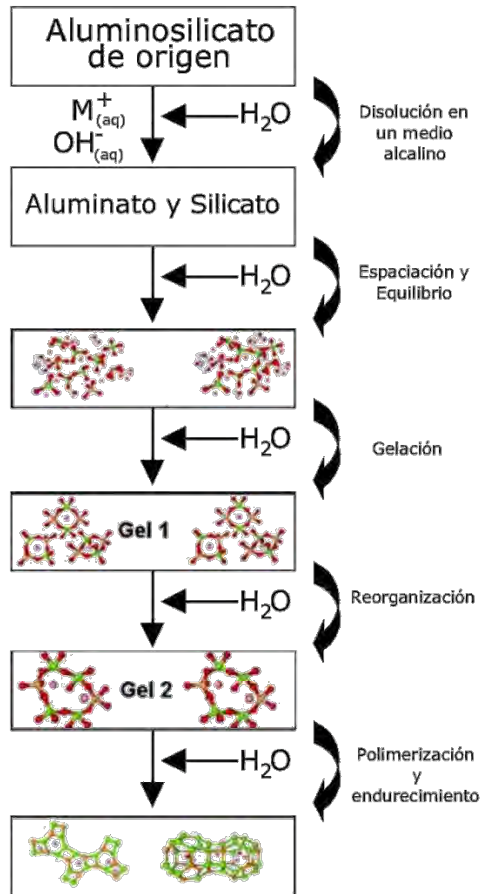


Figura 34. Modelo conceptual para la geopolimerización [Duxson et al, 2006].

2.6.3. COMPONENTES DE LOS GEOPOLÍMEROS.

2.6.3.1. Materiales fuente.

Los materiales base utilizados en la síntesis de geopolímeros ya han sido ampliamente investigados en el pasado.

Existen dos componentes principales de los geopolímeros, es decir, los materiales base y los líquidos alcalinos. Los materiales base para los geopolímeros están basados en aluminosilicatos que deben ser ricos en Sílice (Si) y aluminio (Al). Estos pueden ser minerales naturales como la caolinita, arcillas, micas, etc. Cuya fórmula empírica contenga Si, Al y O.

Por otra parte, subproductos de materiales como cenizas volantes, humo de sílice, escorias, cenizas de cascara de arroz, barro rojo, etc. También podrían ser utilizados como materiales base. La elección de los materiales base dependerá de

factores como disponibilidad, costo, tipo de aplicación y demanda específica de los usuarios finales [Wallah y Rangan, 2006].

La caolinita y otras arcillas fueron inicialmente usadas en 1975 y 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) figura 35 como fuente de óxidos de aluminio-silicatos para sintetizar los geopolímeros.

Muchas otras investigaciones se han enfocado en la manufactura de productos geopoliméricos y su aplicación industrial mediante el uso de caolinita o metacaolín como reactivos principales [Komnistas y Zaharaki, 2007].



Figura 35. Metacaolín como material base en la elaboración de geopolímeros.

La generación de electricidad mediante la combustión de carbón pulverizado genera productos de desecho, uno de los principales es la ceniza. La disposición final de las cenizas volantes es siempre motivo de preocupación de las compañías eléctricas.

Los procesos de valor agregado pueden tratar algunos de los residuos producidos en las centrales eléctricas típicas, sin embargo no todas las cenizas volantes son químicamente adecuadas para ciertos procesos. El contenido de calcio juega un papel importante en su adecuación en procesos de aplicaciones específicas. La geopolimerización de estas cenizas puede ser vista como una alternativa a los procesos de valor agregado y una alternativa a otros métodos de estabilización. El objetivo de la geopolimerización es estabilizar o tratar las cenizas volantes y disminuir su lixiviación [Bankowski et al, 2003].

La ceniza volante con bajo contenido de calcio como material base es preferible a las cenizas volantes con alto contenido de calcio. La presencia de una gran cantidad de calcio puede interferir con el proceso de polimerización y alterar la microestructura [Hardjito y Rangan, 2005].

La escoria de alto horno se forma en procesos tales como la fabricación de la fundición en bruto del mineral de hierro, la combustión de residuos de coque y fuentes como la piedra caliza y otros materiales. Si la escoria fundida es rápidamente enfriada se forma un vítreo de silicato de grano fino Ca-Al-Mg. En general la manera de utilizar la escoria granulada de alto horno se encuentra en la sustitución parcial del cemento Portland. La escoria granulada de alto horno es un material no tóxico y puede ser una buena materia prima para la fabricación de productos de valor agregado como lo son los geopolímeros ya que pueden ser utilizados en aplicaciones resistentes al fuego [Cheng y Chiu, 2002].

También se ha realizado amplias investigaciones sobre el uso de diferentes aluminosilicatos minerales con la adición de caolinita con el fin de sintetizar geopolímeros y se observó que para la mayoría de los minerales con aluminosilicatos es necesaria la adición de caolinita para la formación del gel. Si la caolinita solo se usa sin presencia de otros aluminosilicatos una estructura débil se forma, por lo que se concluyó que la sinergia entre diferentes aluminosilicatos es muy importante [Komnistas y Zaharaki, 2007].

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 hechos 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].

Cada fuente de material tiene ventajas y desventajas. Por ejemplo el metacaolín presenta una alta disolución en la solución reactiva, produce una relación Si/Al controlada en los geopolímeros y un color blanco. Sin embargo, el metacaolín es costoso para producir en grandes volúmenes porque necesita ser calcinado a temperaturas de alrededor de 500 – 700 °C por algunas horas. En este sentido el uso de materiales de residuos, como cenizas volantes es económicamente muy positivo [Wallah y Rangan, 2006].

2.6.3.2. Soluciones alcalinas.

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 16 (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 36. Hidróxido de Potasio presentación en forma de lentejas.

2.6.4. APLICACIONES.

Los geopolímeros con propiedades como la abundancia la abundancia de materia prima, baja emisión de CO_2 , menor consumo de energía, bajo costo de producción, alta resistencia inicial, fraguado rápido. Lo hacen encontrar aplicaciones en muchos campos de la industria, tales como la ingeniera civil,

industria automotriz y aeroespacial, en las fundiciones de metales no ferrosos y metalurgia, la industria del plástico, el arte y la decoración y el reacondicionamiento de los edificios [Li et al, 2004].

Las propiedades físicas y químicas de los geopolímeros y de los productos creados con geopolímeros los convierten en candidatos atractivos para una gran variedad de estabilización y encapsulación de residuos (tabla 21).

ÁREA	APLICACIÓN
INGENIERÍA CIVIL	Bajas emisiones de CO2, fraguado rápido del cemento, productos prefabricados de concreto y mezcla de concreto.
MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN	Ladrillos, bloques, adoquines, azulejos, péneles acústicos, tuberías.
ARQUEOLOGÍA	Reparaciones y restauración a monumentos históricos por geopolimerización.
MATERIALES COMPUESTOS	Herramientas para funciones aeronáuticas, compuestos para aplicaciones de cerámica estructural.
MATERIALES RESISTENTES AL FUEGO	Materiales compuestos para fuego y calor.
APLICACIÓN COMO REFRACTARIOS	Moldes refractarios para la fundición de metales.
UTILIZACIÓN PARA RESIDUOS	Uso de ceniza volante, escoria de alto horno y otros residuos para los productos geopoliméricos
INMOVILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS TÓXICOS	Encapsulación de materiales domésticos, peligrosos, radioactivos y contaminados en materiales muy impermeables y de alta resistencia.
OTRAS	Pinturas, recubrimientos y adhesivos.

Tabla 21. Aplicaciones potenciales de los geopolímeros [Sanjay Kumar, 2008].

Si/AI	Aplicación
1	Ladrillos, cerámicos, protección contra

	el fuego.
2	Cementos de bajo CO ₂ , concretos, encapsulación de material radioactivo y toxico,
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 22. Aplicaciones de los geopolímeros respecto a su relación sílice/aluminio [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 39 M – 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 probadas 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 en kg obtenida en la máquina de prueba.

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

2.7.2. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

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 variables tales como: el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. La figura 37 muestra el Resistómetro marca Nilsson Modelo 400 que se utilizó en esta investigación [Red DURAR, 2000].

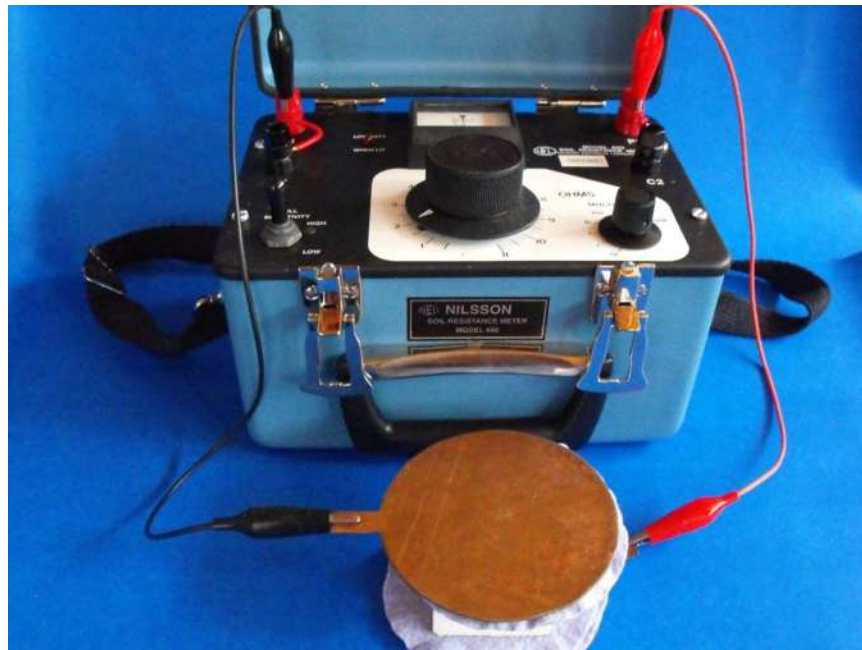


Figura 37. Resistometro Nilsson Model 400.

La resistencia a la compresión en el concreto depende de la relación agua/cemento. Cuanto mayor sea esta relación más baja será la resistencia. La resistividad eléctrica del concreto disminuye linealmente con el aumento de la relación agua/cemento por lo tanto la resistividad puede predecir la resistencia a la compresión en un concreto [Chouteau y Beaulieu, 2011].

Dado que la corrosión es un proceso electroquímico, la resistividad eléctrica del concreto tendrá repercusión en la velocidad de corrosión en el acero como una corriente iónica (corriente eléctrica en la forma de un flujo de iones en el agua capilar) que debe pasar de los ánodos a los cátodos para que la corrosión se produzca [Broomfield, 2007].

Para ensayos a nivel laboratorio. Se procede a tomar las dimensiones (área A , diámetro Φ y longitud L) y efectuar el montaje del ensayo como se muestra en la figura 38 donde se puede observar el acomodo del espécimen el cual consta de dos electrodos en los extremos y una esponja húmeda en los mismos para garantizar una continuidad entre el espécimen y los electrodos. .

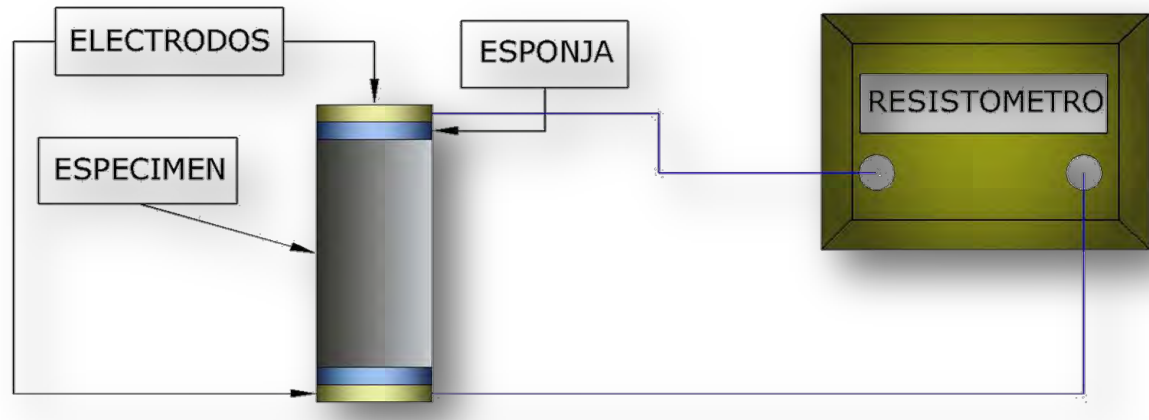


Figura 38. Representación esquemática de la prueba de resistividad.

La resistividad de las muestras se calcula mediante el despeje de la siguiente fórmula.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica, en Ohm-cm.

L= Longitud, en cm.

A= Área, en cm².

R= Resistencia eléctrica en Ohm.

La resistividad eléctrica es una indicación del tamaño, el contenido de humedad en los poros y el grado de interconexión en el sistema poroso. La resistividad es fuertemente afectada por la calidad del concreto, es decir, el contenido de cemento, la relación agua/cemento, el curado y los aditivos utilizados [Broomfield, 2007].

2.7.3. MÉTODO PULL OFF.

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 [Simon 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 CONTROLS figura 39.



Figura 39. Equipo para prueba Pull Off marca CONTROLS.

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.
- Prepare la superficie con el mismo método que se utilizara 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 seria para un trabajo real.

2.7.3.3. Aparatos.

- 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.
- 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.
- Compruebe que el dispositivo de carga a la tensión por lo menos una vez al año y después de las reparación 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 de la superficie.

- Eliminar todos los contaminantes y concreto suelto o deteriorado para obtener una superficie limpia y en buen estado.
- Prepare la superficie con el mismo método que se utilizara 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.

2.7.3.5. 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.

2.7.3.6. 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 sea de una velocidad o un radio de 35 ± 15 kPa/s (5 ± 2 psi/s).
- Registrar la carga de falla y el modo de falla. Registrar el modo de falla:
 1. En el sustrato.
 2. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
 3. En el material de reparación o revestimiento.
 4. 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.
- 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.

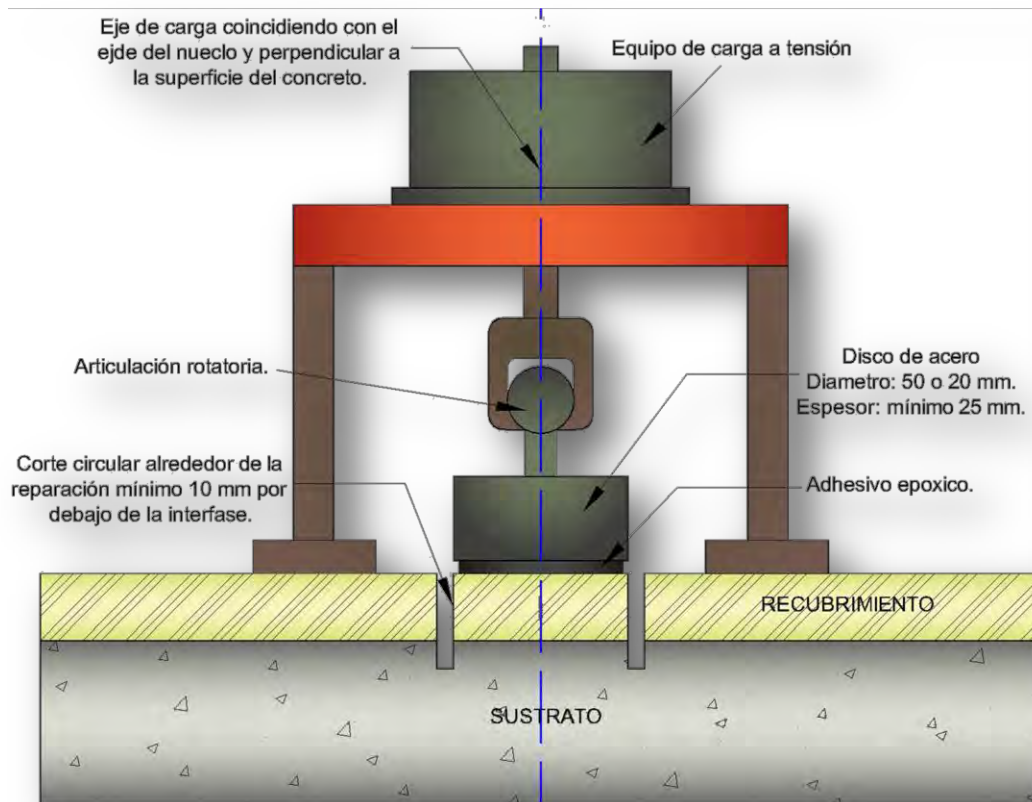


Figura 40. Representación esquemática de la prueba Pull Off [ASTM 1583-04].

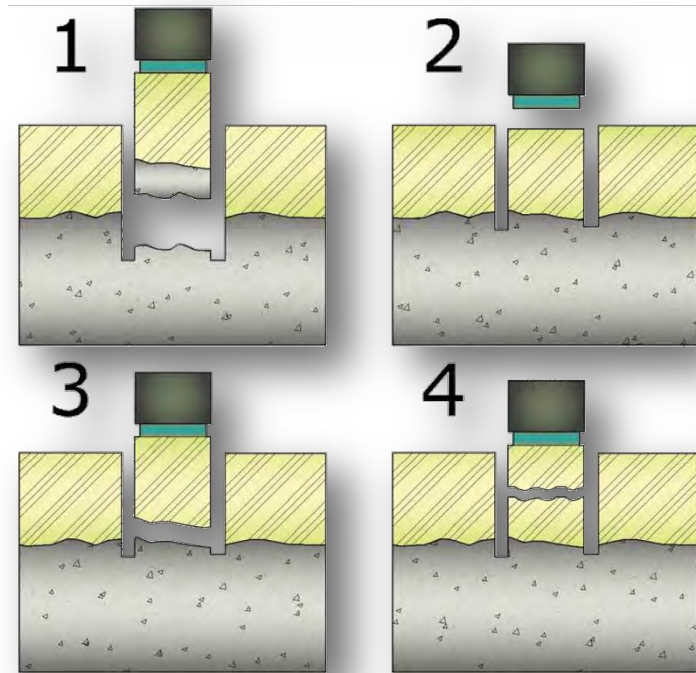


Figura 41. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.

3. MARCO EXPERIMENTAL.

Para el marco experimental se pretende diseñar, elaborar y evaluar un recubrimiento geopolimérico, con diferentes materiales que permitan mejorar su comportamiento en cuanto a adherencia, porosidad, resistencia y trabajabilidad.

3.1. DISEÑO DE UN RECUBRIMIENTO GEOPOLIMÉRICO.

Se elaboró un recubrimiento con diferentes materiales base así como dos soluciones alcalinas para después colocar dicho recubrimiento en sustratos de concreto y mortero. Los materiales base que se utilizaron fueron:

3.1.1. METACAOLÍN (CAOLÍN CALCINADO).

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 (ver figura 43).

Los depósitos de caolín se forman in situ a partir de rocas aluminosilicáticas por alteración debida a la meteorización o por alteración hidrotermal, y casualmente por una combinación de estos procesos.

Ahora bien el metacaolín es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente que se produce de calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500°C y 600°C. Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y concretos, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad.



Figura 42. Caolín presente en la región de los Azufres, Michoacán.

3.1.2. CENIZA DE TERMOELÉCTRICA (PRODUCTO DE DESHECHO).

Esta ceniza es un producto de la combustión mineral en la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles. Que está ubicada en el municipio de La unión Guerrero, en la localidad de Petacalco a unos 15 km de Lázaro Cárdenas Michoacán (ver figura 43).



Figura 43. Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles.

Ceniza apilada: En lo que respecta a las cenizas de carbón apiladas no existe interés en ella. Esto debido al alto costo que significaría el desapilarlas, almacenarlas, descontaminarlas, clasificarlas, transportarlas, etc., además de las bajas características físico-químicas que han adquirido al ser mezcladas (volante y de fondo) y al adicionarles tierra vegetal, arcilla, grava y agua; lo cual repercute en el valor de las mismas.

3.1.3. AGREGADOS Y SOLUCIONES.

Además de variar los materiales base, también se elaboraron dos soluciones diferentes con concentraciones en peso diferentes. Las soluciones fueron:

- Hidróxido de potasio.
- Hidróxido de sodio.

A dicha solución también se le agrego nanosílice amorfo.

Las cantidades utilizadas en esta investigación corresponden a las obtenidas en investigaciones anteriores (de acuerdo a un diagrama ternario como el mostrado en la figura 44) y las cuales tuvieron el mejor comportamiento en cuanto a adherencia con el concreto endurecido y la resistencia del recubrimiento.

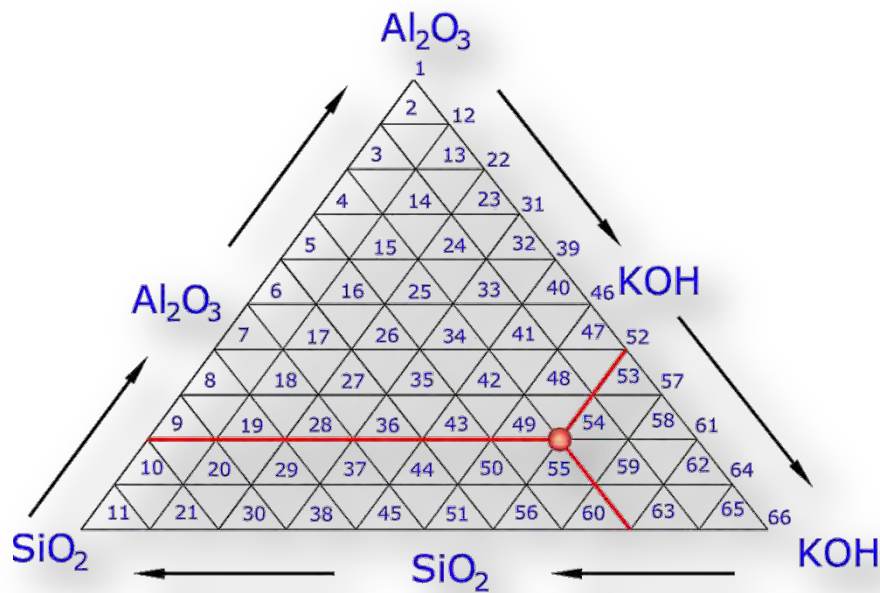


Figura 44. Diagrama ternario.

Los agregados de los recubrimientos, se variaron en porcentajes de acuerdo al recubrimiento base y los materiales utilizados fueron:

- Marmolina N° 2.
- Microesfera.
- Látex.

La variación en los porcentajes de agregados se realizó con respecto al recubrimiento base y los porcentajes fueron 100%, 125%, 150%, 175%, 200%, 225%, 250%, 275%, 300%, 325% y 350% dependiendo de la trabajabilidad y la porosidad así como la adherencia que presentaran al momento de ser elaborados.

3.2. RECUBRIMIENTO A BASE DE METACAOLÍN.

3.2.1. SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN.

Se elaboró un recubrimiento a base de metacaolín con una solución en baja concentración (en peso) de hidróxido de potasio (ver tabla 23) y de hidróxido de sodio (ver tabla 25). El cual fue aplicado sobre sustratos de concreto y tabicón (matriz más porosa) para evaluar su comportamiento en saturación con agua, su trabajabilidad y su fuerza de adherencia con el sustrato.

RECUBRIMIENTO BASE	
METACAOLÍN	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
KOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 23. Recubrimiento a base de metacaolín y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.

Para la elaboración del recubrimiento se varió en porcentaje de los materiales agregados, así como la aplicación de látex estireno butadieno (ver tablas 24 y 26).

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 24. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

En la siguiente secuencia fotográfica se muestra el estado final del recubrimiento a base de metacaolín, con hidróxido de potasio en baja concentración y sin látex en sus diferentes proporciones, figuras 45, 46 y 47.



Figura 45. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 46. Sustratos y recubrimiento a un 250% y 300% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 47. Sustratos y recubrimiento a un 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.

En la siguiente secuencia fotográfica se muestra el estado final del recubrimiento a base de metacaolín, con hidróxido de potasio en baja concentración y con látex en sus diferentes proporciones, figuras 48, 49 y 50.



Figura 48. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.

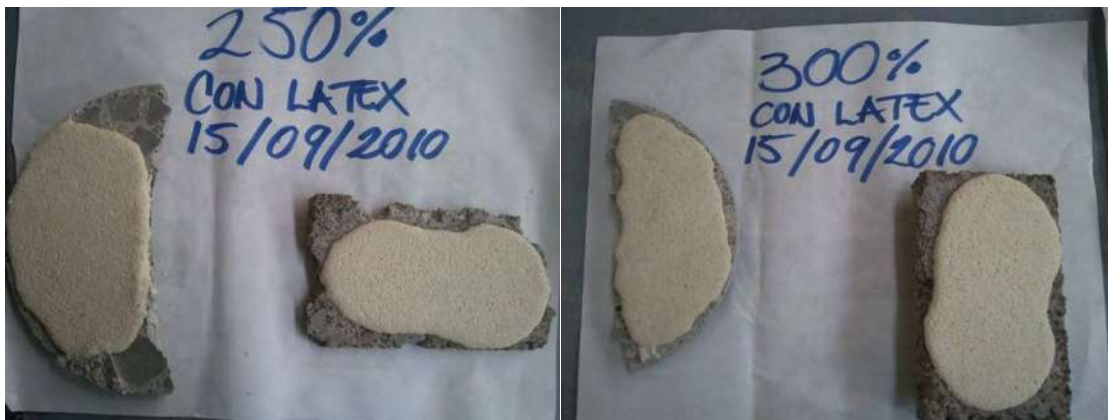


Figura 49. Sustratos y recubrimiento a un 250% y 300% solución KOH en baja concentración y con látex.



Figura 50. Sustratos y recubrimiento a un 350% solución KOH en baja concentración y con látex.

RECUBRIMIENTO BASE	
METACAOLÍN	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
NaOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 25. Recubrimiento a base de metacaolín y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 26. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

La siguiente secuencia fotográfica muestra el estado final del recubrimiento a base de metacaolín, con hidróxido de sodio en baja concentración y sin látex en sus diferentes proporciones, figuras 51 y 52.



Figura 51. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y sin látex.

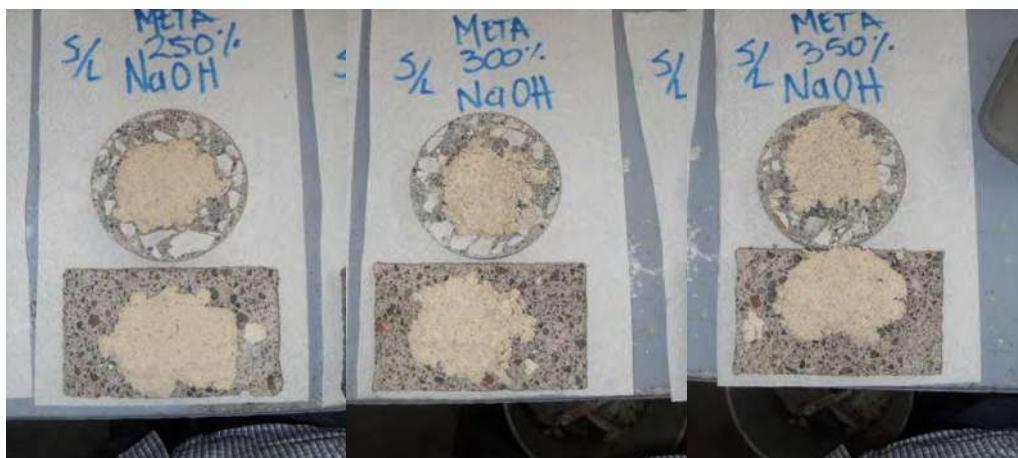


Figura 52. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y sin látex.

La siguiente secuencia fotográfica muestra el estado final del recubrimiento a base de metacaolín, con hidróxido de sodio en baja concentración y con látex en sus diferentes proporciones, figuras 53 y 54.

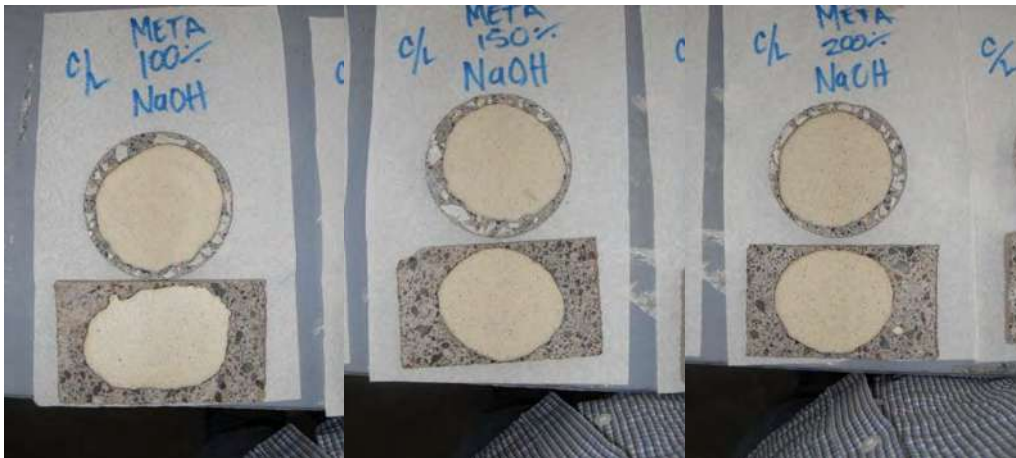


Figura 53. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.



Figura 54. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.

3.3. RECUBRIMIENTO A BASE DE CENIZA DE TERMOELÉCTRICA.

3.3.1. SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN.

Se elaboró un recubrimiento a base de ceniza de una termoeléctrica con una solución en baja concentración (en peso) de hidróxido de potasio (ver tabla 27) y de hidróxido de sodio (ver tabla 29). El cual fue aplicado sobre sustratos de

concreto y tabicón (matriz más porosa) para evaluar su comportamiento en saturación con agua, su trabajabilidad y su fuerza de adherencia con el sustrato.

RECUBRIMIENTO BASE	
CENIZA	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
KOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 27. Recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.

Para la elaboración del recubrimiento se varió en porcentaje de los materiales agregados, así como la aplicación de látex estireno butadieno (ver tablas 28 y 30).

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 28. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

La siguiente secuencia fotográfica muestra el recubrimiento final a base de ceniza de termoeléctrica, con una solución de hidróxido de potasio en baja concentración y sin látex, en sus diferentes proporciones figuras 55 y 56.



Figura 55. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 56. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 57. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.



Figura 58. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.

RECUBRIMIENTO BASE	
CENIZA	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
NaOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 29. Recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 30. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

Las figuras 59 y 60 muestran el recubrimiento final a base de ceniza de termoeléctrica, con una solución de hidróxido de sodio en baja concentración y con látex.

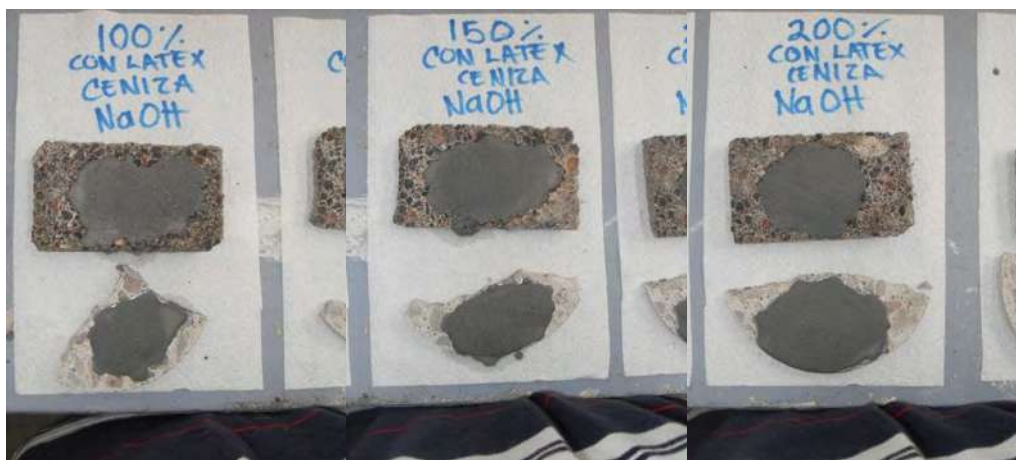


Figura 59. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.

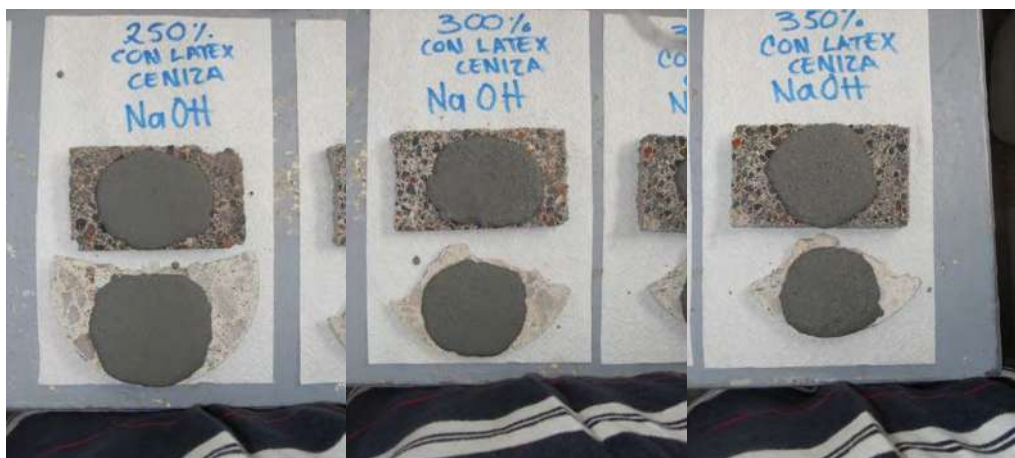


Figura 60. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.

3.4. RECUBRIMIENTO A BASE POLVO DE GRAVA TRITURADA.

3.4.1. SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN.

Se elaboró un recubrimiento a base de polvo producto de la trituración de grava con una solución en baja concentración (en peso) de hidróxido de potasio (ver tabla 31) y de hidróxido de sodio (ver tabla 33). El cual fue aplicado sobre sustratos de concreto y tabicón (matriz más porosa) para evaluar su comportamiento en saturación con agua, su trabajabilidad y su fuerza de adherencia con el sustrato.

RECUBRIMIENTO BASE	
POLVO DE GRAVA	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
KOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 31. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.

Para la elaboración del recubrimiento se varió en porcentaje de los materiales agregados, así como la aplicación de látex estireno butadieno (ver tablas 32 y 34).

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 32. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

La secuencia fotográfica muestra la elaboración final de un recubrimiento a base de polvo producto final de la trituración de grava en la empresa SUPRA en Morelia, Michoacán sin látex, el cual fue tamizado y solamente se utilizó el material que pasa la malla no. 200 y retenido en la malla no. 275, figuras 61, 62 y 63.



Figura 61. Sustratos y recubrimiento a un 100%, y 150% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 62. Sustratos y recubrimiento a un 200%, y 250% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 63. Sustratos y recubrimiento a un 300%, y 350% solución KOH en baja concentración y sin látex.

En la siguiente secuencia fotográfica se muestra el estado final del recubrimiento a base de polvo de grava triturada, con hidróxido de potasio en baja concentración y con látex en sus diferentes proporciones, figuras 64 y 65.



Figura 64. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.



Figura 65. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.

RECUBRIMIENTO BASE	
POLVO DE GRAVA	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
NaOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 33. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de sodio.

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 34. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

De igual manera que los recubrimientos anteriores se elaboraron muestras con sustratos de concreto y tabicón con un material a base de polvo producto de la trituración de grava en esta secuencia fotográfica se muestran el recubrimiento final para cada variación en porcentaje de los agregados con hidróxido de sodio y sin látex, figuras 66 y 67.



Figura 66. Sustratos y recubrimiento a un 100% y 150% solución NaOH en baja concentración y sin látex.



Figura 67. Sustratos y recubrimiento a un 200% y 250% solución NaOH en baja concentración y sin látex.

La secuencia fotográfica muestra el recubrimiento final con látex e hidróxido de sodio en baja concentración, figuras 68 y 69.



Figura 68. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución NaOH en baja concentración y con látex.



Figura 69. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución NaOH en baja concentración y con látex.

3.5. RECUBRIMIENTO A BASE PERLITA NATURAL.

3.5.1. SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO (KOH) Y DE HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH) EN UNA EN BAJA CONCENTRACIÓN.

Se elaboró un recubrimiento a base de perlita natural con una solución en baja concentración (en peso) de hidróxido de potasio (ver tabla 35) y de hidróxido de sodio (ver tabla 37). El cual fue aplicado sobre sustratos de concreto y tabicón

(matriz más porosa) para evaluar su comportamiento en saturación con agua, su trabajabilidad y su fuerza de adherencia con el sustrato.

RECUBRIMIENTO BASE	
PERLITA NAT.	55.53 gr
H ₂ O	76.56 gr
KOH	8.33 gr
SiO ₂	15.02 gr
TOTAL	155.45 gr
ENTRE 7 SUSTRATOS	22.21 gr

Tabla 35. Recubrimiento a base de polvo de grava triturada y una solución en baja concentración de hidróxido de potasio.

En la tablas 36 y 37 se muestran las diferentes variaciones utilizadas para elaborar el recubrimiento a base de perlita natural.

MATERIAL	PORCENTAJES					
	100%	150%	200%	250%	300%	350%
MARMOLINA	22.21 gr	33.31 gr	44.41 gr	55.52 gr	66.62 gr	77.72 gr
MICROESFERA (20%)	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr	4.44 gr
LÁTEX (30%)	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr	6.66 gr

Tabla 36. Variación en porcentaje de los materiales agregados al recubrimiento base.

En las figuras 70 y 71 se muestra el recubrimiento final sin látex con una solución de hidróxido de potasio a base de perlita natural.

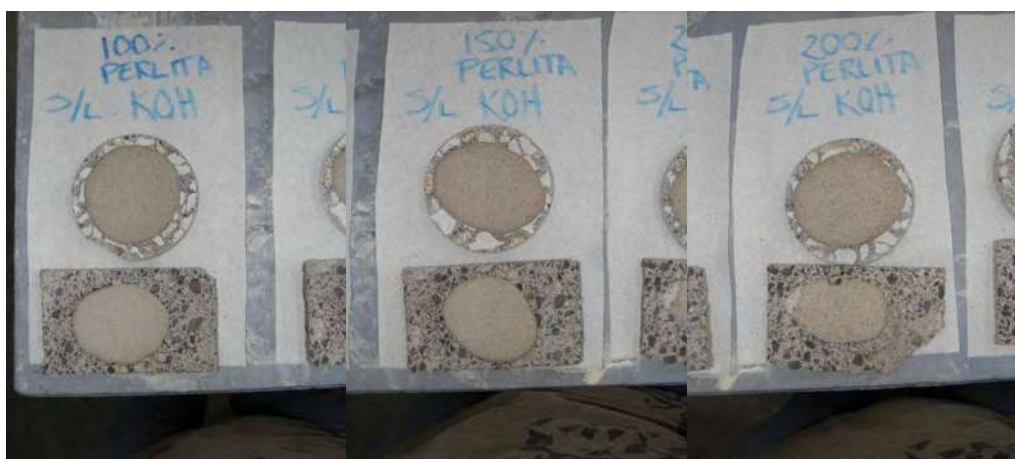


Figura 70. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.



Figura 71. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 200% solución KOH en baja concentración y sin látex.

Las figuras 72 y 73 muestran el recubrimiento final a base de perlita natural agregándole látex con una solución de hidróxido de potasio.



Figura 72. Sustratos y recubrimiento a un 100%, 150% y 200% solución KOH en baja concentración y con látex.

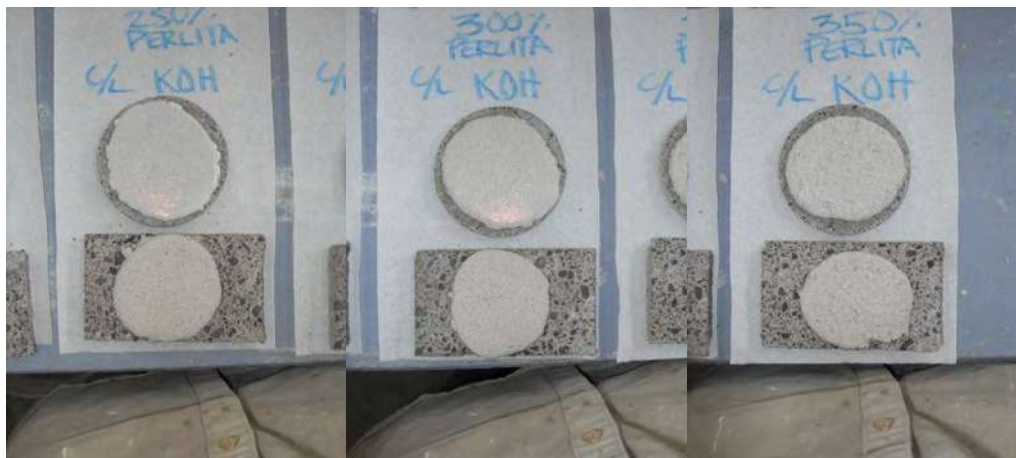


Figura 73. Sustratos y recubrimiento a un 250%, 300% y 350% solución KOH en baja concentración y con látex.

3.6. SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Una vez que se elaboraron los sustratos estos se llevaron a saturación en agua durante un mínimo de 24 horas para comprobar que estos fueran resistentes en presencia de agua, figura 74.



Figura 74. Sustratos sumergidos durante 24 h en agua.

Los recubrimientos a base de los diferentes materiales se saturaron y de ahí se observó que los que estaban elaborados a base de hidróxido de sodio (NaOH) reaccionaban y se disolvían en presencia de agua. Por lo que se descartó el recubrimiento a base de esta solución (ver figura 75).

**Figura 75. Resultados de la prueba en sustratos de perlita y polvo de grava triturada con una solución de NaOH.**

La figura 76 muestra el estado en el que se encontraban los sustratos a base de perlita natural y una baja concentración con hidróxido de sodio, después de las 24 h de inmersión en agua.



Figura 76. Resultados de la prueba en sustratos de metacaolín con una solución de NaOH.

La figura 77, muestra el estado final del recubrimiento a base de ceniza de la termoeléctrica después de 24 h de inmersión en agua, como se puede observar estas presentan un notable deterioro.



Figura 77. Resultados de la prueba en sustratos de ceniza de escoria con una solución de NaOH.

Como resultado de la prueba de saturación e inmersión de los recubrimientos en agua se desecharon los recubrimientos que fueron elaborados con hidróxido de sodio y los recubrimientos a base de una solución de hidróxido de potasio y materiales base el polvo producto de la trituración de la grava y perlita natural. Adicionalmente se trabajó con perlita calcinada la cual se desechó por que no se mezclaba con la solución debido a la baja densidad que presentaba ya que formaba una especie de nata en dichas soluciones.

3.7. PRUEBA DE ADHERENCIA (PULL-OFF) SOBRE SUSTRATOS DE CONCRETO.

La prueba pull-off se realizó para evaluar de manera cuantitativa la adherencia que presenta el recubrimiento y así determinar que material base y que porcentaje de agregados fue el que mejor adherencia presentó.

Para el desarrollo y conclusión de esta prueba fue necesario hacer algunas consideraciones de acuerdo a lo que marca la norma. La primera de ellas fue que la profundidad del núcleo no fue hasta 1 cm como lo marca la norma debido a que los sustratos eran delgados, también fue necesario omitir la separación mínima que debe existir entre núcleo y núcleo debido a que los sustratos fueron elaborados de cilindros de 10x20 cm, el área en estudio fue menor a la que recomienda la norma de 1x1 m.

La figura 78 muestra el recubrimiento a base de metacaolín e hidróxido de potasio con látex, se observa que la mayoría de las fallas se presentaron en el recubrimiento.

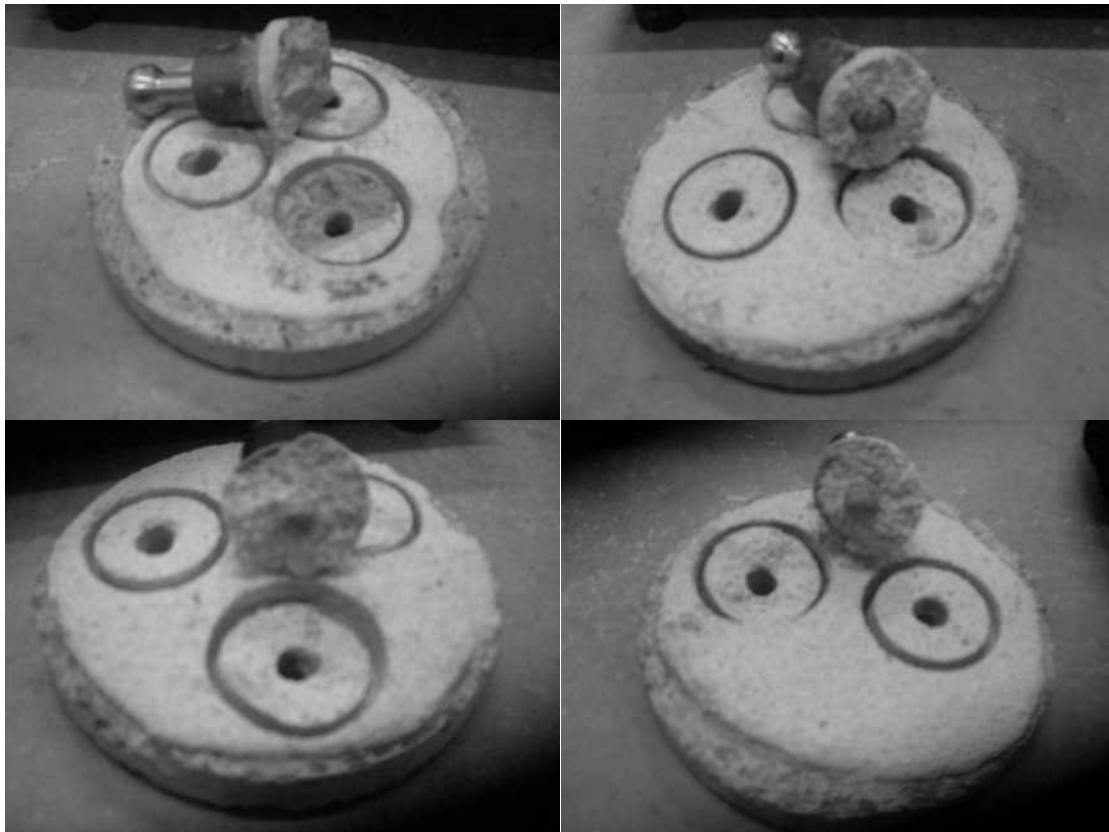


Figura 78. Recubrimiento a base de metacaolín una solución de hidróxido de potasio en alta concentración con látex.

En el caso de las muestras de metacaolín sin látex en algunos casos se presentó una falla en la interface como se observa en la figura 78.



Figura 79. Muestras elaboradas a base de metacaolín sin látex e hidróxido de sodio en alta concentración.

La figura 80 presenta los sustratos elaborados con ceniza de la termoeléctrica sin látex y muestra el tipo de falla que se presentó en la mayoría de los casos.

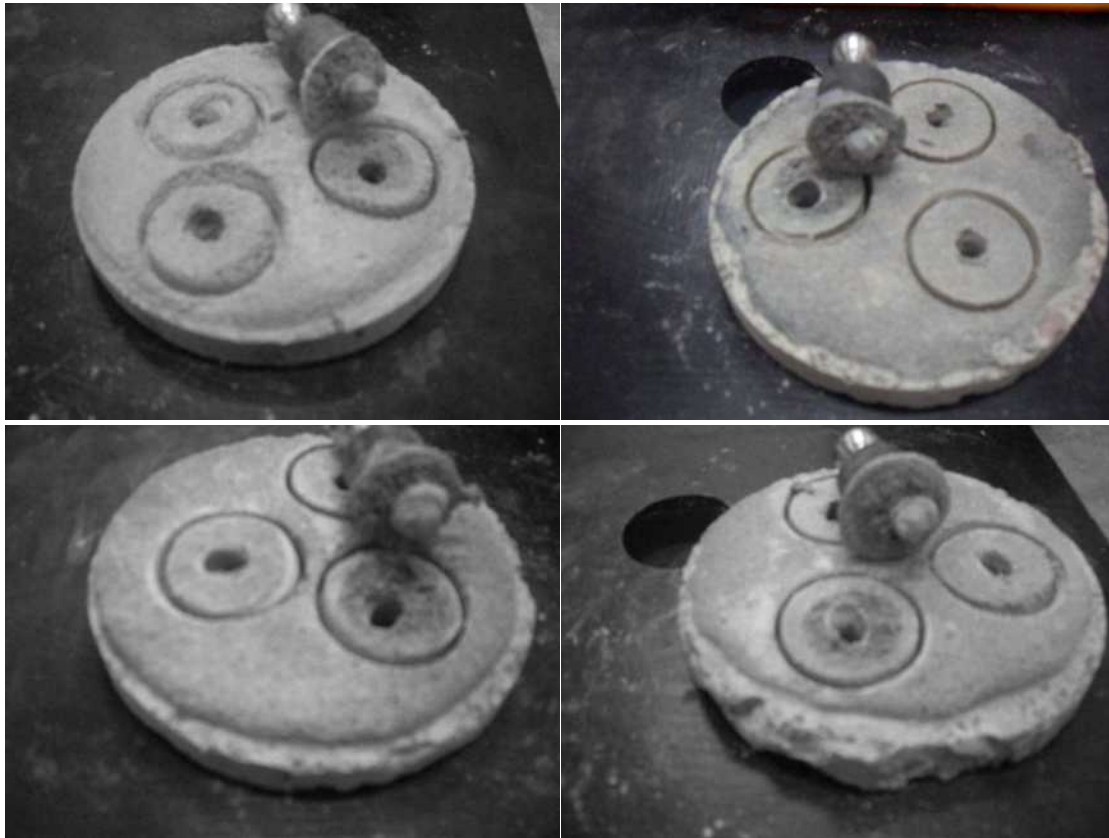


Figura 80. Muestras elaboradas a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex e hidróxido de potasio en alta concentración.

Las muestras elaboradas con ceniza de la termoeléctrica, con látex se muestran en la figura 81.



Figura 81. Muestras elaboradas a base de ceniza de la termoeléctrica, con látex e hidróxido de potasio en alta concentración.

3.8. ELABORACIÓN DE CUBOS 5x5x5 cm.

Una vez descartados algunos materiales por los resultados que presentaron después de la saturación en agua se procedió a elaborar cubos de 5x5x5 cm con la soluciones en baja y alta concentración.

Se elaboraron 3 cubos con material base de metacaolín con una solución de baja concentración.

El resultado fue una alta contracción en los porcentajes más bajos de agregados, así como una polimerización y endurecimiento inadecuados debido a que la muestra tardó alrededor de 5 días en secar completamente y tener la posibilidad de desmoldar los figura 82. Con este resultado se decidió elaborar cubos con una alta concentración de hidróxido de potasio.



Figura 82. Colado de cubos con una solución a base de metacaolín y una solución de baja concentración.

En este caso se intentó desmoldar un cubo a las 24 h de su elaboración pero este todavía se encontraba en estado fresco, por este motivo se decidió trabajar con una segunda concentración que fuera más alta a la inicialmente propuesta (ver figura 83).



Figura 83. Cubos a las 24 h de su elaboración.

Transcurrido un tiempo de 5 días se hizo el segundo intento para desmoldar los cubos en baja concentración. Aparentemente la cara de colado estaba seca pero en el interior se encontraba fresco, figura 84.



Figura 84. Cubos descimbrados a los 5 días de haber sido colados.

En la figura 85, se muestra la elaboración de los cubos con una alta concentración a los cuales se les tomó, pH se colaron los cubos y se elaboraron sustratos, teniendo como resultado un cubo que se podía desmoldar a las 24 h se su elaboración.

El resultado de la prueba de pH fue que la solución era muy alcalina con un valor de 13 en todas las soluciones para los diferentes cubos elaborados a base de metacaolín y una solución de hidróxido de potasio.



Figura 85. Elaboración de cubos a base de metacaolín y una solución con una alta concentración.

Se elaboraron de igual manera cubos y sustratos con la ceniza de termoeléctrica como material base, se utilizaron indicadores de pH para conocer de manera cuantitativa el pH de la solución (ver figura 86).

De igual manera el indicador de pH arrojó como resultado un valor de 13 lo cual nos indicó que la solución era muy alcalina.



Figura 86. Elaboración de cubos a base de ceniza de escoria y una solución con una alta concentración.

Se elaboraron un total de 75 cubos a base de metacaolín, es decir, 6 cubos por cada variación en el porcentaje de agregados.

De igual manera se elaboraron 75 cilindros a base de ceniza de termoeléctrica, es decir, 6 cubos por cada variación en el porcentaje de los agregados.

3.9. ABSORCIÓN DE LOS CUBOS.

Para obtener la absorción se tomaron tres muestras por cada porcentaje de marmolina se sometieron a secado en horno a 100°C por un lapso de 72 h se registraron los pesos secos de las muestras, para después ser sometidas a saturación por un tiempo de 24 h, se secaron superficialmente las muestras y se registraron los pesos superficialmente secos (ver figura 87).



Figura 87. Procedimiento para obtener la absorción en cubos de 5x5x5 cm.

3.10. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL RECUBRIMIENTO.

Para la prueba de resistividad se aprovechó que los cubos fueron sometidos a saturación por 24 h, se registró su peso y posteriormente se determinó la resistencia eléctrica con un Resistometro marca Nilsson Modelo 400, para después calcular la resistividad (ver figura 88).



Figura 88. Procedimiento para obtener la resistividad de los cubos de 5x5x5.

3.11. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL RECUBRIMIENTO.

La prueba de compresión se llevó a cabo en la máquina de reciente adquisición por el laboratorio de materiales la cual maneja una precisión adecuada para pruebas a compresión en especímenes de dimensiones pequeñas.

3.12. DISEÑO UN CONCRETO $F'C=150 \text{ KG/CM}^2$.

Se pretende diseñar, elaborar y evaluar un recubrimiento geopolimérico, con diferentes materiales que permitan mejorar su comportamiento en cuanto a adherencia, porosidad, resistencia y trabajabilidad.

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 $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$, con un revenimiento de 15 cm. Se utilizó cemento tipo CPC-30R.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

MATERIAL	CEMENTO	ARENA	GRAVA
TIPO DE MATERIAL		VOLCÁNICO	VOLCÁNICO
DENSIDAD	3.1	2.33	2.13
P.V.S.S. (kg/m^3)	1490	1397.25	1148.51
P.V.S.V. (kg/m^3)		1522.29	1252.24
T.M. (")		----	1.00
M.F.		3.12	----
ABSORCIÓN (%)		3.20	3.10

Tabla 37. Características de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.

ESTIMACIÓN DEL AGREGADO FINO

MATERIALES	PESO (kg)	DENSIDADES	VOLUMEN (M^3)
Cemento	252.50	3.1	0.081
Agua	202.00	1	0.202
Aire	---	---	0.015
Arena	---	---	---
Grava	798.93	2.13	0.375
Suma de volúmenes, excepto arena (Suma Volúmenes)=			0.674

Tabla 38. Estimación del volumen de arena necesario para 1 m^3 .

MATERIALES	VOLUMEN (Its/m ³)	DENSIDAD	PESO (kg)	REL. EN PESO	BULTO
Cemento	81.45	3.1	252.50	1.00	50.00
Agua	202.00	1	202.00	0.80	40.00
Arena	326.46	2.33	760.66	3.01	150.63
Grava	375.08	2.13	798.93	1.96	98.10
Aire	15.00	---	---	---	---
Total	1000.00		2014.09		

Tabla 39. Estimación de las relaciones en volumen y en peso necesarios para 1m³ así como el material necesario para un bulto.

Del cual se obtuvieron las siguientes relaciones en peso para realizar 1 m³ de concreto. Con una relación A/C= 0.80.

MATERIALES	PESO
Cemento	252.50 kg
Agua	202.00 kg
Arena	760.66 kg
Grava	798.93 kg
Aire	---
Total	2,014.09 kg

Tabla 40. Resumen de materiales en peso necesarios para elaborar 1 m³ de concreto.

Una vez realizado el diseño de la mezcla de concreto se procedió a elaborar cilindros, para comprobar que la resistencia calculada en el mismo fuera semejante a la obtenida en la elaboración de los cilindros.



Figura 89. Cilindros elaborados para comprobar que la resistencia proyectada fue físicamente parecida.

3.13. ELABORACIÓN DE CILINDROS.

Se presenta el proceso seguido en la elaboración de los cilindros utilizados en esta investigación.



Figura 90. Elaboración y curado de cilindros.

3.14. APLICACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO PRELIMINAR A CILINDROS.



Figura 91. Cilindros sin recubrimiento (testigos) y cilindros recubiertos.

3.15. ATAQUE DE INTEMPERISMO ACELERADO.

Esta prueba consiste en someter una muestra del macizo rocoso a ciclos de saturación con sulfato de sodio anhidro y secado en un horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ un lapso tiempo mínimo de 18 horas.

La solución de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) fue elaborada en cómo se describe a continuación:

Se utilizaron 350 g de Sulfato de Sodio para 1 litro de agua destilada. Los cuales fueron agregados de manera gradual en un tiempo de 10 minutos usando agitadores. Se toman 350 g de sulfato de sodio para garantizar que la solución esta saturadas y no tener problemas por cambio de concentraciones de la disolución.

El sulfato de sodio anhidro debe de estar mínimo 48 horas en reposo para poder utilizarse.

Previo a saturar los especímenes en la solución de sulfato de sodio se saturaron en agua y se registraron los pesos y la resistividad inicial que presentaban todas las muestras.

3.15.1. PRIMER CICLO.

El primer ciclo consistió en la inmersión de los 25 cilindros recubiertos y los 25 cilindros testigos en la solución de sulfato de sodio, durante un tiempo mínimo de 18 h (ver figura 92), aprovechando que las muestras se encontraban saturadas se tomó la resistividad que presentaba dichos especímenes. Se registró el peso de los especímenes saturados y secos superficialmente. Transcurrido dicho tiempo se llevaban las muestras al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ se dejaron enfriar un tiempo de 15 minutos para registrar su peso seco (ver figura 93).



Figura 92. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO_4 durante el primer ciclo.

Nótese en la figura 93 el deterioro del recubrimiento debido al secado en el horno esto por la presencia de látex.



Figura 93. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el primer ciclo.

Una vez terminado el primer ciclo se retiraron 5 especímenes recubiertos y 5 especímenes utilizados como testigos para evaluar la resistencia a la compresión.

3.15.2. SEGUNDO CICLO.

En el segundo ciclo se saturaron un total de 20 cilindros recubiertos y 20 cilindros testigos, en un lapso de tiempo mínimo de 18 h en la solución de sulfato de sodio (ver figura 94). Transcurrido dicho tiempo se registraron los pesos de las muestras superficialmente secas, para después ser colocadas en el horno por un periodo de 24 h (ver figura 95).



Figura 94. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO_4 durante el segundo ciclo.



Figura 95. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el segundo ciclo.

Al final del segundo ciclo se tomaron 5 cilindros recubiertos y 5 cilindros testigos para evaluar la resistencia a la compresión después de terminar el segundo ciclo.

3.15.3. TERCER CICLO.

Para el tercer ciclo se sometieron a inmersión un total de 15 cilindros recubiertos y testigos repitiendo los pasos que se realizaron en los ciclos anteriores.

En la figura 96 se puede observar la inmersión de los cilindros, los cuales ya presentan un deterioro a simple vista.



Figura 96. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO_4 durante el tercer ciclo.

Nótese el deterioro evidente que presentan los cilindros recubiertos, un cambio de color significativo debido a que el látex presente en el recubrimiento se vió afectado por la temperatura a la cual se secaron las muestras (ver figura 97)



Figura 97. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el tercer ciclo.

Al igual que los dos ciclos anteriores se tomaron 5 cilindros recubiertos y 5 testigos para evaluar la resistencia a la compresión después de tres ciclos de ataque por intemperismo acelerado.

3.15.4. CUARTO CICLO.

Para el cuarto ciclo se saturaron un total de 10 cilindros recubiertos y testigos, en la figura 98 se observa la inmersión de los cilindros recubiertos en donde ya es evidente el deterioro que presentan los mismos.



Figura 98. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO_4 durante el cuarto ciclo.

La figura 99 muestra el deterioro que presenta los especímenes después de haber sido secados en el horno, nótese que en los cilindros testigos ya se pueden ver los agregados.



Figura 99. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 24 h en el cuarto ciclo.

Una vez secos los especímenes y registrados los pesos, se retiraron 5 cilindros recubiertos y testigos para evaluar la resistencia a la compresión en el cuarto ciclo de ataque.

3.15.5. QUINTO CICLO.

Para el quinto ciclo se saturaron 5 cilindros recubiertos y testigos; para este ciclo ya es evidente el daño en los cilindros, y de manera más significativa en los testigos, ya que como se observa en la figura 100 existe sedimentación del cemento con el que se elaboraron los mismos.



Figura 100. Inmersión de los cilindros a una solución saturada de NaSO_4 durante el quinto ciclo.

En la figura 101 se muestra el estado que presentan las muestras después de haber sido secadas en el horno siendo evidente el daño que presentan después de 5 cilindros de intemperismo acelerado.

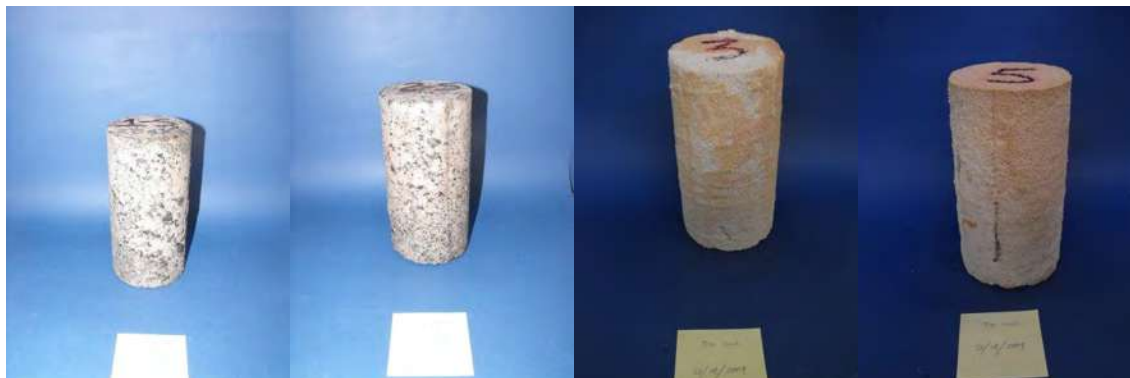


Figura 101. Cilindros después de estar en el horno por un periodo aproximado de 18 h en el cuarto ciclo.

Para concluir el ataque con sulfato de sodio se evaluó la resistencia a la compresión de los 5 cilindros recubiertos y testigos.

4. RESULTADOS.

4.1. FLUORESCENCIA EN MATERIALES BASE.

Las muestras fueron enviadas al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN unidad Saltillo y fueron realizadas por el Dr. José Iván Escalante García.

Las muestras fueron analizadas por método Semicuantitativo en Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con dispersión de longitud de onda, para lo cual se utilizó un equipo Marca BRUKER Modelo S4 PIONNER, el cual está provisto de una fuente de excitación de 4kW, la interpretación de los datos se realizó utilizando el software SPECTRA plus.

Se realizó un barrido al vacío de 71 elementos (Na-U), con un %RSD aproximado para concentraciones >1% de 5 a 10 y para concentraciones <1% de 10 a 20 bajo las siguientes condiciones:

- Tubo de RX con ánodo de Rh
- Voltaje de excitación de 25 a 60 kv.
- Colimador de 0.46dg
- Máscara de colimador de 34mm
- Cristales LIF200 (lithium fluoride) y PET (pentaerithrit)

Los compuestos aquí reportados se calcularon por Estequiometria basándose en los elementos determinados por FRX.

La tabla 41 muestra los resultados obtenidos de la prueba de Espectrometría de fluorescencia de Rayos X, en donde se muestran los porcentajes en peso de los componentes para los materiales base utilizados en la elaboración de los recubrimientos.

Muestra	Perlita natural	Polvo de grava triturada	Ceniza de termoeléctrica	Metacaolín
Al ₂ O ₃	11.6	16.15	31.29	45.27
SiO ₂	79.92	52.46	48.12	51.09
TiO ₂	0.14	0.892	1.994	1.749
Fe ₂ O ₃	1.16	9.133	5.239	0.487
MgO	0.24	2.713	0.868	0
MnO	0	0.225	0	0
CaO	0.64	8.954	6.268	0.032
Na ₂ O	1.51	2.9	0.258	0.219
K ₂ O	4.68	1.658	1.11	0.172
SO ₃	0	0.065	0.847	0.036
ZrO ₂	0.06	0.019	0.081	0
Cl	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0.033
SrO	0.01	0.126	0.296	0
ZnO	0	0	0	0
PXC/PPI		4.71	3.63	0.913
BaO		0	0	0
P ₂ O ₅	0.02	0	0	0
Suma	99.98	100.005	100.001	100.001

Tabla 41. Resultados de la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

De la figura 99 se observa que los materiales con una mayor cantidad de óxido de aluminio (Al₂O₃) y el óxido de silicio (II) son:

- Metacaolín.
- Ceniza de termoeléctrica.
- Polvo de grava triturada.

Si esto lo relacionamos con el comportamiento que se tuvo en la elaboración de cubos, se podría concluir que el contenido de óxido de aluminio es determinante en la polimerización y endurecimiento de las muestras, ya que los cubos elaborados con metacaolín fueron los que un mejor comportamiento tuvieron, ya que estos endurecían a las 24 h de ser elaborados.

La ceniza de la termoeléctrica de igual manera fue el material que polimerizó y endureció más rápidamente después del metacaolín, la diferencia en tiempo de polimerización y endurecimiento fue notable ya estos endurecían en un promedio de 2 semanas.

En cuanto al polvo de grava triturada se elaboraron cubos pero estos nunca polimerizaron y endurecieron. Por lo cual no se continuó con su elaboración.

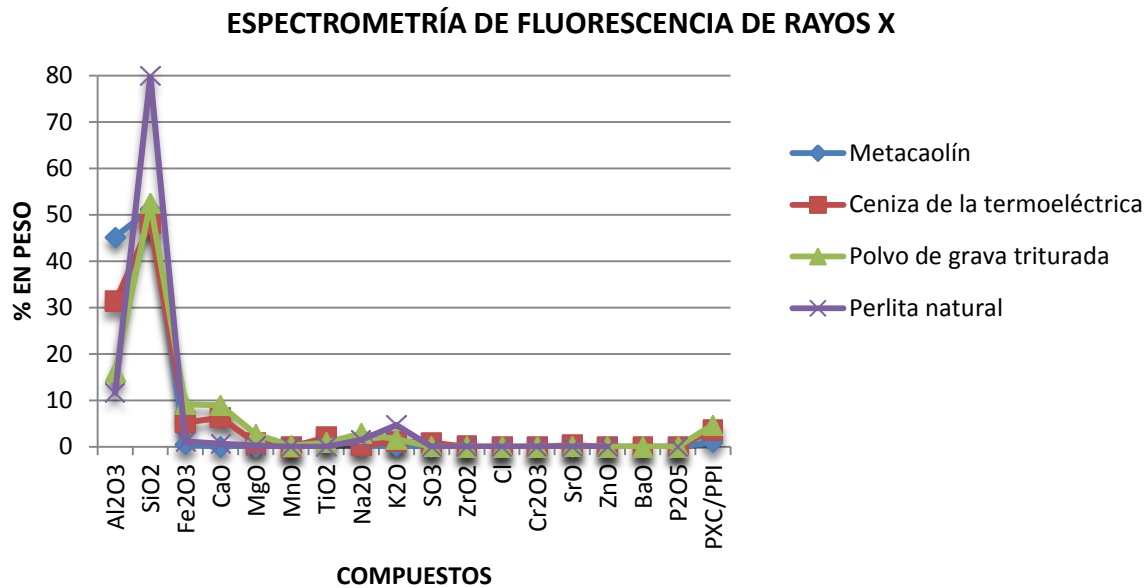


Figura 102. Resultados de la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

4.2. PRUEBA PULL-OFF EN SUSTRATOS DE CONCRETO.

En cuanto a la prueba Pull-off fue necesario hacer de algunas consideraciones que ya fueron comentadas en el marco experimental. Los resultados obtenidos en los recubrimientos a base de metacaolín se muestran en la tabla 42 (recubrimiento sin látex) y la tabla 43 (recubrimiento con látex).

ALTA CONCENTRACIÓN SIN LÁTEX

METACAOLÍN	ESFUERZO	ESFUERZO	ESFUERZO	PROMEDIO	PROMEDIO	FALLA DOMINANTE
KOH	MPa	MPa	MPa	MPa	kg/cm ²	
% DE MARMOLINA	NÚCLEO 1	NÚCLEO 2	NÚCLEO 3			
150	1.08	1.08	2.15	1.44	14.65	RECUBRIMIENTO
175	0.25	0.53	0.46	0.41	4.21	RECUBRIMIENTO
200	0.12	0.57	0.37	0.35	3.60	RECUBRIMIENTO
225	0.65	-	-	0.65	6.63	RECUBRIMIENTO
250	0.27	0.57	-	0.42	4.28	RECUBRIMIENTO
PROMEDIO					6.68	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					4.60	

Tabla 42. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín, sin látex.

ALTA CONCENTRACIÓN CON LÁTEX

METACAOLÍN	ESFUERZO	ESFUERZO	ESFUERZO	PROMEDIO	PROMEDIO	FALLA DOMINANTE
KOH	MPa	MPa	MPa	MPa	kg/cm ²	
% DE MARMOLINA	NÚCLEO 1	NÚCLEO 2	NÚCLEO 3			
200	1.80	3.83	1.64	2.42	24.71	RECUBRIMIENTO
225	1.40	1.67	-	1.54	15.65	RECUBRIMIENTO
250	2.22	1.85	1.10	1.72	17.57	RECUBRIMIENTO
275	2.11	1.84	1.21	1.72	17.54	RECUBRIMIENTO
300	0.98	1.63	1.30	1.30	13.29	RECUBRIMIENTO
325	1.48	-	2.19	1.84	18.71	RECUBRIMIENTO
350	1.70	2.54	-	2.12	21.62	RECUBRIMIENTO
PROMEDIO					18.44	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					3.77	

Tabla 43. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín, con látex.

En la figura 103 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos en los recubrimientos con y sin látex. Se observa un claro aumento en la resistencia a la tensión con los recubrimientos que fueron elaborados con látex y de manera particular los que fueron elaborados con un 200% de marmolina.

RECUBRIMIENTO A BASE DE METACAOLÍN

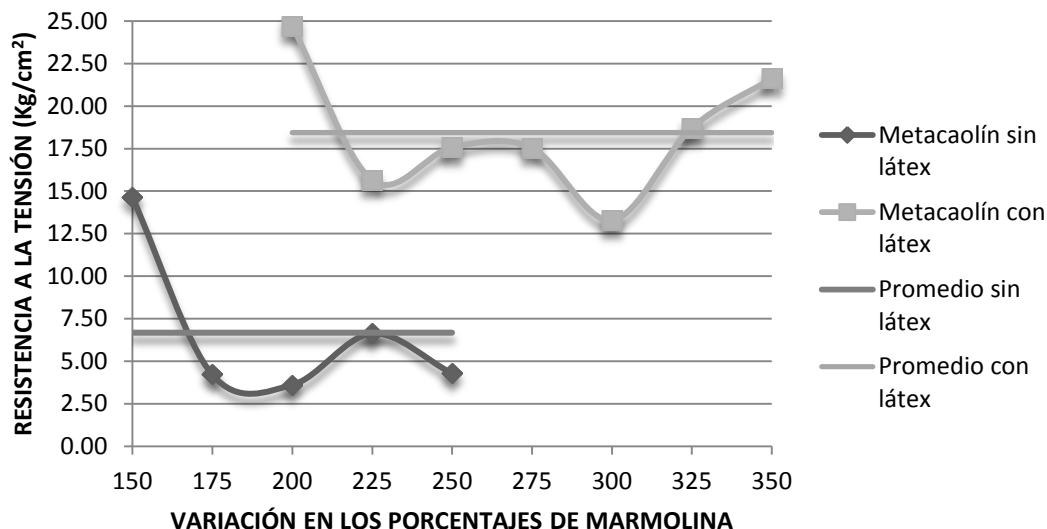


Figura 103. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de metacaolín.

En cuanto a los recubrimientos elaborados con ceniza de la termoeléctrica, se hicieron las mismas consideraciones que las del caso anterior y los resultados se muestran en la tabla 44 (recubrimiento sin látex) y tabla 45 (recubrimiento con látex).

ALTA CONCENTRACIÓN SIN LÁTEX						
CENIZA	ESFUERZO	ESFUERZO	ESFUERZO	PROMEDIO	PROMEDIO	FALLA DOMINANTE
KOH	MPa	MPa	MPa	MPa	kg/cm2	
% DE MARMOLINA	NÚCLEO 1	NÚCLEO 2	NÚCLEO 3			
200	1.88	0.72	1.24	1.28	13.05	RECUBRIMIENTO
225	0.77	-	1.56	1.165	11.88	RECUBRIMIENTO
250	0.75	-	-	0.75	7.65	RECUBRIMIENTO
275	0.08	-	-	0.08	0.82	RECUBRIMIENTO
300	0.18	-	-	0.18	1.84	RECUBRIMIENTO
325	0.21	-	-	0.21	2.14	RECUBRIMIENTO
PROMEDIO					6.23	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					5.40	

Tabla 44. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica, sin látex.

ALTA CONCENTRACIÓN CON LÁTEX

CENIZA	ESFUERZO	ESFUERZO	ESFUERZO	PROMEDIO	PROMEDIO	FALLA DOMINANTE
KOH	MPa	MPa	MPa	MPa	kg/cm ²	
% DE MARMOLINA	NÚCLEO 1	NÚCLEO 2	NÚCLEO 3			
150	1.11	1.92	1.03	1.35	13.80	RECUBRIMIENTO
175	1.76	1.02	0.67	1.15	11.73	RECUBRIMIENTO
200	1.63	1.08	0.41	1.04	10.61	RECUBRIMIENTO
225	0.5	1	0.83	0.78	7.92	RECUBRIMIENTO
250	1.01	0.6	0.46	0.69	7.04	RECUBRIMIENTO
275	1.28	1.03	-	1.16	11.78	RECUBRIMIENTO
300	1.94	2.25	-	2.10	21.36	RECUBRIMIENTO
PROMEDIO					12.03	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					4.73	

Tabla 45. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica, con látex.

De las tablas anteriores se puede observar la falta de algunos resultados debido a que no se pudieron preparar más núcleos para tener una muestra significativa y un datos con un mejor nivel de confianza.

La figura 104 muestra una comparativa entre los recubrimientos con y sin látex; se observa que para este caso el látex disminuyó la resistencia a la tensión en los recubrimientos con menor contenido de marmolina, y aumentó en los últimos dos recubrimientos con un mayor contenido de la misma. En el caso de los recubrimientos sin látex resultó todo lo contrario: la resistencia a la tensión fue mayor en los recubrimientos con menor porcentaje de marmolina.

RECUBRIMIENTO A BASE DE CENIZA DE TERMOELÉCTRICA

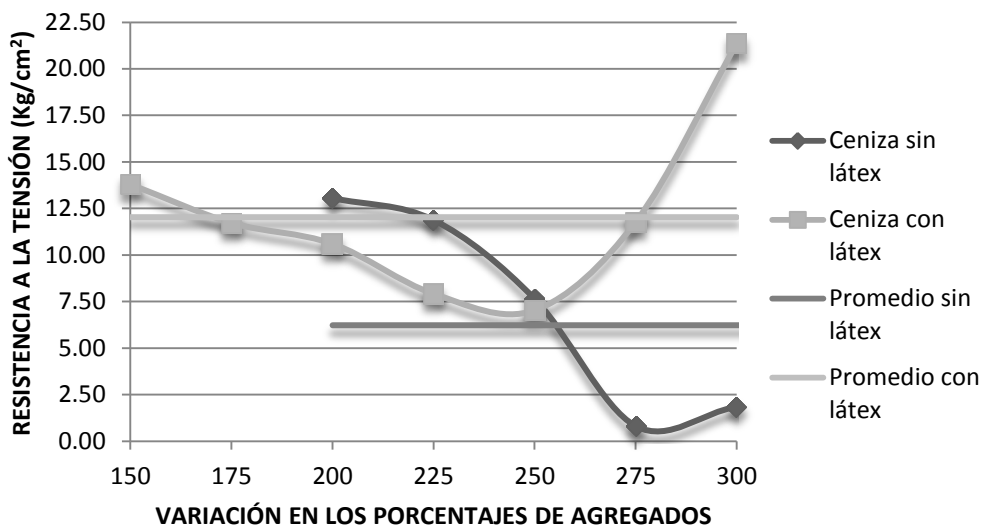


Figura 104. Resistencia a la tensión en recubrimiento a base de ceniza de termoeléctrica.

4.3. ABSORCIÓN EN RECUBRIMIENTOS.

Los resultados obtenidos de la prueba de absorción en recubrimientos a base de metacaolín sin látex y con látex se muestran en las tablas 46 y 47 respectivamente.

CUBOS DE METACAOLÍN SIN LÁTEX										
NO	PESO SECO			PESO SATURADO			ABSORCIÓN			PROMEDIO
	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%	%	
15	216.3	217.8	217.2	255.5	256.3	256.3	18.1	17.6	18.0	17.93
0	0	0	0	0	0	0	2	8	0	
17	223.2	226.5	225.1	260.6	266.0	264.1	16.7	17.4	17.3	17.17
5	0	0	0	0	0	0	6	4	3	
20	244.4	235.5	237.4	275.2	264.4	266.8	12.6	12.2	12.3	12.42
0	0	0	0	0	0	0	0	7	8	
22	243.6	248.8	241.2	272.5	278.0	267.4	11.8	11.7	10.8	11.49
5	0	0	0	0	0	0	6	4	6	
25	237.9	239.9	244.1	262.7	264.6	269.6	10.4	10.3	10.4	10.39
0	0	0	0	0	0	0	2	0	5	

PROMEDIO	13.88
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3.44

Tabla 46. Resultados de la absorción en los cubos a base de metacaolín sin látex.

CUBOS DE METACAOLÍN CON LÁTEX										
NO	PESO SECO			PESO SATURADO			ABSORCIÓN			PROMEDIO
	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%	%	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
20	217.8	219.2	222.8	245.6	246.7	250.6	12.7	12.5	12.4	12.60
0	0	0	0	0	0	0	6	5	8	
22	231.1	231.4	234.0	257.8	258.1	260.8	11.5	11.5	11.4	11.51
5	0	0	0	0	0	0	5	4	5	
25	222.8	228.7	225.7	243.9	250.8	247.1	9.47	9.66	9.48	9.54
0	0	0	0	0	0	0				
27	230.3	230.3	228.9	252.0	252.0	250.8	9.42	9.42	9.57	9.47
5	0	0	0	0	0	0				
30	229.2	230.3	228.2	250.7	251.6	249.8	9.38	9.25	9.47	9.36
0	0	0	0	0	0	0				
32	233.0	229.8	236.0	253.0	249.2	256.5	8.58	8.44	8.69	8.57
5	0	0	0	0	0	0				
35	238.7	238.0	233.8	258.6	257.8	253.3	8.34	8.32	8.34	8.33
0	0	0	0	0	0	0				
PROMEDIO										9.91
DESVIACIÓN ESTÁNDAR										1.57

Tabla 47. Resultados de la absorción en los cubos a base de metacaolín con látex.

Una comparativa entre los recubrimientos a base de metacaolín con y sin látex se muestra en la figura 105.

RECUBRIMIENTO A BASE METACAOLÍN

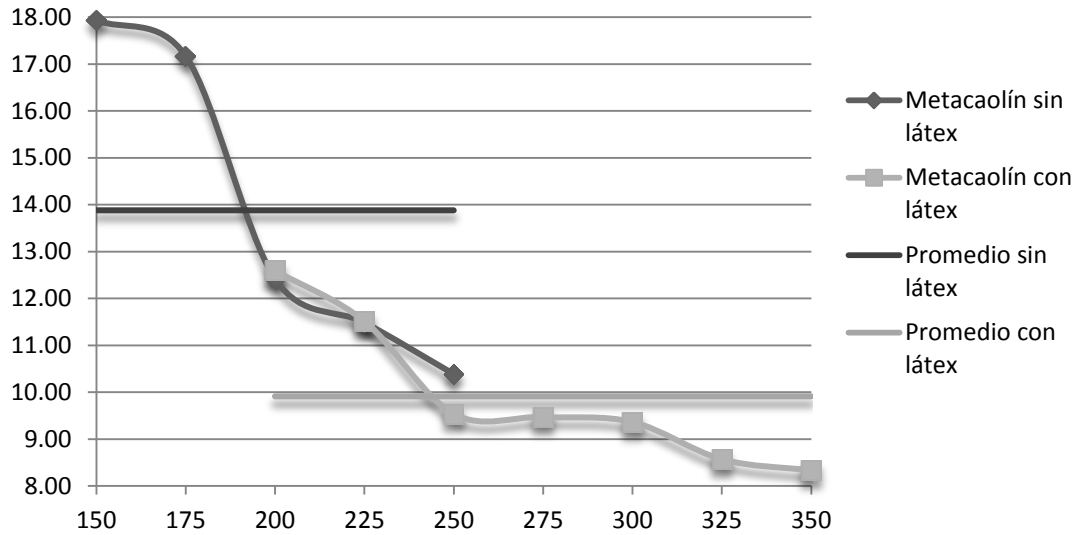


Figura 105. Comparativa de la absorción en los cubos a base de metacaolín.

De la comparativa se observa que los cubos sin látex presentan en promedio una mayor absorción en comparación con los cubos elaborados con látex lo cual nos indica que el látex disminuye la permeabilidad del recubrimiento.

En las tablas 48 y 49 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la absorción en los cubos elaborados con ceniza de la termoeléctrica sin látex y con látex respectivamente.

CUBOS DE CENIZA DE LA TERMOELÉCTRICA SIN LÁTEX										
NO	PESO SECO			PESO SATURADO			ABSORCIÓN			PROMEDIO
	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%	%	
20	242.7	250.6	233.0	260.3	268.4	249.8	7.2	7.1	7.2	7.19
0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	
22	254.2	248.9	247.2	271.9	265.6	264.1	6.9	6.7	6.8	6.84
5	0	0	0	0	0	0	6	1	4	
25	233.4	235.1	237.0	246.4	249.1	250.5	5.5	5.9	5.7	5.74

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

0	0	0	0	0	0	0	7	5	0	
27	274.3	270.3	258.7	291.7	287.1	275.4	6.3	6.2	6.4	6.34
5	0	0	0	0	0	0	4	2	6	
30	264.6	276.5	263.3	281.3	293.5	278.8	6.3	6.1	5.8	6.12
0	0	0	0	0	0	0	1	5	9	
32	257.1	282.7	252.5	272.3	299.6	267.4	5.9	5.9	5.9	5.93
5	0	0	0	0	0	0	1	8	0	
PROMEDIO										6.36
DESVIACIÓN ESTÁNDAR										0.56

Tabla 48. Resultados de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex.

CUBOS DE CENIZA DE LA TERMOELÉCTRICA CON LÁTEX										
NO	SECO			SATURADO			ABSORCIÓN			PROMEDIO
	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%	%	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
15	211.4	206.2	206.8	217.5	211.6	212.2	2.8	2.6	2.6	2.71
0	0	0	0	0	0	0	9	2	1	
17	207.8	215.4	208.5	213.5	221.7	213.9	2.7	2.9	2.5	2.75
5	0	0	0	0	0	0	4	2	9	
20	223.0	213.6	204.9	228.0	219.7	210.7	2.2	2.8	2.8	2.64
0	0	0	0	0	0	0	4	6	3	
22	233.5	234.3	222.2	245.4	246.0	232.4	5.1	4.9	4.5	4.89
5	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
25	252.4	246.6	253.6	259.6	255.3	261.8	2.8	3.5	3.2	3.20
0	0	0	0	0	0	0	5	3	3	
27	241.4	248.7	251.6	249.8	256.8	258.8	3.4	3.2	2.8	3.20
5	0	0	0	0	0	0	8	6	6	
30	247.1	248.2	230.6	254.2	255.5	237.9	2.8	2.9	3.1	2.99
0	0	0	0	0	0	0	7	4	7	
PROMEDIO										3.20
DESVIACIÓN ESTÁNDAR										0.78

Tabla 49. Resultados de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica con látex.

En la figura 106 se muestra una comparativa entre los cubos elaborados con ceniza de la termoeléctrica con látex y sin el mismo.

RECUBRIMIENTO A BASE DE CENIZA DE LA TERMOELÉCTRICA

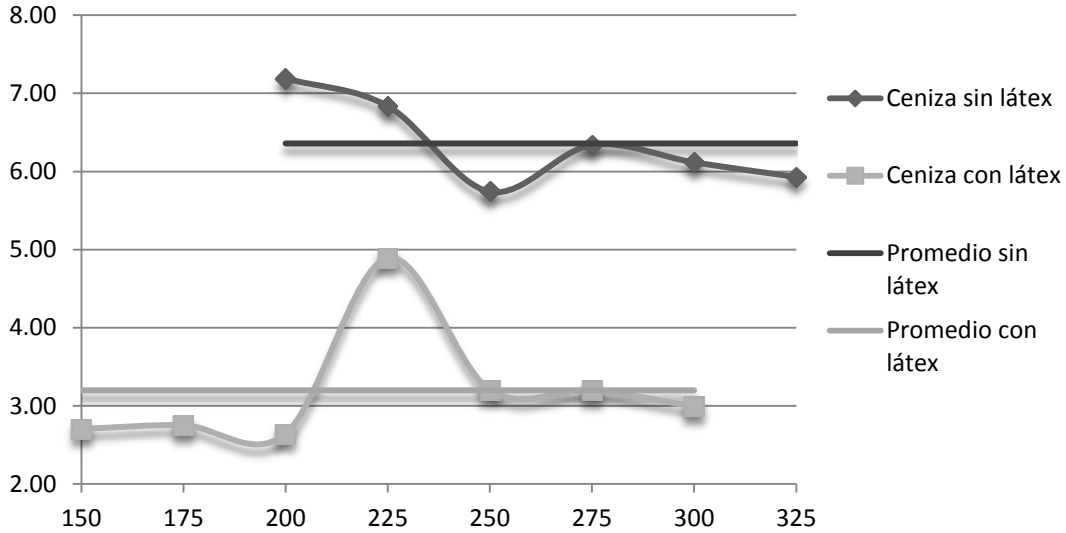


Figura 106. Comparativa de la absorción en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica.

De igual manera que en el caso de los cubos elaborados con metacaolín, para los cubos elaborados con ceniza de la termoeléctrica el látex disminuyó de manera apreciable la permeabilidad de los mismos, y se nota para este caso que también la ceniza disminuyó la absorción en un porcentaje considerable en comparación con los cubos elaborados con metacaolín.

4.4. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN RECUBRIMIENTOS.

Las tablas 50 y 51 muestran los resultados obtenidos de la prueba de resistividad eléctrica para cubos elaborados con metacaolín sin látex y con el mismo.

CUBOS DE METACAOLÍN SIN LÁTEX			
NO	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD	PROMEDIO

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm
	1	2	3	1	2	3	
150	70.00	70.00	80.00	350.00	350.00	400.00	366.67
175	80.00	70.00	80.00	400.00	350.00	400.00	383.33
200	90.00	90.00	120.00	450.00	450.00	600.00	500.00
225	100.00	100.00	100.00	500.00	500.00	500.00	500.00
250	90.00	110.00	90.00	450.00	550.00	450.00	483.33
PROMEDIO							494.44
DESVIACIÓN ESTÁNDAR							9.62

Tabla 50. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de metacaolín sin látex.

CUBOS DE METACAOLÍN CON LÁTEX							
NO	RESISTENCIA			RESISTIVIDAD			PROMEDIO
	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm
	1	2	3	1	2	3	
200	100.00	100.00	90.00	500.00	500.00	450.00	483.33
225	130.00	120.00	100.00	650.00	600.00	500.00	583.33
250	130.00	150.00	130.00	650.00	750.00	650.00	683.33
275	120.00	120.00	120.00	600.00	600.00	600.00	600.00
300	150.00	140.00	140.00	750.00	700.00	700.00	716.67
325	140.00	150.00	130.00	700.00	750.00	650.00	700.00
350	130.00	130.00	140.00	650.00	650.00	700.00	666.67
PROMEDIO							633.33
DESVIACIÓN ESTÁNDAR							82.78

Tabla 51. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de metacaolín con látex.

De estas tablas podemos apreciar que de acuerdo a la clasificación que propone la Red DURAR, todos se encuentran en un alto riesgo de corrosión debido a que todos los cubos están por debajo de los 10,000 Ohm-cm.

En la figura 107 se muestra una comparación entre los cubos a base de metacaolín con y sin látex.

RECUBRIMIENTO A BASE DE METACAOLÍN

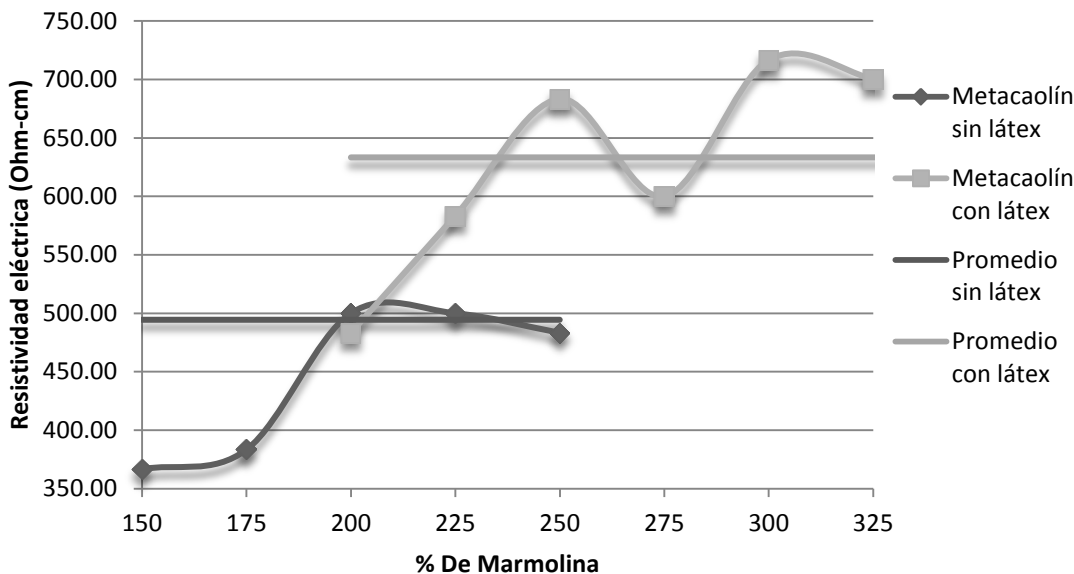


Figura 107. Comparativa de la resistividad eléctrica en los cubos a base de metacaolín.

De la figura anterior podemos observar que la presencia de látex, es importante ya que aumenta de manera significativa la resistividad eléctrica del material, al igual que aumenta la permeabilidad del mismo.

Pare el caso de los cubos elaborados con ceniza de la termoeléctrica los resultados obtenidos para los cubos sin látex se muestran en la tabla 52 y los resultados obtenidos para los cubos con látex se muestran en la tabla 53.

CUBOS DE CENIZA SIN LÁTEX							
NO	RESISTENCIA			RESISTIVIDAD			PROMEDIO
	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm	
	1	2	3	1	2	3	Ohm-cm
200	120.00	100.00	250.00	600.00	500.00	1,250.00	783.33
225	70.00	350.00	140.00	350.00	1,750.00	700.00	933.33
250	110.00	90.00	100.00	550.00	450.00	500.00	500.00
275	80.00	90.00	100.00	400.00	450.00	500.00	450.00
300	80.00	90.00	20.00	400.00	450.00	100.00	316.67
325	100.00	90.00	100.00	500.00	450.00	500.00	483.33
PROMEDIO							577.78
DESVIACIÓN ESTÁNDAR							231.58

Tabla 52. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de ceniza de la termoeléctrica sin látex.

CUBOS DE CENIZA CON LÁTEX							
NO	RESISTENCIA			RESISTIVIDAD			PROMEDIO
	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm-cm	Ohm-cm	Ohm-cm	
	1	2	3	1	2	3	
150	450.00	570.00	610.00	2,250.00	2,850.00	3,050.00	2,716.67
175	580.00	580.00	650.00	2,900.00	2,900.00	3,250.00	3,016.67
200	775.00	630.00	670.00	3,875.00	3,150.00	3,350.00	3,458.33
225	280.00	320.00	290.00	1,400.00	1,600.00	1,450.00	1,483.33
250	400.00	300.00	400.00	2,000.00	1,500.00	2,000.00	1,833.33
275	250.00	350.00	370.00	1,250.00	1,750.00	1,850.00	1,616.67
300	550.00	600.00	450.00	2,750.00	3,000.00	2,250.00	2,666.67
325	180.00	190.00	190.00	900.00	950.00	950.00	933.33
PROMEDIO							1,998.61
DESVIACIÓN ESTÁNDAR							911.11

Tabla 53. Resultados de la resistividad eléctrica en recubrimientos a base de ceniza de la termoeléctrica con látex.

En la figura 108 se muestra una comparación entre los cubos con presencia de látex y sin el mismo. Observándose un claro aumento de la resistividad en el caso de los cubos con látex lo cual nos indica que la presencia del mismo ayuda a aumentar la resistividad y por lo tanto también la permeabilidad del recubrimiento .

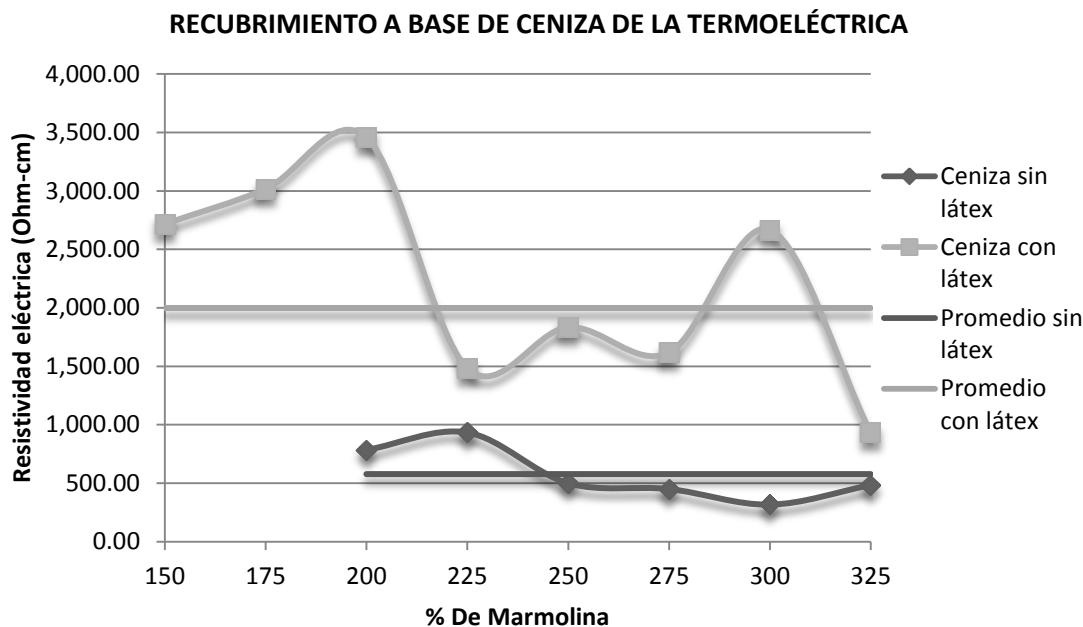


Figura 108. Comparativa de la resistividad eléctrica en los cubos a base de ceniza de la termoeléctrica.

4.5. INTEMPERISMO ACELERADO.

Los resultados obtenidos durante los ciclos de ataque por intemperismo acelerado con una solución saturada de sulfato de sodio se muestran a continuación.

4.5.1. ABSORCIÓN.

El porcentaje de absorción se determinó para cada uno de los ciclos de ataque y los resultados para el primer ciclo se muestran en la tabla 46, para el segundo ciclo tabla 47, para el tercer ciclo tabla 48, cuarto ciclo tabla 49 y quinto ciclo tabla 50. Un resumen comparativo en la figura 102 para los cilindros sin recubrimiento y la figura 103 para los cilindros recubiertos.

No.	1er. Ciclo					
	Peso saturado		Peso seco		Absorción	Absorción
	gr		gr		%	%
	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos
1	3,177	4,213	2,905	3,869	9.36	8.89
2	3,144	4,298	2,941	3,957	6.90	8.62
3	3,133	4,233	2,927	3,875	7.04	9.24
4	3,156	4,388	2,929	4,013	7.75	9.34

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

5	3,164	4,073	2,951	3,699	7.22	10.11
6	3,147	4,219	3,001	3,824	4.87	10.33
7	3,146	4,267	2,910	3,948	8.11	8.08
8	3,138	4,144	2,840	3,784	10.49	9.51
9	3,164	4,158	2,899	3,826	9.14	8.68
10	3,167	4,236	3,006	3,905	5.36	8.48
11	3,126	4,151	2,926	3,841	6.84	8.07
12	3,173	4,135	2,948	3,813	7.63	8.44
13	3,135	4,212	2,812	3,861	11.49	9.09
14	3,141	4,189	2,812	3,826	11.70	9.49
15	3,146	4,293	2,839	3,900	10.81	10.08
16	3,157	4,284	2,912	3,991	8.41	7.34
17	3,139	4,244	2,911	3,908	7.83	8.60
18	3,189	4,254	3,039	3,943	4.94	7.89
19	3,168	4,258	2,872	3,881	10.31	9.71
20	3,185	4,319	3,019	3,992	5.50	8.19
21	3,149	4,293	3,032	3,972	3.86	8.08
22	3,128	4,310	2,816	3,985	11.08	8.16
23	3,167	4,314	2,912	3,948	8.76	9.27
24	3,121	4,391	2,903	4,014	7.51	9.39
25	3,132	4,268	2,803	3,953	11.74	7.97
PROMEDIO					8.19	8.84
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					2.29	0.79

Tabla 54. Absorción que presentan los cilindros en el primer ciclo de ataque.

No.	2do. Ciclo					
	Peso saturado		Peso seco		Absorción	Absorción
	gr		gr		%	%
	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos
1	3,167	4,251	2,966	3,950	6.78	7.62
2	3,136	4,334	3,036	3,988	3.29	8.68
3	3,131	4,246	2,907	3,999	7.71	6.18
4	3,153	4,355	2,928	4,065	7.68	7.13
5	3,165	4,040	2,980	3,812	6.21	5.98
6	3,141	4,194	3,039	3,958	3.36	5.96
7	3,139	4,301	2,940	4,031	6.77	6.70
8	3,077	4,132	2,896	3,888	6.25	6.28
9	3,153	4,183	2,932	3,853	7.54	8.56
10	3,161	4,253	3,013	3,891	4.91	9.30
11	3,125	4,181	2,906	3,928	7.54	6.44
12	3,171	4,164	2,921	3,892	8.56	6.99
13	3,105	4,234	2,843	3,933	9.22	7.65
14	3,073	4,190	2,845	3,868	8.01	8.32
15	3,124	4,309	2,863	3,918	9.12	9.98
16	3,140	4,306	2,908	4,017	7.98	7.19
17	3,137	4,285	2,883	3,942	8.81	8.70
18	3,184	4,247	3,070	3,909	3.71	8.65
19	3,138	4,262	2,919	3,907	7.50	9.09
20	3,186	4,329	3,033	3,932	5.04	10.10
PROMEDIO					6.80	7.78
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					1.85	1.32

Tabla 55. Absorción que presentan los cilindros en el segundo ciclo de ataque.

No.	3er. Ciclo					
	Peso saturado		Peso seco		Absorción	Absorción
	gr		gr		%	%
	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos
1	3,170	4,248	2,950	3,943	7.46	7.74
2	3,090	4,347	2,872	4,066	7.59	6.91
3	3,137	4,216	2,834	3,997	10.69	5.48
4	3,158	4,403	2,867	4,140	10.15	6.35
5	3,150	4,075	2,877	3,838	9.49	6.18
6	3,096	4,234	2,832	3,981	9.32	6.36
7	3,132	4,227	2,874	4,029	8.98	4.91
8	3,129	4,165	2,884	3,932	8.50	5.93
9	3,161	4,198	2,936	3,913	7.66	7.28
10	3,135	4,254	2,927	3,988	7.11	6.67
11	3,127	4,158	2,934	3,942	6.58	5.48
12	3,173	4,139	2,909	3,912	9.08	5.80
13	3,154	4,219	2,868	3,969	9.97	6.30
14	3,160	4,210	2,870	3,845	10.10	9.49
15	3,161	4,308	2,880	4,050	9.76	6.37
PROMEDIO					8.83	6.48
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					1.27	1.10

Tabla 56. Absorción que presentan los cilindros en el tercer ciclo de ataque.

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

No.	4to. Ciclo					
	Peso saturado		Peso seco		Absorción	Absorción
	gr		gr		%	%
	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos
1	3,186	4,254	2,957	3,952	7.74	7.64
2	3,134	4,325	2,933	4,055	6.85	6.66
3	3,151	4,327	2,877	3,985	9.52	8.58
4	3,154	4,422	2,897	4,130	8.87	7.07
5	3,133	4,044	2,917	3,804	7.40	6.31
6	3,082	4,249	2,881	3,972	6.98	6.97
7	3,148	4,272	2,955	3,996	6.53	6.91
8	3,151	4,156	2,972	3,915	6.02	6.16
9	3,170	4,201	2,993	3,896	5.91	7.83
10	3,145	4,227	2,970	3,934	5.89	7.45
PROMEDIO					7.17	7.16
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					1.24	0.74

Tabla 57. Absorción que presentan los cilindros en el cuarto ciclo de ataque.

No.	5to. Ciclo					
	Peso saturado		Peso seco		Absorción	Absorción
	gr		gr		%	%
	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos	Sin Rec.	Recubiertos
1	3,188	4,183	3,005	3,550	6.09	17.83
2	3,107	4,296	2,929	4,000	6.08	7.40
3	3,148	4,228	2,892	3,952	8.85	6.98
4	3,169	4,136	2,921	3,673	8.49	12.61
5	3,160	4,024	2,953	3,468	7.01	16.03
PROMEDIO					7.30	12.17
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					1.31	4.92

Tabla 58. Absorción que presentan los cilindros en el quinto ciclo de ataque.

ABSORCIÓN EN CILINDROS SIN RECUBRIMIENTO

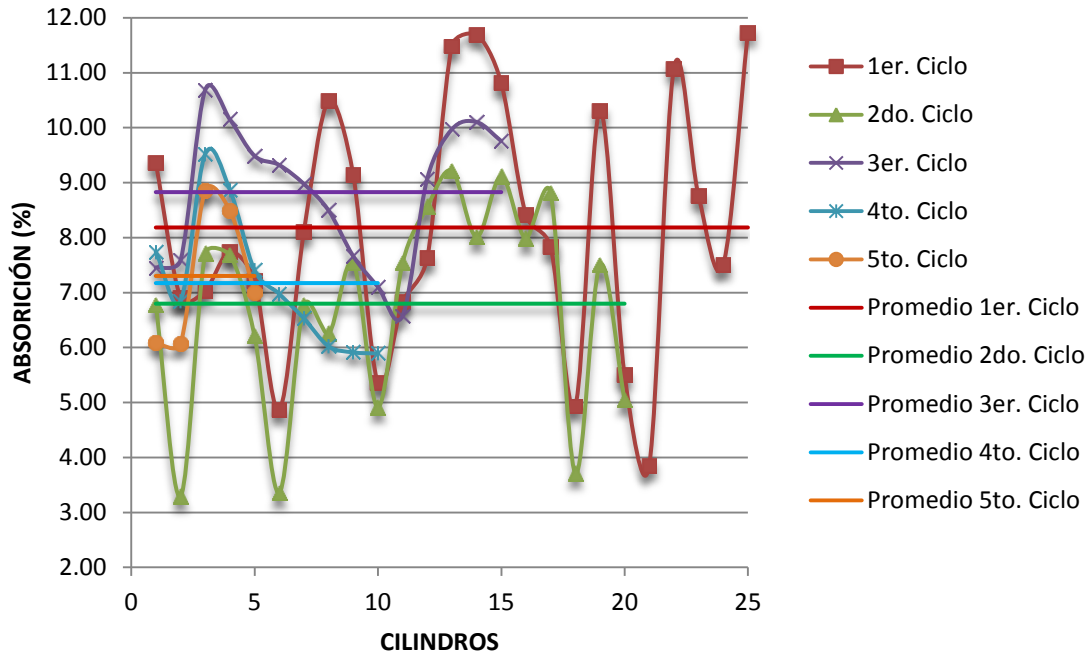


Figura 109. Absorción que presentan los cilindros a lo largo del ataque por sulfato de sodio en cilindros sin recubrimiento.

ABSORCIÓN EN CILINDROS CON RECUBRIMIENTO

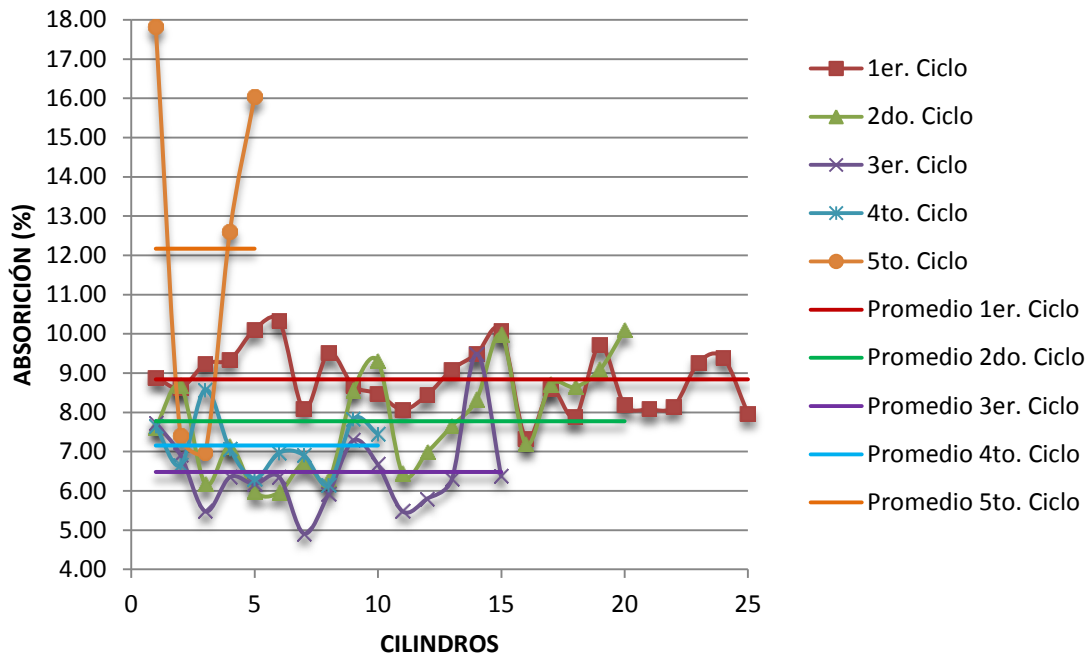


Figura 110. Absorción que presentan los cilindros a lo largo del ataque por sulfato de sodio en cilindros con recubrimiento.

En el primer ciclo de la prueba de absorción con la solución de sulfato de sodio anhidro, para los cilindros sin recubrimiento se tiene que el porcentaje menor fue de 3.86% y el mayor de 11.74% con un rango de variación de 7.88%. Para los cilindros recubiertos el porcentaje menor fue de 8.07% y el mayor de 10.11% con un rango de variación de 2.04%. Lo que indica que en estos últimos cilindros se tiene como promedio una mayor absorción en un menor rango de variación.

Para el segundo ciclo, para cilindros sin recubrimiento el porcentaje más bajo fue 3.29% y el más alto de 9.12% con un rango 5.83%; para cilindros recubiertos los porcentajes respectivos fueron de 5.98% y 10.10% con un rango de variación de 4.12%.

Para el tercer ciclo la menor absorción para cilindros sin recubrimiento fue de 7.11% y la mayor de 10.69% con un rango de variación de 3.58%; para cilindros recubiertos la menor absorción fue de 4.91% y la mayor de 7.74 con un rango de variación 2.83%.

Para el cuarto ciclo en cilindros sin recubrimiento el porcentaje más bajo de absorción fue de 5.89% y el más alto de 9.52% con un rango de variación de 3.63 %; para cilindros recubiertos el menor porcentaje fue de 6.16% y el mayor de 8.58% con un rango de variación de 2.42%.

En el quinto ciclo para los cilindros recubiertos el menor porcentaje de absorción fue del 6.08% y el mayor de 8.85% con un rango de variación de 2.77%; para los cilindros recubiertos el menor porcentaje fue de 6.98% y el mayor de 17.83% con un rango de variación 10.85%.

Observando los resultados anteriores se puede distinguir que en los dos primeros ciclos, los cilindros sin recubrimiento son menos absorbentes que los cilindros con recubrimiento; los cilindros recubiertos presentan; sin embargo, un menor rango de variación. En el tercer y cuarto ciclo se invierte, en relación a los porcentajes de absorción, el comportamiento antes descrito, ya que los cilindros recubiertos presentan menores porcentajes de absorción. En el último ciclo, se presenta un muy alto porcentaje de absorción en cilindros recubiertos.

De lo anterior se puede concluir que el recubrimiento es más absorbente que el sustrato o cilindro de concreto, en los dos primeros ciclos. Sin embargo el comportamiento de los cilindros recubiertos en el tercer y cuarto ciclo es de una menor absorción, indicando esto que ante ataques acelerados es más adecuada la respuesta cuantificada, lo que representa una menor penetración de iones despasivantes que puedan afectar a la matriz del concreto y al acero embebido. En el último ciclo, al haberse tenido desprendimientos notables del recubrimiento, se considera que el indicador obtenido del porcentaje de absorción no es representativo. Una consideración a lo escrito anteriormente es que el recubrimiento es un híbrido inorgánico-orgánico, siendo el látex de estireno butadieno el componente orgánico, el cual, al ser sometido a temperaturas de más de 105°C empieza a degradarse al cabo del quinto ciclo, modificándose y degradándose la función adherente e impermeabilizante para las cuales había sido añadido.

Convendrá en estudios posteriores, hacer estudios sobre el cambio en la microestructura debido al cambio de temperatura, ya que al ser un polímero orgánico se modifican las cadenas poliméricas y su proceso de polimerización.

4.5.2. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

La resistividad eléctrica se determinó para cada ciclo de ataque por una solución saturada de sulfato de sodio.

Los resultados para cada ciclo se muestran en las tablas 51, 52, 53, 54, 55 y 56.

No.	Saturado en agua			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm – Cm	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	6,200	1,000	24,347	3,927
2	6,000	1,100	23,562	4,320
3	5,400	820	21,206	3,220
4	5,500	1,100	21,598	4,320
5	5,700	1,200	22,384	4,712
6	6,400	1,000	25,133	3,927
7	6,800	880	26,704	3,456
8	6,100	960	23,955	3,770
9	6,200	990	24,347	3,888
10	6,000	1,100	23,562	4,320
11	6,100	750	23,955	2,945
12	6,200	1,100	24,347	4,320
13	5,900	900	23,169	3,534
14	5,700	980	22,384	3,848
15	5,600	990	21,991	3,888
16	6,200	940	24,347	3,691
17	5,100	820	20,028	3,220
18	6,300	940	24,740	3,691
19	6,600	980	25,918	3,848
20	5,700	980	22,384	3,848
21	5,600	860	21,991	3,377
22	5,300	860	20,813	3,377
23	6,000	880	23,562	3,456
24	5,600	960	21,991	3,770
25	5,300	840	20,813	3,299
26	5,600	910	21,991	3,574
27	5,100	1,200	20,028	4,712
28	5,500	830	21,598	3,259
29	5,000	960	19,635	3,770
30	6,200	800	24,347	3,142
31	4,900	1,100	19,242	4,320

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

32	5,000	1,200	19,635	4,712
33	5,200	910	20,420	3,574
34	5,100	1,100	20,028	4,320
35	4,600	1,100	18,064	4,320
PROMEDIO			22,406	3,819
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			2,069	473

Tabla 59. Resistividad en cilindros saturados en agua.

No.	1er. Ciclo			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm - Cm	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	4,000	330	15,708	1,296
2	3,300	340	12,959	1,335
3	3,200	340	12,566	1,335
4	3,000	340	11,781	1,335
5	3,600	320	14,137	1,257
6	3,200	380	12,566	1,492
7	3,100	310	12,174	1,217
8	4,100	330	16,101	1,296
9	3,300	280	12,959	1,100
10	3,000	310	11,781	1,217
11	3,700	310	14,530	1,217
12	3,400	320	13,352	1,257
13	3,300	290	12,959	1,139
14	3,800	330	14,923	1,296
15	3,200	250	12,566	982
16	3,400	360	13,352	1,414
17	3,500	310	13,744	1,217
18	3,800	330	14,923	1,296
19	3,000	340	11,781	1,335
20	4,200	300	16,493	1,178
21	3,500	290	13,744	1,139
22	3,100	350	12,174	1,374
23	3,000	300	11,781	1,178
24	3,800	320	14,923	1,257
25	3,600	310	14,137	1,217
PROMEDIO			13,525	1,255
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			1,407	107

Tabla 60. Resistividad que presentan los cilindros en el primer ciclo de ataque.

No.	2do. Ciclo			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm - Cm	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	490	210	1,924	825
2	690	230	2,710	903
3	570	200	2,238	785
4	490	260	1,924	1,021
5	610	310	2,395	1,217
6	1,100	230	4,320	903
7	570	180	2,238	707
8	660	200	2,592	785
9	450	210	1,767	825
10	990	190	3,888	746
11	620	190	2,435	746
12	520	180	2,042	707
13	440	190	1,728	746
14	580	200	2,278	785
15	430	170	1,689	668
16	590	230	2,317	903
17	540	180	2,121	707
18	1,200	220	4,712	864
19	470	200	1,846	785
20	790	210	3,102	825
	PROMEDIO		2,513	823
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR		859	126

Tabla 61. Resistividad que presentan los cilindros en el segundo ciclo de ataque.

No.	3er. Ciclo			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm - m	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	1,100	330	4,320	1,296
2	3,000	270	11,781	1,060
3	690	400	2,710	1,571
4	710	340	2,788	1,335
5	1,200	400	4,712	1,571
6	3,000	310	11,781	1,217

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES.

7	1,100	300	4,320	1,178
8	720	290	2,827	1,139
9	740	320	2,906	1,257
10	1,700	250	6,676	982
11	740	350	2,906	1,374
12	550	330	2,160	1,296
13	440	310	1,728	1,217
14	350	240	1,374	942
15	370	230	1,453	903
PROMEDIO			4,296	1,223
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			3,343	201

Tabla 62. Resistividad que presentan los cilindros en el tercer ciclo de ataque.

No.	4to. Ciclo			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm - m	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	770	380	3,024	1,492
2	590	490	2,317	1,924
3	380	440	1,492	1,728
4	460	420	1,806	1,649
5	660	470	2,592	1,846
6	810	370	3,181	1,453
7	510	350	2,003	1,374
8	480	380	1,885	1,492
9	580	370	2,278	1,453
10	930	370	3,652	1,453
PROMEDIO			2,423	1,587
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			685	189

Tabla 63. Resistividad que presentan los cilindros en el cuarto ciclo de ataque.

No.	5to. Ciclo			
	Resistencia		Resistividad	
	ohm		ohm - m	
	Sin Rec.	Rec.	Sin Rec.	Rec.
1	740	280	2,906	1,100
2	1,200	330	4,712	1,296
3	430	350	1,689	1,374

4	470	370	1,846	1,453
5	600	340	2,356	1,335
PROMEDIO			2,702	1,312
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			1,221	132

Tabla 64. Resistividad que presentan los cilindros en el quinto ciclo de ataque.

En la figura 104 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los cilindros sin recubrimiento para cada ciclo de ataque.

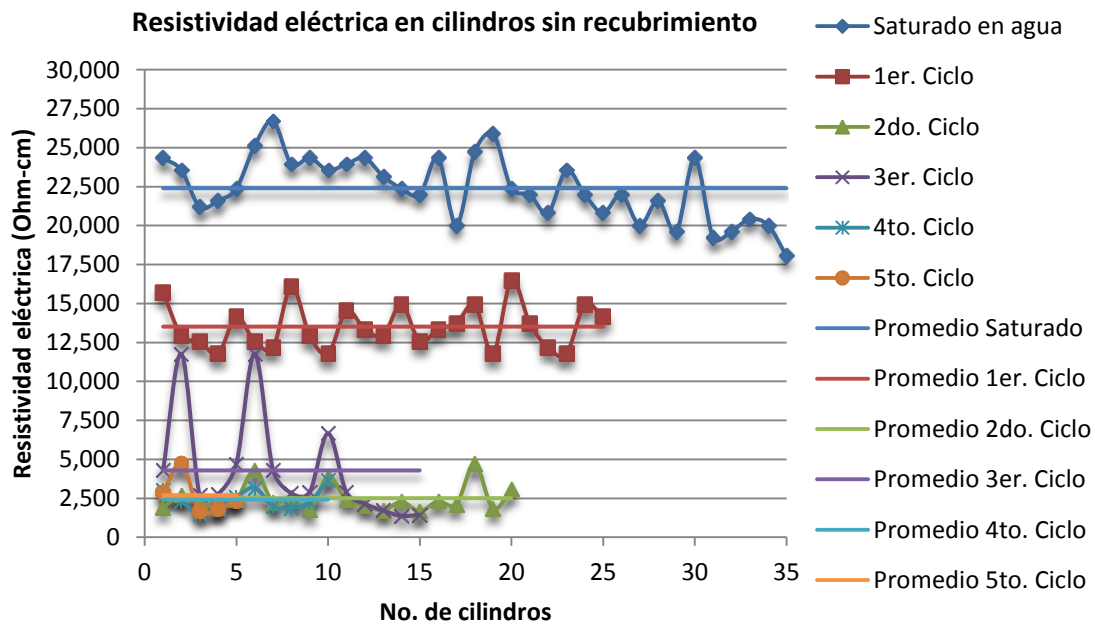


Figura 111. Resistividad que presentan los cilindros sin recubrimiento en los cinco ciclos de ataque.

La figura 105 muestra un resumen de los resultados obtenidos con los cilindros recubiertos para cada ciclo de ataque.

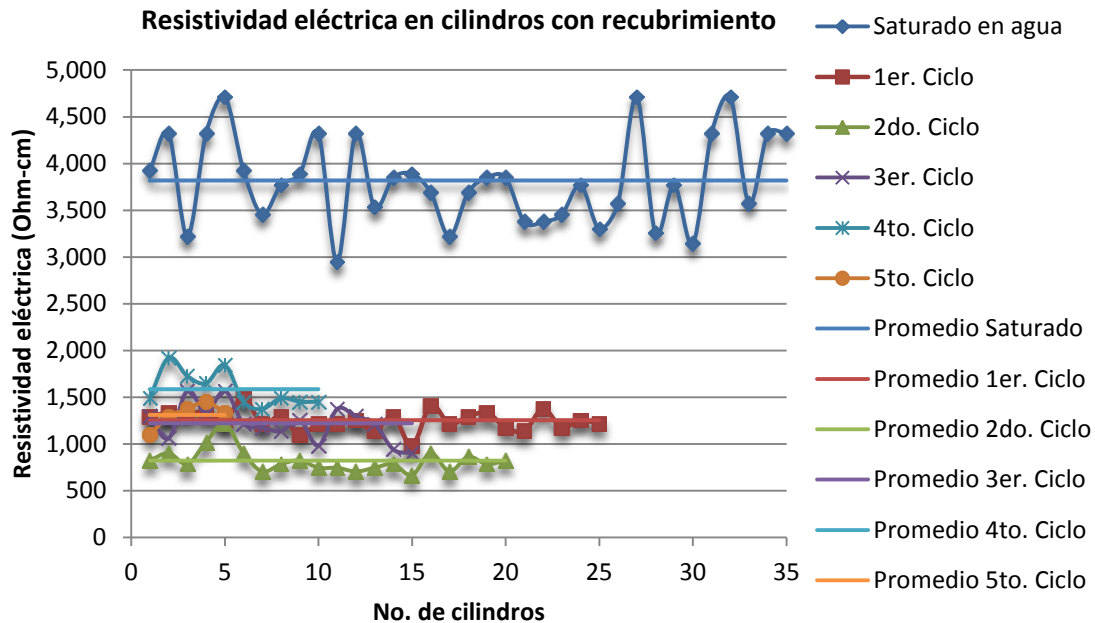


Figura 112. Resistividad que presentan los cilindros con recubrimiento en los cinco ciclos de ataque.

La resistividad eléctrica es lo opuesto a la conductividad de electrones, por lo que mientras más alta sea esta, se tendrá un menor riesgo de corrosión en las estructuras de concreto.

Se experimentó con cilindros recubiertos y sin recubrir, saturados con agua y después desde uno hasta cinco ciclos con sulfato de sodio anhidro, con la finalidad de observar el riesgo de corrosión correspondiente.

De los resultados de cilindros saturados en agua sin recubrimiento y de acuerdo al manual de la Red DURAR, se tiene un bajo riesgo de corrosión, ya que el promedio de resistividad en 35 cilindros fue de 22,406 Ohm-cm y, para cilindros recubiertos su promedio fue de 3,819 Ohm-cm lo que indica un alto riesgo de corrosión.

Para el primer ciclo el promedio de resistividad para 25 cilindros sin recubrimiento fue de 13,525 Ohm-cm, lo que indica un riesgo moderado de corrosión. Para cilindros recubiertos el promedio fue de 1,255 Ohm-cm, lo que indica alto riesgo de corrosión. Para el segundo ciclo, en los 20 cilindros analizados, sin recubrimiento se tiene un promedio de 2,513 Ohm-cm y 823 Ohm-cm respectivamente, para cilindros sin recubrimiento y recubiertos; ambos con alto riesgo de corrosión. Para el tercer ciclo en los 15 cilindros analizados se tuvo un promedio de 4,296 Ohm-cm y 1,223 Ohm-cm para cilindros sin recubrimiento y recubrimiento respectivamente; ambos con alto riesgo de corrosión. En el cuarto ciclo en los 10

cilindros analizados se tuvo un promedio de 2,423 Ohm.cm y 1,587 Ohm-cm para cilindros sin recubrimiento; ambos con un alto riesgo de corrosión. Para el quinto ciclo en los 5 cilindros analizados, para cada caso se tuvo un promedio de 2,702 Ohm-cm y 1,312 Ohm-cm para cilindros sin recubrimiento y recubiertos respectivamente; ambos en alto riesgo de corrosión.

De los resultados obtenidos se puede comentar que la resistividad eléctrica para cilindros saturados sin recubrimiento, antes de ser sometidos al ataque por una solución de sulfato de sodio anhidro grado industrial, se tuvo un riesgo moderado de corrosión al ser mayor de 10,000 Ohm-cm la resistividad, y para los cilindros recubiertos se tuvo una resistividad mucho menor a los 10,000 Ohm-cm lo que indica un alto riesgo de corrosión. En el primer ciclo, para cilindros sin recubrimiento la resistividad promedio indica un riesgo moderado de corrosión, y un alto riesgo de corrosión para cilindros recubiertos la cual disminuyó del orden de un tercio la resistividad de cilindros saturados en agua. Para el segundo ciclo en cilindros recubiertos la resistividad disminuyó drásticamente del orden de una quinta parte de la resistividad del ciclo anterior presentándose ahora un alto riesgo de corrosión. Para cilindros recubiertos la resistividad bajó al orden de dos tercios respecto al ciclo anterior continuando con un alto riesgo de corrosión. Para el tercer ciclo la resistividad aumentó del orden del doble respecto al ciclo anterior, en cilindros sin recubrir, manteniéndose un alto riesgo de corrosión, y también aumentó en un orden de tres medios con respecto al ciclo en cilindros recubiertos, manteniéndose en un alto riesgo de corrosión. En el cuarto ciclo para cilindros recubiertos la resistividad promedio vuelve a bajar en un orden de la mitad del ciclo anterior, y para cilindros recubiertos esta se incrementa en el orden de una cuarta parte respecto al ciclo anterior; sin embargo ambos resultados presentan alto riesgo de corrosión. En el quinto y último ciclo la resistividad para cilindros recubiertos aumenta ligeramente y para cilindros recubiertos disminuye ligeramente; ambos resultados indican alta probabilidad de riesgo de corrosión en el material.

Analizando lo anteriormente escrito, puede deducirse que el recubrimiento, desde el punto de vista de la resistividad eléctrica, hace parecer que el concreto tuviera un mayor riesgo de corrosión. Sin embargo al estarse desprendiendo la capa de recubrimiento con los ciclos, probablemente la medida no sea adecuadamente representativa. Sin embargo el recubrimiento si absorbe una mayor cantidad de agua y de solución que el concreto solo, por lo que es necesario disminuir la capacidad de absorción del recubrimiento. Además la medida de resistividad eléctrica debe complementarse con otros estudios; esto para poder tener un mejor marco de referencia.

4.5.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Las tablas 65, 66, 67, 68 y 69 se muestran los resultados obtenidos de las compresiones en cada ciclo de ataque y la figura 113 un resumen de los resultados obtenidos.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO			CON RECUBRIMIENTO		
	NO	CARGA Kg	ESFUERZO Kg/cm ²	NO	CARGA Kg	ESFUERZO Kg/cm ²
1er.	22	7,050.00	90	24	13,750.00	140
1er.	23	8,700.00	111	25	16,625.00	152
1er.	24	10,450.00	133	21	17,500.00	163
1er.	25	11,700.00	149	22	17,500.00	171
1er.	21	13,300.00	169	23	18,500.00	188
	PROMEDIO	10,240	130		16,775	163
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2,454	31		1,817	18

Tabla 65. Resistencia a la compresión durante el primer ciclo de intemperismo acelerado.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO			CON RECUBRIMIENTO		
	NO	CARGA Kg	ESFUERZO Kg/cm ²	NO	CARGA Kg	ESFUERZO Kg/cm ²
2do.	18	9,500.00	121	18	15,750.00	160
2do.	20	10,600.00	135	20	16,000.00	168
2do.	19	11,050.00	141	19	18,500.00	169
2do.	16	11,200.00	143	16	17,375.00	176
2do.	17	12,450.00	159	17	18,250.00	185
	PROMEDIO	10,960	140		17,175	172
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,066	14		1,261	10

Tabla 66. Resistencia a la compresión durante el segundo ciclo de intemperismo acelerado.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO			CON RECUBRIMIENTO		
	NO	CARGA	ESFUERZO	NO	CARGA	ESFUERZO
		Kg	Kg/cm ²		Kg	Kg/cm ²
3er.	14	8,300.00	106	13	15,750.00	166
3er.	12	8,850.00	113	12	17,750.00	180
3er.	13	9,650.00	123	15	17,625.00	189
3er.	15	11,650.00	148	11	21,000.00	202
3er.	11	12,950.00	165	14	20,250.00	206
	PROMEDIO	10,280	131		18,475	188
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,960	25		2,133	16

Tabla 67. Resistencia a la compresión durante el tercer ciclo de intemperismo acelerado.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO			CON RECUBRIMIENTO		
	NO	CARGA	ESFUERZO	NO	CARGA	ESFUERZO
		Kg	Kg/cm ²		Kg	Kg/cm ²
4to.	7	8,850.00	113	10	14,000.00	142
4to.	9	9,150.00	117	6	14,125.00	149
4to.	6	9,650.00	123	7	14,500.00	153
4to.	8	12,900.00	164	9	16,000.00	175
4to.	10	13,150.00	167	8	18,875.00	195
	PROMEDIO	10,740	137		15,500	163
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2,107	27		2,048	22

Tabla 68. Resistencia a la compresión durante el cuarto ciclo de intemperismo acelerado.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO			CON RECUBRIMIENTO		
	NO	CARGA	ESFUERZO	NO	CARGA	ESFUERZO
		Kg	Kg/cm ²		Kg	Kg/cm ²
5to.	4	9,750.00	124	4	18,500.00	236
5to.	3	10,700.00	136	5	19,500.00	248
5to.	1	10,800.00	138	1	21,000.00	267
5to.	2	11,500.00	146	2	21,500.00	274
5to.	5	11,650.00	148	3	23,500.00	299
	PROMEDIO	10,880	139		20,800	265
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	757	10		1,924	24

Tabla 69. Resistencia a la compresión durante el quinto ciclo de intemperismo acelerado.

En la figura 113 se muestra el resumen de los resultados obtenidos para los cilindros con el recubrimiento a base de metacaolín, en dicha figura se observa que el recubrimiento hace un aporte apreciable a la resistencia de los cilindros y también se muestra que dicha resistencia es mayor en todos los ciclos siendo notable el último ciclo.

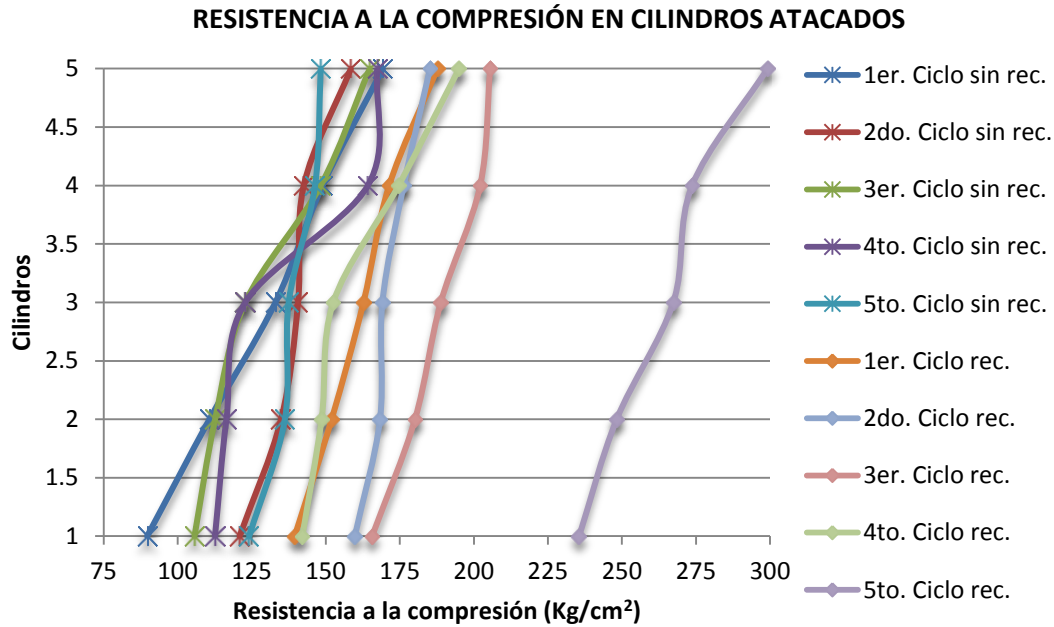


Figura 113. Resultados de la resistencia a la compresión durante los cinco ciclos de intemperismo acelerado.

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.

En cuanto a los materiales base para la elaboración del recubrimiento se concluye que los materiales con un mejor comportamiento fueron los siguientes y en el siguiente orden:

- Metacaolín.
- Ceniza de la termoeléctrica Plutarco Elías Calles.
- Polvo de grava triturada de la trituradora SUPRA.

Las soluciones utilizadas fueron hidróxido de potasio e hidróxido de sodio de las cuales se tuvo un mejor comportamiento en cuanto a polimerización y endurecimiento la solución de hidróxido de potasio; adicionalmente los recubrimientos elaborados con hidróxido de sodio no resistieron a una saturación de agua, durante 24 h.

En cuanto a la prueba Pull-off se concluyó que el adicionarle látex estireno butadieno aumento significativamente la resistencia a la tensión con los materiales a base de metacaolín y ceniza de la termoeléctrica.

De acuerdo a los resultados de esta prueba se sugiere continuar la investigación con el recubrimiento elaborado con metacaolín, una solución de hidróxido de potasio en una alta concentración, en un 200% de marmolina con respecto al recubrimiento base, un 20% de Microesfera y un 30% de látex estireno butadieno. Ya que esta mezcla fue la que tuvo una mayor resistencia a la tensión en la prueba pull-off.

En base a los resultados de la prueba de absorción, se observó, en el caso de los cubos elaborados a base de metacaolín tiene una absorción significativamente mayor que los cubos que fueron elaborados con la ceniza de la termoeléctrica. De manera adicional se observa que los cubos con ambos materiales, a los cuales se les adicionó una parte orgánica la cual fue aportada por el látex, esté disminuyó la absorción de manera apreciable para ambos casos. Por lo anterior se sugiere un estudio más completo de las propiedades del látex estireno butadieno, utilizado en esta investigación.

Para la prueba de resistividad eléctrica en el caso de los cubos elaborados, se observa que todos los cubos de acuerdo a los criterios de la Red DURAR, están en un alto riesgo de corrosión, pero también se concluye que dicha prueba no es

un criterio contundente para asegurar dicha observación. Para lo cual sería necesario hacer pruebas complementarias para evaluar de manera más completa dicho recubrimiento.

En cuanto al ataque por intemperismo acelerado con sulfato de sodio anhidro, en cilindros recubiertos con un material a base de metacaolín y una alta concentración de hidróxido de potasio. Se observa que el recubrimiento aparentemente es más absorbente que los cilindros sin recubrimiento, pero con el avance del ataque la absorción se vio disminuida en los cilindros recubiertos.

Como sugerencia para continuar con esta investigación, se hace la recomendación de trabajar con una solución de hidróxido de potasio, y una combinación en diferentes porcentajes de metacaolín por ser el material que mostro un mejor desempeño a lo largo de esta investigación, con otros materiales como la ceniza de la termoeléctrica y el polvo de grava triturada para tratar de disminuir la absorción y así mejorar el recubrimiento con el fin de que sea utilizado como barrera física, para impedir la penetración de agentes agresivos para las estructuras de concreto. Adicionalmente y como complemento a esta investigación se recomienda evaluar los recubrimientos aquí elaborados con una prueba de penetración rápida de cloruros para determinar si el recubrimiento en realidad impide la penetración de los iones cloruro en la estructura de concreto reforzado.

6. REFERENCIAS.

REFERENCIAS CONCRETOS

Lamond Joseph F. and Pielert James H. **Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials**. ASTM Stock. STP169D. 2006.

Sánchez de Guzmán Diego. **Tecnología del concreto y propiedades**. Editado por Asocreto 1997.

Nilson Arthur H. **Diseño de estructuras de concreto**. McGraw-Hill 1999. ISBN: 958-600-953-X. Colombia.

Neville A. M. y Brooks J. J. **Tecnología del concreto**. ITrillas, 1998. ISBN 9682494614.

Yakut Ahmet, **REINFORCE CONCRETE FRAME CONSTRUCTION (PAPER)**, Middle East Technical University, turkey. 2011.

McCormac Jack C., Nelson James K. **Design of reinforced concrete ACI 318-05 Code Edition**, Seventh edition. Library of congress cataloging-publication data. 2005. ISBN 0-471-76132-X

Mosley Bill, Bungey John and Hulse Ray. **Reinforced concrete desing to eurocode 2**, Sixth edition. Palgrave Macmillan, 2007. ISBN 0-230-50071-4

Newman John, Seng Choo Ban. **Advanced Concrete Technology: constituent materials**. Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-5103-2

Del Valle Moreno Angélica, Pérez López Tezozómoc, Martínez Madrid Miguel. **El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado**. Sanfandila, Querétaro. 2001. ISSN 0188-7297.

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.

López Celis Raquel, Pérez Quiroz José Trinidad, Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel, Martínez Molina Wilfrido, Ariza Aguilar Luis Eduardo, Zamudio Cíntora Emilio, Genescá Llongueras Joan, Valdez Salas Benjamín. **Durabilidad del concreto expuesto a diferentes ambientes urbanos de México**. Sanfandila, Querétaro.2006. ISSN 0188-7297.

González Sandoval Federico. **Manual de supervisión de obras de concreto.** Limusa, México, 2004. ISBN 968-18-5907-3

Li Zongjin. Acid-free paper, **Advanced concrete technology.** Canada 2011. ISBN: 978-0.470-43743-8

Ibarra Fierro German, **Pavimentos de concreto hidráulico para carreteras.**

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

Amercian Concrete Institute, **Guide to Durable Concrete. Reported by ACI Committee 201.** 2008.

D.W.S. Ho. **The civil engineering handbook.** CRC Press LLC, 2003.

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.

Thomas M. D. A. and Folliard K. J. **Durability of concrete and cement composites. Chaper 7.** England, 2007. ISBN: 978-0-8493-9129-3.

Durability of concrete structures investigation, repair, protection. E & FN Spon. Chapman & jall, 2003. London, UK. ISBN: 0-419-15620-8.

Professor Colin Bailey, **One Stop Shop in Structural Fire Engineering,** University of Manchester. 2011.

Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Red iberoamericana XV.B. "DURAR" (Durabilidad de la Armadura). **Manual de inspección, evaluación y diagnostico en estructuras de hormigón armado.** Tercera edición, agosto de 2000. ISBN 980-296-541-3.

REFERENCIAS CORROSIÓN

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.

Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Red iberoamericana XV.B. "DURAR" (Durabilidad de la Armadura). **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras de hormigón armado.** Tercera edición, agosto de 2000. ISBN 980-296-541-3.

Torres Acosta Andrés Antonio, Pérez Acosta José Trinidad, Augusto Ramírez Rentarúa Jorge, Martínez Madrid Miguel. **Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se aplican esfuerzos residuales.** Publicación técnica 287, 2006. ISSN 0188-7297. IMT. Pag. 13-14

<http://www.imt.mx/siget>

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.

Ávila Javier, Genescá Joan. **Más allá de la herrumbre.** Fondo de cultura económica. Tercera edición, 2002. México, D. F. ISBN 968-16-2396-7. Páginas: 3-20.

Bentur Arnor, Diamond Sidney y Berke S. Neal. **Steel Corrosion in concrete: Fundamentals and civil engineering practice.** Taylor & Francis Group. Primera Edición, 1997. ISBN 0 419 22530 7. Páginas: 7-30.

Castro Borges Pedro, Castillo René M., Carpio Juan J., Genescá Juan, Helene Paulo, López Waltter, Pazini Enio J., Sanjuán Miguel A., Véleva Lucién. **Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, Inspección, Vida útil y Reparaciones.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. Primera edición, 1998. ISBN 968-464-085-4. Páginas: 1-30.

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.

REFERENCIAS GEOPOLÍMEROS

Davidovits Joseph, **Geopolymer, chemistry and applications,** Geopolymer institute, Saint-Quentin, 2da. Edición, 2008. ISBN 9782951482012

Davidovits Joseph, **Properties of geopolymer cements**, Geopolymer institute, Saint-Quentin, France, 1994.

Davidovits Joseph, **30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market Trends and potential Breakthroughs**. Geopolymer 2002 conference, Melbourne, Australia. 2002.

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.

Van Jaarseveld J.G.S., Van Deventer J. S. J. and Lorenzen L.. **The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications**. Department of Chemical Engineering, The University of Melbourne, Parkville. 1997.

Xu, H, and Deventer, J.S.J.V. **Geopolymerisation multiple. Mineral engineering**. Vol. 15, 2002. Páginas; 1131-1139.

Muntingh Yolandi. **Durability and diffusive behavior evaluation of geopolymeric material**. Department of process Engineering. University of Stellenbosch. 2006. Página: 16.

Wallah S. E. y Rangan B. V. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties**. Research Report GC 2, Faculty of Engineering, Curtin universite of technology Perth, Australia. 2006.

Lloyd Provis John. **Modelling the formation of geopolymers**. Departamento of chemical and biomolecular engineering. The university of Melbourne. March, 2006.

Obonyo Esther, Kamseu Elie, Melo Uphie C y Leonelli Cristina. **Advancing the use of secondary inputs in geopolymer blinders for sustainable cementitious composites: A review**. Open Access, sustainability. ISSN 2071-1050. 2011.

Rodriguez Erich, Mejía de Gutierrez Ruby, Bernal Susan y Gordillo Marisol. **Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza**. Trabajos presentados

en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET. Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008.

Duxson P. Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A., Van Deventer J. S. J. **geopolymer technology: the current state of the art**. Advances in geopolymer science & technology. Springer Science+Business Media, LLC 2006.

Komnistas Kostas y Zaharaki Dimitra. **Geopolimerization: A review and prospects for minerals industry**. ScienceDirect. Minerals engineering. Greece 2007.

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.

Bankowski P. Zou L. Hodges R. **using inorganic polymer to reduce leach rates of metals from Brown coal flya ash**. Elsevier. Mineral engineering. Australia 2003.

Cheng T. W. Chiu J. P. **fire- resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag**. Pergamon. Minerals engineering. Taiwan 2002.

Dimas D. Giannopoulou I.Panias D. **polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology**. Springer Science+business Media, 2009.

Li Zongjin, Ding Zhu y Zhang Yunsheng. **Development od sustainable cementitious materials**. Department of civil engineering, Hong Kong University of science and technology, 2004.

Sanjay Kumar, **Geopolymers: New Generation Materials by Mimicking Rock Formation**. National Metallurgical Laboratory, Council of Scientific & Industrial Research, Jamshedpur 831007, India. Lastupdatedon 31 July 2008

REFERENCIAS ASTM

Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials By Direct Tension (Pull-off Method). ASTM C 1583 – 04.

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C 39/C 39 M – 03.

REFERENCIAS EXTRAS:

Austin Simon, Robins Peter, Pan Youguang. **Tensile bond testing of concrete repairs**. Structures and Materials Research Group. Loughborough , UK, 1995.