



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería civil

Tesis profesional

“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

Para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Presenta:

Diana Laura Charco Angel

Director:

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Codirector interno:

M.I.T. Jorge Alberto Pacheco Segovia

Codirector externo:

Dr. J. Trinidad Pérez Quiroz

Morelia, Michoacán, noviembre 2021



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



RESUMEN

Se diseñó una mezcla testigo de concreto, por el método ACI, con una relación agua-cemento de 0.51 en masa, con cemento Portland CPC 30R-RS y agregados pétreos que previamente pasaron por pruebas de calidad siguiendo recomendaciones de las normas vigentes. La adición de fibras sintéticas como lo son las fibras de PET y polipropileno en el concreto hidráulico ayudan a disminuir la contracción plástica, aumenta la resistencia al agrietamiento y resistencia al impacto, así como la tenacidad del material. La contaminación ambiental es una realidad que a todos nos afecta se estima que se han producido 8.3 millones de toneladas de plástico desde principios de la década de 1950 y alrededor del 60% de éstos han terminado en un tiradero o en el medio ambiente (United Nations Environmental Programme, 2018), pero en la actualidad se está creando una cultura de reciclaje y con el propósito de reducir el impacto de esta problemática se propuso elaborar fibra de PET a partir de botellas de bebidas posconsumo, con características específicas para mayor adherencia entre la fibra y la matriz cementante, buscando mejorar las características del concreto, como lo son las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto.

Se elaboraron cuatro mezclas diferentes a la mezcla testigo, adicionadas con 0.4%, 0.8% y 1.2% de fibras de PET y una más adicionada con fibras de PET y polipropileno en relación a la masa del cemento. Posterior a esto se elaboraron especímenes cilíndricos de cada una de las mezclas para evaluar la resistencia a la compresión a edades de 7, 14, 28, 60 y 90 días, también se realizaron especímenes para realizar pruebas de durabilidad como lo son; carbonatación, ataque por sulfatos, porosidad total y efectiva a una edad de 28 días. La adición de fibras de PET y polipropileno tiene una ligera mejoría en la durabilidad del concreto y en la resistencia mecánica

Palabras claves: Concreto hidráulico, durabilidad, Polietileno Tereftalato y fibras.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



ABSTRACT

In this research, a control concrete mix was designed by the ACI method, with a mass water-cement ratio of 0.51, with Portland cement CPC 30R-RS and stone aggregates that had previously undergone quality tests according to the recommendations of current standards. The addition of synthetic fibers such as PET and polypropylene fibers in hydraulic concrete helps reduce plastic shrinkage, increases crack resistance and impact resistance, as well as the material's toughness.

Environmental pollution is a reality that affects us all; it is estimated that 8.3 million tons of plastic since the early 1950s and about 60% of these have ended up in a landfill or in the environment (United Nations Environmental Programme, 2018), but currently a recycling culture is being created, with the purpose of reducing the impact of this problem it was proposed to elaborate PET fiber from post-consumer beverage bottles, with specific characteristics for greater adhesion between the fiber and the cementitious matrix, seeking to improve the characteristics of the concrete, such as mechanical properties and durability.

Four mixtures different from the control mixture were prepared, with additions of 0.4%, 0.8% and 1.2% of PET fibers, and another one with additions of PET and polypropylene fibers, in relation to the mass of the cement. Afterwards, cylindrical specimens of each of the mixtures were prepared to evaluate the compressive strength at ages of 7, 14, 28, 60 and 90 days; specimens were also prepared for durability tests such as: carbonation, sulfate attack, total porosity and effective porosity at the age of 28 days. The addition of PET and polypropylene fibers has a slight improvement in concrete durability and mechanical strength.

Keywords: Hydraulic concrete, durability, polyethylene terephthalate and fibers.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y permitirme estar donde estoy.

A mis padres Martin Charco Flores y América Angel Barboza por todo el apoyo incondicional durante toda mi vida, el amor y confianza. Son las personas que más amo en el mundo y sin su apoyo y amor nada sería posible.

A mis hermanos y sobrino, por todo el amor y apoyo durante todo este tiempo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo y la Facultad de Ingeniería Civil por darme la oportunidad de formarme como ingeniero civil, al Laboratorio de Resistencia de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH), por brindarme las instalaciones, el material y equipo necesario para desarrollar esta investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Wilfrido Martínez Molina por todo el apoyo y recomendaciones para realizar con éxito esta investigación.

A la maestra Sandra del Carmen por su conocimiento, apoyo, paciencia y recomendaciones durante todo el tiempo.

A mi equipo de trabajo y amigos del alma Ana Daniela Martínez y Oswaldo Castolo por todo este tiempo compartido, por todo el cariño, por todo el buen ánimo, por ser tan positivos y alegres en todo el proceso de esta investigación.

A mi novio Fabricio Ali Hernández Ferreyra por todo su cariño, paciencia, por ayudarme durante todo el proceso y estar ahí cuando más lo necesitaba.

A los muchachos de servicio social que nos apoyaron a realizar las pruebas. A los técnicos y amigos del laboratorio Melisa, Marco Miguel, Alberto Luna.

A la señora Belén por todos sus consejos, por su tiempo, paciencia, cariño y por darme ánimos en los momentos más difíciles.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
JUSTIFICACIÓN	XIV
OBJETIVOS	XV
Objetivo general	xv
Objetivos particulares	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 ANTECEDENTES	2
2.2 CEMENTO PORTLAND	4
2.2.1 Clasificación del cemento Portland	4
2.2.2 Propiedades del cemento Portland	5
2.2.2.1 Composición química y propiedades químicas	5
2.2.2.1.1 Hidratación del cemento.	7
2.2.2.1.2 Calor de hidratación del cemento	8
2.2.2.2 Propiedades físicas	8
2.2.2.2.1 Peso específico.	8
2.2.2.2.2 Superficie específica (finura)	9
2.2.2.2.3 Fraguado	9
2.2.2.3 Resistencias mecánicas	10
2.2.3 Cemento usado en la investigación	10



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2.3	AGREGADOS	11
2.3.1	Origen de los agregados	11
2.3.2	Propiedades de los agregados	13
2.3.2.1	Propiedades físicas	13
2.3.2.2	Propiedades Mecánicas	14
2.3.3	Agregados usados en la investigación	15
2.4	AGUA	19
2.4.1	Especificaciones del agua en la construcción	19
2.4.2	Agua usada en la investigación	20
2.5	CONCRETO HIDRÁULICO	21
2.5.1	Propiedades principales del concreto fresco	22
2.5.1.1	Trabajabilidad	22
2.5.1.2	Segregación	23
2.5.1.3	Temperatura	24
2.5.1.4	Potencial de hidrógeno (pH)	25
2.5.1.5	Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento	25
2.5.2	Propiedades principales del concreto endurecido	26
2.5.2.1	Comportamiento a compresión	26
2.5.2.2	Comportamiento a tracción	27
2.5.2.3	Comportamiento a flexión	27
2.6	FIBRAS ADICIONADAS AL CONCRETO HIDRÁULICO EN LA INVESTIGACIÓN	27
2.6.1	Polietileno Tereftalato	30
2.6.1.1	Historia del PET	30
2.6.1.2	¿Qué es el PET?	31
2.6.1.3	Impacto ambiental del PET	32
2.6.1.4	Reciclaje de PET en México	34
2.6.2	Fibras de polipropileno	36
2.6.2.1	Historia del polipropileno	36
2.6.2.2	Beneficios de las fibras de polipropileno	37
2.6.2.3	Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno	38
2.6.3	Durabilidad en estructuras de concreto reforzado	39
2.6.3.1	Proceso de corrosión en estructuras de concreto armado	39
2.6.3.2	Variables que influyen en la corrosión	41
2.6.3.3	Requisitos de durabilidad	44
3	METODOLOGÍA	48
3.1	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	48



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3.1.1	Cemento Portland	48
3.1.1.1	Consistencia normal del cemento.	48
3.1.1.2	Tiempos de fraguado del cemento hidráulico.	51
3.1.1.3	Densidad del cemento hidráulico.	53
3.1.2	Arena	55
3.1.2.1	Cuarteto en arena.	55
3.1.2.2	Masa volumétrica suelta y seca (MVSS).	57
3.1.2.3	Masa volumétrica seca y varillada (MVSV).	60
3.1.2.4	Humedad de absorción.	62
3.1.2.5	Densidad.	65
3.1.2.6	Granulometría y módulo de finura.	67
3.1.2.7	Determinación del contenido de material orgánico (colorimetría)	74
3.1.2.8	Sedimentación	76
3.1.3	Grava	78
3.1.3.1	Cuarteo en gravas	78
3.1.3.2	Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)	79
3.1.3.3	Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)	80
3.1.3.4	Humedad de absorción	82
3.1.3.5	Densidad de la grava	84
3.1.3.6	Granulometría y tamaño máximo del agregado	86
3.1.3.7	Desgaste por trituración de Los Ángeles	89
3.1.4	Elaboración de fibras de PET	93
3.1.5	Diseño de mezcla	95
3.1.5.1	Cálculo del proporcionamiento de la mezcla testigo	95
3.1.5.2	Dosificación de fibras de PET y polipropileno	101
3.1.6	Elaboración de mezclas y especímenes	102
3.1.7	Descimbrado y curado de las muestras	104
3.2	Pruebas al concreto fresco	105
3.2.1	Revenimiento	105
3.2.2	Índice de pH	107
3.3	Prueba mecánica	108
3.3.1	Compresión	108
3.4	Evaluación por durabilidad	110
3.4.1	Resistividad eléctrica	111
3.4.2	Porosidad total	113
3.4.3	Porosidad efectiva	117
3.4.4	Carbonatación	121
3.4.5	Ataque por sulfatos	125



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



4	RESULTADOS Y DISCUSIONES	128
4.1	Pruebas al concreto fresco	128
4.1.1	Revenimiento	128
4.1.2	Índice de pH	129
4.2	Prueba mecánica	129
4.2.1	Compresión	129
4.3	Evaluación por durabilidad	131
4.3.1	Resistividad eléctrica	131
4.3.2	Porosidad total	133
4.3.3	Porosidad efectiva	135
4.3.4	Carbonatación	141
4.3.5	Ataque por sulfatos	144
4.4	Correlación de forma gráfica físico/mecánico	147
5	CONCLUSIONES	151
6	BIBLIOGRAFÍA	153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Calor de hidratación en los compuestos del Clinker. Fuente: (Grupo Argos, 2020)	8
Ilustración 2. Cemento marca Tolteca. Fuente: Cementos CEMEX	11
Ilustración 3. Banco de material “El Coro”. Fuente: Google maps	16
Ilustración 4. Banco de material “San Bernabé”. Fuente: Google maps	16
Ilustración 5. Banco de material “La Roka”. Fuente: Google maps	17
Ilustración 6. Envases de PET. Fuente: Polycoplastic	31
Ilustración 7. Símbolo del PET. Fuente: RAJA BLOG	32
Ilustración 8. Cantidad de polímeros producidos en México; Fuente: (INECC, 2020)	33
Ilustración 9. Botellas de PET desechadas. Fuente: Google.	34
Ilustración 10. Acopio de botellas en México. Fuente: SEMARNAT 21/09/2021	35
Ilustración 11. PET reciclado a nivel mundial. Fuente SEMARNAT 21/09/2021	35
Ilustración 12. Fibras de polipropileno. Fuente: (Texdelta, s.f.)	37
Ilustración 13. Corrosión en estructuras de concreto armado. Fuente: (UAdeC)	40



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 14. Diagrama de Tutti. Fuente: (Víctor Yepes , 2016)	42
Ilustración 15. Elaboración de la pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia	49
Ilustración 16. Lectura de consistencia normal del cemento. Fuente: Elaboración propia	50
Ilustración 17. Preparación de la pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia. 52	
Ilustración 18. Elaboración de la pastilla de cemento. Fuente: Elaboración propia52	
Ilustración 19. Aguja de Gillmore en contacto con la pastilla de cemento	53
<i>Ilustración 20. Cuarteo mecánico en arena. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 21. Cuarteo manual en arena. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 22. MVSS en arena. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 23. MVSV en arena. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 24. Determinación de la masa superficialmente seca en arena.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 25. Densidad en arena. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 26. Extracción del retenido en las mallas. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 27. Distribución de la granulometría en arena. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 28. Curva granulométrica, límites para concreto. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>71</i>
Ilustración 29. Curva granulométrica en arena blanca. Fuente: Elaboración propia	73
Ilustración 30. Curva granulométrica en arena negra. Fuente: Elaboración propia73	
Ilustración 31. Curva granulométrica en arena 50% AB y 50% AN	74
<i>Ilustración 32. Colorimetría en arena. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 33. Sedimentación en muestras de arena</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 34. Cuarteo en grava</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 35. Densidad en las muestras de grava. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 36. Distribución granulométrica en grava.</i>	<i>87</i>
Ilustración 37. Límites granulométricos para concreto. Fuente: Elaboración propia	88
Ilustración 38. Curva granulométrica del agregado grueso. Fuente: Elaboración propia	89
Ilustración 39. Esferas de metal. Fuente: Elaboración propia	91
Ilustración 40. Colocación de la muestra de grava en la máquina de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia	92
Ilustración 41. Muestra de grava después del proceso de desgaste. Fuente: Elaboración propia	92
Ilustración 42. Acopio de botella posconsumo. Fuente: Elaboración propia	93



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 43. Obtención de hilos de fibras de PET. Fuente: Elaboración propia	94
Ilustración 44. Hilos de PET almacenado hasta su uso. Fuente: Elaboración propia.....	94
<i>Ilustración 45. Rayado de la superficie del hilo de PET. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>94</i>
Ilustración 46. Corte de fibras de PET. Fuente: Elaboración propia	95
Ilustración 47. Fibras de PET. Fuente: Elaboración propia	95
<i>Ilustración 48. Muestra de mezcla de concreto</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 49. Moldes cilíndricos. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 50. Curado de los especímenes. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 51. Ejecución de la prueba de revenimiento. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>106</i>
Ilustración 52. Revenimiento. Fuente: Elaboración propia	107
<i>Ilustración 53. Tira indicadora sobre el concreto. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 54. Cabeceo de especímenes. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 55. Cilindros sometidos a compresión. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>109</i>
Ilustración 56. Corte de especímenes de concreto. Fuente: Elaboración propia	110
<i>Ilustración 57. Resistividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 58. Muestras de concreto en horno de secado a una temperatura de 100 °C a 110 °C. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 59. Muestras de concreto sumergidas en agua. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 60. Hervido de muestras. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 61. Sellado de laterales con parafina. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>119</i>
<i>Ilustración 62. Muestras en proceso de absorción capilar. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>119</i>
<i>Ilustración 63. Elaboración de la solución de fenolftaleína. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 64. Colocación de la solución de fenolftaleína. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 65. Lecturas de profundidad de carbonatación</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 66. Muestras en el horno a una temperatura de 50 °C ± 5 °C</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 67. Muestras en solución de sulfato de sodio</i>	<i>127</i>
Ilustración 68. Indicador de pH. Fuente: Elaboración propia.....	129
Ilustración 69. Resultados de la prueba de compresión: Fuente: Elaboración propia	130



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 70. Valores de resistividad eléctrica en cilindros de 15 cm Ø y 30 cm h.	
Fuente: Elaboración propia	132
Ilustración 71. Porcentaje de porosidad total a una edad de 28 días.	134
Ilustración 72. Regresión lineal para la muestra de concreto PET-P-2. Fuente:	
Elaboración propia	136
Ilustración 73. Resultados de Sorción capilar a una edad de 28 días. Fuente:	
elaboración propia.....	138
Ilustración 74. Tasa inicial de absorción. Fuente: Elaboración Propia	139
Ilustración 75. Tasa secundaria de absorción. Fuente: Elaboración Propia.....	140
Ilustración 76. Porosidad efectiva a una edad de 28 días. Fuente: Elaboración	
propia	140
Ilustración 77. Profundidad de carbonatación en muestras de concreto. Fuente:	
Elaboración propia	141
Ilustración 78. Constante de carbonatación. Fuente: Elaboración propia	142
Ilustración 79. Proyección de la carbonación. Fuente: Elaboración propia	144
Ilustración 80. Porcentaje de pérdida de masa en muestra de 10 cm Ø y 5 cm h, a	
una edad de 28 días. Fuente: Elaboración propia.....	145
Ilustración 81. Especímenes de la mezcla testigo al finalizar la prueba. Fuente:	
Elaboración propia	146
Ilustración 82. Especímenes de las mezclas adicionadas con PET y polipropileno	
al finalizar la prueba. Fuente: Elaboración propia	146
Ilustración 83. Correlación física-mecánica. Fuente: Elaboración propia.....	147
Ilustración 84. Correlación porosidad total Vs porosidad efectiva. Fuente:	
Elaboración propia	148
Ilustración 85. Correlación resistividad eléctrica Vs porosidad total. Fuente:	
Elaboración propia	149
Ilustración 86. Correlación resistividad eléctrica Vs porosidad efectiva. Fuente:	
Elaboración propia	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo y características del cemento Portland; (ASTM-C-150, 2016).....	4
Tabla 2. Tipo y características del cemento Portland; (NMX-C-414-ONNCCE,	
2017)	4
Tabla 3. Caracterización y normativa en arena y grava. Fuente: Elaboración propia	
.....	17
Tabla 4. Valores característicos de y límites máximos tolerables. Fuente: (NMX-C-	
122-ONNCCE, 2019)	19
Tabla 5. Resultados de análisis de calidad del agua; laboratorio de Ingeniería	
Sanitaria y Ambiental	20
Tabla 6. Avances en la regulación estatal en materia de residuos plásticos.	
Fuente: (INECC, 2020).....	36
Tabla 7. Información técnica. Fuente: (Macrofibras, s.f.)	38



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 8. Clasificación de exposición ambiental. (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) ...	45
Tabla 9. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición. (NMX-C-530-ONNCCE, 2018).....	47
Tabla 10. Resultados de la prueba de densidad en el cemento.....	55
Tabla 11. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y suelta en arenas. Elaboración propia.	59
Tabla 12. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y varillada en arenas	61
Tabla 13. Resultados de la prueba de humedad de absorción en arenas	64
Tabla 14. Resultados de la prueba de humedad de absorción en arenas	67
Tabla 15. Tabla de registro para datos de retenido en agregado fino	70
Tabla 16. Resultado del análisis granulométrico en arena blanca (AB). Fuente: Elaboración propia	71
Tabla 17. Resultados del análisis granulométrico en arena negra (AN). Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 18. Resultados del análisis granulométrico en arena (50% AB Y 50% AN). Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 19. Resultados de la prueba de colorimetría en arenas.	76
Tabla 20. Resultados de la prueba de sedimentación en arenas.	77
Tabla 21. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y suelta en grava. 80	
Tabla 22. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y varillada en grava	81
Tabla 23. Resultados de la prueba de humedad de absorción en grava	83
Tabla 24. Tipos de absorción en gravas. Fuente: (NMX-C-164-ONNCCE, 2014). 84	
Tabla 25. Resultados de la prueba de densidad en grava	86
Tabla 26. Registro de datos de granulometría en grava. Fuente: (NMX-C-077-ONNCCE, 2019).....	87
Tabla 27. Resultados del análisis granulométrico en grava. Fuente: Elaboración propia	88
Tabla 28. Composición de la muestra de prueba y carga abrasiva (M-MMP-2-02-032, 2018)	90
Tabla 29. Resultado de desgaste por trituración de la máquina de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia	92
Tabla 30. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia.....	96
Tabla 31. Revenimiento para diferentes tipos de construcción. Fuente: ACI 211 .	96
Tabla 32. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregados. Fuente: ACI 211	97
Tabla 33. Correspondencia entre relación agua/cemento y la Resistencia a compresión del concreto. Fuente: ACI 211	98



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 34. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Fuente: ACI 211	99
Tabla 35. Resumen de las propiedades de los agregados. Fuente: Elaboración propia	100
Tabla 36. Cantidades reales de los materiales. Fuente: Elaboración propia.....	101
Tabla 37. Dosificación de los materiales para un metro cubico de mezcla. Fuente: Elaboración propia	101
Tabla 38. Número de capas requeridas para los especímenes. Fuente: Elaboración propia	103
Tabla 39. Diámetro de varilla y número de penetraciones. Fuente: (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).....	104
Tabla 40. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).....	112
Tabla 41. Porcentaje de porosidad. Fuente: ("DURAR", 1998)	113
Tabla 42. Valores típicos de constantes de carbonatación; fuente. (NMX-C-515-ONNCCE, 2016).....	124
Tabla 43. Resultados de prueba de revenimiento en las diferentes mezclas de concreto. Fuente: Elaboración propia.....	128
Tabla 44. Porcentaje de porosidad total en muestras de concreto. Fuente: Elaboración propia	133
Tabla 45. Porcentaje de porosidad. Fuente: ("DURAR", 1998)	133
Tabla 46. Datos generales de la muestra PET-P—2 en la prueba de porosidad efectiva. Fuente: Elaboración propia	135
Tabla 47. Resultados de la muestra PET-P-2. Fuente: Elaboración propia.	135
Tabla 48. Requisitos en los ensayos de penetración del agua (NMX-C-530-ONNCCE, 2018).....	137
Tabla 49. Resultados de la prueba de porosidad efectiva de acuerdo a la metodología del manual de la Red DURAR ("DURAR", 1998).....	137
Tabla 50. Profundidad de carbonatación estimada a 25 años. Fuente: Elaboración propia	143



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



JUSTIFICACIÓN

A partir de la introducción de los productos plásticos desechables (en el año de 1988), la sociedad está cambiando sus hábitos de consumo y convirtiéndolo en una parte importante de su estilo de vida. El resultado de este cambio de comportamiento es la renuncia paulatina a la responsabilidad de la disposición final de los residuos generados por estos productos. Como resultado, la sociedad mexicana se ha vuelto dependiente del consumo de plásticos, lo que ha llevado a una reducción en la capacidad de gestionar adecuadamente y utilizar racionalmente los residuos plásticos. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2021), se estima que en nuestro país únicamente el 9.2% de los plásticos desechados se recolectan para reciclaje y el 15.8% para el caso del PET. No obstante, esta cantidad recolectada no necesariamente refleja el porcentaje real de residuos plásticos reciclados (INECC, 2020)

El actual problema de corrosión de las infraestructuras de concreto reforzado del país no solo genera pérdidas económicas a las instituciones responsables del proyecto de restauración, sino que también genera problemas sociales. Esto se refleja en el número de hospitales, puentes, escuelas, edificios, instalaciones deportivas, dañados por este fenómeno. El costo del daño social (pérdida indirecta) puede exceder fácilmente el costo de los trabajos de reparación y, en ocasiones, causar víctimas. La infraestructura de concreto armado se está deteriorando actualmente a un ritmo acelerado; en muchos casos, no ha alcanzado la vida útil prevista. Es por ello que es necesario calcular el momento en que alcanzan el riesgo de falla y determinar el mejor momento para iniciar la recuperación. Al mismo tiempo, también es importante determinar el tipo de mantenimiento que se debe realizar en la infraestructura de acuerdo a condiciones ambientales específicas, porque el medio ambiente es un factor muy importante en su durabilidad (López Celis, y otros, 2006).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



De acuerdo a lo mencionado anteriormente, esta investigación se centra en evaluar las propiedades de durabilidad en concretos adicionados con diferentes tipos de porcentajes de fibras de PET y Polipropileno. Con el propósito de hacer un concreto durable, mejorando las propiedades, hacer un segundo uso de los residuos sólidos y reducir un poco el impacto de la contaminación ambiental en México.

Teniendo en cuenta que el concreto es un material comúnmente usado en la industria de la construcción se propuso adicionar fibras no biodegradables con la finalidad de innovar concretos ecológicos, económicos, eficientes y durables.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar la durabilidad de las diferentes mezclas de concreto adicionadas con fibras de PET y polipropileno.

Objetivos particulares

- Reducir la contaminación, a partir del reciclaje de residuos PET.
- Caracterizar el material para obtener los parámetros de diseño de las mezclas por el método ACI.
- Evaluar las propiedades físico-mecánicas a edades tardías.
- Evaluar algunos parámetros por durabilidad a edades tempranas de las mezclas diseñadas.
- Elaborar fibras de PET a partir de botellas desechadas y adicionarlas al concreto hidráulico para mejorar la adherencia en la mezcla de concreto hidráulico.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación forma parte de una línea de investigación previa, enfocada en la utilización de fibras de PET (Blancas Herrera, 2020) y polipropileno, en colaboración con Ana Daniela Martínez González, Fabricio Ali Hernández Ferreyra y Oswaldo Castolo Montero.

Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son, en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y, en el estado fresco, el control de la contracción plástica. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga.

En la práctica actual de la construcción, las fibras discontinuas se agregan a la matriz de concreto en cantidades relativamente bajas, por lo general el porcentaje es inferior al 2%, aunque la variación más común está entre el 0.1% y el 0.7%. El concreto con fibras se ha utilizado en diversas aplicaciones, siendo las más habituales la construcción de pavimentos, cubiertas para puentes, concreto lanzado para la estabilización de taludes, revestimiento de túneles, elementos estructurales prefabricados, bóvedas, entre otras (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011).

La gestión de la durabilidad de la infraestructura civil envuelve gastos significativos y en una época de recursos públicos limitados, requiere decisiones difíciles para establecer prioridades de mantenimiento, rehabilitación y sustitución. En este aspecto se aprecia la importancia del concepto de vida útil, que sirve como base para un abordaje holístico de proyecto. Las estructuras deben ser idealizadas para la seguridad estructural y el mantenimiento durante un período especificado. Eso incluye un proyecto para durabilidad y sustentabilidad. Con la intención de concebir una estructura con una baja necesidad de mantenimiento durante su vida útil, medidas que deben ser tomadas en la fase de concepción y todavía es necesario realizar el control cuando la estructura está en servicio (E. F., Rodrigues Balabuch, Correa Posterlli, Possan, & Carrazedo, 2017).



2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El concreto armado como material de construcción ha aumentado su utilización desde mediados del siglo pasado. La variedad y el aspecto de las obras de concreto armado, generó una tecnología en permanente transformación. Como material de construcción, se pensó que el concreto podría tener una duración ilimitada, pero en la actualidad se reportan numerosos casos de estructuras prematuramente deterioradas por la corrosión del acero de refuerzo. Esta corrosión, en general se debe al ataque destructivo de iones cloruros que penetran desde el exterior por difusión o porque fueron incorporados en la mezcla de concreto, la carbonatación del recubrimiento surge por el CO_2 atmosférico, así como también por la acción de sulfatos, ataques químicos (amonio y magnesio), ciclos de congelamiento y deshielo, abrasión o desgaste principalmente (NMX-C-530-ONNCCE, 2018).

Los costos de mantenimiento de la estructura, así como los de corrección o contención de las patologías generadas por el fenómeno de corrosión, cuando estos son técnicamente posibles, son económicamente significativos. Es importante resaltar que la calidad y duración de las reparaciones de estructuras de concreto reforzado dependen de la correcta evaluación y de un acertado diagnóstico del problema ("DURAR", 1998).

El concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo. El material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico (Solís Carcaño, Moreno , & Castro Borges, 2005).

Se acuerdo a lo indicado en la terminología del cemento y del concreto (ACI116), la durabilidad del concreto se define como “su capacidad para resistir las acciones del



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



intemperismo, el ataque químico, la abrasión y otras condiciones de servicio”. Por lo tanto, en México se ha tratado de dar un enfoque más amplio al tema añadiendo a las acciones deteriorantes otros factores de desempeño tales como la calidad del concreto y sus componentes, los factores constructivos, los cambios volumétricos y la ejecución de colado en diferentes tipos de entornos ambientales (Mena Ferrer, 2005).

Las causas externas de carácter no estructural que suele afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de las condiciones de exposición (medio ambiente) y servicio (funciones operativas).

La mayoría de los problemas de durabilidad en las estructuras de concreto están asociados con su porosidad y permeabilidad, propiedades que determinan la capacidad para permitir el flujo de líquidos o gases. Los principales compuestos químicos que afectan a estas estructuras son los cloruros, el dióxido de carbono, los sulfatos y los ácidos; los dos primeros compuestos propician de manera directa o indirecta un proceso electroquímico que deteriora el acero de refuerzo, conocido como corrosión, en el cual participan también el oxígeno y la humedad (Solís Carcaño & Alcocer Fraga, 2019).

La porosidad es una medida del volumen total de los poros que se encuentra en la estructura interna del concreto endurecido; depende de su relación entre el agua y el cemento (A/C), el grado de hidratación del cemento, el volumen de aire atrapado y las proporciones entre los agregados fino y grueso. Los agregados representan aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto, por lo que su propia porosidad tiene una gran influencia en la porosidad total del concreto.

La permeabilidad es la capacidad del material para permitir la filtración de un fluido a través de sus poros interconectados; de ahí que dependa de la cantidad total de los poros, así como de su distribución, tamaño e interconectividad. Los fluidos pueden transportarse dentro de la masa de concreto por difusión o por absorción (Solís Carcaño & Alcocer Fraga, 2019).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2.2 CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland es producido a base de la molienda de Clinker y usualmente sulfato de calcio. Es un material inorgánico finamente pulverizado que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava y otros materiales es capaz de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

2.2.1 Clasificación del cemento Portland

De acuerdo a la normativa mexicana, tabla 1 y la normativa norteamericana, tabla 2, se describen las clasificaciones del cemento Portland de acuerdo a sus características y clase de resistencia.

Tabla 1. Tipo y características del cemento Portland; (ASTM-C-150, 2016)

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo II (MH)	Moderada calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
Tipo II (MH) A	Con aire incluido con moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Tabla 2. Tipo y características del cemento Portland; (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

TIPO	DENOMINACIÓN		
------	--------------	--	--



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



		CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICA S ESPECIALES
CPO	Cemento portland ordinario	20	RS Resistencia a los sulfatos
CPP	Cemento portland puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali-agregado
CPEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento portland compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento portland con humo de sílice	40R	
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno		

2.2.2 Propiedades del cemento Portland

2.2.2.1 Composición química y propiedades químicas

Las materias primas constituyentes del cemento Portland son principalmente cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Durante el proceso de producción del cemento estos compuestos interactúan para luego formar una serie de productos más complejos (silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos y ferritos) que alcanzan un estado de equilibrio químico, con la excepción de un residuo de cal no combinada



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



la cual no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar, ésta es denominada como cal libre (Portugal Barriga, 2007).

- **Silicato tricálcico (C3S)**

También denominado Alita, es la fase principal en la mayoría de los clinker Portland, y se compone de 73.7% de cal y 26.3% de óxido silícico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, trióxido de calcio y dióxido de silicio). Este compuesto presenta cristales poligonales bien formados, con dimensiones que varían según el grado de cristalización, siendo bien desarrollados cuando la cocción ha tenido lugar a temperatura suficientemente elevada y durante bastante tiempo, así como en presencia de una cantidad adecuada de fase líquida. El silicato tricálcico contribuye de manera muy importante a las resistencias iniciales, siendo su velocidad de hidratación alta, así también desarrolla un alto calor de hidratación, se estima su calor de hidratación completo en 120 cal/gr (Portugal Barriga, 2007).

- **Silicato bicálcico (C2S)**

También denominado Belita, es la segunda fase en importancia en el Clinker, y se compone de 65.1% de cal y 34.9% de óxido silícico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, dióxido de calcio y dióxido de silicio). Este compuesto presenta cristales relativamente anchos, de contornos redondeados y tamaño variable. El silicato bicálcico tiene una lenta velocidad de hidratación y desarrollo de calor bajo, 62 cal/gr, dada su lenta velocidad de endurecimiento, la contribución del silicato bicálcico a las resistencias iniciales es muy pequeña, siendo su efecto posterior la fuente principal de resistencia. Su estabilidad química es bastante buena, por lo que el uso de cementos con alto contenido de silicato bicálcico para producir concretos resistentes al ataque de sulfatos es muy recomendable (Portugal Barriga, 2007).

- **Aluminato tricálcico (C3A)**

También denominada Celita, se compone de 62.3% de cal y 37.7% de alúmina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$, trióxido de aluminio y trióxido de calcio). Este compuesto presenta un color oscuro ante el examen microscópico del Clinker, después de los álcalis, los



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



aluminatos son los compuestos del cemento que primero reaccionan con el agua. Su fraguado ocurre a una velocidad de hidratación muy alta, hasta el punto de ser casi instantáneo, es por esta razón que la adición de sulfato de calcio se hace necesaria para controlar esta velocidad de hidratación.

El aluminato tricálcico contribuye en las resistencias durante las primeras horas, su calor de hidratación es muy elevado 207 cal/gr. Tanto la resistencia del concreto a ciclos de hielo y deshielo, así como su resistencia al ataque de sulfatos tiende a disminuir conforme se incrementa el contenido de aluminato tricálcico en el cemento. El aluminato tricálcico es muy sensible a la acción de sulfatos y cloruros, debido a la formación de sales del tipo sulfoaluminatos y cloroaluminatos, la formación de estas sales es de carácter expansivo, pudiendo originar agrietamiento y desintegración del concreto (Portugal Barriga, 2007).

- **Ferroaluminato tetracálcico (C3A)**

También es denominada Celita clara o Ferrito, se compone de 46.1% de cal, 21% de alúmina y 32.9% de óxido de hierro ($Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$, óxido de calcio, trióxido de dialuminio, trióxido de hierro). Este compuesto presenta un calor de hidratación de 100 cal/gr y una alta estabilidad química, los cementos ricos en este compuesto tienen condiciones de empleo específicas en todos aquellos casos en que importe más la durabilidad frente a los agresivos químicos que las resistencias mecánicas (Portugal Barriga, 2007).

2.2.2.1.1 Hidratación del cemento.

La reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se produce en una pasta de cemento y agua, generada por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos. En otras palabras, en presencia del agua los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación, los cuales, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura que se conoce como pasta de cemento endurecida. La hidratación comienza en los granos de cemento después de cierto tiempo de estar en contacto con el agua en la superficie de las partículas de cemento, similarmente a la corrosión de un metal. Luego con el



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



tiempo, esta superficie de reacción se mueve gradualmente más profundamente en el interior de la partícula de cemento (Portugal Barriga, 2007).

2.2.2.1.2 Calor de hidratación del cemento

El proceso de hidratación es un proceso exotérmico, lo cual hace que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura; este incremento es importante en concretos masivos, debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede conducir a graves agrietamientos. Este mismo efecto es uno de los principales problemas en los concretos con bajas relaciones de agua/cemento, dado que la cantidad de cemento se incrementó y consecuentemente la temperatura del concreto también se incrementa, esta es una de las razones para el uso de adiciones reemplazando a porcentajes del cemento (Portugal Barriga, 2007).

El calor de hidratación es la cantidad de calor, en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. El calor de hidratación depende de la composición química del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de sus componentes (Ilustración 1).

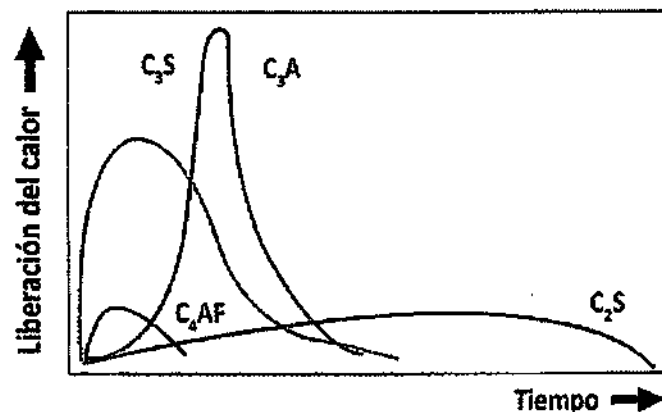


Ilustración 1. Calor de hidratación en los compuestos del Clinker. Fuente: (Grupo Argos, 2020)

2.2.2.2 Propiedades físicas

2.2.2.2.1 Peso específico.

El peso específico del cemento corresponde al material en estado compacto. Su valor suele variar para los cementos Pórtland normales entre 3.0 y 3.2. En el caso



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



de cementos adicionados el valor es menor de 3.0 y depende de la finura del material adicionado. Es por su menor peso específico que los cementos Pórtland adicionados proporcionan una mayor cantidad de pasta para un mismo peso de cemento, esto mejora las características de trabajabilidad de los concretos elaborados con estos cementos (Portugal Barriga, 2007).

2.2.2.2 Superficie específica (finura)

La finura de un cemento es función del grado de molienda del mismo y está íntimamente ligado a su valor hidráulico. Puesto que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas de cemento constituye el material de hidratación.

La importancia de la finura de un cemento radica en la influencia que puede tener sobre la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado. La fragua de los cementos es más rápida y el agrietamiento más temprano conforme son más finos. La exudación disminuye conforme la fineza se incrementa; y la absorción se incrementa con el grosor del grano (Portugal Barriga, 2007).

La resistencia a la compresión se incrementa más que la resistencia a la tensión conforme aumenta la fineza del cemento. La resistencia a la compresión está relacionada a la resistencia a la flexión como la raíz cuadrada de la superficie específica. La contracción parece ser una función lineal de la superficie específica y el agrietamiento puede relacionarse con el grado de desarrollo de resistencia del concreto y en general, los cementos que ganan rápidamente su resistencia son los más propensos a agrietarse. Al aumentar la finura de cualquier cemento aumenta su velocidad para desarrollar resistencia y así indirectamente, el riesgo de grietas por contracción (Portugal Barriga, 2007).

2.2.2.3 Fraguado

Este es el término utilizado para describir la rigidez de la pasta del cemento, aun cuando la definición de rigidez de la pasta puede considerarse un poco arbitraria. En términos generales el fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento fraguada. El fraguado inicial es el cambio de estado fluido a estado rígido y el fraguado final es el inicio de la resistencia mecánica. El proceso de fraguado va acompañado de cambios de temperatura en la pasta del cemento: el fraguado inicial corresponde a un rápido aumento en temperatura y el final, al máximo de temperatura. En este momento también se produce una fuerte caída en la conductividad eléctrica, por lo que se han realizado algunos intentos de medir el fraguado por medios eléctricos (Portugal Barriga, 2007).

2.2.2.3 Resistencias mecánicas

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Por lo tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia estén indicadas en todas las especificaciones del cemento. La resistencia de un cemento es función de su fineza, composición química, grado de hidratación, así como del contenido de agua de la pasta. La velocidad de desarrollo de la resistencia es mayor durante el periodo inicial de endurecimiento y tiende a disminuir gradualmente en el tiempo. El valor de la resistencia a los 28 días se considera como la resistencia del cemento (Portugal Barriga, 2007).

2.2.3 Cemento usado en la investigación

El cemento Portland que se utiliza en esta investigación es de la marca Tolteca CPC 30R RS (Ilustración 2). Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A), la norma (ASTM-C-150, 2016) vigente para este cemento, lo clasifica como un tipo II y estipula un contenido máximo de 8% de C_3A .



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 2. Cemento marca Tolteca. Fuente: Cementos CEMEX

2.3 AGREGADOS

Los agregados finos y gruesos constituyen entre el 60 y el 75% del volumen de una mezcla de concreto. Debido a que los agregados ocupan un porcentaje tan alto del volumen de una mezcla de concreto y pueden afectar de gran manera las propiedades del concreto en estado fresco como endurecido, es importante que los agregados sean muestreados y ensayados adecuadamente para garantizar que sean idóneos para usarse en la mezcla diseñada (IMCYC, 2015)

Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del concreto, pues sus propiedades pueden afectar en gran medida la durabilidad y el rendimiento estructural del concreto.

2.3.1 Origen de los agregados

Los agregados naturales para concreto por lo general con una mezcla de rocas y minerales. El mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de los límites estrechos. Las rocas se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen con varios minerales. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo y arcilla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Rocas Ígneas. Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra, de ellas se derivan los otros grupos de rocas y la mayor parte de los agregados del concreto en América. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y tienen



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



una estructura masiva, totalmente cristalina o vítrea o una combinación entre ellas, dependiendo de la velocidad a la que se enfriaron durante su formación. Las rocas de grano fino se originan cuando existe un enfriamiento relevante rápido que forma cristales microscópicos, no permitiéndose disminuir los minerales a simple vista. Cuando existe enfriamiento lento se permite que los minerales formen cristales grandes, disminuyéndose a simple vista. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie.

Rocas Sedimentarias. Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.

Rocas Metamórficas. Tanto las rocas ígneas como las rocas sedimentarias pueden ser sometidas a altas temperaturas y presiones que causan metamorfismo produciendo un cambio en la estructura y textura de las rocas.

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores, a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico (Neville & Brooks, 2010).

2.3.2 Propiedades de los agregados

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el mortero debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos o poros que este deje.

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el mortero y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Neville & Brooks, 2010).

Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm (Neville & Brooks, 2010).

Algunas otras propiedades físicas del agregado son: la forma y textura de las partículas, la limpieza, forma, textura, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia y, de suma, importancia la granulometría del agregado, así como el módulo de finura.

2.3.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas que más impactan en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas).

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que las arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

- **Porosidad.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. Se requieren agregados que cumplan con esta propiedad física y así garantizar una buena resistencia mecánica.
- **Densidad suelta.** Es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen unitario es el ocupado por los agregados y los vacíos que se generan entre las partículas de los agregados.
- **Forma y Textura.** Influye en las propiedades del concreto fresco más que en las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más cantidad de agua para producir concreto trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además, requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.

2.3.2.2 Propiedades Mecánicas

- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se les han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración.

- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.
- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales (Neville & Brooks, 2010).

2.3.3 Agregados usados en la investigación

Para esta investigación determinamos la calidad de los agregados de acuerdo a la normativa NMX vigente, tabla 3.

- A. Arena blanca (AB): obtenida del banco de material “El Coro” ilustración 3, ubicado a un costado de la carretera Morelia – Zinapécuaro, antes de llegar a la localidad de José María Morelos. El material obtenido es de tipo sedimentario o de río y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 3. Banco de material "El Coro". Fuente: Google maps

- B. Arena negra (AN): Obtenida del banco de material llamado “San Bernabé” ilustración 4 ubicado en la localidad de San Bernabé a 22.2 kilómetros, de la carretera Pátzcuaro-Cuitzeo en dirección Oeste, de la localidad de Morelia. El material obtenido es volcánico y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado.



Ilustración 4. Banco de material "San Bernabé". Fuente: Google maps



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Para la caracterización del agregado grueso, seguimos las recomendaciones establecidas en las normas NMX vigentes.

- A. Grava del tipo triturada (Ilustración 5); obtenida del banco de material “La Roka” ilustración 5 que está ubicado a un costado de la carretera Morelia – Guadalajara, justo después de pasar la localidad de Cuto del Porvenir perteneciente al municipio de Tarímbaro del estado de Michoacán.



Ilustración 5. Banco de material “La Roka”. Fuente: Google maps

Tabla 3. Caracterización y normativa en arena y grava. Fuente: Elaboración propia

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO	ENSAYO DEL LABORATORIO	NORMA NMX
Muestro	Muestreo de agregados.	(NMX-C-030-ONNCCE, 2004)
Cuarteo	Reducción de las muestras de agregados obtenidas en campo al tamaño requerido de prueba.	(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Masas volumétricas (MVSS Y MVSV)	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados.	(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)
Densidad y humedad de absorción	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino.	(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)
Densidad y humedad de absorción	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso	(NMX-C-164-ONNCCE, 2014)
Desgaste de los ángeles	Determinación de la Resistencia a la Degradación por Abrasión e Impacto de Agregados Gruesos Usando la Máquina de los Ángeles	(M-MMP-2-02-032, 2018)
No. De colorimetría	Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino.	(NMX-C-088-ONNCCE, 2019)
Sedimentación	Método de prueba para determinar el exceso de finos en el agregado fino.	(NMX-C-088-ONNCCE, 2019)
Granulometría	Análisis granulométrico en agregados.	(NMX-C-077-ONNCCE, 2019)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2.4 AGUA

2.4.1 Especificaciones del agua en la construcción

Cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se puede implementar en mezcla de concreto. El exceso de impurezas en el agua de la mezcla no solo puede afectar a la resistencia del concreto, también puede causar corrosión del refuerzo, inestabilidad en el volumen y reducción de la durabilidad, por lo tanto, el agua usada en la mezcla de concreto hidráulico debe tener ciertos límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

La norma mexicana (NMX-C-122-ONNCCE, 2019) nos indica que el agua es apta para la mezcla de concreto si cumple con las siguientes especificaciones (tabla 4).

Tabla 4. Valores característicos de y límites máximos tolerables. Fuente: (NMX-C-122-ONNCCE, 2019)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m	Cementos sulforesistentes en p.p.m
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como CL		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puentes	400	600
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700	1000
Sulfato como SO₄	3000	3500
Magnesio como Mg⁺⁺	100	150
Carbonatos como CO₃	600	600
Dióxido de carbono disuelto, como CO₂	5	3
Álcalis totales como Na	300	450
Total, de impurezas en solución	3500	4000



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumo en medio ácido)	150	150
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6

2.4.2 Agua usada en la investigación

Para esta investigación se utilizó agua de la llave, para saber si es adecuada. El laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la Facultad de Ingeniería civil, de la UMSN, recolectó una muestra y se analizó siguiendo los parámetros establecidos en la normativa NMX vigente. En las tablas 5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5. Resultados de análisis de calidad del agua; laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

PARÁMETRO/ UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO NMX-C-122- ONNCCE-2004		MÉTODO DE PRUEBA
Sólidos en suspensión (SST mg/l)	1.0	200	cumple	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos totales (ST mg/l)	436.0			NMX-AA-034-SCFI-2001
Total, de impurezas en solución Sólidos disueltos totales (SDT mg/l)	435.0	3500	cumple	NMX-AA-034-SCFI-2001
Cloruros Cl (mg/l)	14.9	400	cumple	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos como SO ₄ (mg/l)	10.0	3000	cumple	NMX-AA-074-1981
Dureza magnésica (mg/l CaCO ₃)	38.3	100	cumple	NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	27.00			NMX-AA-072-SCFI-2001
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	65.25			NMX-AA-072-SCFI-2001
Carbonatos CO ₃ (mg/l)	1.34	600	cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad total (mg/l CaCO ₃)	270.00	300	cumple	NMX-AA-036-SCFI-2001



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Alcalinidad a la fenolftaleína (mg/l)	0.67			NMX-AA-036-SCFI-2001
Hidróxidos OH (mg/l)	0.00			NMX-AA-036-SCFI-2001
Bicarbonatos HCO ₃ (mg/l)	268.66			NMX-AA-036-SCFI-2001
Grasa o aceites (mg/l)	0.00	0	cumple	NMX-AA-005-SCFI-2000
Materia Orgánica como DQO (mg/l)	0.00	150	cumple	NMX-AA-030-SCFI-2001
Potencial de hidrógeno (unidades pH)	6.50	>6	cumple	NMX-AA-008-SCFI-2000
Conductividad eléctrica (µs/cm)	442.00			Electrométrico
Oxígeno disuelto (mg O ₂ /l)	3.75			Electrométrico
Salinidad (%)	0.20			Electrométrico
Cloro total (mg/l)	0.00			Comparación colorimétrica
Cloro libre (mg/l)	0.00			Comparación colorimétrica
Temperatura de análisis (°C)	21.00			NMX-AA-007-SCFI-2000

Del agua analizada, se comprobó que cumple con los parámetros mínimos de calidad para ser utilizada en la elaboración de concreto hidráulico.

2.5 CONCRETO HIDRÁULICO

El concreto hidráulico es una combinación de cemento, agua, arena, grava y en algunos casos aditivos. Por su durabilidad, trabajabilidad en estado fresco, resistencia, facilidad de producción y economía, actualmente es el material más utilizado en la industria de la construcción.

El concreto hidráulico es una especie de roca artificial, diseñada y producida de acuerdo a estándares de calidad establecidos, tiene una alta resistencia a la compresión, pero la resistencia a la tracción es baja (normalmente es el 10% de la



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



resistencia a compresión), por lo que se recomienda colocar acero de refuerzo, cuando existan solicitaciones mecánicas de este tipo.

La dosificación y producción del concreto es un trabajo complejo en el que se deben seguir las normas establecidas respecto a la dosificación, calidad del agregado y proceso de fabricación (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.5.1 Propiedades principales del concreto fresco

En una mezcla de concreto, al integrar los materiales antes mencionados y eventualmente aditivos, se dice que se ha obtenido concreto fresco o concreto recién mezclado cuya principal propiedad es la de ser plástica o semifluida y generalmente capaz de ser moldeado a mano (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

La norma (NMX-C-155-ONNCCE, 2014) define al concreto hidráulico en estado fresco como la etapa inicial del proceso de fraguado del concreto durante la cual presenta una consistencia que permite realizar las operaciones de transporte, colocación, compactación y acabado. A continuación, se describen las propiedades que debe cumplir un concreto fresco.

2.5.1.1 Trabajabilidad

Es la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La norma ASTM C125 define a la trabajabilidad como “la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de concreto acabado de mezclar con una pérdida mínima de homogeneidad”; mientras que el ACI la define como: “aquella propiedad del concreto o mortero acabado de mezclar que determina la facilidad y homogeneidad con las cuales se puede mezclar, colocar, compactar y acabar”. Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son:

- El método y la duración del transporte
- La cantidad y características de los materiales cementantes



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- La consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento)
- Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos
- Aire incluido (aire incorporado)
- Cantidad de agua o contenido de humedad
- Temperatura del concreto y del aire
- Aditivos incorporados a la mezcla

La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad. En el caso del concreto, la consistencia algunas veces se utiliza para significar el grado de humedad; dentro de ciertos límites, los concretos húmedos son más trabajables que los secos, pero los concretos de la misma consistencia pueden variar en trabajabilidad (Neville A. , 2013).

El asentamiento en cono de Abrams o medición del revenimiento se usa como medida de la consistencia y de la humedad del concreto. La norma ASTM C143 describe la metodología de prueba y consiste en tener un cono truncado de 30 cm de alto que se coloca sobre una superficie lisa, con la abertura menor en la parte superior, y se llena con concreto en tres capas. Cada capa se apisona 25 veces con una varilla de acero normal de 15 mm de diámetro, redondeada en el extremo, y la superficie superior se recorta por medio de un movimiento de aserrar y rodar de la varilla de apisonar.

inmediatamente después del llenado, el cono se levanta lentamente, y el concreto sin soporte ahora se va a revenir. La disminución en la altura del concreto revenido se llama revenimiento y se mide hasta el punto más alto.

2.5.1.2 Segregación

Para un concreto trabajable, la ausencia de segregación es esencial para que una mezcla tenga una compactación completa. Se puede definir a la segregación como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



su distribución ya no es uniforme. En el caso del concreto, las diferencias en el tamaño de las partículas y en el peso específico de los constituyentes de la mezcla son las causas primarias de la segregación, pero su efecto puede controlarse con la selección de una granulometría adecuada y con el cuidado en el manejo de la mezcla. La segregación es difícil de medir cuantitativamente, pero se descubre fácilmente cuando el concreto se maneja en obra en alguna de las dos formas siguientes:

- Las partículas más gruesas tienden a separarse porque tienden a moverse a lo largo de una pendiente o a asentarse más que las partículas más finas.
- Esta ocurre particularmente en mezclas húmedas, manifestándose con la separación de lechada (cemento más agua) de la mezcla.

Con algunas granulometrías, al utilizar una mezcla pobre puede ocurrir el primer tipo de segregación si la mezcla está demasiado seca; la adición de agua mejoraría la cohesión de la mezcla, pero cuando la mezcla llegara a estar demasiado húmeda, sucedería la segregación del segundo tipo (Neville A. , 2013)

2.5.1.3 Temperatura

En el concreto hidráulico, la temperatura temprana que se presenta al elaborar la mezcla tiene una gran influencia en la resistencia que puede alcanzar dicho material. Las pruebas del laboratorio del concreto fresco suelen ejecutarse a una temperatura controlada, normalmente constante y anteriormente se realizaban principalmente en climas templados. La temperatura normalizada escogida estaba generalmente en la región de 18 a 21 °C, de modo que mucha de la información básica respecto a las propiedades del concreto, tanto fresco como endurecido, se basa sobre el comportamiento del material a estas temperaturas. En la práctica, sin embargo, el concreto se mezcla a una amplia gama de temperaturas y también permanece en servicio a diferentes temperaturas. Una elevación de temperatura durante la colocación y el fraguado, aumenta la resistencia muy temprana del concreto, afectando adversamente la resistencia desde alrededor de los 7 días en adelante. Esto se debe a que una rápida hidratación inicial parece formar productos



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



de una estructura física más pobre, probablemente más porosa, de modo que una proporción de los poros siempre permanecerán sin llenar (Neville A. , 2013)

La norma ASTM C94 menciona que la temperatura máxima del concreto fresco no debe exceder los 32 °C, mientras que el ACI limita la temperatura máxima del concreto a 35 °C en el momento de la colocación.

2.5.1.4 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada.

En el caso del concreto reforzado, el pH de la solución del poro es importante en términos de durabilidad (Moreno, 2006) puesto que, tener valores ideales de pH elevados de 12 a 13, mantiene protegido o pasivo el acero de refuerzo, ante procesos como la carbonatación. Es así que, el concreto tiene la propiedad de ser alcalino o básico por naturaleza.

Los hidróxidos de calcio, sodio y potasio, disueltos en el componente acuoso del concreto, son los responsables del elevado pH que actúa como protector del acero, y es cuando el CO₂ penetra en el concreto que se produce una reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que cuando todo el Ca(OH)₂, Na(OH) y K(OH) presentes en los poros han sido carbonatados, el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero.

2.5.1.5 Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento

La calidad de unión (adhesión) de la pasta de cemento Portland se debe a las reacciones químicas entre el cemento y el agua, conocidas como hidratación. Los dos silicatos de calcio (tricálcico y dicálcico), los cuales constituyen 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (hidrato de silicato de calcio).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Este último es, sin duda, el más importante compuesto del concreto. Las propiedades de ingeniería del concreto: fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional; dependen principalmente del silicato de calcio hidratado, resultando éste el corazón del concreto.

El conocimiento de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que haya tiempo para transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

2.5.2 Propiedades principales del concreto endurecido

El concreto hidráulico en estado endurecido es la condición en la que el concreto hidráulico es capaz de resistir las acciones para las cuales fue especificado (NMX-C-155-ONNCCE, 2014). La propiedad más valiosa del concreto endurecido es su resistencia mecánica, aunque como se ha mencionado anteriormente, en muchos casos otras características tales como la durabilidad o la permeabilidad pueden tener mayor importancia. Sin embargo, la resistencia mecánica es tomada como un parámetro general de calidad, por estar directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada, además de cumplir como un elemento vital para el diseño de la mezcla de concreto, para el diseño estructural y por especificada como un valor con fines de cumplimiento.

2.5.2.1 Comportamiento a compresión

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 200 y 400 kg/cm². Concretos con resistencias a compresión de 700 y 1400 kg/cm² han sido empleados en puentes especiales y edificios altos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El comportamiento a compresión del concreto se mide con la prueba de resistencia a la compresión, en parte porque es fácil de practicarse, y en parte porque la



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



mayoría de las características deseables del concreto están relacionadas cualitativamente con su resistencia; pero fundamentalmente por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del concreto en el diseño estructural (Neville A. , 2013)

2.5.2.2 Comportamiento a tracción

La resistencia a la tensión (resistencia a tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima normalmente como siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales (1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm²) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.5.2.3 Comportamiento a flexión

La resistencia a compresión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. La resistencia a flexión de concretos de peso normal es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales (1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm²) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

2.6 FIBRAS ADICIONADAS AL CONCRETO HIDRÁULICO EN LA INVESTIGACIÓN

Varias investigaciones han demostrado que las adiciones con fibras en cantidades normalmente cerca de 1 a 2 % por volumen en concretos convencionales pueden mejorar sus características. Los concretos adicionados con fibras son considerablemente más firmes, tienen mayor resistencia al agrietamiento y al impacto.

El uso de fibras ha aumentado la versatilidad del concreto al reducir su fragilidad. El acero de refuerzo proporciona refuerzo solo en la dirección de la varilla, mientras



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



que las fibras distribuidas aleatoriamente proporcionan resistencia en todas las direcciones (McCormac & Brown).

El instituto mexicano del cemento y el concreto menciona que, para el uso efectivo de fibras en el concreto endurecido se deben tener contempladas las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, un módulo de elasticidad más alto. No es nuestro caso.
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

Tipos de fibras

Vidrio

la fibra de vidrio está disponible en longitudes continuas o en trozos. Se utilizan longitudes de fibra de hasta 35 mm en aplicaciones de rociado y las longitudes de 25 mm en aplicaciones de premezclado. Esta fibra tiene alta resistencia a tensión (2–4 GPa) y alto módulo elástico (70–80 GPa) pero tiene características quebradizas en esfuerzo-deformación (2.5–4.8% de alargamiento a la rotura) y poca fluencia a temperatura ambiente. Se han hecho afirmaciones en el sentido de que se ha usado exitosamente hasta 5% de fibra de vidrio por volumen en el mortero de arena-cemento sin formar bolas. Los productos de fibra de vidrio expuestos a ambientes a la intemperie han mostrado una pérdida de resistencia y ductilidad.

Es adecuado para usarse en técnicas de rociado directo y procesos de premezclado; ha sido usado como reemplazo para fibras de asbesto en hojas planas, tubos y en una variedad de productos prefabricados (IMCYC, 2007).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Acero

Típicamente las fibras de acero tienen diámetros equivalentes (con base en el área de la sección transversal) de 0.15 a 2 mm y longitudes de 7 a 75 mm. Las relaciones de aspecto generalmente varían de 20 a 100. (La relación de aspecto se define como la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente, que es el diámetro de un círculo con un área igual al área de la sección transversal de la fibra). Las fibras de acero tienen alta resistencia a tensión (0.5–2 GPa) y alto módulo de elasticidad (200 GPa), una característica dúctil y plástica en esfuerzo-tensión (IMCYC, 2007).

Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímica y textil. La mayoría de las aplicaciones de las fibras sintéticas están en el nivel de 0.1% por volumen. A ese nivel, se considera que la resistencia del concreto no se ve afectada y se buscan las características de control de las grietas. Los tipos de fibras que han sido ensayados en las matrices de concreto de cemento incluyen: acrílico, poliéster, polietileno y polipropileno (IMCYC, 2007).

- Acrílico

Las fibras acrílicas han sido usadas para reemplazar la fibra de asbesto en muchos productos de concreto reforzado con fibras. También se han agregado fibras acrílicas al concreto convencional a bajos volúmenes para reducir los efectos del agrietamiento por contracción plástica (IMCYC, 2007).

- Poliéster

Las fibras de poliéster están disponibles en forma de monofilamentos y pertenecen al grupo de poliéster termoplástico. Son sensibles a la temperatura y a temperaturas por encima del servicio normal sus propiedades pueden ser alteradas. Las fibras de poliéster son algo hidrófobas. Se han usado a bajos contenidos (0.1% por volumen)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



para controlar el agrietamiento por contracción plástica en el concreto (IMCYC, 2007).

- Polipropileno

El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. Las fibras de polipropileno son hidrófobas y por lo tanto tienen como desventajas el tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento, un bajo punto de fusión, alta combustibilidad y un módulo de elasticidad relativamente bajo. Las fibras de polipropileno son tenaces, pero tienen baja resistencia a tensión y bajo módulo de elasticidad; tienen una característica plástica de esfuerzo-deformación. Se asegura que se han usado exitosamente contenidos de fibras de polipropileno de hasta 12% por volumen, con técnicas de fabricación de empaquetado manual, pero se ha reportado que volúmenes de 0.1% de fibras de 50 mm en el concreto han causado una pérdida de revenimiento de 75 mm (IMCYC, 2007).

- Polietileno

El concreto reforzado con fibras de polietileno a contenidos de entre 2 y 4% por volumen exhibe un comportamiento de flexión lineal bajo cargas de flexión hasta la primera grieta, seguido por una transferencia de carga aparente a las fibras, permitiendo un incremento en la carga hasta que las fibras se rompen (IMCYC, 2007).

2.6.1 Polietileno Tereftalato

2.6.1.1 Historia del PET

Fue producido por primera vez en 1941 por los científicos británicos John Rex Whinfield y James Tennant Dickson, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras, buscando sustituir el algodón proveniente de Egipto.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se comenzó a emplear en forma de filme

para envasar alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos.

A partir de 1976, se le usa para la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes principalmente para bebidas. Sin embargo, el PET ha tenido un desarrollo extraordinario para empaques.

En México, se comenzó a utilizar para este fin a mediados de la década de los ochenta, del siglo XX.

Los primeros envases de PET aparecen en el mercado alrededor del año 1977 y desde su inicio hasta nuestros días el envase ha supuesto una revolución en el mercado y se ha convertido en el envase ideal para la distribución moderna (RecaudaPET, 2013).



Ilustración 6. Envases de PET. Fuente: Polycoplastic

2.6.1.2 ¿Qué es el PET?

El PET es una muestra de materiales directos plásticos procedentes del petróleo, perteneciendo su fórmula a la de un poliéster aromático. El nombre técnico es Polietilén Tereftalato o Politereftalato de etileno. Idóneo para las empresas consagradas a producir botellas de plástico y otros productos plásticos. Los termoplásticos manejados para la producción de las botellas plásticas son: Polietilentereftalato (PET) Ilustración 7, Polipropileno (PP), Policloruro de vinilo



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



PVC, Poliestireno y se obtienen por dos métodos de fabricación: Inyección-soplado o Inyección-soplado-estirado (Quishpe Gaibor & Ortiz, 2018)



Ilustración 7. Símbolo del PET. Fuente: RAJA BLOG

2.6.1.3 Impacto ambiental del PET

En todo el mundo, se compran un millón de botellas de plástico desechables para beber cada minuto, y hasta 5 billones de bolsas de plástico de un solo uso cada año. En total, la mitad de todo el plástico producido está diseñado para usarse solo una vez, y luego desecharse. Se estima que se han producido 8.3 millones de toneladas de plástico desde principios de la década de 1950 y alrededor del 60% de estos han terminado en un tiradero o en el medio ambiente (United Nations Environmental Programme, 2018).

En 2018 un estudio reveló que la exposición de distintos polímeros (particularmente PS y PET) a la radiación solar natural genera gases como el metano y etileno en cantidades que van desde los 10 a 5100 pmol/g por día. (INECC, 2020)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

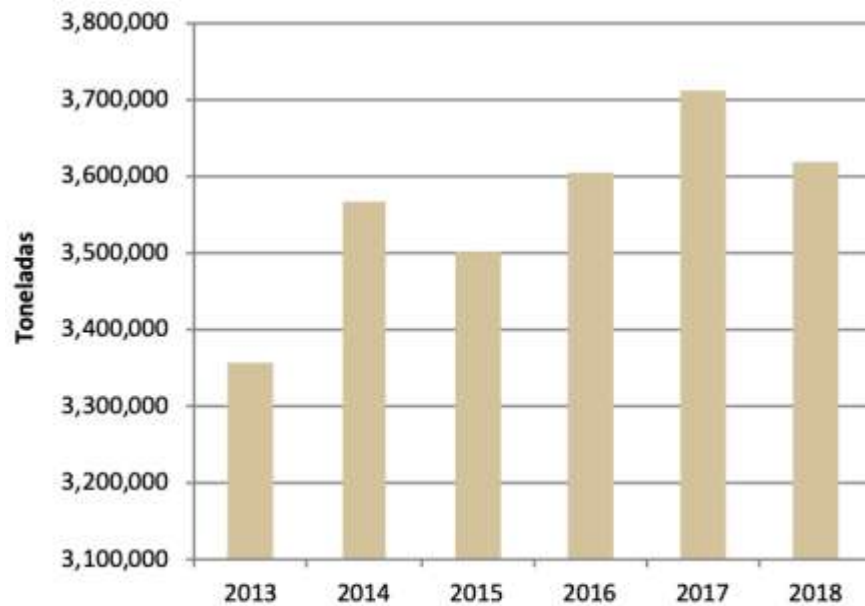


Ilustración 8. Cantidad de polímeros producidos en México; Fuente: (INECC, 2020)

De acuerdo a (SEMARNAT, 2021) “entre el 60 y el 80 por ciento de los residuos marinos son plásticos. En su mayoría son fragmentos menores a los cinco milímetros. Este hecho ocasiona que distintas especies de la fauna marina, al confundirlos con su alimento, los ingieran y les cause la muerte. De forma similar algunos de nuestros bosques, ríos y reservas naturales también han sido afectados al convertirse en basureros clandestinos Ilustración 9.

El PET es uno de los materiales más aptos para el reciclaje, por ello, en la sociedad se está produciendo una cultura de reciclaje de este material y distribuyendo de esta forma a cada empresa responsable de la reutilización y recogida de este material. El PET es uno de los materiales más reutilizados y reciclados del mundo. Este material se puede reutilizar en los siguientes productos: alfombras, cuerdas, cepillos, escobas, y recientemente se le ve presente en fibras utilizadas como material adicional en mezclas de concreto (INECC, 2020).



Ilustración 9. Botellas de PET desechadas. Fuente: Google.

2.6.1.4 Reciclaje de PET en México

El reciclaje es un mecanismo por el cual los materiales de desecho, entre ellos el plástico, vuelven a ser introducidos en un proceso de transformación para devolverles su utilidad como nuevos materiales. La importancia de reciclar está en su contribución a resolver algunos de los problemas creados por el ser humano, como lograr un aprovechamiento más racional de los recursos naturales no renovables, así como disminuir el consumo de energía y generar menos gases de efecto invernadero (INECC, 2020).

La asociación civil ambiental creada y auspiciada por la industria de bebidas y alimentos (ECOCE), destacó que México mantiene su liderazgo en la recuperación y reciclaje de envases de PET posconsumo (ECOCE, 2021), Ilustración 11.

En la ilustración 10 se muestra el acopio de botellas en México según información de la secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2021).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

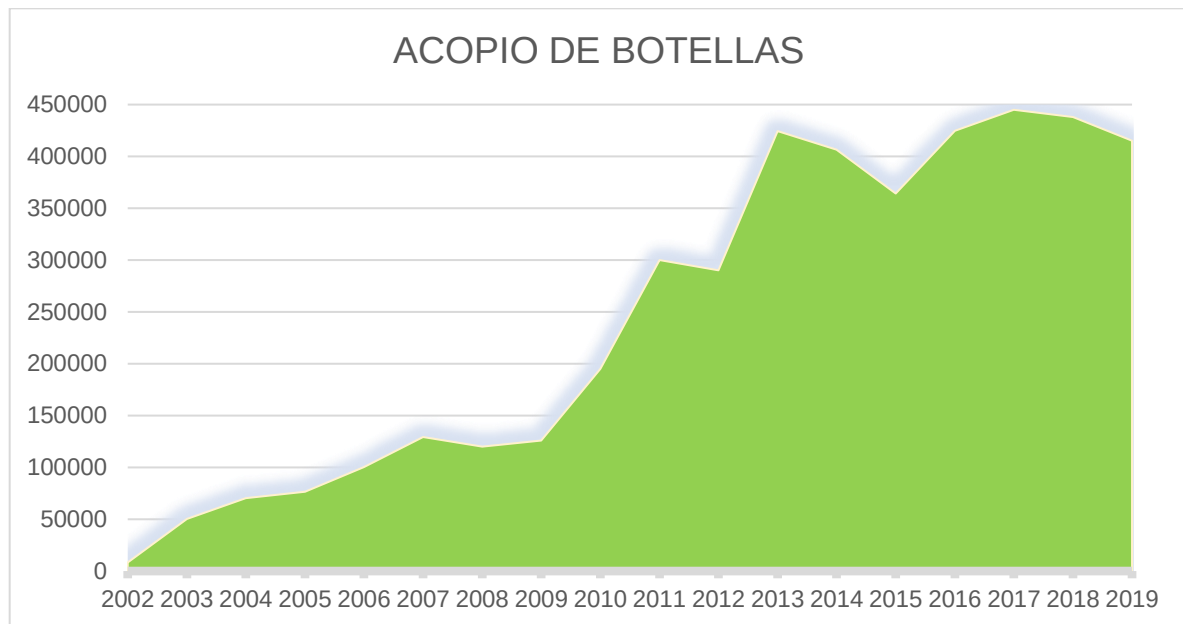


Ilustración 10. Acopio de botellas en México. Fuente: SEMARNAT 21/09/2021

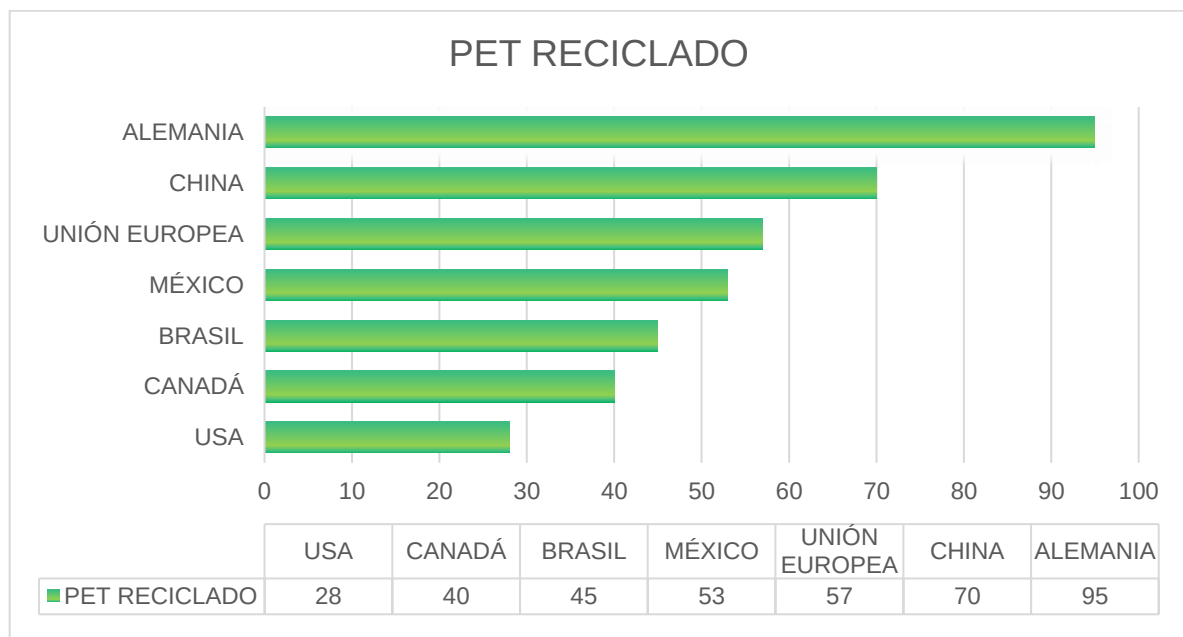


Ilustración 11. PET reciclado a nivel mundial. Fuente SEMARNAT 21/09/2021

En la actualidad poco más de 20 estados de toda la República Mexicana han modificado sus leyes en materia de manejo de residuos (INECC, 2020).

En el estado de Michoacán de Ocampo se ha implementado desde el 2018 el decreto descrito en la tabla 6.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 6. Avances en la regulación estatal en materia de residuos plásticos. Fuente: (INECC, 2020)

Estado	Marco regulatorio	Fecha de publicación	medidas	Acciones destacables	Fuente de consulta
Michoacán de Ocampo	Decreto Artículo primero. Se expide la ley para la prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial para el estado de Michoacán de Ocampo Artículo 1º fracción XIV	11 de octubre de 2018	Medida: “prohibir gradualmente el uso de bolsas, popotes de plástico y unicel” Plazo máximo: 11 de enero de 2019 Sujetos regulados: establecimientos mercantiles y comerciales		LXXIV Legislatura del H. congreso del estado libre y soberano de Michoacán de Ocampo (2018). Gaceta parlamentaria (p.4) Michoacán, México: gobierno del estado de Michoacán.

2.6.2 Fibras de polipropileno

2.6.2.1 Historia del polipropileno

En el año de 1951 J. Paul Hogans y Robert Banks estaban tratando de obtener gasolina en base a Propileno, lo cual no lograron, pero obtuvieron de su trabajo un catalizador (sustancia que acelera las reacciones químicas) que les permitió obtener una muestra de polipropileno, aunque en ese momento ni sus propiedades ni su catalizador lo hacían apto para un desarrollo industrial, con el tiempo permitió el desarrollo del polipropileno cristalino.

En paralelo a la Phillip Petroleum, la Standard Oil, por medio de Bernhard Evering y su equipo también estaban produciendo mezclas de Polipropileno y Polietileno en el año de 1950, utilizando un catalizador en base a molibdeno; los resultados fueron iguales de insatisfactorios a nivel industrial.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



En 1954 el equipo dirigido por el alemán Karl Ziegler había obtenido el polietileno de alta densidad (Ilustración 12) usando catalizadores organometálicos como las sales de Titanio y circonio; pero lo que no se percató inicialmente el equipo de Ziegler, era que también había obtenido Polipropileno.

Ese mismo año en Italia, comenzó a experimentar con los catalizadores de Ziegler, pero en vez de aplicarlos al Etileno lo hizo con el Propileno, obteniendo el Polipropileno Isotáctico; este tipo de Polipropileno de cadenas regulares, le confiere propiedades que han permitido su uso a nivel industrial y comercial (Roberto, 2015).

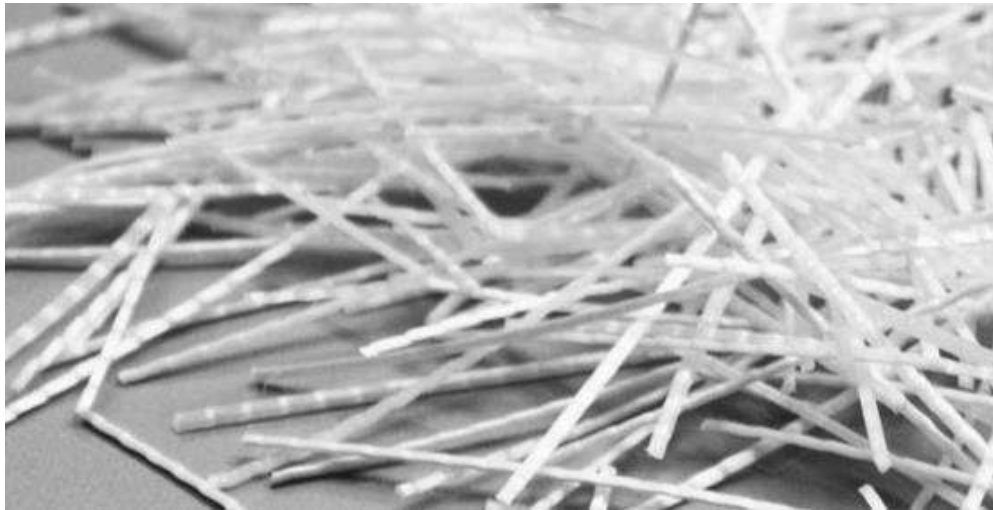


Ilustración 12. Fibras de polipropileno. Fuente: (Texdelta, s.f.)

2.6.2.2 Beneficios de las fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno cuentan con algunas características que les hacen ser un complemento ideal para obtener ciertas ventajas en las obras y concretamente como añadido al concreto, como se muestra a continuación, (Texdelta, s.f.).

- Sistema de refuerzo alternativo a las mallas, más barato, rápido y fácil de usar.
- Disminuye la formación de grietas por retracciones y contracciones.
- Ahorran tiempo de construcción ya que al mezclarlo con el concreto su aplicación es directa.
- Reducen costos de mano de obra al saltarse procedimientos en la ejecución de las obras.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Proporcionan refuerzo secundario y uniforme.
- Se mezclan fácilmente en el concreto, ya sea en planta como en obra.
- No es corrosivo ni magnético.
- Aportan tenacidad a la estructura.
- Aumentan la resistencia al impacto y evitan la erosión.
- Proporcionan seguridad a las obras.
- Proveen refuerzo tridimensional.
- Tienen una resistencia a la tracción alta.

2.6.2.3 Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno

Tabla 7. Información técnica. Fuente: (Macrofibras, s.f.)

Largo	44 mm ± 5%	50 mm ± 5%	54 mm ± 5%
Polímero	Polipropileno	polipropileno	Polipropileno
Gravedad específica	0.91 gr/cm ³	0.91 gr/cm ³	0.91 gr/cm ³
Absorción	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Color	Cristal	Cristal	Cristal
Módulo de elasticidad	≈ 800 ksi (5.5 Gpa)	≈ 800 ksi (5.5 Gpa)	≈ 800 ksi (5.5 Gpa)
Resistencia a la tensión	85 ksi (585 Mpa)	85 ksi (585 Mpa)	85 ksi (585 Mpa)
Punto de fusión	160 °C	160 °C	160 °C
Punto de ignición	587 °C	587 °C	587 °C
Resistencia a los álcalis, ácidos y sales	Alta	Alta	Alta
Tipo de anclaje	Fibra crimpada	Fibra crimpada	Fibra crimpada
Forma	Forma de palo	Forma de palo	Forma de palo
Relación de aspecto	55 ± 5%	62 ± 5%	67 ± 5%
Eficiencia espacial de la fibra a (0.25% vol.)	0.0401	0.0450	0.0480
Eficiencia espacial de la	0.3511	0.3801	0.3980



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



fibra a (0.50% vol.)			
----------------------	--	--	--

2.6.3 Durabilidad en estructuras de concreto reforzado

En la actualidad la durabilidad del concreto es una característica tan importante como las características mecánicas, debido a que determina la capacidad para resistir los agentes agresivos del medio ambiente. Los agentes que obstaculizan la durabilidad en las estructuras de concreto están asociados con la porosidad y permeabilidad, estas propiedades determinan la capacidad de permitir el flujo de líquidos y gases.

Los principales agentes químicos que dañan a las estructuras son; los cloruros, el dióxido de carbono, los sulfatos y los ácidos. La resistividad eléctrica está muy relacionada con la durabilidad del concreto, debido a que el flujo de corriente eléctrica en un material depende de su microestructura y su porosidad. Se espera que, a mayor porosidad, mayor sea el flujo de corriente eléctrica y por lo tanto su resistividad disminuya. A menor porosidad, hay mayor flujo de corriente y mayor resistividad (Solís Carcaño & Alcocer Fraga, 2019).

2.6.3.1 Proceso de corrosión en estructuras de concreto armado

La corrosión es un fenómeno complejo donde interactúan diferentes variables interdependientes que contribuyen de manera sistémica al proceso. Para evaluar los riesgos de la corrosión en las estructuras de concreto armado, se debe iniciar con la identificación de los factores que se pueden presentar en las fases de diseño, proceso constructivo, operación y mantenimiento de la estructura (UAdeC).

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto, es un fenómeno electroquímico que requiere un flujo eléctrico y algunas reacciones químicas para su desarrollo. Los tres elementos principales del proceso son el ánodo, el cátodo y la solución electrolítica presentes en la estructura, como se muestra en la ilustración 13.

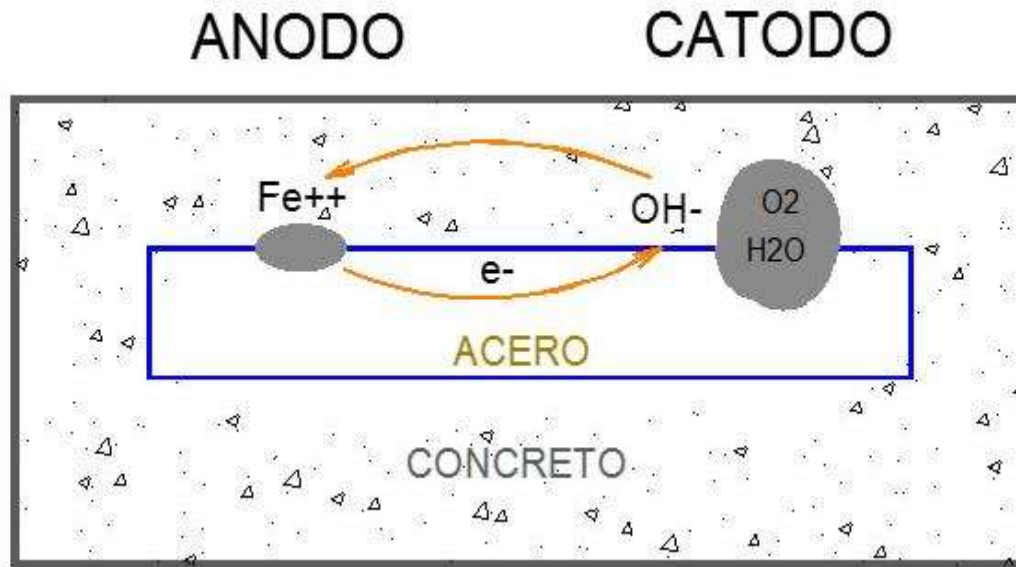


Ilustración 13. Corrosión en estructuras de concreto armado. Fuente: (UAdeC)

El ánodo y el cátodo pueden estar presentes en la misma barra de acero de refuerzo o en barras adyacentes del armado. El ánodo es la localización donde la corrosión toma lugar y el elemento metálico, en este caso el hierro, sufre una reacción de oxidación o reacción anódica debido a la pérdida de electrones, creando iones de hierro (Fe^{++}). El cátodo es la localización donde el hierro no es consumido debido a que el oxígeno, en presencia de agua, acepta electrones (reducción) formando iones hidroxilos (OH^-) (UAdeC).

La solución electrolítica es el medio que facilita el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo, en consecuencia, en el caso del concreto, al ser expuesto a altos ciclos de humedad se crea una conductividad suficiente para que funcione como un electrolito.

La iniciación y continuación del proceso de corrosión son controladas por el medio ambiente del concreto de recubrimiento del acero de refuerzo. El concreto es alcalino debido a la presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH y NaOH con un rango de alcalinidad de 12 a 13. Debido a la alta alcalinidad del agua intersticial en el concreto, el acero de refuerzo es pasivo debido a la capa de óxido (Fe_2O_3) formada por la oxidación de hidróxido de Hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) en presencia de oxígeno y agua,



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



reduciendo la velocidad de la corrosión. Para que la corrosión ocurra, la capa pasiva del acero de refuerzo necesita ser destruida, lo cual ocurre cuando se combina la presencia de oxígeno, agua y agentes agresivos como los cloruros, aumentando la conductividad y disminuyendo la resistividad del concreto (UAdeC).

2.6.3.2 Variables que influyen en la corrosión

- **La corrosión puede ser desencadenada por iones cloruro**, (periodo de propagación) ilustración 14, presentes en la superficie del acero con una concentración crítica de 0,4 % (en peso) respecto al contenido de cemento en el concreto. Siendo éstos los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas al ambiente ácido y en estructuras construidas con materiales contaminados, los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros, y en el segundo caso se incorporan al concreto como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.) (UAdeC).
- **La corrosión iniciada por carbonatación**, (periodo de iniciación de la corrosión) ilustración 14, es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del concreto. Como resultado, el pH del concreto carbonatado se reduce a valores menores que 9. Una vez que la carbonatación alcanza el acero de refuerzo, comienza la disolución de la película pasiva que protege el acero (UAdeC).

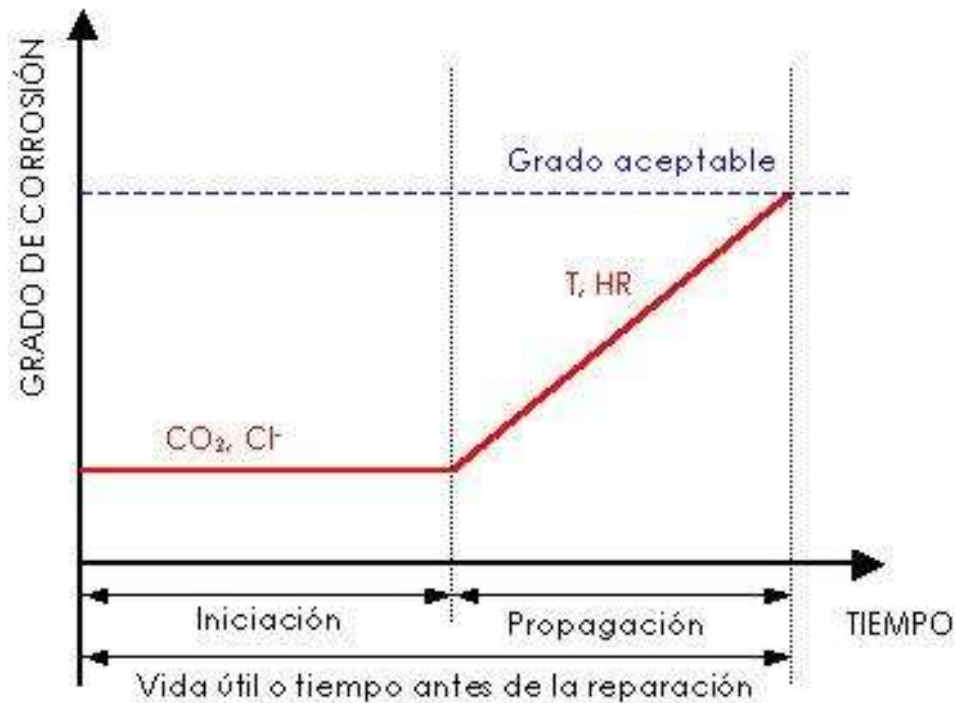


Ilustración 14. Diagrama de Tutti. Fuente: (Víctor Yepes , 2016)

- **La permeabilidad**, es el factor que principalmente determina la porosidad del concreto y la distribución de los tamaños de poro. Los poros facilitan el ingreso de elementos como Cl , CO_2 , O_2 , H_2O y algunos otros agentes agresivos del medio ambiente que favorecen el inicio y progreso de la corrosión. La permeabilidad del concreto está estrechamente relacionada a la relación agua cemento (A/C), por lo tanto, la permeabilidad del concreto se incrementa con el aumento de la relación A/C , especialmente cuando $A/C > 0,55$. En algunos casos la permeabilidad puede variar hasta dos veces cuando la relación A/C se incrementa de 0,4 a 0,7. Aditivos minerales mejoran la resistencia del concreto al agua ácida, agua con sulfatos y agua de mar, principalmente debido a la reacción puzolánica que causa el refinamiento de los poros reduciendo la permeabilidad del concreto (UAdeC).
- **El proceso de hidratación del cemento**



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Contribuye a la porosidad y la permeabilidad del concreto, en algunos casos, por ejemplo, la porosidad cambia de 29% a los 40 días de curado a 25,8% a los 296 días (UAdeC).

- **La humedad del concreto**

Favorece la penetración y disolución de los agentes agresivos y proporciona el vehículo para que la corrosión avance. Por otro lado, el recubrimiento del concreto sobre la armadura provee una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el medio ambiente exterior. Su eficiencia depende fundamentalmente de dos factores: el espesor del recubrimiento (ER), el cual se recomienda para ambiente ácido un mínimo de 5 cm, además de un diseño de la mezcla con una baja relación agua-cemento (A/C) lo que genera un ambiente propicio para un concreto de buena calidad en este ambiente (UAdeC).

- **La absorción de agua**

En el concreto desde el ambiente exterior puede incrementar rápidamente la velocidad de corrosión en el acero hasta generar fracturas y eliminación.

- **El proceso de corrosión del acero embebido en el concreto**

Puede ser monitoreado con la medición del potencial eléctrico mediante el procedimiento conforme a ASTM C876 Método de Prueba Estándar para Medición del Potencial de Celda Media del Acero de Refuerzo en el Concreto. El principio de esta técnica es esencialmente la medición del potencial de corrosión de las barras de refuerzo con respecto a un electrodo de referencia estándar, tales como electrodo de calomelanos saturado (SCE), electrodo de cobre/sulfato de cobre o electrodo de plata/cloruro de plata (UAdeC).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- **La resistividad eléctrica del concreto**

Es un parámetro importante para determinar la intensidad del proceso de corrosión inicial. El concreto con una alta resistividad eléctrica, ocasionará un proceso de corrosión lento en comparación con los concretos de baja resistividad en la que la corriente puede pasar fácilmente entre las zonas del ánodo al cátodo. La resistividad es fuertemente dependiente de la calidad del concreto y de las condiciones de exposición, tales como la humedad relativa y la temperatura, las cuales afectan el grado de saturación de los poros del concreto y por lo tanto los valores de resistividad (UAdeC).

2.6.3.3 Requisitos de durabilidad

En las tablas 8 y 9 se muestran los requisitos para un concreto durable en diferentes tipos de exposición ambiental, según las recomendaciones de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018),

Tabla 8. Clasificación de exposición ambiental. (NMX-C-530-ONNCCE, 2018)

Clase general de exposición				
Clase (ambiente de exposición)	Subclase (condición de exposición)	Tipo de proceso	Designación (clasificación)	Descripción
No agresivo	Seco	Ninguno	C0	Concreto en ambiente seco o protegido de la humedad y no sometido a condenaciones. Con una humedad relativa <40%
Rural/urbano	Concreto en contacto con humedad alta	Corrosión por carbonatación	C1	Concreto en ambiente con alta humedad relativa >80%, independiente de la contaminación por CO ₂ y SO ₂
	Concreto en contacto con humedad baja		C2	Concreto en ambiente con baja humedad relativa entre 40% y 50%, independiente de la contaminación por CO ₂ y SO ₂
	Concreto en contacto con humedad moderada		C3	Concreto en ambiente con moderada humedad relativa entre 50% y 80%, con contaminación por CO ₂ y SO ₂
Marina	Sumergida	Corrosión por cloruros	M1	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel mínimo de bajamar.
	Zonas aéreas con distancias de 50 m a 500 m a la línea de costa		M2	Elementos de exteriores de estructuras en las proximidades de la línea de costa (de 50m a 500 m)
	Zonas aéreas con distancia de 0 m a 50 m		M3	Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar (salpique) de 0 m a 50 m de la línea de costa
	En zonas de mareas		M4	Elementos de estructuras marinas situadas en zona de mareas y salpique
Concreto con cloruros de origen diferente al medio marino	Concreto reforzado o presforzado expuesto a la incorporación de ión cloruro desde su fabricación		CI1	Concreto producido con materiales que contengan contaminación de ion cloruro soluble en el agua < 0.06 % respecto al consumo de material cementante
	Concreto reforzado o presforzado expuesto a una fuente externa de cloruros		CI2	concreto expuesto a humedad y una fuente externa de cloruros

Industrial/agresividad química	Baja		Q1	Elementos situados en ambientes con contenido de sustancias químicas capaces de provocar la degradación del concreto con velocidad lenta
	Moderada		Q2	Elementos en contacto con agua de mar y/o situados en ambientes moderados con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la degradación del concreto con velocidad media
	Severa		Q3	Elementos expuestos a degradación alta del concreto, Instalaciones industriales con sustancias de alta agresividad
	Muy severa		Q4	Concreto expuesto a agresividad química muy alta de sólidos, líquidos y gases
Congelamiento y deshielo	Limitada exposición al agua	Congelamiento y deshielo	F1	Elementos situados en contacto limitado al agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno menores al 50% y que tengan una posibilidad anual superior al 50% de alcanzar temperaturas por debajo de - 5 °C
	Exposición frecuente al agua y sustancias descongelantes		F2	Elementos situados en contacto frecuente al agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno mayores a 50% y que tengan una posibilidad anual superior al 50% de alcanzar temperaturas por debajo de 5 °C y en contacto con sustancias descongelantes
Desgaste	Moderado a severo	Daño mecánico	D	Abrasión, cavitación. Elementos sometidos a desgaste superficial. Desgaste de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua
donde:				
C	Ataque por carbonatación			
M	Ataque por ambiente marino			
Q	Ataque químico			
F	Congelamiento y deshielo			
D	Daño mecánico			

Tabla 9. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición. (NMX-C-530-ONNCCE, 2018)

Requisitos		Sin riesgo de corrosión	Corrosión inducida por carbonatación			Corrosión inducida por cloruros						Industrial/ Agresividad química				Congelamiento y deshielo		Desgaste
						Proveniente de agua de mar				Origen destino del agua de mar						Limitada exposición al agua	Exposición frecuente al agua y sustancias descongelantes	
		C0	C1	C2	C3	M1	M2	M3	M4	Cl1	Cl2	Q1	Q2	Q3	Q4	F1	F2	D
Máxima relación a/c	Simple											0.50	0.45	0.45	0.40			0.50
	Reforzado	0.60	0.60	0.55	0.50	0.40	0.45	0.42	0.40	0.50	0.40	0.50	0.45	0.40	0.40	0.55	0.45	0.45
	Presforzado	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.42	0.38	0.35	0.40	0.35	0.50	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40	0.45
Contenido mínimo de cemento (kg/m3)	Simple	230	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	300	350	380	250	250	275
	Reforzado	250	250	280	300	300	380	400	450	300	450	250	300	350	380	300	450	300
	Presforzado	250	280	300	350	380	400	450	480	380	480	300	350	380	400	325	480	350
Resistividad húmeda mínima a 90 días (kΩ-cm)	Simple	10	10	20	15	20	20	20	20	20	20	20	20	30	40	20	40	30
	Reforzado	10	15	25	20	30	40	50	60	30	60	20	30	40	50	20	50	40
	Presforzado	20	20	30	25	40	50	60	70	40	70	20	40	50	60	30	60	50
Recubrimiento mínimo (mm)	Simple	25	30	35	45	50	55	60	70	50	70	40	45	55	60	40	50	40
	Presforzado	30	35	40	50	55	60	70	80	60	80	45	50	60	70	45	60	50
Contenido de aire por TMA (%)	40 mm															4.50	5.50	
	20mm															5.00	6.00	
	10mm															6.00	7.50	
Requisitos adicionales para agregado						Desgaste máximo por prueba de los Ángeles ≤ 40%; densidad ≥ 2.4; Bajo contenido de materia orgánica										Resistente a congelamiento	Resistentes a congelamiento	Desgaste máximo por prueba de los Ángeles ≤ 40%; densidad ≥ 2.4
Otros requerimientos		Todo tipo de cemento	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0.6%			Cementos con 5< C3A<8%						Cementos con C3A<5%		Cementos con 5< C3A<8%		Todo tipo de cemento		



3 METODOLOGÍA

3.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

3.1.1 Cemento Portland

3.1.1.1 Consistencia normal del cemento.

El objetivo es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con una determinada masa de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

La prueba de consistencia normal permite conocer la cantidad de agua que es necesaria agregar a una cantidad determinada de cemento, para obtener una consistencia normal.

El agua de consistencia normal puede definirse como el agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato Vicat penetre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ durante 30 segundos en la pasta de cemento, después de haberse iniciado la prueba.

Equipo:

- 600g aproximadamente de cemento.
- Agua.
- Espátulas.
- Recipiente liso e impermeable.
- Aparato de Vicat.
- Balanza con aproximación de 0.1 gramos.
- Placas de vidrio.
- Guantes de látex.

Procedimiento:

1. Se pesan aproximadamente 600 g de cemento y se vierten sobre un recipiente liso e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una espátula.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje, respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).
3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca, Ilustración 15 (esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).



Ilustración 15. Elaboración de la pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia

4. En otro ciclo de 30 segundos consecutivos a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice.
5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
 - a. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
 - b. En los siguientes 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una mano a otra a una distancia aproximada de 15 centímetros, (se repite por lo menos 6 veces).
 - c. En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la esfera de cemento en la palma de la mano, se introduce a presión por el diámetro mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



sostiene con la otra mano llenando completamente el anillo con la pasta.

- d. Eliminamos todo exceso de pasta. A continuación, se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la parte superior con una espátula, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.
6. Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un émbolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el tornillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial.
7. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30s y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (Ilustración 16), se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento (si la lectura no es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, se repite el procedimiento hasta conseguir la lectura deseada).



Ilustración 16. Lectura de consistencia normal del cemento. Fuente: Elaboración propia



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Referencia:

(NMX-C-057-ONNCCE, 2015)

3.1.1.2 Tiempos de fraguado del cemento hidráulico.

Este ensayo debe ser realizado inmediatamente después de concluir el ensayo de consistencia normal, con la pasta de cemento adicionada con la cantidad óptima de agua.

Equipo:

- 600g aproximadamente de cemento.
- Agua.
- Espátulas.
- Recipiente liso e impermeable.
- Aparato de Gilmore.
- Balanza con aproximación de 0.1 gramos.
- Placas de vidrio.
- Guantes de látex.

Procedimiento:

Preparación de la pasta de cemento.

1. Siguiendo el procedimiento descrito en la preparación de mezcla para la consistencia normal del cemento, Ilustración 17.

Moldeado de la muestra.

2. Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 centímetros de diámetro y 1.3 centímetros de espesor en la parte central. Para moldear, se aplana primero la pasta de cemento sobre el vidrio, después moviendo la espátula desde los bordes hacia el centro (Ilustración 18), aplanado a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



húmedo y se deja ahí, hasta el tiempo requerido para determinar del tiempo de fraguado.



Ilustración 17. Preparación de la pasta de cemento. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 18. Elaboración de la pastilla de cemento. Fuente: Elaboración propia

Determinación de los tiempos de fraguado.

3. Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la menos pesada), sin que marque huellas apreciables, Ilustración 19.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 19. Aguja de Gillmore en contacto con la pastilla de cemento

4. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable.

Referencia:

(ASTM-C-266, 2015)

La norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2017) especifica el tiempo mínimo de fraguado 45 minutos y el máximo en 600 minutos.

3.1.1.3 Densidad del cemento hidráulico.

Se entiende por densidad del cemento hidráulico, la relación de la masa entre el volumen que desplaza este al introducirse en un líquido, con el cual no efectúe reacción química alguna.

Equipo:

- Muestra representativa de cemento.
- Matraz de Le Chatelier.
- Balanza con aproximación de 0.1gramos.
- Reactivo: petróleo.
- Recipiente con agua.
- Termómetro.
- Embudo de cristal.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Procedimiento:

1. Se llena el matraz Le Chatelier con petróleo (reactivo) hasta un nivel entre 0 y 1 ml. Para eliminar el líquido adherido en las paredes superiores del matraz y burbujas de aire, el matraz se coloca dentro de un recipiente con agua a temperatura del laboratorio, girando el matraz en círculo horizontal, (se deja en el agua hasta conseguir una estabilidad del líquido en el matraz).

La temperatura del agua debe mantenerse constante durante todo el ensayo, la variación no debe ser mayor a 0.2 °C al momento de tomar las lecturas.

Una vez estabilizado el nivel del líquido (reactivo) se toma la lectura inicial como Li.

2. Se pesa aproximadamente 60 g de cemento y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz. Se debe tener cuidado de evitar que el cemento se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
3. Se coloca el tapón al matraz y se eliminan las burbujas de aire que haya sido atrapado al introducir el cemento en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada sobre una superficie plana.
4. Una vez finalizado el paso 3, esperamos que se estabilice la temperatura nuevamente y tomamos la lectura final como Lf.

Cálculo:

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60 \text{ g}}{L_f - L_i}$$

Donde:

D = densidad del cementante hidráulico, en g/cm³.

M = masa del cementante hidráulico, en g.

V = volumen del líquido desalojado, en cm³.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Resultados:

Tabla 10. Resultados de la prueba de densidad en el cemento

CEMENTO		
	Muestra 1	Muestra 2
PESO DEL CEMENTO	60.00 g	60.00 g
L_i	0.90 cm ³	0.80 cm ³
L_f	20.60 cm ³	20.50 cm ³
VOLUMEN	19.70 cm ³	19.70 cm ³
DENSIDAD	3.05 g/cm ³	3.05 g/cm ³
PROMEDIO	3.046 g/cm³	

Referencia:

La norma (NMX-C-152-ONNCCE-2015, 2015) indica el rango entre valores de densidad en cemento de 2.9 - 3.15 g/cm³

3.1.2 Arena

Material fino que pasa por la malla No. 4 (abertura de 4.75mm) y retiene en la malla No. 2000 (abertura de 0.075mm) usado para la elaboración de mezcla de concreto hidráulico.

3.1.2.1 Cuarteto en arena.

“El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y sólo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio” (NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

El objetivo es obtener una muestra representativa y de tamaño adecuado para la experimentación.

Equipo:

- Palas.
- Cucharones.
- Divisor de muestras.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Procedimiento:

Existen tres procedimientos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras.

Método “A”. Cuarteo Mecánico.

- Procedimiento para divisor de muestras.
 1. Se tomó la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vació sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.
 2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera, Ilustración 20.



Ilustración 20. Cuarteo mecánico en arena. Fuente: Elaboración propia.

Método “B”. Cuarteo Manual.

- Procedimiento por cuarteo con palas.
 1. Se coloca la muestra original sobre una superficie limpia.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2. Se cambia el material de un extremo a otro con ayuda de la pala, tratando de homogenizar el material además de apilar el material de forma cónica (se repite este procedimiento por lo menos 3 veces).
3. Una vez terminado el paso 2 se aplana la parte superior con la cara posterior de la pala y después se divide el material en 4 partes iguales, eliminando las dos porciones opuestas. Si se requiere reducir la muestra aún más, se debe repetir el procedimiento mencionado, Ilustración 21.



Ilustración 21. Cuarteo manual en arena. Fuente: Elaboración propia.

Especificaciones:

Las muestras de campo de agregado fino que se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método “A”. Las muestras de campo que se reduzcan por el método “B” deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas.

Referencia:

(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)

3.1.2.2 Masa volumétrica suelta y seca (MVSS).

Se le considera masa volumétrica de los agregados, a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2014). El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena consiste en conocer una masa por



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural. Dicho ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la normativa correspondiente (NMX-C-073-ONNCCE, 2014)

Equipo:

- Muestra representativa de arena totalmente seca.
- Recipiente de masa y volumen conocidos.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Báscula.
- Cucharón y pala.

Procedimiento:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de arena.
2. Se vació la arena dentro del recipiente, dejando caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente (Ilustración 22), llenándolo hasta formar un cono.
3. Se retiró todo el exceso enrasado con la varilla, eliminando todas las partículas adheridas.
4. Se llevó a pesar la muestra.
5. A la masa total se le resto la masa del recipiente, y así obtenemos la masa de la arena.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 22. MVSS en arena. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos

$$MVSS = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSS= Masa volumétrica suelta y seca, en g/cm³

M= Masa de la arena en g

V= Volumen del recipiente en cm³

Resultados:

Tabla 11. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y suelta en arenas. Elaboración propia.

DATOS	ARENA BLANCA (AB)		ARENA NEGRA (AN)		ARENA (50% AB Y 50% AN)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	5,300	5,310	5,565	5,535	5,455	5,460
Masa del recipiente (g)	1,840	1,840	1,840	1,840	1,890	1,890
Masa de arena (g)	3,460	3,470	3,725	3,695	3,565	3,570



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Volumen del recipiente (cm ³)	2,787	2,787	2,787	2,787	2,759	2,759
MVSS (g/cm ³)	1.24	1.25	1.34	1.33	1.292	1.29
PROMEDIO	1.24 g/cm ³		1.33 g/cm ³		1.29 g/cm ³	

Referencia:

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

3.1.2.3 Masa volumétrica seca y varillada (MVSV).

Determinar la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material presenta una compactación, para esta prueba seguimos el procedimiento de la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

Equipo:

- Muestra representativa de arena totalmente seca.
- Recipiente de masa y volumen conocidos.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Báscula.
- Cucharón y pala.

Procedimiento:

1. Del procedimiento de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de arena.
2. Se vació la arena dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente, llenando el recipiente en 3 capas y dando 25 golpes en cada capa de arena, cuidando no penetrar la capa inferior al dar los golpes, Ilustración 23.
3. Se retiró todo el exceso enrasado con la varilla y eliminando todas las partículas adheridas.
4. Se llevó a pesar la muestra.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



5. A la masa total se le resto la masa del recipiente, y así obtenemos la masa de la arena.



Ilustración 23. MVSV en arena. Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$MVSV = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSV= Masa volumétrica suelta y varillada, en g/cm³.

M= Masa de la arena, en g.

V= Volumen del recipiente, en cm³.

Resultados:

Tabla 12. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y varillada en arenas

DATOS	ARENA BLANCA (AB)		ARENA NEGRA (AN)		ARENA (50% AB Y 50%AN)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	5710	5720	5855	5850	5900	5895
Masa del recipiente (g)	1840	1840	1840	1840	1890	1890
Masa de arena (g)	3870	3880	4015	4010	4010	4005



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Volumen recipiente (cm ³)	2787	2787	2787	2787	2759	2759
MVS _V (g/cm ³)	1.389	1.392	1.441	1.439	1.453	1.452
PROMEDIO	1.390 g/cm ³		1.440 g/cm ³		1.453 g/cm ³	

Referencia:

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) especifica la masa volumétrica compactada con varilla debe ser mayor que 1120 kg/m³

3.1.2.4 Humedad de absorción.

La absorción es la propiedad de los agregados que más influye en el diseño y elaboración de la mezcla de concreto hidráulico.

La normativa (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) define la absorción como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente; debido al agua que se introduce en los poros del material, sin incluir el agua adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca y es índice de la porosidad del material.

Equipo:

- Aproximadamente 2 kg de arena seca.
- Balanza.
- Parrilla.
- Charolas metálicas.
- Molde troncocónico.
- Pisón.
- Espátula.
- Vidrio reloj.

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Del método de cuarteo se extrajeron 2 kg. Aproximadamente de arena, se colocó en la charola y se puso a saturar por $24h \pm 4h$.
2. Después de estar saturada la muestra, se secó superficialmente la muestra, por medio del método del molde troncocónico de la siguiente forma (Ilustración 24).
 - Se colocó una porción de arena en una charola, y posteriormente se puso en contacto con la parrilla y así eliminar el exceso de agua, hasta estar en un estado de superficialmente seca.
 - Para saber cuándo ya está superficialmente seca (sss), se colocó el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena completamente el cono y con ayuda del pisón se dan 10 compactaciones con el peso propio del pisón, se llena nuevamente el cono y se dan 10 compactaciones más, para la tercera capa se llena el cono y se dan 3 compactaciones más y finalmente en la última capa se dan 2 compactaciones más, haciendo un total de 25 compactaciones.
 - Se retira el cono verticalmente y se observa que: si la arena mantiene la forma del cono, esta aun contiene exceso de agua, por lo que el proceso se repite. Cuando al retirar el cono este se disgrega deformándose parcialmente, la muestra ya alcanzo la condición de superficialmente seco.
3. Una vez alcanzada la condición de superficialmente seco, se extrae una muestra aproximada de 300gr. Registrando este dato como superficialmente seco (mss.).
4. Esta muestra se coloca en una charola y se coloca en la parrilla para secarla totalmente.
5. Para saber cuándo la muestra está totalmente seca, se coloca el espejo y observamos que no se empañe, una vez pasando este procedimiento se retira del fuego, esperando a que se enfríe y así registrar el valor de (Ms).



Ilustración 24. Determinación de la masa superficialmente seca en arena.

Cálculos:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

A= Humedad de absorción, en %.

M_{sss}= Masa de muestra y superficialmente seca, en g.

M_s= Masa seca, en g.

Resultados:

Tabla 13. Resultados de la prueba de humedad de absorción en arenas

DATOS	ARENA BLANCA(AB)		ARENA NEGRA(AN)		ARENA COMPENSADA (50% AB Y 50% AN)	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
PESO HUMEDO (g)	300.00	300.00	320.00	306.50	300.00	300.00
PESO SECO (g)	285.40	285.60	304.00	290.50	284.90	285.10
HUMEDAD (g)	14.60	14.40	16.00	16.00	15.10	14.90



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



% ABS.	5.12%	5.04%	5.26%	5.51%	5.30%	5.23%
PROMEDIO	5.08%		5.39%		5.26%	

Referencia:

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

3.1.2.5 Densidad.

Siguiendo las recomendaciones de la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) realizamos la prueba con la finalidad de obtener el volumen efectivo de las partículas de agregado fino.

La densidad absoluta, se refiere al volumen de las partículas individuales solamente, y naturalmente, no es posible acomodar estas partículas para que no haya huecos entre ellas. Cuando el agregado se va a dosificar realmente por volumen, es necesario saber la masa de agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario. Ésta se conoce como la densidad aparente del agregado y se usa generalmente, para convertir cantidades por masa a cantidades por volumen (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Equipo:

- Aproximadamente 2 kg de arena seca.
- Balanza.
- Parrilla.
- Charolas metálicas.
- Molde troncocónico.
- Pisón.
- Espátula.
- Frasco de Chapman.
- Probeta.

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Del método de cuarteo se extrajeron 2 kg. Aproximadamente de arena, se colocó en la charola y se puso a saturar por $24h \pm 4h$.
2. Se utilizó el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción, para obtener la masa superficialmente seca.
3. Una vez que la arena alcanzó el estado de saturada y superficialmente seca, se pesaron 300 g aproximadamente, registrando este dato como (msss).
4. Se llenó con agua el frasco de Chapman hasta la marca de aforo (450 ml), y se registró este dato como (Mpa)
5. Retiramos el agua hasta el nivel de 200ml y colocamos la arena dentro del frasco.
6. Se inclinó el frasco 45° y se giró horizontalmente para eliminar las burbujas de aire atrapadas.
7. Después se llenó con agua el frasco hasta la marca de afore (450 ml) y se registró este dato como (Mpma) Ilustración 25.



Ilustración 25. Densidad en arena. Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

$$Dr_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_{pa} + M_{sss} - M_{pma}}$$

Donde:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Drsss= Densidad relativa.

Mpa= Masa del frasco de Chapman lleno, en g.

Msss= Masa de la muestra superficialmente seca, en g.

Mpma= Masa del picnómetro, muestra y agua, en g.

Resultados:

Tabla 14. Resultados de la prueba de humedad de absorción en arenas

ARENA (50% AB Y 50% AN)		
	Muestra 1	Muestra 2
MPA (g)	771.20	772.80
MSSS (g)	300.00	300.00
MPMA (g)	939.50	940.50
DRSSS	2.28	2.27
PROMEDIO	2.27	

Referencia:

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014)

La norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) especifica valores de densidad en arena de 2.24

3.1.2.6 Granulometría y módulo de finura.

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis o división de porciones del material por medio de tamices (cribas) de malla de alambre con aberturas cuadradas. La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se usan agregados gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente, para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



El módulo de finura es de máxima importancia ya que afecta directamente en la resistencia, en la trabajabilidad de la mezcla, en la cohesión de sus agregados y sobre todo requiere una mayor cantidad de cemento y lo cual impactaría directamente en el costo de producción.

Equipo:

- Una muestra representativa de arena.
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada del No. 4 (4.75 mm), No. 8 (2.36 mm), No. 16 (1.18 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm), No. 200 (0.075 mm) y una charola con su respectiva tapa.
- Máquina Raf-Tap.
- Una báscula con aproximación de 0.1 gramo.
- Charolas metálicas y espátulas.
- Una parrilla eléctrica.
- Cepillos de cerdas suaves y de alambre.
- Hojas de papel.

Procedimiento:

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente de 600 gramos. Dicha muestra fue obtenida de la reducción por cuarteo anteriormente mencionada.
2. Se secó la muestra hasta masa constante a una temperatura no mayor a 110 °C.
3. Cuando el material ya se encontraba seco y frío, se tomaron aproximadamente 500 gramos.
4. Se colocaron el juego de mallas en orden decreciente (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola) y se vació la muestra de aproximadamente 500 gramos en la parte superior, para posteriormente tapar la malla de mayor abertura.

5. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda de la máquina agitadora (Raf-tap), se agitó la muestra durante un tiempo aproximado de 10 ± 5 minutos.
6. Se procedió a extraer el material retenido en cada una de las mallas, colocando el material en las hojas de papel, Ilustración 26, con ayuda de un cepillo de alambre se desalojó el material que se encontraba entre los espacios de las mallas del No. 4, 8, 16 y 30, mientras que las mallas del No. 50, 100 y 200 se limpiaron con cepillo de cerdas suaves.



Ilustración 26. Extracción del retenido en las mallas. Fuente: Elaboración propia

7. Una vez realizado el procedimiento mencionado en el paso 6. Se pesaron las muestras y en una superficie horizontal y limpia se dejaron las muestras para observar la distribución de tamaños, Ilustración 27.



Ilustración 27. Distribución de la granulometría en arena. Fuente: Elaboración propia

Cálculos:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 15. Tabla de registro para datos de retenido en agregado fino

Malla	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
No. 8				
No. 16				
No. 30				
No. 50				
No. 100				
No. 200				
CHAROLA				
Total			MF=	

1. Masa retenida: se colocan los pesos respectivos del retenido de cada malla.
2. % retenida: se calcula de la sig. Fórmula.

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma del peso retenido}} * 100$$

3. % acumulativo:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ retenido de la malla} + \% \text{ retenido de la malla anterior}$$

4. % que pasa:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

5. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de la malla \#4 hasta la malla \#100}}{100}$$

Gráfica granulométrica:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

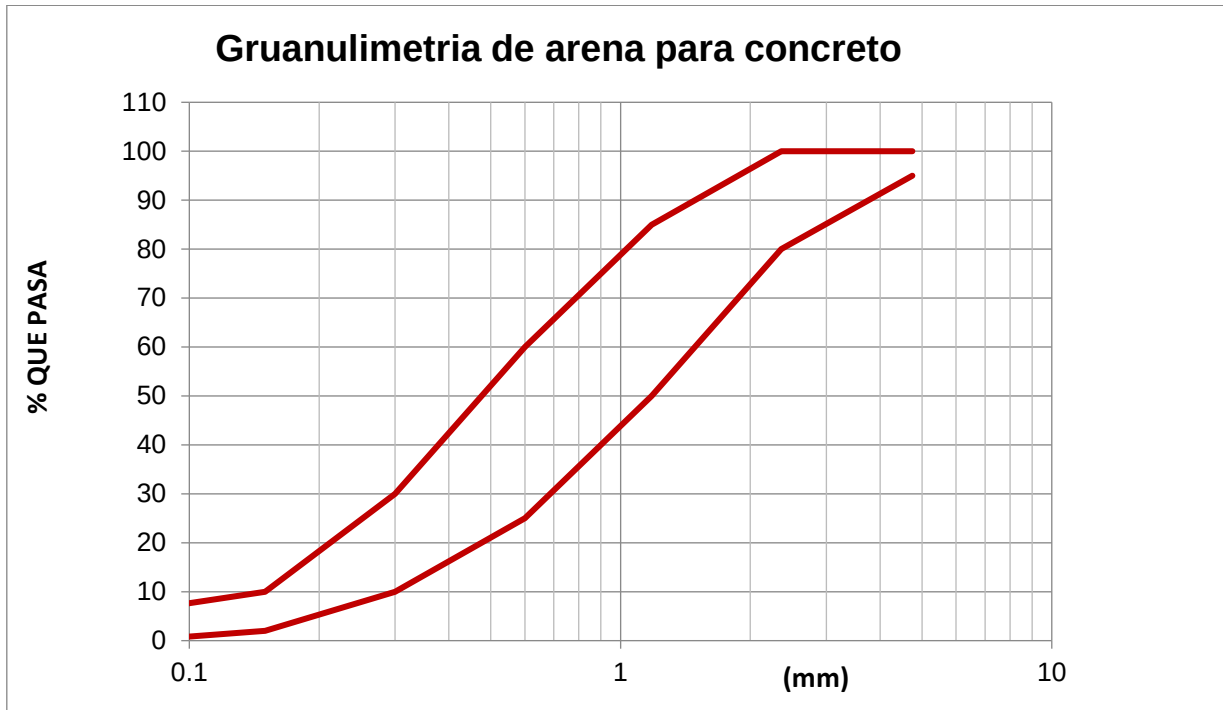


Ilustración 28. Curva granulométrica, límites para concreto. Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 16. Resultado del análisis granulométrico en arena blanca (AB). Fuente: Elaboración propia

Arena blanca (AB)				
Masa de la muestra			500 g	
Malla	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
No. 8	27.95	5.60	5.60	94.40
No. 16	64.50	12.92	18.52	81.48
No. 30	125.70	25.18	43.69	56.31
No. 50	138.85	27.81	71.50	28.50
No. 100	57.90	11.60	83.10	16.90
No. 200	44.10	8.83	91.93	8.07
CHAROLA	40.30	8.07	100.00	0
Total	499.30		MF=	2.22



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 17. Resultados del análisis granulométrico en arena negra (AN). Fuente: Elaboración propia

Arena negra (AN)				
Masa de la muestra			500 g	
Malla	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
8	72.00	14.40	14.40	85.60
16	131.10	26.22	40.62	59.38
30	130.90	26.18	66.80	33.20
50	78.60	15.72	82.52	17.48
100	38.80	7.76	90.28	9.72
200	25.40	5.08	95.36	4.64
CHAROLA	23.20	4.64	100.00	0
Total	500.00		MF=	2.95

Tabla 18. Resultados del análisis granulométrico en arena (50% AB Y 50% AN). Fuente: Elaboración propia

Granulometría en arena 50% AB y 50% AN				
Masa de la muestra			300 g	
Malla	Masa retenida g	% retenido	% acumulado	% que pasa
8	43.13	14.42	14.42	85.58
16	60.40	20.20	34.62	65.38
30	68.93	23.05	57.68	42.32
50	52.00	17.39	75.07	24.93
100	32.83	10.98	86.04	13.96
200	21.40	7.16	93.20	6.80
CHAROLA	20.33	6.80	100.00	0
Total	299.02		MF=	2.67

Gráficas granulométricas



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

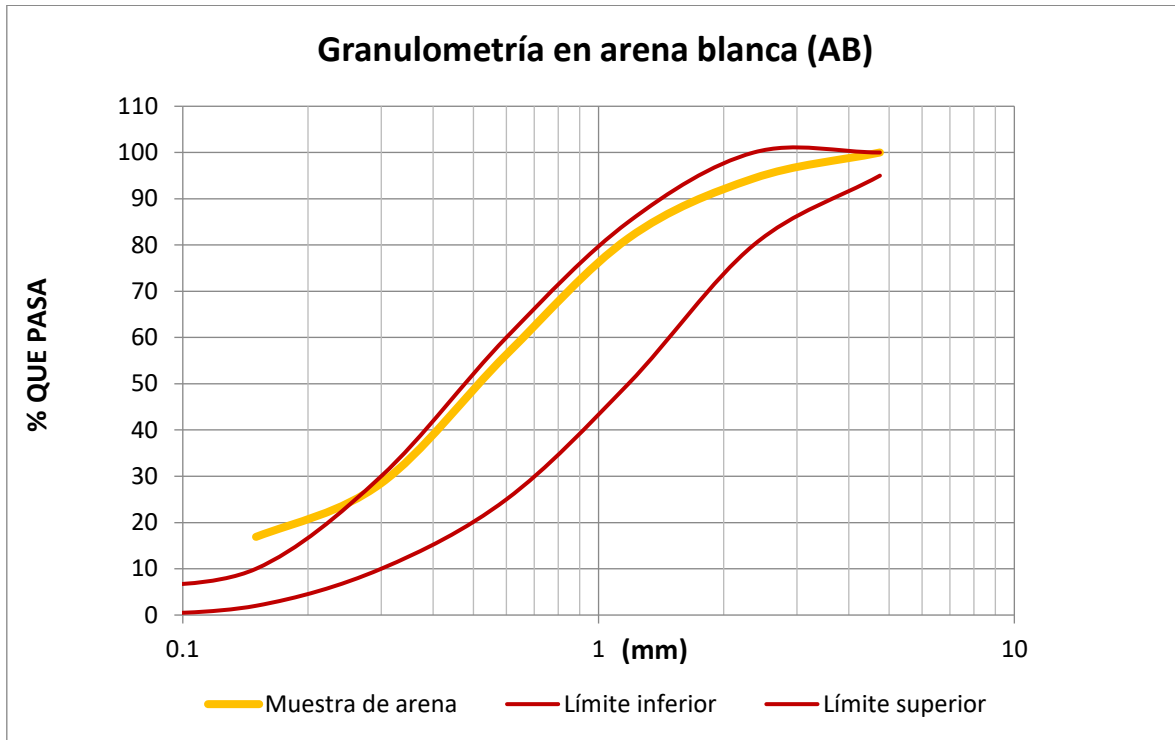


Ilustración 29. Curva granulométrica en arena blanca. Fuente: Elaboración propia

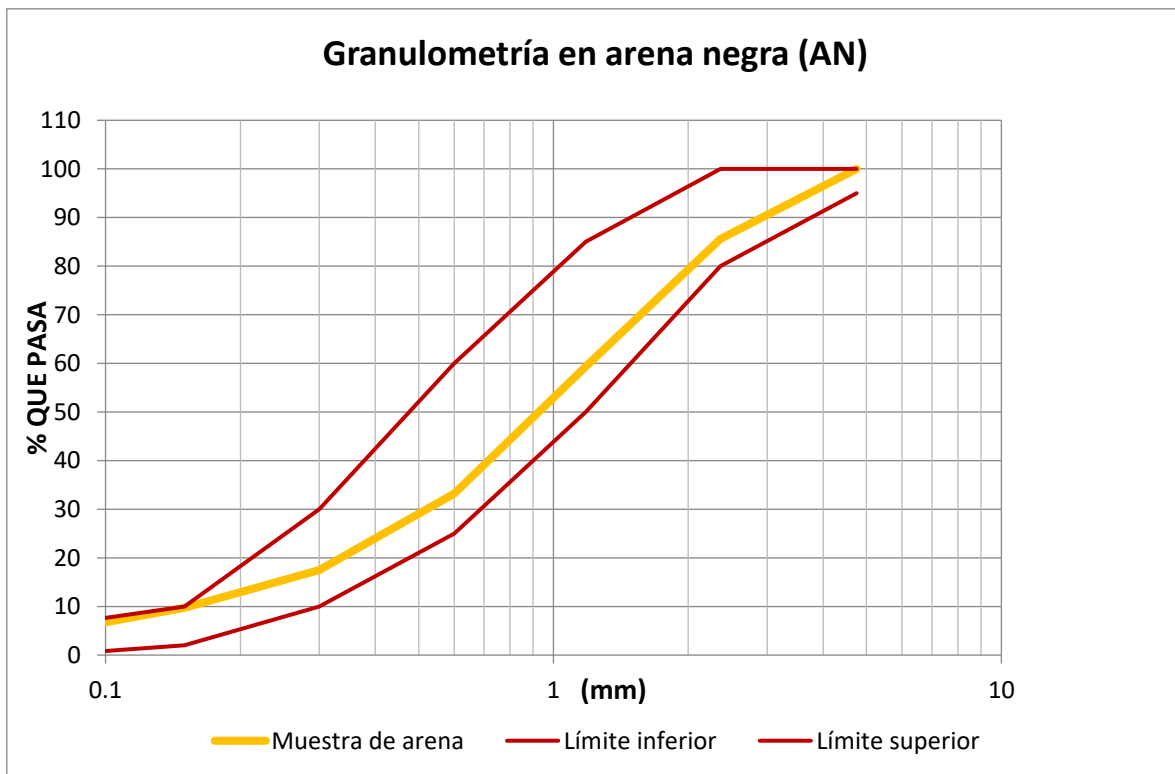


Ilustración 30. Curva granulométrica en arena negra. Fuente: Elaboración propia



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

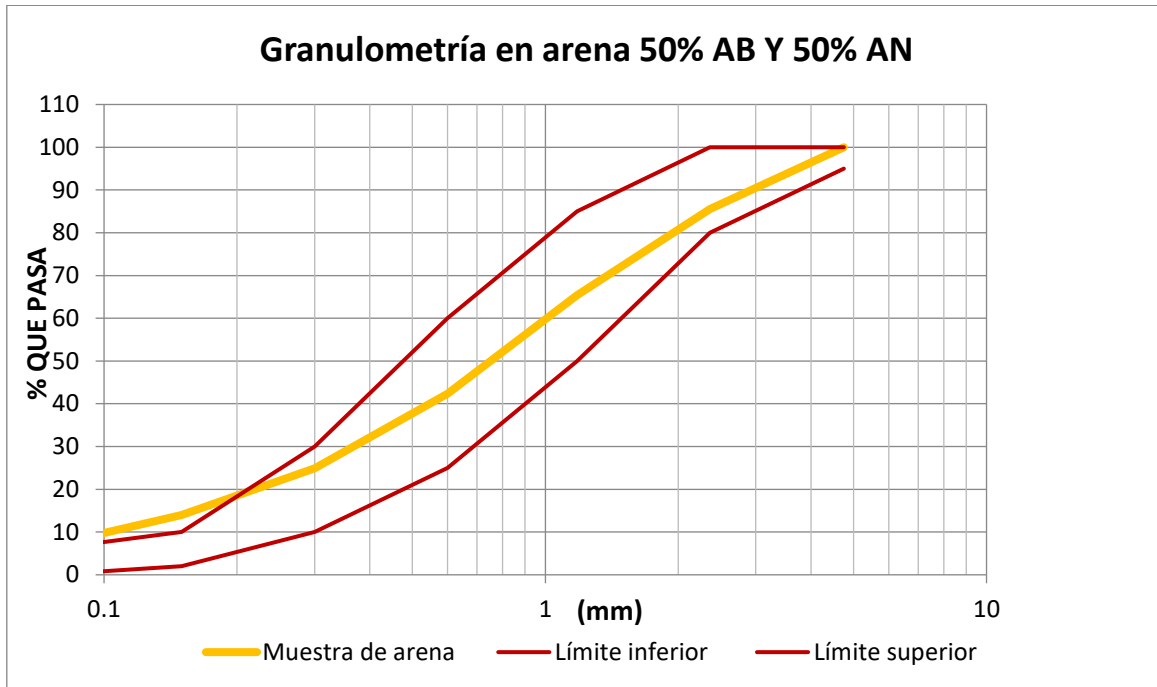


Ilustración 31. Curva granulométrica en arena 50% AB y 50% AN

Referencia:

(NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

3.1.2.7 Determinación del contenido de material orgánico (colorimetría)

Este procedimiento se lleva a cabo con la finalidad de determinar si la arena es adecuada para realizar una mezcla de concreto, ya que es un parámetro visual que nos indica si hay materia orgánica dañina o no.

El exceso de impurezas baja las propiedades mecánicas del concreto.

La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) menciona que, una vez efectuado el ensayo, la solución que presente un color más oscuro que la coloración No. 3 de la tabla colorimétrica, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes.

Equipo:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Botellas iguales de vidrio incoloro (biberón) de aproximadamente 350 cm³ con marcas a cada 25 cm³.
- Muestra representativa de arena.
- Solución de sosa cáustica 30g por litro de agua destilada.
- Balanza con aproximación de 0.1g.
- Tabla colorimétrica.
- Espátula y charolas metálicas.

Procedimiento:

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente de 1kg. se secó hasta una masa constante a una temperatura no mayor a 110 °C.
2. Una vez seca la arena, la dejamos enfriar y colocamos una muestra en el frasco de biberón hasta 133 cm³.
3. Añadimos la solución de sosa cáustica hasta la marca de 206 cm³.
4. Tapamos el frasco de biberón y agitamos durante 2 minutos aproximadamente y dejamos reposar durante 24 horas (Ilustración 32).
5. Una vez cumplidas las 24 horas, comparamos el líquido de la botella con la tabla colorimétrica.



Ilustración 32. Colorimetría en arena. Fuente: Elaboración propia



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Resultados:

Tabla 19. Resultados de la prueba de colorimetría en arenas.

	Muestra	N. de la tabla colorimétrica
Arena blanca (AB)	1-3	1
Arena negra (AN)	1-2	2

Recomendaciones:

Si el color es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de exceso de materia orgánica.

Por lo que se recomienda hacer otra prueba, pero con el material lavado, si este resultado sigue siendo igual, se debe completar la prueba con un análisis químico.

Referencia:

(NMX-C-088-ONNCCE, 2019)

3.1.2.8 Sedimentación

Determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto, al observar una ausencia o exceso de finos en el material.

Esta prueba se desarrolló siguiendo las recomendaciones del manual de análisis de materiales (Navarro Sánchez , Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011) del laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería civil.

Equipo:

- Frasco graduado con tres marcas (la primera a 414 ml, la segunda a los 444 ml y la tercera a los 828 ml).
- Muestra de arena seca de aproximadamente 2 kg.
- Agua destilada.

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de los 414 ml.
2. Colocamos agua hasta la marca de 828 ml, tapamos el frasco, agitamos hasta que todo el material fino quede suspendido en el agua.
3. Se deja reposar durante 24 horas para determinar el nivel de material fino.
4. Observamos si el material fino rebasa o no la marca de 444 ml (Ilustración 33).



Ilustración 33. Sedimentación en muestras de arena

Resultados:

Tabla 20. Resultados de la prueba de sedimentación en arenas.

	Muestra	Resultado
Arena blanca (AB)	1-3	Aceptable
Arena negra (AN)	1-2	Aceptable

Observaciones:

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de los 444 ml, el material se reporta con exceso de finos.
- Si el material fino no rebasa la marca de los 444 ml, el material se reporta como aceptable.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3.1.3 Grava

3.1.3.1 Cuarteo en gravas

Para realizar el cuarteo o reducción del agregado grueso, se aplicó el método “B” o cuarteo manual según lo especificado por la normativa (NMX-C-170-ONNCCE, 2019). La metodología corresponde a la misma que se aplicó en el agregado fino

Equipo:

- Muestra de grava.
- Palas.
- Escobas.

Procedimiento:

Método por paleo.

1. Se coloca la muestra original sobre una superficie limpia y la dejamos en el sol para lograr el secado de la grava.
2. Una vez seca, se cambia el material de un extremo a otro con ayuda de la pala, tratando de homogenizar el material además de apilar el material de forma cónica (se repite este procedimiento por lo menos 3 veces).
3. Una vez terminado el paso 2 se aplana la parte superior con la cara posterior de la pala y después se divide el material en 4 partes iguales, eliminando las dos porciones opuestas. Si se requiere reducir la muestra aún más, se debe repetir el procedimiento mencionado (Ilustración 34).



Ilustración 34. Cuarteo en grava



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Referencia.

(NMX-C-170-ONNCCE, 2019)

3.1.3.2 Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

La masa volumétrica de los agregados, como ya se mencionó anteriormente, es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2014). El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una grava consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural.

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla punta de bala.
- Balanza.
- Cucharones.

Procedimiento:

1. Del procedimiento de cuarteo, obtuvimos una muestra más pequeña y manejable de grava.
2. Se llena el recipiente con un cucharón, dejando caer la grava a una altura aproximada de 5 cm del borde superior del recipiente, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto hasta que se llene completamente hasta formar un cono.
3. Se enrasa con ayuda de la varilla punta de bala.
4. Finalmente se lleva a pesar la muestra.

Cálculos:

$$MVSS = \frac{M}{V}$$



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Donde:

MVSS= Masa volumétrica suelta y seca, en g/cm³.

M= Masa de la arena, en g.

V= Volumen del recipiente, en cm³.

Resultados:

Tabla 21. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y suelta en grava

DATOS	GRAVA	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	18,590.00	18,390.00
Masa del recipiente (g)	2,930.00	2,930.00
Masa de la grava (g)	15,660.00	15,460.00
Volumen recipiente (cm ³)	10,600.00	10,600.00
MVSS (g/cm ³)	1.48	1.46
PROMEDIO	1.47 g/cm ³	

Referencia:

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

3.1.3.3 Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Determinar la masa por unidad de volumen de un material, cuando el material presenta una compactación, para esta prueba seguimos el procedimiento de la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla punta de bala.
- Balanza.
- Cucharones

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Del procedimiento de cuarteo se obtuvo una muestra representativa de grava.
2. Se vació la grava dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de 5cm aproximadamente a partir de la arista superior del recipiente, llenando el recipiente en 3 capas y dando 25 golpes en cada capa de grava, cuidando no penetrar la capa inferior al dar los golpes.
3. Se retiró todo el exceso enrasado con la varilla o con la mano por comodidad.
4. Se llevó a pesar la muestra.
5. A la masa total se le resto la masa del recipiente.

Cálculos:

$$MVSV = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSV= Masa volumétrica suelta y varillada, en g/cm³.

M= Masa de la arena, en g.

V=Volumen del recipiente, en cm³.

Resultados:

Tabla 22. Resultados de la prueba de masa volumétrica seca y varillada en grava

DATOS	GRAVA	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa total (g)	19,720.00	19,800.00
Masa del recipiente (g)	2,930.00	2,930.00
Masa de la grava (g)	16,790.00	16,870.00
Volumen recipiente (cm ³)	10,600.00	10,600.00
MVSV (g/cm ³)	1.58	1.59
PROMEDIO	1.59 g/cm ³	

Referencia:

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) especifica la masa volumétrica compactada con varilla debe ser mayor que 1120 kg/m^3

3.1.3.4 Humedad de absorción

La absorción es definida como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca (NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

Equipo:

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 1 kg.
- Franela.
- Parrilla.
- Espátulas.
- Vidrio
- Balanza.
- Mallas $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$ ".

Procedimiento:

1. Se criba la muestra a través de la malla $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$ y del material que pasa la $\frac{3}{4}$ y se retiene en $\frac{3}{8}$ se pone a saturar durante 24 ± 4 horas.
2. Una vez cumplido el tiempo de saturado, se procede a secar superficialmente con una franela una muestra de aproximadamente 300 g. registramos ese valor como masa saturada y superficialmente seca (Mh).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3. Se coloca el material en una charola dejándolo en la parrilla para eliminar todo exceso de agua, y para saber cuándo está completamente seco se coloca el vidrio sobre la muestra y si no se empaña o se forman pequeñas gotas de agua, el material alcanzó el estado seco y se retira de la parrilla, dejándolo enfriar y finalmente llevarlo a pesar, registrando este dato como masa seca (M_s).

Cálculos:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

A= Humedad de absorción, en %

M_{sss} = Masa de muestra y superficialmente seca, en g.

M_s = Masa seca, en g

Resultados:

Tabla 23. Resultados de la prueba de humedad de absorción en grava

GRAVA		
	Muestra 1	Muestra 2
MASA HÚMEDA	307.60	307.00
MASA SECA	300.80	300.60
HUMEDAD	6.80	6.40
% ABS.	2.26	2.1
PROMEDIO	2.19%	

Especificaciones:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 24. Tipos de absorción en rocas. (N-CMT-2-01-003-19, 2019)

Tipo de absorción	% H. Absorción.
BAJA	Menos de 2%
MEDIA	Entre 2 y 4%
ALTA	Más de 4%

Referencia:

(NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

3.1.3.5 Densidad de la grava

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas de concreto de cemento Pórtland.

La densidad del agregado grueso, de acuerdo con la norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014), es la relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la densidad del agua, equivalente a la relación de la masa del agregado saturado superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua que se incluyen en los poros que se encuentran dentro de las mismas.

Equipo:

- Una muestra representativa de aproximadamente 3 kilogramos
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Charolas metálicas
- Cribas de tamaño de 3/4" y 3/8"
- Una franela limpia y seca
- Probeta graduada
- Un picnómetro

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Se criba la muestra a través de la malla $\frac{3}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ " y del material que pasa la $\frac{3}{4}$ y se retiene en $\frac{3}{8}$ se pone a saturar durante 24 ± 4 horas.
2. Una vez cumplido el tiempo de saturado, se procede a secar superficialmente con una franela una muestra de aproximadamente 300 g. registramos ese valor como masa de la muestra (M).
3. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro.
4. Se recibe el agua desalojada en una probeta graduada durante aproximadamente 15 minutos o hasta que deje de caer.
5. El volumen de agua desalojada en la probeta corresponde al volumen (V) de las partículas de grava, Ilustración 35.



Ilustración 35. Densidad en las muestras de grava. Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde.

D= Densidad, en g/cm³

M= Masa de la grava, en g.

V= Volumen de la grava, cm³.

Resultados:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 25. Resultados de la prueba de densidad en grava

GRAVA		
	Muestra 1	Muestra 2
VOLUMEN DESALOJADO (cm ³)	110.00	112.00
MASA HÚMEDA (g)	300.40	301.80
DENSIDAD RELATIVA (g/cm ³)	2.73	2.69
PROMEDIO	2.713 g/cm ³	

Referencia:

(NMX-C-164-ONNCCE, 2014)

La norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) especifica valores de densidad en arena de 2.24.

3.1.3.6 Granulometría y tamaño máximo del agregado

El tamaño de las partículas de la muestra de grava, se determinan por medio del tamizado en mallas o cribas con unas aberturas especificadas en la norma (NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

El tamaño máximo de agregado que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para mayores tamaños.

El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar.

Equipo:

- Muestra grava de aproximadamente 15 kg.
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada de 1 ½”, 1”, ¾”, ½ “, 3/8” y No.4.
- Charolas metálicas.
- Balanza

Procedimiento:

1. De la prueba de cuarteo en gravas, obtenemos una muestra de aproximadamente 15 kg. Secada previamente.
2. Colocamos las mallas de mayor a menor.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3. Pasamos el material por las mallas, agitándose con las manos, para que las partículas más pequeñas pasen a la malla siguiente, Ilustración 36.
4. Este procedimiento mencionado en el paso 3 se repite hasta terminar la muestra de grava.



Ilustración 36. Distribución granulométrica en grava.

Cálculos:

Tabla 26. Registro de datos de granulometría en grava. Fuente: (NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

Malla	Masa retenida	% retenido	% acumulado	% que pasa
1 "				
3/4 "				
1/2 "				
3/8 "				
No. 4				
PASA No.4				
Suma				

Gráfica granulométrica:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

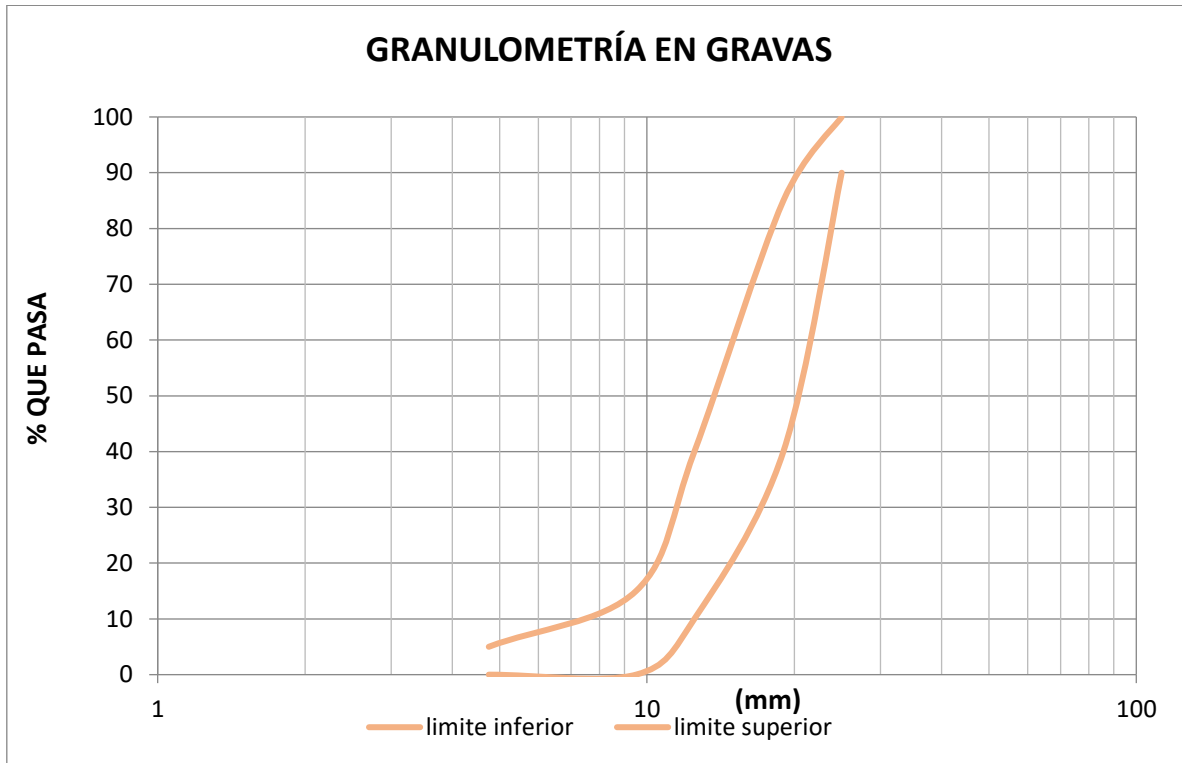


Ilustración 37. Límites granulométricos para concreto. Fuente: Elaboración propia

1. El porcentaje retenido se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida en la malla}}{\text{masa de la muestra}} \times 100$$

2. Porcentaje acumulado se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ acumulado de la malla} = \% \text{ acumulado} + \% \text{ retenido en la malla}$$

3. Porcentaje de la malla que pasa:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ acumulado de la malla}$$

4. Tamaño máximo de la grava se obtiene observando en la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retiene el 5% o más de la masa de la muestra.

Resultados:

Tabla 27. Resultados del análisis granulométrico en grava. Fuente: Elaboración propia

Malla	Masa retenida	% retenido	% acumulado	% que pasa
1 "	232.50	1.51	1.51	98.49



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3/4 "	6495.00	42.13	43.64	56.36
1/2 "	6425.00	41.67	85.31	14.69
3/8 "	1487.50	9.65	94.96	5.04
No. 4	732.50	4.75	99.71	0.29
PASA No.4	45.00	0.29	100.00	0.00
Suma	15417.50			

Gráfica granulométrica:

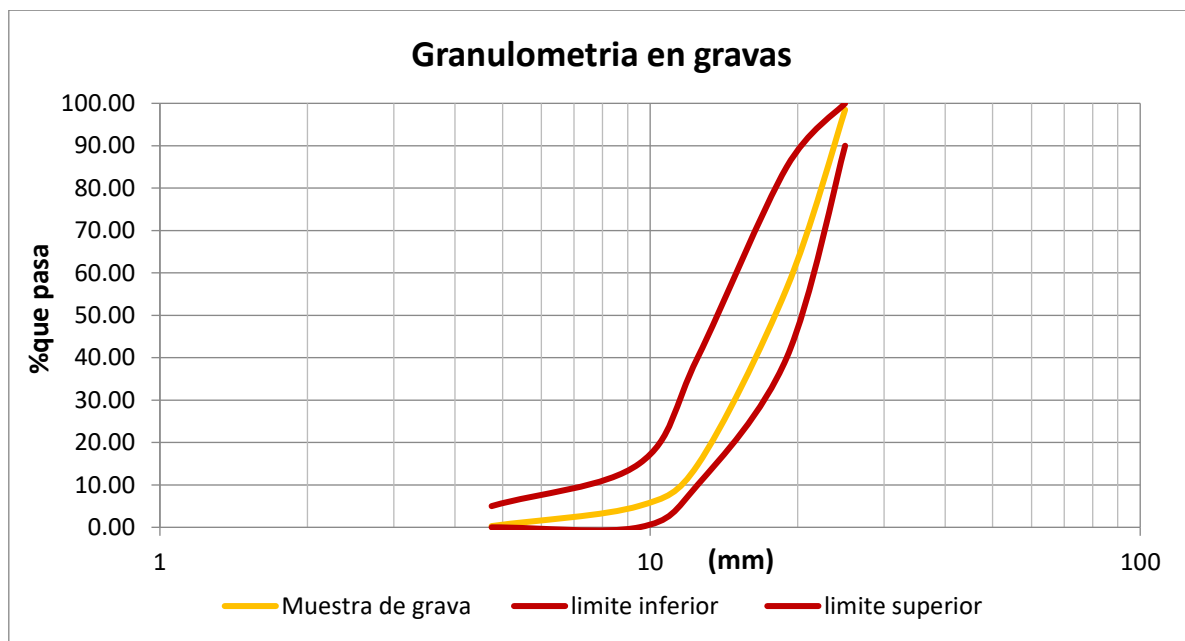


Ilustración 38. Curva granulométrica del agregado grueso. Fuente: Elaboración propia

Referencia:

(NMX-C-077-ONNCCE, 2019)

3.1.3.7 Desgaste por trituración de Los Ángeles

Para determinar la resistencia se hace actuar una carga abrasiva sobre la muestra de material. Dentro de la máquina de Los Ángeles, interactúan el material y unas esperas de acero con determinado diámetro y masa, que afectan su composición granulométrica, triturando el material y perdiendo masa. El porcentaje de pérdida de masa nos indicará la calidad del material ante el desgaste (M-MMP-2-02-032, 2018).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Equipo:

- Máquina de Los Ángeles
- Esferas de acero
- Juego de mallas
- Horno de secado
- Báscula con aproximación de 0.1g
- Charolas metálicas

Procedimiento

1. A partir del procedimiento de cuarteo, obtenemos una muestra representativa de grava.
2. Lavamos el material con la finalidad de eliminar todo exceso de polvo adherido y lo colocamos en el horno de secado a una temperatura de 100 ± 5 °C.
3. Cribamos la muestra, eliminando el material que pasa la malla No.10
4. En relación a la granulometría, se elige el tipo de composición (tabla 28) que se utilizará para esta muestra, para esta investigación elegimos la composición B.

Tabla 28. Composición de la muestra de prueba y carga abrasiva (M-MMP-2-02-032, 2018)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	Mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	25 – 37.5	1" – 1 ½"	1250 ± 25	12	5000 ± 25
	19 – 25	¾" – 1"	1250 ± 25		
	12.5 – 19	½" – ¾"	1250 ± 10		
	9.5 – 12.5	3/8" – ½"	1250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
B	12.5 – 19	½" – ¾"	2500 ± 10	11	4584 ± 25
	9.5 – 12.5	3/8" – ½"	2500 ± 10		



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
C	6.3 – 9.5	¼” – 3/8”	2500 ± 10	8	3330 ± 20
	4.75 – 6.3	Nº 4 – ¼”	2500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
D	2.36 – 4.75	Nº. 8 – Nº 4	5000 ± 10	6	2500 ± 15
E	67 – 75	2 ½ “ – 3”	2500 ± 25	12	5000 ± 25
	50 – 63	2” – 2 ½ “	2500 ± 25		
	37.5 – 50	1 ½ “ – 2”	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
F	37.5 – 50	1 ½ “ – 2”	5000 ± 25	12	5000 ± 25
	25 – 37.5	1” – 1 ½ “	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
G	25 – 37.5	1” – 1 ½ “	5000 ± 25	12	5000 ± 25
	19 – 25	¾” – 1”	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 50		

5. Obtenemos las cantidades de muestra de retenido como se indica en la tabla 28, lo registramos como P_i y procedemos a colocarlo en la máquina junto con el número de esferas de acero, Ilustración 39.



Ilustración 39. Esferas de metal. Fuente: Elaboración propia

6. Hacemos funcionar la máquina de Los Ángeles a una velocidad de 30 a 33 rpm durante 500 revoluciones, Ilustración 40.
7. Retiramos el material de la máquina, Ilustración 41 en una charola, pasamos la muestra por las mallas y desechamos el material que pasa por la malla Nº 12.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



8. Lavamos el material restante para eliminar polvo adherido y lo colocamos en el horno se secado a una temperatura de 100 ± 5 °C hasta una masa constante.
9. Finalmente dejamos enfriar la muestra a la temperatura ambiente del laboratorio y procedemos a pesar con aproximación de 0.1 g y lo registramos como P_f .



Ilustración 40. Colocación de la muestra de grava en la máquina de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 41. Muestra de grava después del proceso de desgaste. Fuente: Elaboración propia

Cálculos

$$P_a = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100$$

P_a = Desgaste por trituración de los ángeles, (%)

P_i = Masa inicial de la muestra, g

P_f = Masa final de la muestra, g

Resultados

Tabla 29. Resultado de desgaste por trituración de la máquina de Los Ángeles. Fuente: Elaboración propia

Desgaste por trituración de los ángeles	
Masa inicial	500 g
Masa final	4176 g



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



% de desgaste	16.48%
---------------	--------

La norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018) especifica valores de desgaste $\leq$ a 40%

3.1.4 Elaboración de fibras de PET

Procedimiento:

1. Recolección de botella de PET posconsumo

Se recolectaron las botellas con ayuda de amigos, familiares y maestros del laboratorio de materiales, Ilustración 42.



Ilustración 42 Acopio de botella posconsumo. Fuente: Elaboración propia

2. Selección y lavado de las botellas

Seleccionamos las botellas más grandes de la marca Coca-Cola, Jarritos, Ciel y otras marcas, cuidando que esta tuviera la superficie lisa, retiramos las etiquetas, las tapas y con agua retiramos todo exceso de refresco o algunas partículas adheridas a la superficie interna y externa de la botella, finalmente dejamos secar por completo.

3. Corte de las botellas

Para obtener el hilo de PET con un diámetro (ancho) de 3.2 mm cortamos la parte inferior de la botella con ayuda de una navaja o cúter, para después ingresar el extremo inicial del hilo (cortado con tijeras) debajo de la navaja del dispositivo de corte, jalando con una pinza para obtener todo el hilo posible de cada envase, Ilustración 43.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 43. Obtención de hilos de fibras de PET. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 44. Hilos de PET almacenados hasta su uso. Fuente: Elaboración propia

4. Rayado de los hilos de PET

Realizamos un mecanismo que consiste en dos piezas de madera presionadas entre sí, en su interior contiene una lija, introducimos en inicio de la fibra y con ayuda de una pinza fuimos tirando del hilo, Ilustración 45. El hilo de PET ya salía rayado de ambas superficies, esto con la finalidad de dar adherencia entre la fibra y la mezcla de concreto.



Ilustración 45. Rayado de la superficie del hilo de PET. Fuente: Elaboración propia

5. Cortado manual de la fibra.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Las fibras de PET fueron cortadas, Ilustración 46 y 47 en segmento de 1 ½” (3.81cm) de forma manual con tijera o con una guillotina como se muestra a continuación.

Se almacenaron hasta el momento de su uso.



*Ilustración 46. Corte de fibras de PET.
Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 47. Fibras de PET. Fuente:
Elaboración propia*

3.1.5 Diseño de mezcla

Para esta investigación se realizaron 5 mezclas de concreto:

1. Mezcla testigo (TEST)
2. Mezcla con 0.4% de PET adicionado (0.4%-PET)
3. Mezcla con 0.8% de PET adicionado (0.8%.PET)
4. Mezcla con 1.2% de PET adicionado (1.2%-PET)
5. Mezcla con 0.23% PET y 0.77% polipropileno (PET-P)

3.1.5.1 Cálculo del proporcionamiento de la mezcla testigo

1. Se tienen las características físicas de los agregados pétreos y del cemento que se estarán implementando a la mezcla de concreto, tabla 30. Los materiales pétreos, antes de su uso, pasaron por un proceso de secado total, por lo que, no presentan humedad actual.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 30. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES						
MATERIAL	MVSS (kg/m ³)	MVSV (kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)	Módulo de finura	Tamaño máximo	Absorción (%)
GRAVA	1467.925	1587.736	2.713	-	3/4 "	2.19%
ARENA	1293.041	1452.519	2.273	2.67	-	5.26%
CEMENTO	1490.000	-	3.046	-	-	-

2. El cálculo del valor de f'_c (resistencia a compresión) del concreto a partir de la resistencia a la flexión o MR, (42 Kg/cm²).

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente es usada en los cálculos para el diseño de puentes, edificios y otras estructuras.

La resistencia a la flexión de concretos de peso normal es normalmente de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/cm² (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

$$MR = 1.99 \text{ a } 2.65 \sqrt{f'_c}$$

$$MR = 2.32 \sqrt{f'_c}$$

Si se despeja el f'_c de la ecuación anterior

$$f'_c = \left(\frac{MR}{2.32} \right)^2$$

$$f'_c = 3.27.735$$

por seguridad en los cálculos se utilizará un valor de $f'_c = 330 \text{ kg/cm}^2$

3. Cálculo de cantidad de agua, proponemos un revenimiento para concreto de pavimentos y losas de 7.5 cm, tabla 31 de acuerdo al ACI 211.

Tabla 31. Revenimiento para diferentes tipos de construcción. Fuente: ACI 211

REVENIMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN		
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



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5

Calculamos la cantidad de agua que debe tener un metro cubico de concreto y el aire atrapado que se encuentra a la hora del mezclado. De acuerdo al revenimiento propuesto (7.5 cm) y el tamaño máximo del agregado grueso (3/4”), obtenemos de la tabla 32 la cantidad de agua requerida en el diseño y el porcentaje aire atrapado.

Tabla 32. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregados. Fuente: ACI 211

Agua, kg. / m ³ de Concreto								
Revenimiento	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5	207	199	190	179	160	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	175	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	185	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Promedio recomendado de contenido de aire total, según el nivel de exposición (%)								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

El concreto de esta investigación es un concreto sin aire incluido, por lo que tenemos 205 L/m³ de agua y 2% de aire atrapado en el concreto.

Cálculo de volumen de aire atrapado:

$$\text{volumen de aire atrapado} = 0.02 \times 1000 \text{ L/m}^3$$

$$\text{volumen de aire atrapado} = 20 \text{ L/m}^3$$

4. Cálculo de la relación agua-cemento por peso y la cantidad de cemento que se requiere por metro cúbico de mezcla, ingresando a la tabla 33 recomendada por el ACI 211.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Se ingresó con la resistencia a compresión de diseño a los 28 días (330 kg/cm²) y como ya se ha mencionado, la mezcla es sin aire incluido.

Tabla 33. Correspondencia entre relación agua/cemento y la Resistencia a compresión del concreto. Fuente: ACI 211

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación Agua/Cemento por peso	
	Concreto Sin aire incluido	Concreto 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

Para obtener la relación agua-cemento tenemos que, la resistencia a la compresión a los 28 días de diseño es de 330 kg/cm², por lo que interpolamos los valores.

$$Rel. a - c = \frac{(0.48 - 0.57)(330 - 280)}{(350 - 280)} + 0.57$$

$$Rel. a - c = 0.51$$

Teniendo la relación agua-cemento, calculamos el contenido de cemento.

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{\text{litros de agua (kg/m}^3\text{)}}{\text{Relación agua - cemento}}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.51}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = 401.961 \text{ kg/m}^3$$

Calculamos el volumen de cemento requerido para la mezcla

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento (kg/m}^3\text{)}}{\text{Densidad de cemento}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{401.961 \text{ kg/m}^3}{3.05}$$

$$\text{Volumen de cemento} = 131.800 \text{ L/m}^3$$



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



5. Contenido de agregado grueso por volumen unitario de concreto, para esto ingresamos a la tabla 34, con el tamaño máximo del agregado (19 mm) y el módulo de finura (2.67).

Tabla 34. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Fuente: ACI 211

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.				
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
37.5(1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79

Interpolamos los valores de módulo de finura, para obtener el volumen de agregado grueso varillado en seco como se muestra a continuación.

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = \frac{(0.62 - 0.64)(2.67 - 2.60)}{(2.80 - 2.60)} + 0.64$$

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = 0.633$$

Calculamos la masa del agregado grueso para un metro cubico de mezcla, a partir del volumen de agregado varillado en seco.

$$\text{Masa de la grava} = \text{Volumen del agregado varillado en seco} \times \text{MVS}$$

$$\text{Masa de la grava} = 0.633 \times 1588 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa de la grava} = 1005.204 \text{ kg/m}^3$$



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Para obtener el volumen de grava por metro cubico de mezcla se debe dividir la masa de la grava entre la sensibilidad, como se muestra a continuación.

$$\text{Volumen de la grava} = \frac{\text{masa de la grava (kg/m}^3\text{)}}{\text{densidad}}$$

$$\text{Volumen de la grava} = \frac{1005.204 \text{ kg/m}^3}{2.713}$$

$$\text{Volumen de la grava} = 370.514 \text{ L/m}^3$$

6. Cálculo del volumen y masa del agregado fino para un metro cubico de concreto.

$$\text{Volumen de arena} = 1000 \text{ L/m}^3 - (V_{\text{cemento}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{grava}})$$

$$\text{Volumen de arena} = 1000 - (131.80 + 205 + 20 + 370.514)$$

$$\text{Volumen de arena} = 272.686 \text{ L/m}^3$$

$$\text{Masa de la arena} = \text{Volumen de arena} \times \text{densidad}$$

$$\text{Masa de la arena} = 272.686 \text{ L/m}^3 \times 2.27$$

$$\text{Masa de la arena} = 618.997 \text{ kg/m}^3$$

A continuación, se muestra un resumen de las propiedades de los agregados (tabla 35).

Tabla 35. Resumen de las propiedades de los agregados. Fuente: Elaboración propia

MATERIALES	VOLUMEN (L/m3)	Masa total (kg/m3)
Cemento	131.800	401.961
Arena	272.686	618.997
Grava	370.514	1005.204
Agua	205.000	205.000
Aire	20	-
Suma	1000	2231.161

7. Corrección por humedad de absorción, el porcentaje de agua que absorben los materiales, debe ser el porcentaje de agua adicional en la mezcla de concreto. A continuación, se muestran los ajustes.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Masa corregida de la arena = Masa del agregado x (1 – % de absorción)

$$\text{Masa corregida de la arena} = 618.997 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.0526)$$

$$\text{Masa corregida de la arena} = 586.438 \text{ kg/m}^3$$

Masa corregida de la grava = Masa del agregado x (1 – % de absorción)

$$\text{Masa corregida de la grava} = 1005.204 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.0219)$$

$$\text{Masa corregida de la grava} = 983.190 \text{ kg/m}^3$$

Masa corregida del agua = Masa total del agua + Σ (Masa del agregado x % de absorción)

$$\text{Masa corregida del agua} = 205 \text{ kg/m}^3 + [(618.997 \text{ kg/m}^3 \times 0.0526) + (1005.204 \text{ kg/m}^3 \times 0.0219)]$$

$$\text{Masa corregida del agua} = 259.573 \text{ kg/m}^3$$

Las cantidades reales de los materiales para un metro cubico de mezcla de concreto muestran en la tabla 36

Tabla 36. Cantidades reales de los materiales. Fuente: Elaboración propia

Materiales	Masa (kg)
Cemento	401.961
Agua	259.573
Aire	0
Arena	586.438
Grava	983.19
Total	2231.347

3.1.5.2 Dosificación de fibras de PET y polipropileno

A partir del cálculo de la mezcla testigo, se ocuparon las mismas cantidades de materiales para realizar las otras mezclas, adicionando las fibras de PET y Polipropileno en relación a la masa total del cemento tabla 37.

Tabla 37. Dosificación de los materiales para un metro cubico de mezcla. Fuente: Elaboración propia

Masa requerida de materiales por metro cubico de mezcla (kg/m³)



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Materiales	TEST	0.4%-PET	0.8%-PET	1.2%-PET	PET-P
Cemento	401.961	401.961	401.961	401.961	401.961
Agua	259.573	259.573	259.573	259.573	259.573
Aire	0	0	0	0	0
Arena	586.438	586.438	586.438	586.438	586.438
Grava	983.19	983.19	983.19	983.19	983.19
PET		1.608	3.216	4.824	0.740
Polipropileno					2.476

3.1.6 Elaboración de mezclas y especímenes

Una vez que tenemos las cantidades exactas de materiales producto del cálculo descrito en el apartado 3.1.4.

Para esta investigación se realizaron 5 mezclas diferentes, una mezcla testigo (TEST), una mezcla con 0.4% de fibra de PET (0.4%-PET), una con 0.8% de fibra de PET (0.8%-PET), una mezcla con 1.2% de fibra de PET (1.2%-PET) y finalmente una mezcla con 0.23% PET y 0.77% polipropileno (PET-P), por separado manteniendo las mismas condiciones de dosificación de materiales, llenado de especímenes y vibrado de los mismos.

Procedimiento:

1. Pesamos el material pétreo seco y por separado, también la cantidad de agua para cada mezcla.
2. Se ingresó aproximadamente el 50% de agua a la revolvedora junto con la grava, dejamos homogenizar hasta que la grava esté en un estado de superficialmente húmedo.
3. Ingresamos el cemento, dejamos homogenizar e incorporamos la arena con el resto del agua.
4. Después de un tiempo aproximado de 10 min, cuando la mezcla está totalmente homogénea se coloca en la carretilla, Ilustración 48 en el caso de la mezcla testigo.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



5. En caso de las otras mezclas se incorpora la fibra de PET en las cantidades calculadas, dejamos mezclar totalmente, posteriormente se coloca en la carretilla.



Ilustración 48. Muestra de mezcla de concreto

6. Realizamos el revenimiento con el cono de Abrams, obtenemos la temperatura y el pH de la mezcla en cuestión.
7. Procedemos a elaborar los especímenes de acuerdo a la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) antes de usar los moldes (Ilustración 49) les colocamos aceite para facilitar desmoldar.

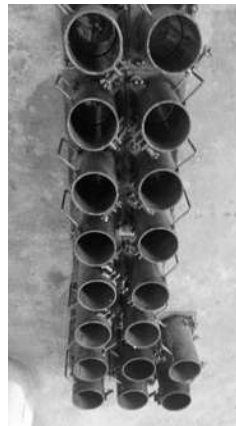


Ilustración 49. Moldes cilíndricos. Fuente: Elaboración propia .

Tabla 38. Número de capas requeridas para los especímenes. Fuente: Elaboración propia

Tipo y tamaño del espécimen	Modo de compactación	Número de capas
Cilindro de 10x20 cm	Varillado	2
Cilindro de 15x30 cm	Varillado	3



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



8. Se elaboraron 20 cilindros de 10x20 cm y 15 de 15x30 cm por cada mezcla, se llenaron las muestras en capas acuerdo a la tabla 39, dejando un excedente de material para su compactación y vibración.
9. Con la punta redondeada de la varilla se hicieron 25 compactaciones distribuidas por cada capa como lo indica la tabla 39 y con ayuda del mazo de goma se golpean ligeramente los laterales para eliminar burbujas de aire atrapado.

Tabla 39. Diámetro de varilla y número de penetraciones. Fuente: (NMX-C-159-ONNCCE, 2016)

Diámetro del cilindro	Diámetro de varilla (mm)	Número de penetraciones por capa
10 cm	10±2	25
15 cm	16±2	25

10. Finalmente, con un enrasador de metal se eliminó todo exceso de mezcla dejando la superficie lo más lisa y uniforme posible.

3.1.7 Descimbrado y curado de las muestras

1. Los especímenes deben ser retirados de los moldes, de preferencia a las 24 horas de haberse elaborado y almacenarse de inmediato en una condición húmeda a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de su prueba (Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo).
2. Todos los especímenes fueron retirados de los moldes dentro de lo establecido en la norma (en las primeras 24 horas), marcados para su identificación con nombre y fecha de su elaboración.
3. Almacenamos todas las muestras en la pila de curado, Ilustración 50, manteniendo un tirante de agua de 5 cm por encima de los especímenes durante todo el tiempo de curado.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 50. Curado de los especímenes. Fuente: Elaboración propia

3.2 Pruebas al concreto fresco

3.2.1 Revenimiento

El ensayo de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams, es el método más ampliamente aceptable y utilizado para medir la consistencia del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). La consistencia se califica dependiendo de la trabajabilidad o manejabilidad de la mezcla en los primeros 15 minutos, después de ser elaborada, midiendo el asentamiento que presenta al quitarle el cono en el que inicialmente se ha vertido dicha mezcla.

Equipo:

- Molde troncocónico de dimensiones específicas
- Carretilla
- Cucharón metálico
- Varilla punta de bala de 5/8 de diámetro
- Placa metálica de acero de 60x60 cm
- Flexómetro

Procedimiento:

1. Una vez teniendo la mezcla, colocamos una muestra en la carretilla y homogenizamos con una pala con el objetivo de obtener una muestra representativa.
2. Colocamos un poco de agua en el molde troncocónico, la placa de acero y la varilla con la finalidad de que no se adhiera la mezcla.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3. En una superficie plana se colocó la placa de acero y sobre la placa el cono troncocónico (el diámetro mayor hacia abajo, en contacto con la placa).
4. Para mantener fijo el molde, se colocó el operador de forma que los pies estuvieran presionando las orejas del molde, Ilustración 51.



Ilustración 51. Ejecución de la prueba de revenimiento. Fuente: Elaboración propia

5. Colocamos la mezcla en el molde con ayuda del cucharón, en tres capas; la primera capa a un tercio aproximadamente de la longitud del molde y con la varilla punta de bala compactamos con 25 golpes distribuidos por toda la superficie, la segunda capa a dos tercios de la longitud del molde y compactamos con 25 golpes cuidando de penetrar la primera capa a 2 cm aproximadamente y finalmente la tercera capa, llenamos completamente el molde y damos 25 varilladas igual cuidando penetrar en la segunda a 2 cm de esta (NMX-C-156-ONNCCE, 2010)
6. Una vez realizado el procedimiento descrito en el paso 5, retiramos todo exceso de mezcla con la varilla, enrazando el molde y limpiando los laterales del molde.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



7. Retiramos el molde en forma vertical en un tiempo aproximado de 5 s, colocamos el molde cerca de la mezcla asentada de forma contraria a como se utilizó, se colocó la varilla de forma horizontal sobre el molde.
8. Con ayuda del flexómetro se midió el asentamiento de la mezcla, Ilustración 52 de la parte inferior de la varilla, hasta una altura promedio del cono formado por el molde.



Ilustración 52. Revenimiento. Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Índice de pH

Esta prueba se realiza con la finalidad de conocer si la mezcla se encuentra en un estado de alcalinidad. Siendo esta una de las características del concreto en estado fresco, Ilustración 53.

Procedimiento:

1. Se colocó una tira indicadora sobre la muestra de concreto fresco.



Ilustración 53. Tira indicadora sobre el concreto. Fuente: Elaboración propia



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



2. Se dejó la tira un tiempo aproximado de 1 min, con la finalidad de obtener una lectura exacta.
3. Finalmente retiramos la tira y la comparamos con la tabla de colores indicadores de pH.

3.3 Prueba mecánica

3.3.1 Compresión

La resistencia a la compresión del concreto puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como la capacidad de resistencia mecánica ("DURAR", 1998).

De acuerdo a la norma (NMX-C-083-ONNCCE, 2014), sometiendo a compresión 3 cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud, por cada mezcla en estudio y una vez cumplida la edad de 7, 14, 28, 60 y 90 días después de su elaboración.

Equipo:

- 3 especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud.
- Vernier y flexómetro.
- Máquina de ensayo con dispositivo de lectura de carga.
- Material de cabeceo (azufre).
- Molde para cabeceo de los cilindros.

Procedimiento:

1. Extraemos las nuestras de la pila de curado, enumerando para su identificación, medimos el diámetro y la longitud de cada espécimen.
2. Dejamos calentar el material para el cabeceo (azufre) hasta que se encuentre en un estado líquido, colocándolo en el molde donde también colocaremos las caras del cilindro teniendo un espesor de aproximado de 3 mm como lo indica la norma (NMX-C-109-ONNCCE, 2013), Ilustración 54.



Ilustración 54. Cabeceo de especímenes. Fuente: Elaboración propia

3. Una vez teniendo el cabeceo, llevamos a la presa las muestras.
4. Cuidando que las placas de acero de la prensa estén limpias, colocamos el cilindro sobre la placa inferior, alineándose con la placa superior.
5. Bajamos la placa de la prensa tocando ligeramente la cara superior del cilindro.
6. Dejamos la lectura de la prensa en ceros y procedemos a cargar la presa a una velocidad constante hasta que se registre la carga máxima.
7. La carga (P) que registramos está expresada en tonelada.



Ilustración 55. Cilindros sometidos a compresión. Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

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



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Donde:

f'_c = Resistencia a compresión, en kg/cm^2

P = Carga máxima, en kg.

A = Área del espécimen, en cm^2

Referencia:

("DURAR", 1998)

(NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

(NMX-C-109-ONNCCE, 2013)

3.4 Evaluación por durabilidad

Para realizar las pruebas de porosidad total, porosidad efectiva, ataque por sulfatos y resistividad eléctrica húmeda de esta investigación, se requirieron muestras de concreto en forma cilíndrica de 10 cm $\varnothing$ x 5 cm de espesor. Se cortan los cilindros en rodajas de 5 cm y con ayuda de la cortadora ilustración 56.



Ilustración 56. Corte de especímenes de concreto. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta un concentrado de requisitos de la evaluación por durabilidad tabla 28 y 29, establecidos en la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018). Que nos servirán de referencia para evaluar la durabilidad en muestras de concreto hidráulico.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



3.4.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica húmeda es una propiedad recíproca de cada material, depende en gran parte del grado de saturación de los poros de la mezcla de concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta, en función a las variables tales como: el tipo de cemento, la adición, la relación agua-cemento y la porosidad.

La resistividad eléctrica húmeda es solo uno de los parámetros que controla la corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por lo tanto, no se considera como único criterio para definir el daño en la estructura. ("DURAR", 1998)

Equipo:

- Especímenes de concreto de 15 cm Ø x 30 cm de espesor
- Resistómetro.
- Tela absorbente de agua.
- Vernier.

Procedimiento:

1. Extraemos las muestras de la pila de curado, las enumeramos para su identificación y obtenemos el diámetro y la longitud de cada una.
2. En una superficie plana y de un material que no conduzca electricidad. Colocamos en las bases del espécimen las telas absorbentes presionadas con las placas de metal, colocamos un peso extra en la base superior para garantizar el contacto eléctrico.
3. Instalamos el equipo como se muestra en la siguiente figura 57.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 57. Resistividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia

4. Sometemos las muestras a una corriente eléctrica y registramos la resistencia (Re) dada (se hace la prueba por lo menos 3 veces para verificar el resultado).

Cálculos:

$$\rho = Re \left(\frac{A}{L} \right)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica, en $K\Omega$ -cm (ohm-m).

Re = Resistencia eléctrica, en $K\Omega$.

A = Área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = Longitud del espécimen, en cm.

Criterio de evaluación

Tabla 40. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100-200 $k\Omega$ -cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



	y una velocidad de corrosión baja independientemente de la presencia de carbonatación.
50-100 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo y una velocidad de corrosión baja.
10-50 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada considerable, por lo que el transporte de agentes agresivos hacia al acero de refuerzo es alto, con una velocidad de corrosión alta en concretos carbonatados.
<10 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, por lo que permite el transporte de agentes agresivos hacia al acero de refuerzo de forma extremadamente rápida. La velocidad de corrosión es muy alta en concretos carbonatados.

Referencia:

("DURAR", 1998)

(NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019)

3.4.2 Porosidad total

La porosidad se define como los espacios vacíos que quedan en el concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado ("DURAR", 1998)

Tabla 41. Porcentaje de porosidad. Fuente: ("DURAR", 1998)

$\leq 10\%$	Indica un concreto de buena calidad y compacidad
10%-15%	Indica un concreto de moderada calidad
>15%	Indica un concreto de durabilidad inadecuada

Equipo:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- 5 muestras de concreto de 10 cm Ø x 5 cm de espesor.
- Horno de secado.
- Parrilla de gas.
- Recipiente para hervir las muestras.
- Balanza.
- Canastilla metálica.

Procediendo:

1. Extraemos 5 muestras de la pila de curado.
2. Secamos las muestras a una temperatura de 100 °C a 110 °C hasta una masa constante en cada una de las muestras y teniendo una diferencia de 0.5% entre las masas en un intervalo de 24 horas (Ilustración 58), como lo indica la norma (NMX-C-263-ONNCCE, 2010)



*Ilustración 58. Muestras de concreto en horno de secado a una temperatura de 100 °C a 110 °C.
Fuente: Elaboración propia*

3. Una vez teniendo las muestras secas, registramos este dato como masa seca (ms), dejamos enfriar y los colocamos en un recipiente con agua y los dejamos saturar por lo menos 48 horas, secamos superficialmente con una tela absorbente y registramos la masa como **masa saturada por inmersión** (mss), Ilustración 59.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 59. Muestras de concreto sumergidas en agua. Fuente: Elaboración propia

- Colocamos los especímenes en un recipiente cubriendo con agua totalmente, dejamos hervir por 5 horas cuidando el nivel de agua durante toda la experimentación, después del tiempo requerido, dejamos enfriar a la temperatura del laboratorio.
- Una vez fría las muestras las sacamos del recipiente, las secamos superficialmente con una tela y registramos la masa como **masa saturada por ebullición** (me), Ilustración 60.



Ilustración 60. Hervido de muestras. Fuente: Elaboración propia

- En un recipiente lleno de agua colocamos la canastilla en suspensión a una temperatura de 20 °C - 25 °C, colocamos las muestras en la canastilla y registramos este dato como **masa sumergida** (ma). A cada muestra se le restó el peso de la canastilla sumergida.

Cálculos



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Porcentaje de la absorción después de la inmersión:

$$\frac{m_{ss} - m_s}{m_s} \times 100$$

- Porcentaje de absorción después de la ebullición:

$$\frac{m_e - m_s}{m_s} \times 100$$

- Masa específica seca:

$$\frac{m_s}{m_e - m_a} = g_1$$

- Masa específica después de la inmersión:

$$\frac{m_{ss}}{m_e - m_a}$$

- Masa específica después de la ebullición

$$\frac{m_e}{m_e - m_a}$$

- Masa específica aparente:

$$\frac{m_s}{m_s - m_a} = g_2$$

- Porcentaje de volumen de poros permeables (vacíos):

$$\frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \text{ o } \frac{m_e - m_s}{m_e - m_a} \times 100$$

- Porcentaje de porosidad total

$$\% \text{ de porosidad total} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_{ss} - m_a} \times 100$$

Donde:

m_s = masa seca, en g.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



mss= masa saturada por inmersión y superficialmente seca, en g.

me = masa saturada por ebullición y superficialmente seca, en g.

ma= masa de la muestra sumergida, en g.

g1= masa específica seca, en g.

g2= masa específica aparente, en g.

Referencia:

("DURAR", 1998)

(NMX-C-263-ONNCCE, 2010)

3.4.3 Porosidad efectiva

La absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agresivos ambientes ("DURAR", 1998)

Las propiedades de la absorción capilar del concreto están relacionadas directamente con su porosidad y a su vez con la durabilidad o vida útil de servicio de una estructura. La absorción capilar, aunada al fenómeno de difusión, contribuye al transporte de iones cloruro y otras sustancias nocivas o neutras hacia el interior del concreto (NMX-C-504-ONNCCE, 2015)

Equipo:

- 5 muestras de concreto de 10 cm Ø x 5 cm de espesor.
- Horno de secado.
- Balanza con aproximación de 0.1 g.
- Vernier y cronómetro.
- Parrilla de gas.
- Material de sellado (80% parafina + 20% brea).
- Bolsas de plástico.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Ligas.
- Brocha.
- Tela absorbente.
- Recipiente de almacenamiento con tapa.
- Esponja.
- Agua.

Procedimiento:

1. Extraemos las muestras de concreto de la pila de curado.
2. Colocamos las muestras en el horno a una temperatura de 50 °C durante 3 días.
3. Después de los 3 días, colocamos las muestras en un recipiente hermético sellado durante 15 días, con una separación que permita el flujo de aire.
4. Una vez cumplidos los 15 días, se extrajeron las muestras del recipiente y se pesaron antes de sellar los laterales.
5. Con ayuda del vernier se midieron el diámetro y la altura de cada muestra.
6. Preparamos el recipiente que mantendrá las muestras durante todo el ensayo, colocando la esponja en el fondo y cubriendo con agua ésta hasta un nivel de 3 ± 1 mm por encima.
7. Calentamos el material de sellado hasta conseguir el estado líquido.
8. Sellamos los laterales completamente de cada espécimen, Ilustración 61.



Ilustración 61. Sellado de laterales con parafina. Fuente: Elaboración propia

9. Colocamos la bolsa sujeta con la liga sobre la superficie que no estará expuesta al agua, Ilustración 62.
10. Pesamos las muestras, registrando como masa inicial (m_0).
11. Con ayuda del cronómetro, iniciamos la medida del tiempo, inmediatamente colocamos las muestras sobre la esponja, anotando hora y fecha del contacto con el agua.



Ilustración 62. Muestras en proceso de absorción capilar. Fuente: Elaboración propia

12. Registramos cada masa en intervalos de tiempo de 60s, 5min, 10min, 20min, 30min, 60min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas,



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



72 horas, 96 horas, 120 horas, 144 horas, 168 horas, 192 horas después el primer contacto con el agua. Retirando el espécimen del recipiente, secándose con la tela y colocando en la pesa de forma invertida (La cara que está en contacto con el agua no está en contacto con el platillo de la balanza). Registramos esta masa como m_t de cada una de las muestras.

13. Al finalizar el ensayo, calculamos la absorción capilar y el índice de absorción.

Cálculos

Siguiendo la metodología de la red ("DURAR", 1998) calculamos tres coeficientes dados por Fagerlund, que son los siguientes:

- Coeficiente de la resistencia a la compresión del agua (m):

$$m = \frac{t}{z^2}, (s/m^2)$$

donde:

z = profundidad de penetración del agua al tiempo t .

- Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(mt - m_0)/A}{\sqrt{t}} (kg/m^2 s^{1/2})$$

donde:

m_0 = masa inicial del espécimen antes de ingresar en contacto con el agua, en kg.

m_t = masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg A = área expuesta del espécimen, en m^2 .

- Porosidad efectiva (ϵ_e):

$$\epsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%)$$



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Con los coeficientes ya mencionados, calculamos la sorción capilar (S):

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \text{ (mm/h}^{1/2}\text{) o (m/s}^{1/2}\text{)}$$

La norma (NMX-C-504-ONNCCE, 2015), menciona el cálculo del índice de absorción (I), es decir el “cambio de la masa dividida entre el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua”

$$I = \frac{mt - mo}{a * d}$$

Donde:

I = índice de absorción, en mm

mt = masa, en el tiempo t , en g

mo = masa, en el tiempo 0, en g

a = zona expuesta de la muestra, en mm^2

d = densidad del agua, en g/mm^3

Especificaciones

Referencia:

("DURAR", 1998)

(NMX-C-504-ONNCCE, 2015)

(NMX-C-530-ONNCCE, 2018)

3.4.4 Carbonatación

La carbonatación es la reacción del CO_2 con los productos hidratados del cemento, produciendo CaCO_3 y reduciendo la alcalinidad normal (pH de 12.0- 13.5) del concreto. En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los compuestos alcalinos



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



solidificados y/o disueltos en la fase acuosa de los poros de la pasta del cemento, neutralizándolos para formar carbonatos, reduciendo la porosidad y disminuyendo el pH por debajo de 10. A este pH la capa pasiva que protege al acero de refuerzo ya no es estable y favorece el inicio de la corrosión del acero (NMX-C-515-ONNCCE, 2016)

Equipo:

- Cilindros de 15 cm Ø x 30 cm de longitud.
- Prensa para romper los cilindros por tensión indirecta.
- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (1 g fenolftaleína + 100 ml de alcohol isopropílico o etanol).
- Vaso precipitado
- Envase limpio e impermeable
- Balanza
- Pipeta
- Vernier
- Cincel y martillo.
- Cepillo de cerdas de plástico.
- Atomizador.

Procedimiento:

Elaboración de la solución de fenolftaleína

En un envase limpio colocamos 99 ml de alcohol isopropílico, posteriormente colocamos 1 g de fenolftaleína, Ilustración 63, sellamos el envase y agitamos hasta que los grumos desaparezcan, finalmente colocamos 100 ml de agua destilada, agitar nuevamente por un tiempo aproximado de 5 min.

La solución se realizó unos minutos antes de su uso.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Ilustración 63. Elaboración de la solución de fenolftaleína. Fuente: Elaboración propia

1. Después de 28 días de curado, extraemos los especímenes de la pila de curado y los dejamos expuestos a las corrientes de aire dominantes de la ciudad de Morelia, durante un periodo de tiempo de 90 días.
2. Una vez cumplida la edad requerida para esta investigación, procedemos a romperlos por tensión indirecta cada una de las muestras.
3. Limpiamos el interior de las muestras y colocamos con el atomizador la solución de fenolftaleína.
4. Finalmente, antes de los 15 min en los que colocamos la solución, Ilustración 64 medimos la profundidad de la carbonatación con ayuda del vernier, Ilustración 65.



Ilustración 64. Colocación de la solución de fenolftaleína. Fuente: Elaboración propia

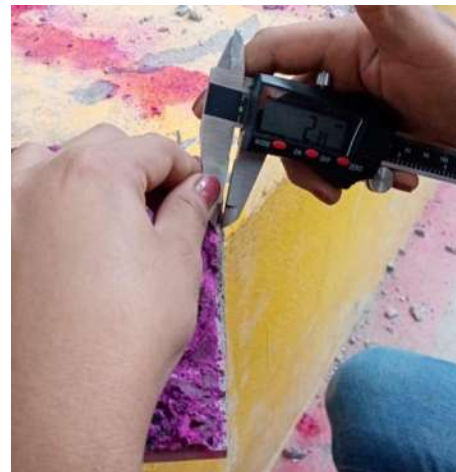


Ilustración 65. Lecturas de profundidad de carbonatación

Cálculos:

$$X_{CO2} = K_{CO2} \sqrt{t}$$

$$K_{CO2} = \frac{X_{CO2}}{\sqrt{t}}$$

$$t_{pred} = \left(\frac{ec}{k_{CO2}} \right)^2$$

Donde:

X_{CO2} = profundidad de carbonatación, en mm

K_{CO2} = constante de carbonatación, en mm/año^{1/2}

t = tiempo de exposición del concreto, en años

t_{pred} = tiempo estimado en que el frente de carbonatación llegue al refuerzo, en años

ec = recubrimiento de concreto del acero de refuerzo, en mm

Especificaciones

Tabla 42. Valores típicos de constantes de carbonatación; fuente. (NMX-C-515-ONNCCE, 2016)

Valores de k_{CO2}	Características
< 3mm/año ^{1/2}	Concreto de buena calidad y elevada resistencia a la carbonatación



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



$3 \leq k_{CO_2} \leq 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Concreto de mediana calidad, con inicio de carbonatación
$k_{CO_2} > 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Concreto pobre, con muy baja resistencia a la carbonatación

Referencia:

("DURAR", 1998)

(NMX-C-515-ONNCCE, 2016)

3.4.5 Ataque por sulfatos

Las reacciones del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio (yeso) y la reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado, formando sulfoaluminato de calcio (etringita) dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causa de la expansión y descomposición de los concretos expuestos a soluciones de sulfatos.

Para que resulte un ataque significativo en el concreto, los sulfatos deben estar en solución y por encima de alguna concentración mínima (IMCYC, 2006)

Equipo:

- 5 muestras de concreto de 10 cm Ø x 5 cm de espesor.
- Recipientes de plástico con tapa.
- Horno.
- Rejillas de plástico.
- Balanza con aproximación de 0.1 gramos.
- Charolas metálicas.
- Taladro con aspas giratorias.
- Agua destilada.
- Sulfato de sodio.
- Recipientes con capacidad de 19 litros.
- Guantes de látex.
- Termómetro de mercurio.

Procedimiento:



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



1. Extraemos las muestras de la pila de curado y las enumeramos para su identificación.
2. Colocamos las muestras en las charolas metálicas y las ingresamos al horno a una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una masa constante (durante 6 días) Ilustración 66.



Ilustración 66. Muestras en el horno a una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

3. Se realizó la solución de sulfato de acuerdo a la norma (NMX-C-075-ONNCCE, 2018) con una concentración de 350 g por litro de agua destilada a una temperatura de $25\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ medida con el termómetro de mercurio.
Una vez alcanzada la temperatura del agua, incorporamos el sulfato y con ayuda del taladro con las aspas giratorias, se agitó la solución por un tiempo aproximado de 1 hora.
4. Una vez que se tiene la solución tapamos el recipiente y lo dejamos enfriar a la temperatura del laboratorio hasta el momento de su uso.
5. Una vez teniendo la masa constante registramos el dato como “ m_s del ciclo 0”.
6. Colocamos la solución de sulfato en los recipientes de plástico, dejando la rejilla de plástico al fondo del recipiente.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



7. Dejamos enfriar las muestras a la temperatura del laboratorio antes de colocarlas en la solución, manteniendo un tirante de aproximadamente 2 cm por encima de los especímenes durante toda la experimentación, Ilustración 67.
8. Dejamos las muestras en la solución con los recipientes sellados durante un tiempo aproximado de 17 ± 1 hora.
9. Una vez pasado el tiempo mencionado en el paso 8, sacamos las muestras, las secamos y las colocamos nuevamente en el horno durante 6 días más, reconociendo este ciclo como “ciclo 1”
10. Después del tiempo se secado, extraemos las muestras del horno, dejamos enfriar y registramos la masa seca como “ms del ciclo 1”
11. Repetimos el procedimiento ya mencionado en los ciclos necesarios para registrar una pérdida de masa de 5%.



Ilustración 67. Muestras en solución de sulfato de sodio

Cálculos:

$$\% \text{ pérdida de masa} = \left(\frac{ms \text{ ciclo } 0 - ms \text{ ciclo } i}{ms \text{ ciclo } 0} \right) \times 100$$

Donde:

ms= masa seca constante, en g.

i= número de ciclos.

Referencia:

(NMX-C-075-ONNCCE, 2018)



4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de todas las pruebas realizadas en esta investigación fueron obtenidos de acuerdo a las normas vigentes.

Se nombraron las diferentes muestras de concreto para su identificación como se muestra a continuación:

1. Mezcla testigo (TEST)
2. Mezcla con 0.4% de PET adicionado (0.4%-PET)
3. Mezcla con 0.8% de PET adicionado (0.8%-PET)
4. Mezcla con 1.2% de PET adicionado (1.2%-PET)
5. Mezcla con 0.23% PET y 0.77% polipropileno (PET-P)

4.1 Pruebas al concreto fresco

Antes de hacer los especímenes de concreto, se realizaron pruebas al concreto fresco como revenimiento e índice de pH, a continuación, se presentan los resultados.

4.1.1 Revenimiento

En la tabla 44 se muestran los valores obtenidos de la prueba de revenimiento de cada una de las mezclas.

Tabla 43. Resultados de prueba de revenimiento en las diferentes mezclas de concreto. Fuente: Elaboración propia

Mezcla	Revenimiento nominal (cm)	Revenimiento real (cm)	Tolerancia (cm)
TEST	7.5	8	2.5
0.4%-PET	7.5	10	2.5
0.8%-PET	7.5	12	2.5
1.2%-PET	7.5	7	2.5
PET-P	7.5	9	2.5



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Se observa que los valores de revenimiento de las mezclas TEST, 0.4%-PET y PET-P se encuentran en el límite superior de la tolerancia. La mezcla 0.8%-PET supera el límite, siendo la mezcla que más fluida estaba para trabajar. La mezcla 1.2%-PET está dentro del límite, pero es la mezcla más densa.

4.1.2 Índice de pH

De acuerdo con los indicadores para medir el potencial de hidrogeno (pH), todas las mezclas presentaron un valor de entre 12 y 13 (figura 68), lo cual indica que es un concreto sano, por lo que la adición de fibras no modifico su composición.



Ilustración 68. Indicador de pH. Fuente: Elaboración propia

4.2 Prueba mecánica

Para esta investigación se realizaron cilindros de 15 cm de diámetro y 30 de altura (NMX-C-159-ONNCCE, 2016), con la finalidad de someterlos a grades cargas bajo un ambiente controlado, con el objetivo de hacerlos fallar y medir la carga máxima soportada.

4.2.1 Compresión

La resistencia a la compresión en la presente investigación se realizó en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 de altura, a edades de 7, 14, 28, 60 y 90 días, partiendo de una resistencia de diseño de 330 kg/cm^2 (33 MPa). En la ilustración 69 se muestra su comportamiento, el procedimiento de aplicación de carga es bajo la normativa (NMX-C-083-ONNCCE, 2014).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

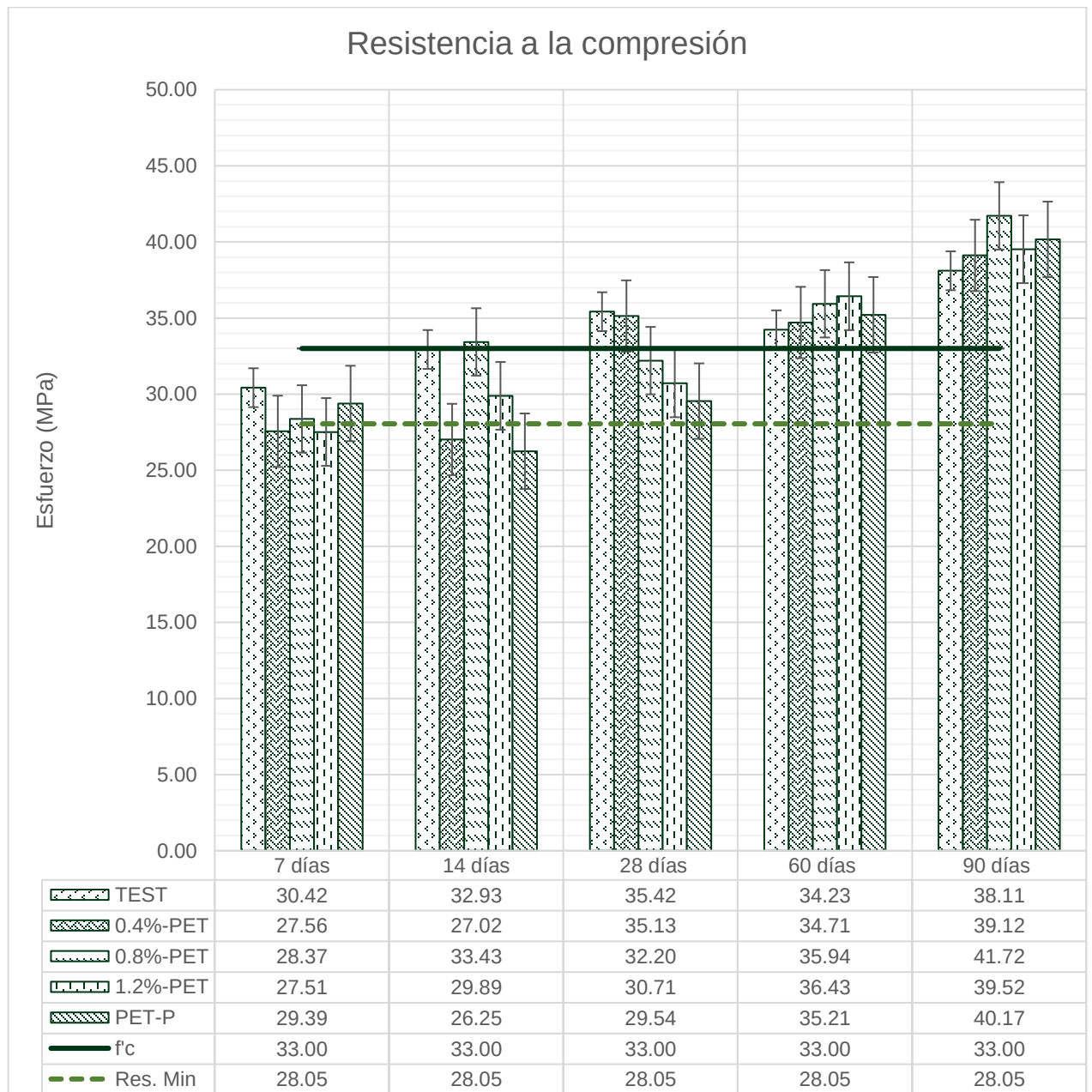


Ilustración 69. Resultados de la prueba de compresión: Fuente: Elaboración propia

Se observa que a los 7 días todas las mezclas de concreto están por debajo del valor de diseño. A los 14 días la mezcla Testigo y la mezcla adicionada con 0.8%-PET alcanzan el 100 % de la resistencia de diseño, mientras que las mezclas de



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



0.4%-PET, 1.2%-PET y PET-P alcanzan el 81.88%, 90.57% y 79.55% respectivamente.

A los 28 días las mezclas Testigo y 0.4%-PET superan el valor de diseño en un 7.33 y 6.46 %, las mezclas de 1.2%-PET y PET-P presentan resistencia inferior en un 6.94 y 10.49% al valor de diseño.

De acuerdo a la norma (NMX-C-083-ONNCCE, 2014) deben cumplir como mínimo con el 85% del valor del f'_c de diseño a los 28 días, por lo que las mezclas de esta investigación cumplen con lo menciona en la norma.

Observamos que a los 60 días la mezcla 1.2%-PET alcanza una resistencia de 36.43 MPa, 6.43% superior en comparación a la mezcla Testigo que presenta 34.23 MPa.

Todas las mezclas alcanzan la resistencia a compresión de diseño después de los 60 días. A los 90 días la mezcla 0.8%-PET presenta 41.72 MPa (126.42% del f'_c), siendo la mezcla de concreto que mayor resistencia ganó. Las mezclas TEST, 0.4%-PET, 1.2%-PET y PET-P cumplen con la resistencia de diseño con valores de 38.11 MPa (115.49% del f'_c), 39.12 MPa (118.55 % del f'_c), 39.52 MPa (119.76 % del f'_c) y 40.17 MPa (121.73 % del f'_c).

4.3 Evaluación por durabilidad

El estudio de la durabilidad en estructuras de concreto reforzado se basa principalmente en el daño que pueden hacer los agentes agresivos del medio ambiente al ser transportados por medio de los poros del concreto hacia el acero de refuerzo.

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas en diferentes tipos de concretos adicionados con fibras de PET y Polipropileno.

4.3.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es un parámetro indirecto de durabilidad, que nos indica si el concreto diseñado es un material con demasiados poros interconectados, por lo que puede ser un material con una velocidad de corrosión alta.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Se realizó la prueba en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 de altura a edades de 28 días y 90 días, la evaluación se realizó siguiendo el procedimiento de la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019), en la ilustración 70 se observan los valores promedios de los especímenes de concreto, los cuales se revisarán bajo las especificaciones de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018), en las cuales se especifica la evaluación por durabilidad en estructuras de concreto reforzado.

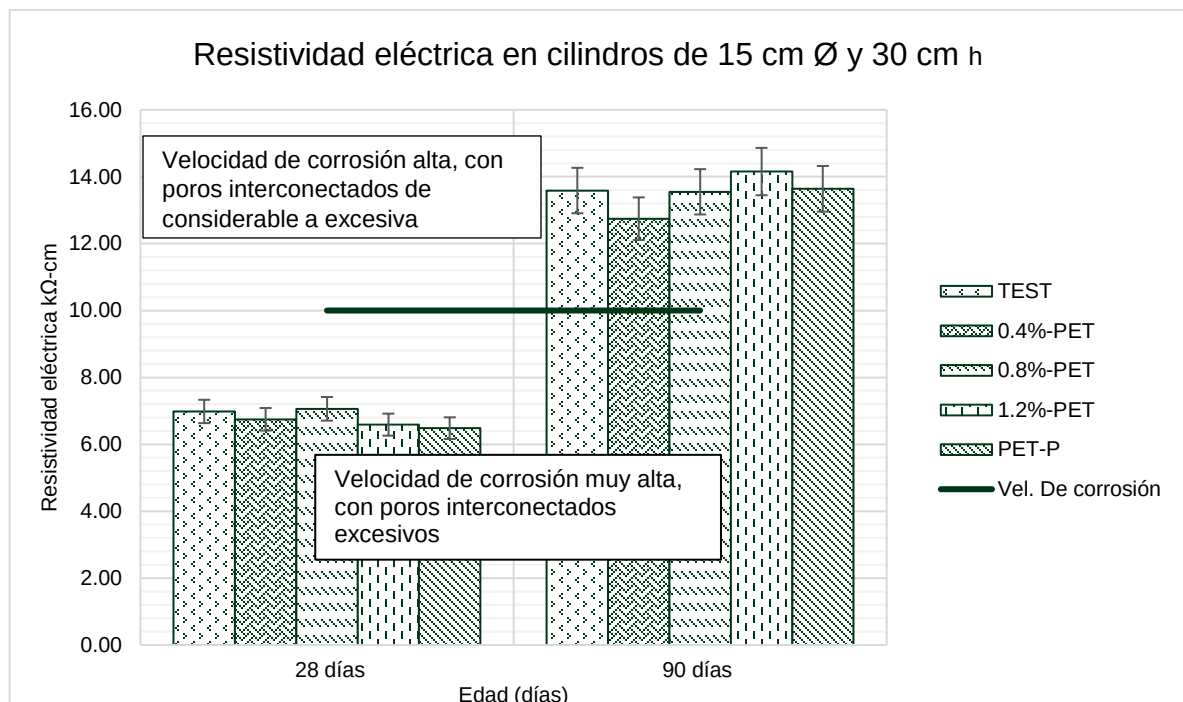


Ilustración 70. Valores de resistividad eléctrica en cilindros de 15 cm Ø y 30 cm h. Fuente: Elaboración propia

Observamos que a los 28 días todas las mezclas de concreto presentan una resistividad eléctrica inferior de 10 kΩ-cm, por lo que presentan una velocidad de corrosión muy alta, con demasiados poros interconectados según la clasificación de la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019). En la ilustración 70 se observa la tendencia que en edades tardías es superior lo que indica que en los poros se continúan llenando parcialmente con los geles de tobermorita y portlandita.

A la edad de 90 días todas las mezclas tienen un valor entre 10 kΩ-cm y 50 kΩ-cm, siguiendo los parámetros de la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019) pero



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



siguen teniendo una velocidad de corrosión alta y considerables poros interconectados por lo que permite el flujo de agentes agresivos del medio ambiente.

De acuerdo a la (NMX-C-530-ONNCCE, 2018), la resistividad eléctrica para concretos expuestos en un ambiente Rural/Urbana (humedad relativa de 50% y 80% con contaminación por CO₂ y SO₂) presenta un valor de 15 kΩ-cm como máximo para ser considerado un concreto durable, por lo que los concretos de esta investigación cumplen este requisito ya que presentan valores de 13.19, 12.75, 13.55, 14.15 y 13.64 kΩ-cm respectivamente.

4.3.2 Porosidad total

Siguiendo las recomendaciones de la norma (NMX-C-263-ONNCCE, 2010) y ("DURAR", 1998) se realizó la prueba a una edad de 28 días, teniendo los siguientes resultados. Los cuales se muestran en la tabla 45

Tabla 44. Porcentaje de porosidad total en muestras de concreto. Fuente: Elaboración propia

MUESTRA	% DE POROSIDAD TOTAL
TEST	14.19
0.4%-PET	17.12
0.8%-PET	17.65
1.2%-PET	16.11
PET-P	15.32

Tabla 45. Porcentaje de porosidad. Fuente: ("DURAR", 1998)

≤ 10%	Indica un concreto de buena calidad y compacidad
10%-15%	Indica un concreto de moderada calidad
>15%	Indica un concreto de durabilidad inadecuada

La tabla 46 presenta algunos valores de porosidad recomendados por la Red ("DURAR", 1998).

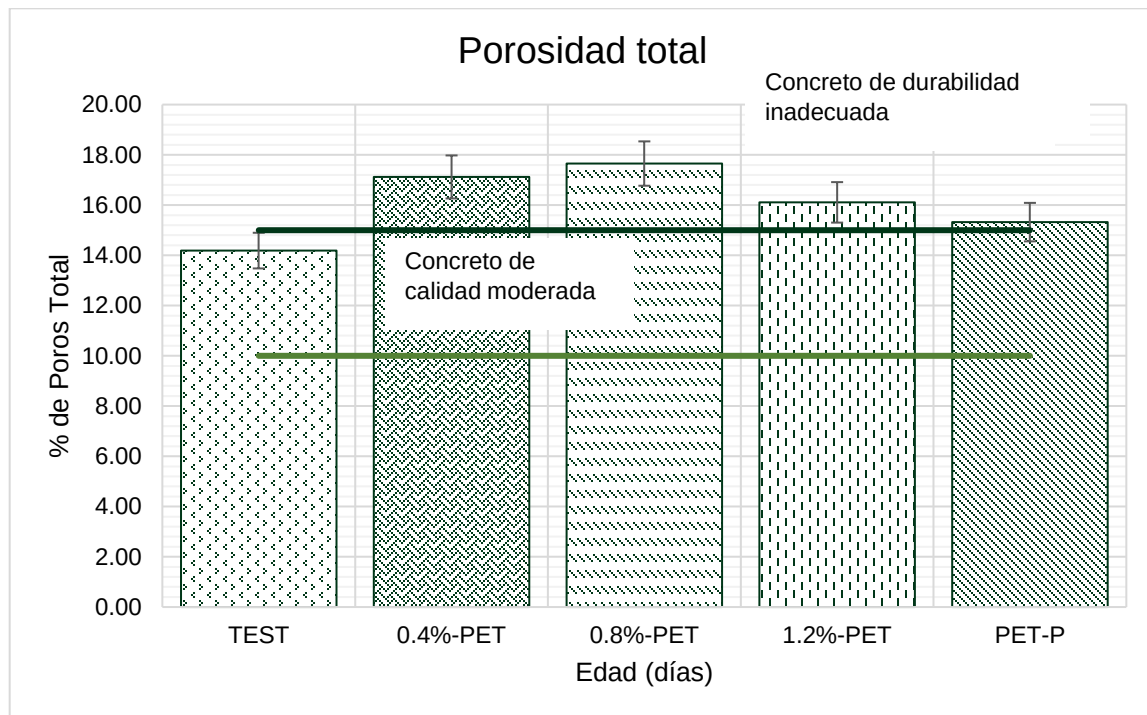


Ilustración 71. Porcentaje de porosidad total a una edad de 28 días.

Los resultados de la tabla 45, ilustración 71 nos indican que las mezclas 0.8%-PET presenta un valor de 17.65% de porosidad, superior en un 24.38% en comparación a la mezcla testigo que presenta un porcentaje de porosidad de 14.19%. Siendo un concreto de durabilidad inadecuada según las recomendaciones de la Red ("DURAR", 1998).

La mezcla 0.4%-PET, 1.2%-PET y PET-P presentan un porcentaje de porosidad superior en un 20.65, 13.53 y 7.96% en comparación a la mezcla testigo, siendo mezclas de durabilidad inadecuada.

La mezcla testigo presenta un valor entre 10 y 15% de porosidad total, lo que nos indica que es un concreto de calidad moderada según los parámetros de la Red ("DURAR", 1998).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



4.3.3 Porosidad efectiva

Este ensayo se realizó a una edad de 28 días, siguiendo las recomendaciones de la norma (NMX-C-504-ONNCCE, 2015) y la red ("DURAR", 1998), en especímenes de concreto de 10 cm Ø y 5 cm de espesor.

Consiste en graficar una serie de puntos (índice de absorción) con la raíz cuadrada del tiempo en segundos (ilustración 72) y posteriormente realizar una regresión lineal para obtener un valor de sorción capilar ilustración 73, se realizó para cada una de los especímenes de concreto.

A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo y el comportamiento de los resultados del espécimen PET-P-2.

Tabla 46. Datos generales de la muestra PET-P—2 en la prueba de porosidad efectiva. Fuente: Elaboración propia

Datos			
Muestra:	PP-2	Diámetro	99.8 mm
m₀:	803.30 g	Área (A₀):	7823 mm ²
		Altura (z):	49 mm

Tabla 47. Resultados de la muestra PET-P-2. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo (t)		$\sqrt{t}$	Masa (m)	Δm	I
min	S	s ^{1/2}	G	G	Mm
0	0		803.30	0.000	0.00
1	60	8	805.4	2.100	0.27
5	300	17	807.10	3.800	0.49
10	600	24	808.30	5.000	0.64
20	1200	35	809.60	6.300	0.81
30	1800	42	810.60	7.300	0.93
60	3600	60	812.40	9.100	1.16
120	7200	85	814.10	10.800	1.38
180	10800	104	815.70	12.400	1.59
240	14400	120	816.90	13.600	1.74
300	18000	134	817.90	14.600	1.87
360	21600	147	818.70	15.400	1.97
1440	86400	294	825.60	22.300	2.85
2880	172800	416	829.40	26.100	3.34

4320	259200	509	831.30	28.000	3.58
5760	345600	588	832.70	29.400	3.76
7200	432000	657	833.60	30.300	3.87
8640	518400	720	834.20	30.900	3.95
10080	604800	778	835.20	31.900	4.08
11520	691200	831	835.60	32.300	4.13

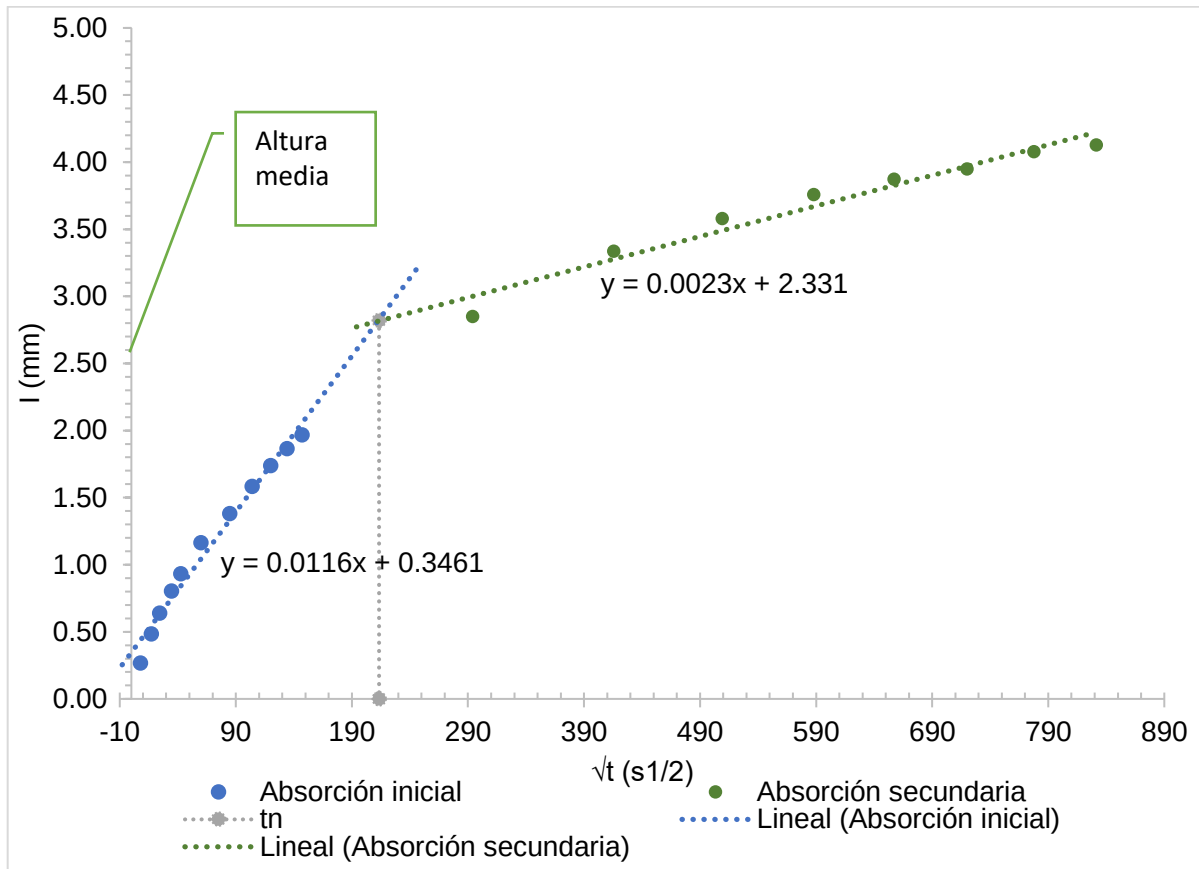


Ilustración 72. Regresión lineal para la muestra de concreto PET-P-2. Fuente: Elaboración propia

Observamos dos líneas de tendencia, la primera indica la absorción inicial durante las primeras 24 horas y la segunda la absorción secundaria durante los 7 días restantes.

En la tabla 49 se muestran especificaciones de la penetración del agua según recomendaciones de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018), mostrando una altura media de 3 mm para condiciones de exposición ambiental en zona rural/urbana (ataque por carbonatación).



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



Tabla 48. Requisitos en los ensayos de penetración del agua (NMX-C-530-ONNCCE, 2018)

Clase de exposición ambiental	Especificación para la altura máxima	Especificación para la altura media
C	50mm	≤30mm
M, CI, Q y F	30mm	≤20mm
Donde:		
C	Ataque por carbonatación	
M	Ataque por ambiente marino	
Q	Ataque químico	
F	Congelamiento y deshielo	
D	Daño mecánico	

Se observa en la ilustración 72 la intercepción de las líneas de tendencia que nos indica una altura media de 2.88 mm, siendo inferior a 3mm, como lo indicado en la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018), situando el espécimen concreto PET-P-2 en un ambiente C (Ambiente expuesto al ataque por carbonatación) según recomendaciones de la norma (NMX-C-530-ONNCCE, 2018).

Tabla 49. Resultados de la prueba de porosidad efectiva de acuerdo a la metodología del manual de la Red DURAR ("DURAR", 1998)

MUESTRA	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR (K) $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$	RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL AGUA (m) s/m^2	POROSIDAD EFECTIVA (ϵ_e) %	SORCIÓN CAPILAR (S) $\text{m/s}^{1/2}$
TEST	7.63E-03	4.71E+06	1.36	5.73E-04
0.4%-PET	6.76E-03	5.03E+06	1.50	4.53E-04
0.8%-PET	1.58E-03	1.43E+07	0.60	2.67E-04
1.2%-PET	7.70E-03	1.42E+07	2.89	2.70E-04
PET-P	9.59E-03	1.63E+07	3.90	2.51E-04



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



En la tabla 50 se muestra un resumen de los resultados (promedios) de los parámetros indicados en la norma (NMX-C-504-ONNCCE, 2015) y la Red ("DURAR", 1998).

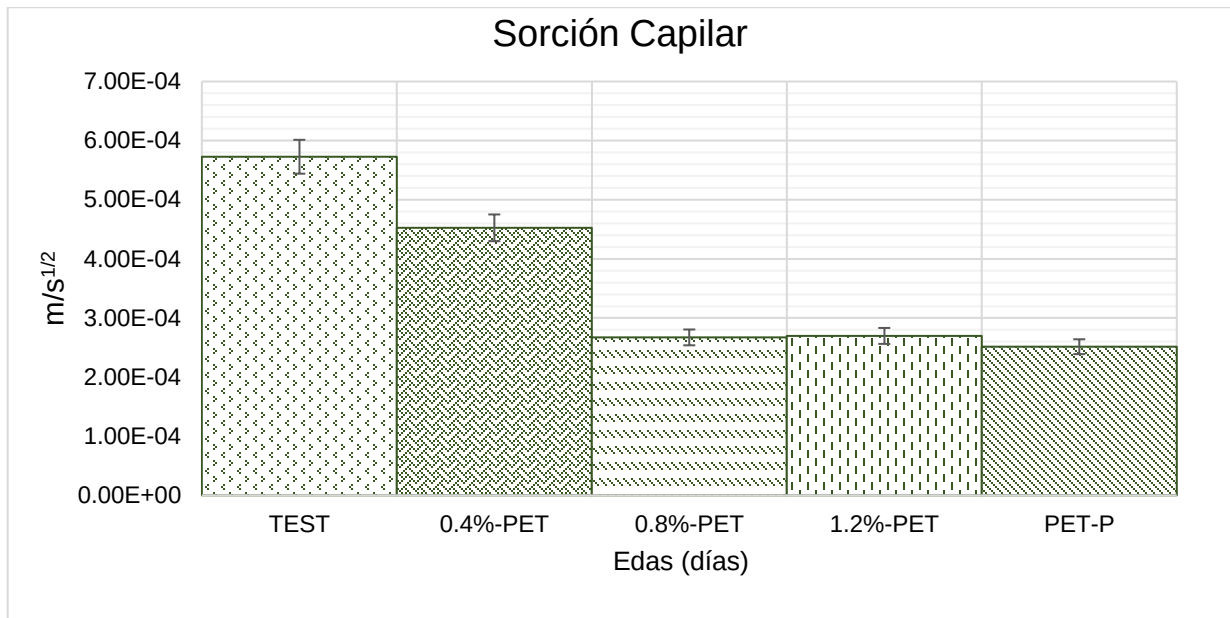


Ilustración 73. Resultados de Sorción capilar a una edad de 28 días. Fuente: elaboración propia

La Red ("DURAR", 1998) menciona que para ambientes severos se recomienda un valor de sorción capilar $S \leq 5.10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ y para ambientes menos severos un valor de $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$. Se concluye que todas las muestras de concreto se pueden proponer para ambientes menos severos.

La mezcla testigo presenta una sorción capilar de $5.73\text{E-}04 \text{ m/s}^{1/2}$ siendo superior en un 20.94, 53.40, 52.88 y 56.19 % en comparación a la mezcla 0.4%-PET, 0.8%-PET, 1.2%-PET y PET-P.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

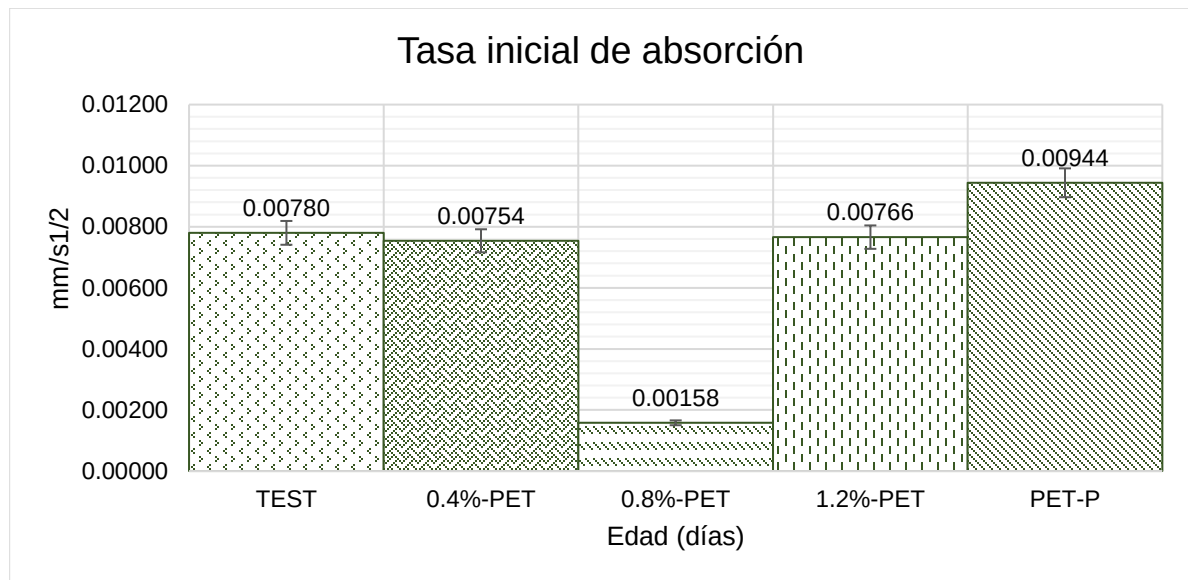


Ilustración 74. Tasa inicial de absorción. Fuente: Elaboración Propia

En la ilustración 74 se muestran los resultados promedios de la tasa inicial de absorción (durante las primeras 24 horas de la prueba), observamos que la mezcla 0.8%-PET presenta una tasa inicial de absorción inferior en un 83.26% en comparación a la mezcla PET-P que presenta un valor de 0.00944 m/s^{1/2}, la mezcla testigo, 0.4%-PET y 1.2%-PET presenta una tasa inicial de absorción inferior en un 17.37, 20.12 y 18.86% en comparación a la mezcla PET-P.

En la ilustración 76 se observa que la mezcla 0.8%-PET presenta una tasa secundaria de absorción de 0.6%, (inferior en un 84.62%) en comparación a la mezcla PET-P, que presenta un valor de 3.9%.

La mezcla testigo, 0.4%.PET y 1.2%-PET presentan valores de absorción secundaria de 1.36, 1.50 y 2.89% inferiores al valor de absorción de la mezcla PET-P.

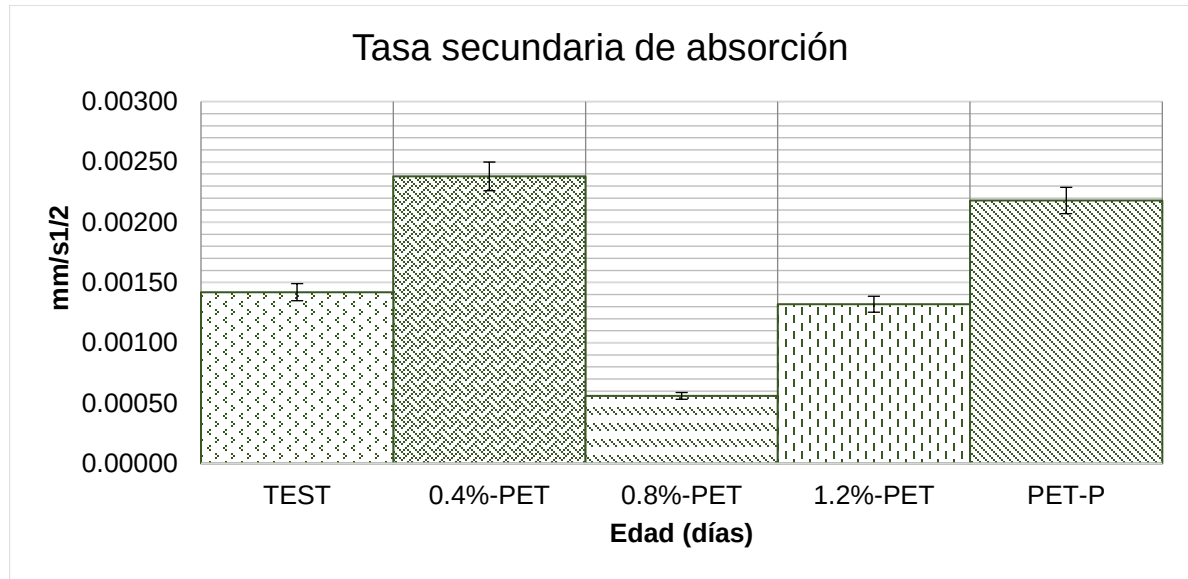


Ilustración 75. Tasa secundaria de absorción. Fuente: Elaboración Propia

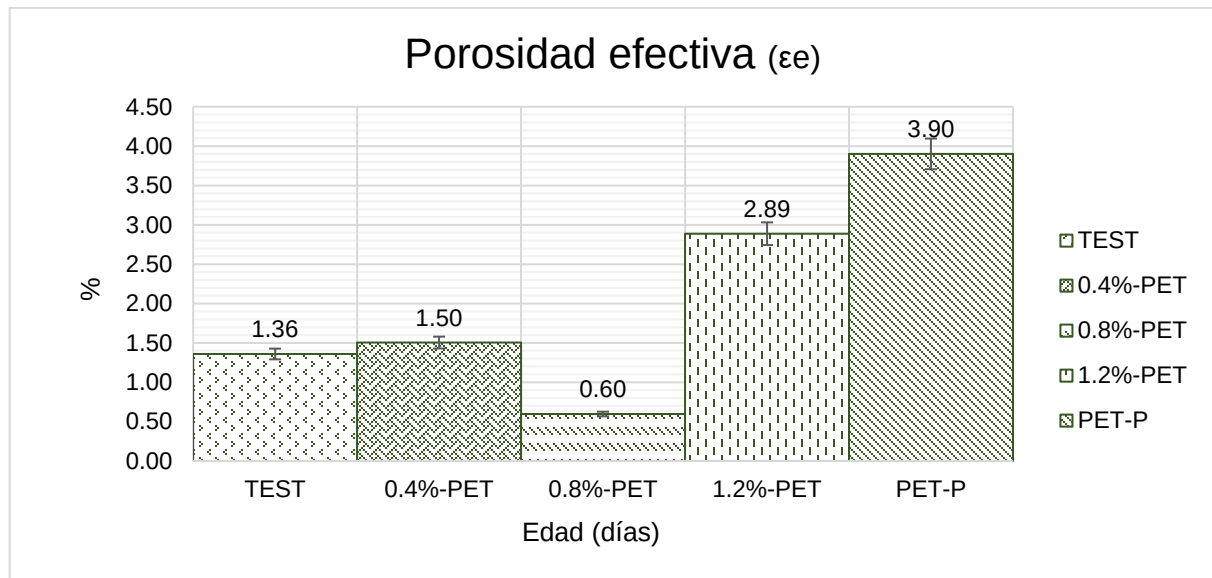


Ilustración 76. Porosidad efectiva a una edad de 28 días. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 76 se muestran los resultados promedios de la porosidad efectiva en las diferentes mezclas de concreto elaboradas para esta investigación, se observa que la mezcla 0.8%-PET tiene 0.6% de porosidad efectiva, mientras que la mezcla PET-P presenta un valor de 3.90%, siendo inferior en un 84.62%.

Las mezclas TES, 0.4%-PET y 1.2%-PET presentan valores de absorción de 1.36, 1.50 y 2.89%.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



4.3.4 Carbonatación

Siguiendo la metodología de la norma (NMX-C-515-ONNCCE, 2016) y de la Red ("DURAR", 1998), en la Ilustración 77 se muestra el comportamiento de los resultados.

Se ejecutaron las pruebas después de 90 días de exposición a la intemperie.

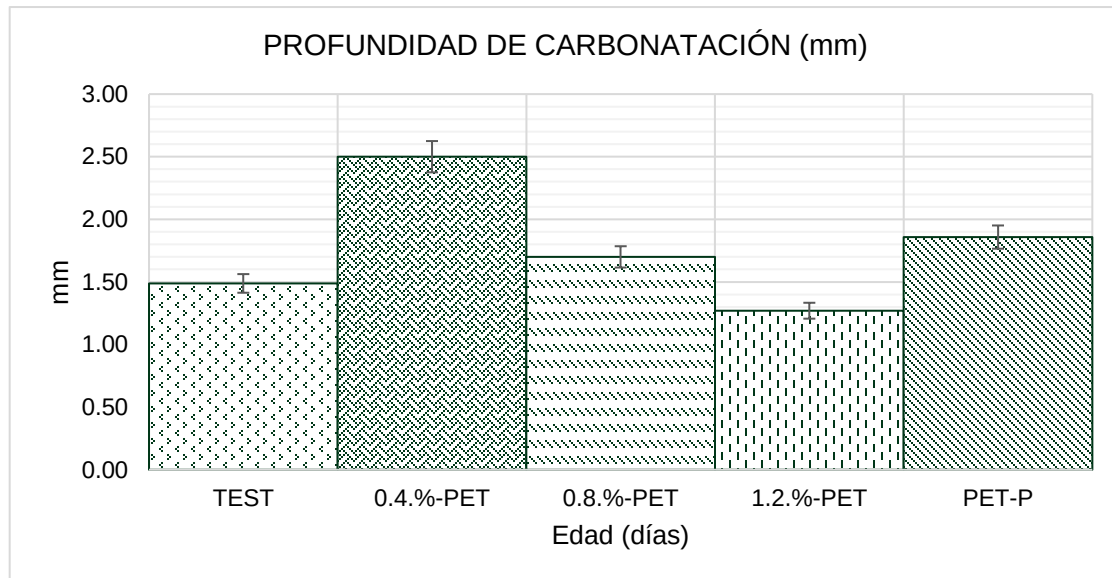


Ilustración 77. Profundidad de carbonatación en muestras de concreto. Fuente: Elaboración propia

La mezcla de 0.4%-PET presenta a 90 días de exposición a la intemperie mayor profundidad de carbonatación en muestras promedio, seguida de la mezcla PET-P, que también tiene una profundidad de carbonatación considerable, siendo la mezcla de 1.2%-PET la más favorable, menor profundidad de carbonatación, ante los agentes agresivos del medio ambiente.

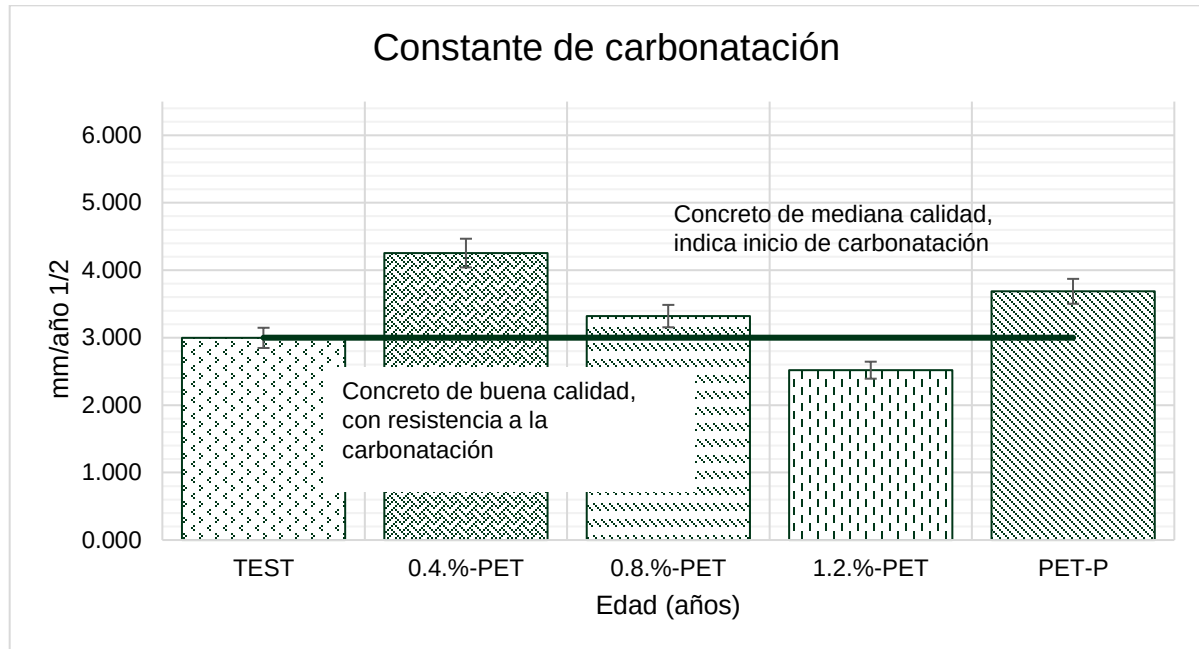


Ilustración 78. Constante de carbonatación. Fuente: Elaboración propia

La constante de carbonatación, nos indica la profundidad que puede presentar un concreto a un determinado tiempo. El comportamiento de los resultados de muestras en la ilustración 78. Se observa que la mezcla más favorable es 1-2%-PET, resultando inferior a la mezcla testigo, ya que presenta una constante inferior de 3 mm/año^{1/2}, lo que nos indica que es un concreto de buena calidad resistente a la carbonatación de acuerdo a la norma (NMX-C-515-ONNCCE, 2016). Las mezclas 0.4%-PET, 0.8%-PET y PP se consideran como un concreto de calidad mediana, con inicio de carbonatación, teniendo valores de 4.25 mm/año^{1/2}, 3.32 mm/año^{1/2} y 3.68 mm/año^{1/2} respectivamente.

A continuación, se presenta una proyección de la carbonatación a 25 años de las muestras elaboradas tabla 51 e ilustración 79. El concreto más favorable es el adicionado con 1.2%-PET que alcanzará una distancia de 12.59 mm en un periodo de tiempo de 25 años, mientras que la mezcla más de 0.4%-PET llegará a una distancia de carbonatación de 21.27 mm siendo la muestra más desfavorable. Los concretos restantes (TEST, 0.8%-PET y PET-P) tienen un comportamiento



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



medianamente similar teniendo valores de 14.99 mm, 16.60mm y 18.44 mm respectivamente.

Tabla 50. Profundidad de carbonatación estimada a 25 años. Fuente: Elaboración propia

Años	TES	0.4%PET	0.8%PET	1.2%PET	PP
1.00	3.00	4.25	3.32	2.52	3.69
2.00	4.24	6.02	4.70	3.56	5.22
3.00	5.19	7.37	5.75	4.36	6.39
4.00	5.99	8.51	6.64	5.04	7.38
5.00	6.70	9.51	7.42	5.63	8.25
6.00	7.34	10.42	8.13	6.17	9.03
7.00	7.93	11.26	8.78	6.66	9.76
8.00	8.48	12.03	9.39	7.12	10.43
9.00	8.99	12.76	9.96	7.55	11.06
10.00	9.48	13.45	10.50	7.96	11.66
11.00	9.94	14.11	11.01	8.35	12.23
12.00	10.38	14.74	11.50	8.72	12.77
13.00	10.81	15.34	11.97	9.08	13.30
14.00	11.21	15.92	12.42	9.42	13.80
15.00	11.61	16.48	12.86	9.75	14.28
16.00	11.99	17.02	13.28	10.07	14.75
17.00	12.36	17.54	13.69	10.38	15.20
18.00	12.72	18.05	14.09	10.68	15.65
19.00	13.06	18.54	14.47	10.98	16.07
20.00	13.40	19.03	14.85	11.26	16.49
21.00	13.74	19.50	15.22	11.54	16.90
22.00	14.06	19.95	15.57	11.81	17.30
23.00	14.37	20.40	15.92	12.08	17.68
24.00	14.68	20.84	16.27	12.34	18.07
25.00	14.99	21.27	16.60	12.59	18.44

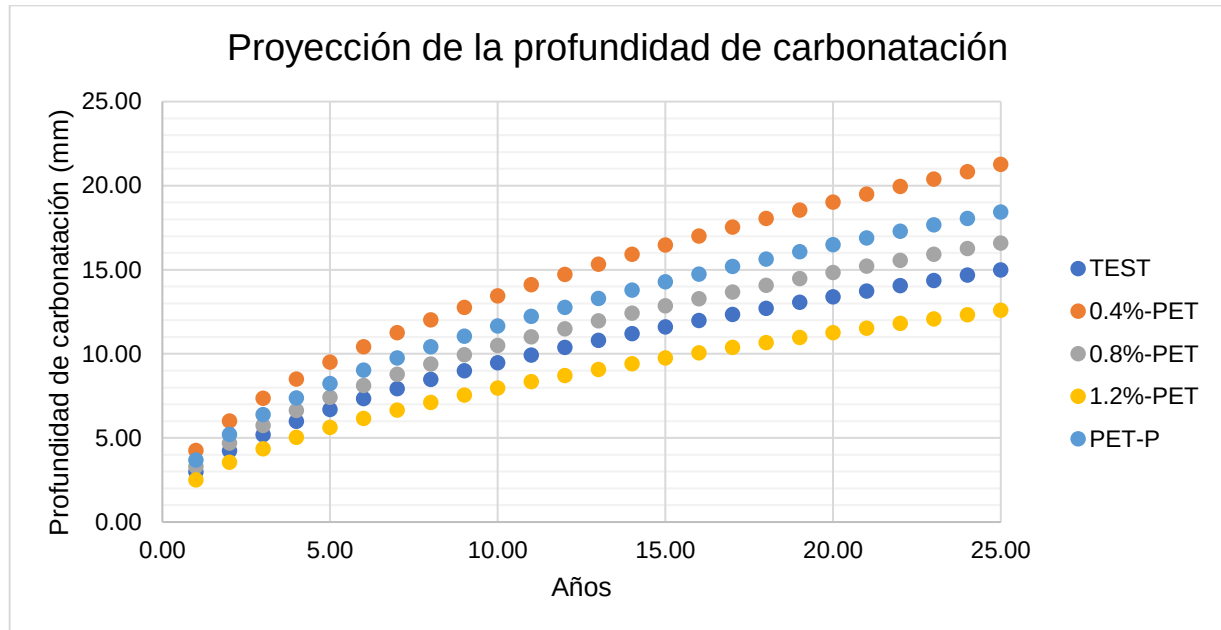


Ilustración 79. Proyección de la carbonación. Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Ataque por sulfatos

Esta prueba evalúa la pérdida de masa de los especímenes, sometidos a cambios acelerados de inmersión en solución de sulfato por un tiempo estimado de 17 ± 1 hora, y secado a masa constante a una temperatura de 50 ± 5 °C.

Se determinó que la temperatura adecuada es 50 ± 5 °C, debido a que, el concreto sometido a temperaturas mayores, presenta baja resistencia mecánica, baja adherencia, y deformaciones. Al calentarse el concreto, el agua comienza a evaporarse, por lo que el vapor atrapado en la masa del concreto provoca un aumento de presión que cuando supera la resistencia del material induce al desprendimiento entre la matriz cementante y agregado (IMCYC, 2011).

En la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) se especifica que la prueba se debe concluir cuando la pérdida de masa supera el 10% de masa inicial de las muestras.

En la ilustración 80 se muestran los resultados promedios de los especímenes de concreto de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor. La prueba se realizó a una edad



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



de 28 días. siguiendo las recomendaciones de la norma (NMX-C-075-ONNCCE, 2018)

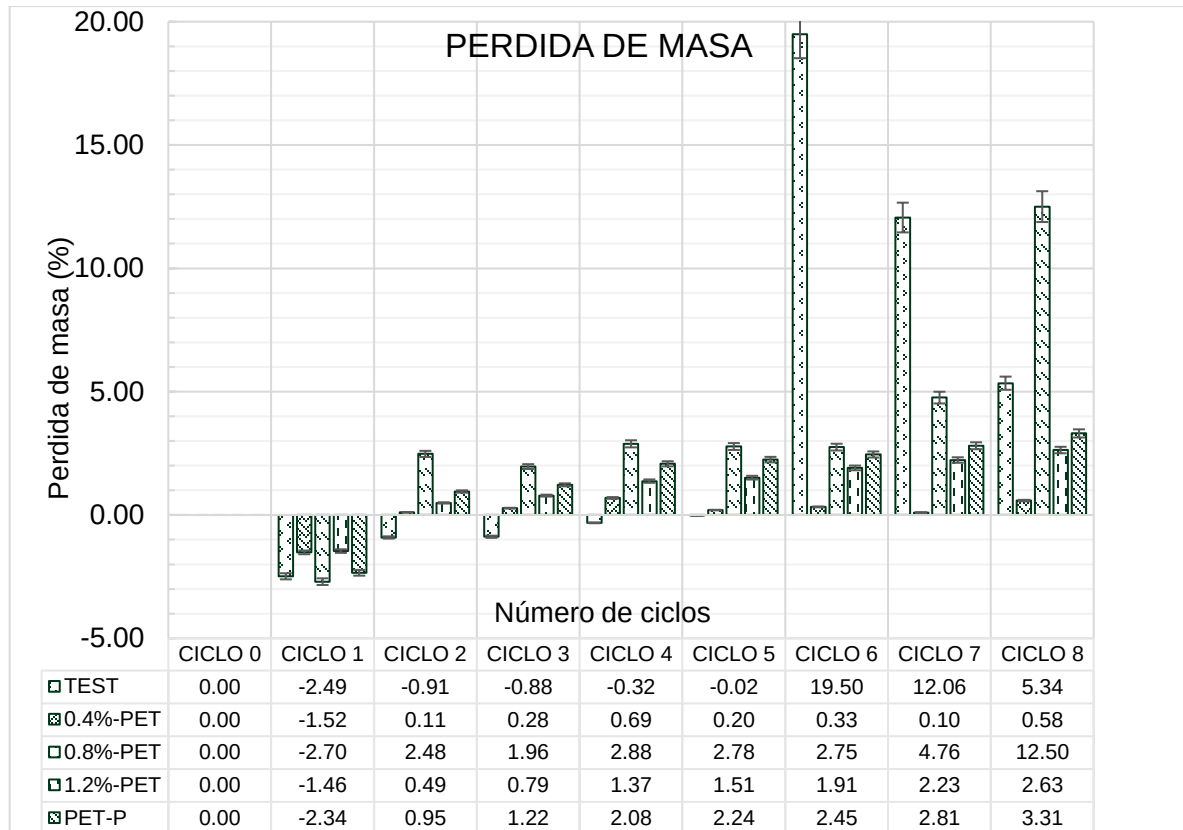


Ilustración 80. Porcentaje de pérdida de masa en muestra de 10 cm Ø y 5 cm h, a una edad de 28 días.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados indicados en la ilustración 80 muestra que en el primer ciclo todas las muestras ganaron masa, después solo la mezcla testigo siguió llenando sus poros con sulfato de sodio y cristalizándolo al momento del secado hasta el ciclo 5 y al llegar al ciclo 6 perdió drásticamente masa superando el 10 % como máximo que se especifica en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2018) Ilustración 81. Las muestras de la mezcla 0.4%-PET, no tuvieron cambios relevantes, por lo que se deduce que no absorbieron demasiado sulfato y al finalizar la prueba, las rodajas de concreto quedaron sin mucho daño, Ilustración 82. La muestra 0.8%-PET en el ciclo 8 supero el 10% de pérdida de masa.

Finalmente, la mezcla de 1.2%-PET y de PET-P se comportaron gradualmente en la pérdida de masa, hasta el final de la experimentación (las muestras quedaron sin daño significativo) ilustración 58



Ilustración 81. Especímenes de la mezcla testigo al finalizar la prueba. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 82. Especímenes de las mezclas adicionadas con PET y polipropileno al finalizar la prueba. Fuente: Elaboración propia

4.4 Correlación de forma gráfica físico/mecánico

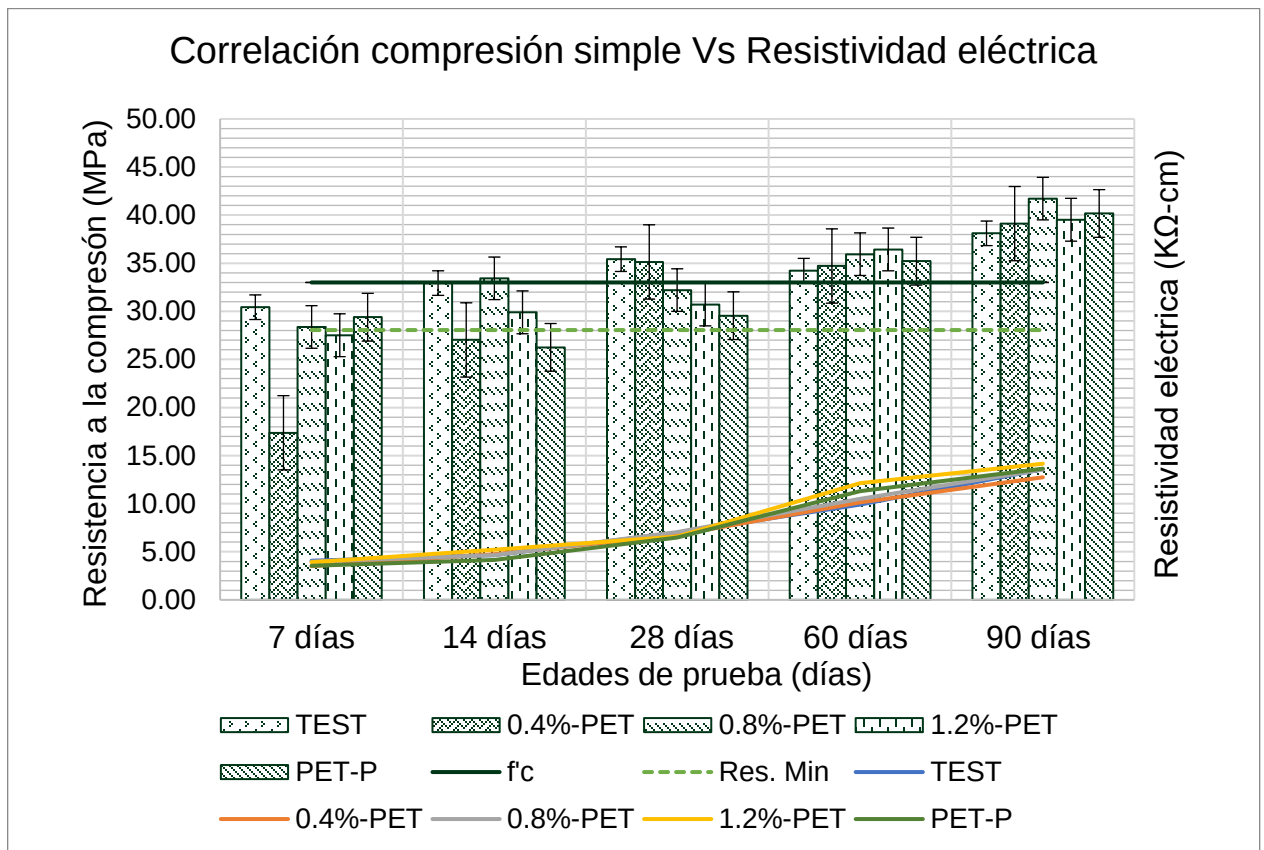


Ilustración 83. Correlación física-mecánica. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 83 se hace una correlación entre los promedios de 3 muestras tanto para la evaluación a compresión simple como para la resistividad eléctrica de las diferentes mezclas de concreto a diferentes edades.

Observamos que, al incrementar la resistencia a la compresión, aumenta la resistividad eléctrica gradualmente va incrementándose con forme avanza el tiempo.

La mezcla 1.2%-PET la que tiene una tendencia a seguir incrementándose a edades tardías, siendo superior en un 22.38% comparándolo con la mezcla testigo a 60 días. La mezcla 0.4%-PET presenta valores de resistividad inferiores, pero aumenta en su resistencia a la compresión en comparación a la mezcla testigo a la edad de 90 días. El comportamiento de las otras mezclas es muy similar entre ellas.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

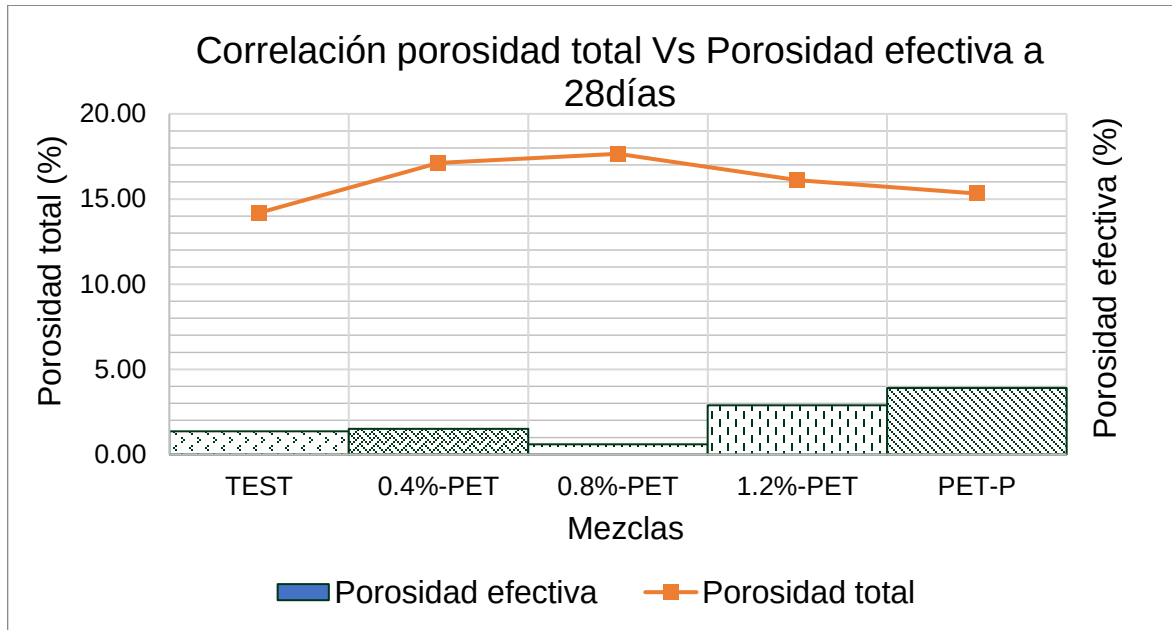


Ilustración 84. Correlación porosidad total Vs porosidad efectiva. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 84 observamos la correlación entre la porosidad total y porosidad efectiva, observamos que a menor porosidad efectiva mayor es la porosidad total.

Se observa que la mezcla 0.8%-PET presenta valores de porosidad efectiva inferiores en comparación a la mezcla testigo en un 55.88% y también presenta una porosidad total superior en un 24.38% en comparación a la mezcla testigo, por lo que se deduce que esa mezcla tiene demasiados poros, pero no están interconectados.

Los porcentajes de fibras superiores a 0.8% incrementan la porosidad efectiva. Las fibras de polipropileno hay un ligero llenado de los poros por lo que la porosidad efectiva es menor en un 186.78% comparado con la mezcla testigo.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”

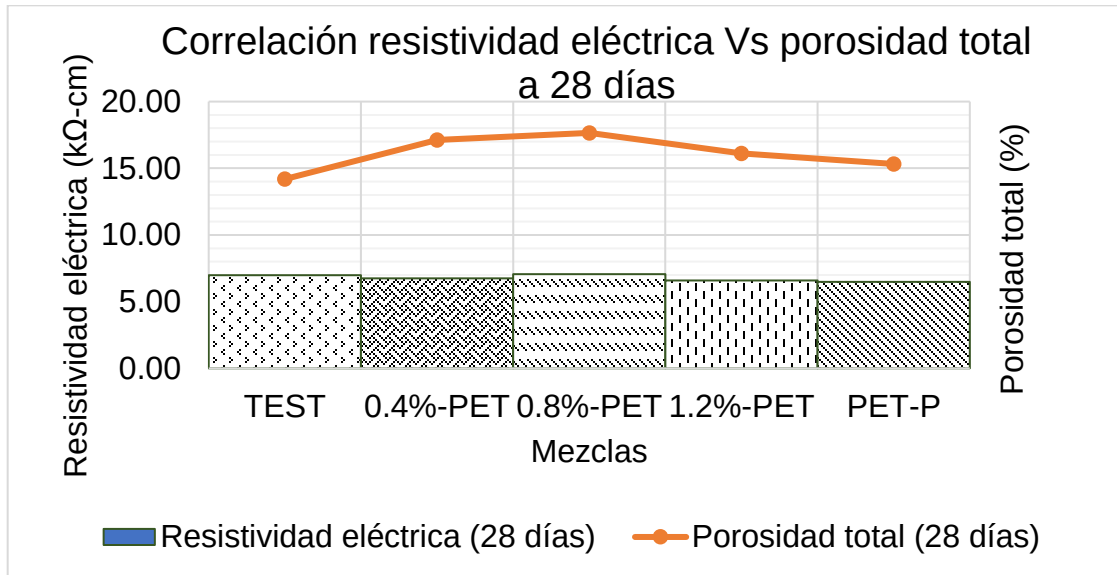


Ilustración 85. Correlación resistividad eléctrica Vs porosidad total. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 85 observamos que la mezcla 0.4%-PET al incrementar la resistividad eléctrica, aumenta la porosidad total en un 20.65% en comparación al valor de porosidad total de la mezcla testigo.

La mezcla 0.8%-PET, aumenta en un 24.38% en la porosidad total, en comparación también a la mezcla testigo, observamos que también aumenta su resistividad eléctrica.

Las mezclas 1.2%-PET y PET-P disminuyen en su resistividad y también disminuye la porosidad total, por lo que se concluye que el comportamiento de la porosidad total es paralelo a la resistividad eléctrica.

Se sugiere que al evaluar la resistividad eléctrica se tenga un control adecuado de la temperatura.

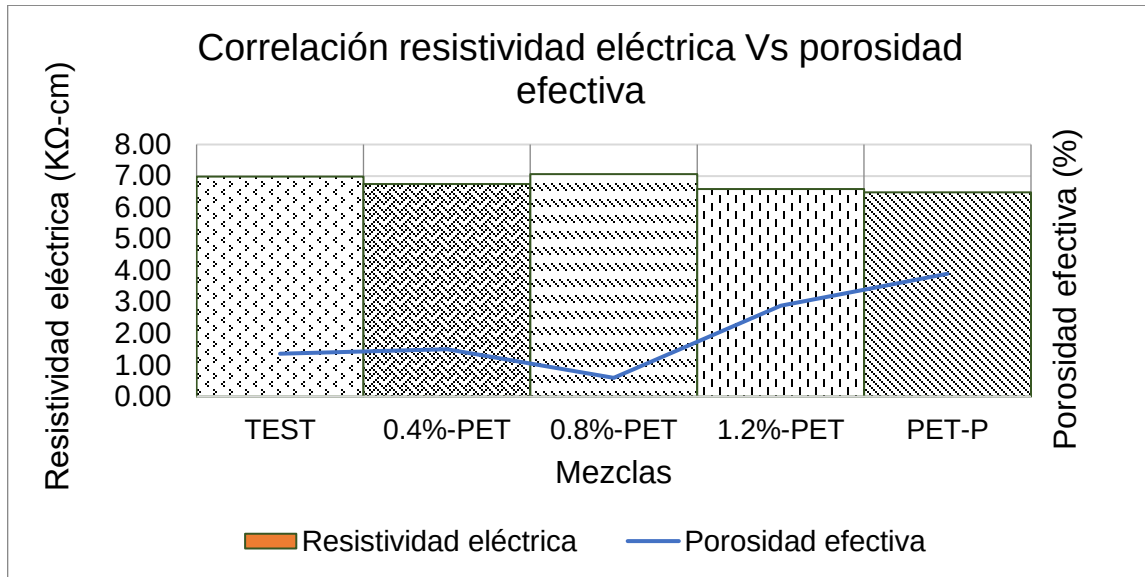


Ilustración 86. Correlación resistividad eléctrica Vs porosidad efectiva. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 86 se observa que la resistividad eléctrica está relacionada con la porosidad efectiva, lo cual cumple con la teoría de la resistividad eléctrica, ya que como se observa al aumentar la resistividad, disminuye la porosidad efectiva.

Observamos que la mezcla 0.8%-PET tiene un comportamiento brusco, ya que, es más claro que al incrementar el valor de la resistividad eléctrica (7.06 kΩ-cm), disminuye la porosidad efectiva (0.60%), mientras que en las otras mezclas no es fácil ver ese comportamiento.

La mezcla adicionada con fibras de PET y polipropileno (PET-P) presenta mayor porosidad efectiva, por lo que la adición de polipropileno hace que el concreto hidráulico tenga mayor porcentaje de poros interconectados.



5 CONCLUSIONES

Esta investigación cumplió con los objetivos establecidos, se caracterizaron los materiales adecuados para la mezcla de concreto hidráulico dosificado en masa, así mismo se diseñó la mezcla partiendo de la resistencia M_R y posteriormente se elaboraron los especímenes cilíndricos para la realización de pruebas en estado fresco (revenimiento e índice de pH) y endurecido (compresión simple, resistividad eléctrica, porosidad total, porosidad efectiva, carbonatación y ataque por sulfatos) de cada una de las mezclas con la finalidad de examinar la influencia de la adición de fibras de PET y polipropileno en diferentes porcentajes en relación a la masa de cemento.

Presentamos una serie de conclusiones a partir de los resultados obtenidos en la experimentación.

- La creación de fibras de PET a partir de desechos urbanos, incrementa el reciclaje, dando una segunda oportunidad al material de un solo uso como lo son las botellas de bebidas.
- De las principales aportaciones en el área de materiales fue la creación de macrofibras de PET a partir de envases posconsumo, con características particulares, la cual es una alternativa para la aplicación en concretos durables, que se pueden usar en todo tipo de infraestructura.
- Con respecto a las pruebas en concreto fresco, todas las mezclas cumplen con los límites de revenimiento propuesto, lo que nos indica que la adición con fibras no obstaculiza la trabajabilidad de las mezclas. El índice de pH nos indica que todas las mezclas son alcalinas, es decir, que son mezclas sanas, que no se ven afectadas por la adición de fibras.
- Todas las mezclas, incluyendo a la mezcla testigo, cumplieron con el 85% de la resistencia de diseño a los 28 días, a los 60 días todas las mezclas adicionadas con fibras superaron el f'_c de diseño superando la mezcla testigo. A edades tardías las mezclas adicionadas con fibra de PET y



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



polipropileno siguieron superando la resistencia de diseño. Por lo que se puede decir, que la adición de fibras incrementa la resistencia a la compresión.

- La prueba de resistividad eléctrica dio como resultado que las mezclas adicionadas con fibras, incluyendo la mezcla testigo a edades tardías tienen una velocidad de corrosión alta y considerables poros interconectados por lo que permite el flujo de agentes agresivos del medio ambiente. La tendencia es a seguir haciendo el micro llenado, por lo que se sugiere continuar con la evaluación a edades más tardías.
- Todas las mezclas adicionadas con fibras presentan un porcentaje mayor de porosidad total en comparación a la mezcla testigo.
- La prueba de carbonatación nos dio como resultado que la mezcla adicionada con 1.2%-PET presenta menor profundidad de carbonatación en la proyección que se realizó a 25 años, situando esta mezcla como un concreto de buena calidad, resistente a la carbonatación, mientras que las mezclas restantes son concretas de mediana calidad en los que los valores de K están en el rango de 3-6 mm/ $\sqrt{t}$.
- En la evaluación al ataque por sulfatos la adición de fibras de PET y polipropileno ayudan a mantener unida la matriz cementante con los agregados pétreos del concreto. Las muestras de la mezcla 0.4%-PET, no tuvieron cambios relevantes, por lo que se deduce que no absorbieron demasiado sulfato durante toda la prueba, al comparar esta mezcla con el testigo, el cual al ciclo 4 comenzaron a desintegrarse, destruyendo por completo la muestra, mientras que la muestras 0.4%-PET en el ciclo 8 se conservaban las muestra.
- La adición de fibras de PET y polipropileno tiene una ligera mejora en la durabilidad del concreto y en la resistencia mecánica.



6 BIBLIOGRAFÍA

- "DURAR", R. I. (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Tercera Edición ed.)*. CYTED. CYTED.
- ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. . ASTM.
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method For Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*.
- Bedoya Montoya, C. M. (enero-abril de 2017). Incidencias del contenido de agua en la trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad del concreto. *Resista de Arquitectura e Ingeniería, vol.11*(núm. 1), pag.1-9. doi:E-ISSN: 1990-8830
- Campos Silva, A. R., Fajardo, G., & Mendoza Rangel, J. M. (Diciembre de 2016). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL AVANCE DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO EN AMBIENTE NATURAL Y ACELERADO. *Concreto y Cemento, Investigación y desarrollo*, pag. 14 a la 34. Recuperado el Octubre de 2021
- E. F., F., Rodrigues Balabuch, T. J., Correa Posterlli, M., Possan, E., & Carrazedo, R. (2017). Analisis de vida util de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión uniforme de un modelo con RNA acoplado al MEF. *Revista ALCONPAT*, pp. 16-29. doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>
- ECOCE. (2021). *Asociacion Ambiental sin Fines de Lucro*. Obtenido de <https://www.ecoce.mx/>
- Grupo Argos. (2020). *Argos*. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog>
- IMCYC. (2006). Cemento y concreto resistente a sulfatos. *PROBLEMAS, CAUSAS Y SOLUCIONES*.
- IMCYC. (2007). Concreto Reforzado con Fibras. *El concreto en la obra, problemas, caudas y soluciones*.
- IMCYC. (2011). La acción del fuego sobre las estructuras de concreto. *Construcción, Tecnología en Concreto*.
- IMCYC. (2015). *Pruebas de Agregados*. México: IMCyC.
- INECC. (2020). Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de productores de concreto.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- López Celis, R., Péres Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Martínez Molina, W., Ariza Aguilar, L. E., . . . Valdez Salas, B. (2006). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. *Instituto mexicano del transporte*. doi:ISSN 0188-7297
- Macrofibras. (s.f.). *Macrofibras*. Recuperado el 2021, de <https://www.macrofibras.com/beneficios>
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (s.f.). *Diseño de Concreto Reforzado*. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Recuperado el 2020
- Mena Ferrer, M. (2005). *Durabilidad de estructuras de concreto en México Previsiones y recomendaciones*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. doi:ISBN 968-464-149-4
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estado plástico y endurecido. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, Vol. 2(No. 2). doi:ISSN 2007-3011
- M-MMP-2-02-032. (2018). *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES. En Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles*. SCT.
- Montoya Vallecilla, J. O. (2017). *Elementos de concreto reforzado I*. Ibagué, Colombia: Ediciones Unibagué.
- Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería*, 10-3, 5-12.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, A. (2011). *Análisis de materiales*. FIC, UMSNH.
- Neville, A. (2013). *TECNOLOGÍA DEL CONCRETO*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. England: ISBN 978-0-273-73219-8.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Muestreo*. ONNCCE.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Masa Volumétrica-Método de Prueba*. ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-075-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción- Agregados- Determinación de la Sanidad por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio- Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción- Agregados para Concreto-Análisis Granulométrico- Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción-Agregados Pétreos- Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino-Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-109-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico- Cabeceo de Especímenes*. ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto - Especificaciones*. ONNCCE.
- NMX-C-152-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Densidad*. ONNCCE.
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Dosificado en Masa Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico- Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. ONNCCE.



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-170-ONNCCE. (2019). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los Ensayos*. ONNCCE.
- NMX-C-263-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico Endurecido-Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos*. ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-504-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico-Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción-Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-515-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Durabilidad-Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-530-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones*. ONNCCE.
- Portugal Barriga, P. (2007). *Tecnología del concreto de alto desempeño*.
- PSI. (2020). *psiconcreto*. Obtenido de <https://psiconcreto.com/fibra-de-polipropileno/>
- Quishpe Gaibor, J., & Ortiz, J. (2018). Ética en la producción de botellas plásticas y su contaminación al medio ambiente. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*.
- RecaudaPET. (2013). *Menos botellas + vida*. Obtenido de <https://recaudapet.wordpress.com/2013/11/30/historia-del-pet/>
- Roberto, A. (Mayo de 2015). *Historias de empaques*. Obtenido de <https://historiasdeempaques.wordpress.com/category/polipropileno/>



“Evaluación por durabilidad del concreto modificado con fibras de PET y polipropileno”



SEMARNAT. (2021). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat>

Solís Carcaño, R. G., & Alcocer Fraga, M. A. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería, Investigación y tecnología*, vol. XX(núm. 4). doi: 10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039

Solís Carcaño, R. G., Moreno, É. I., & Castro Borges, P. (2005). Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. *Ingeniería*, vol. 9(núm. 1), pp. 13-18. doi:ISSN: 1665-529X

Texdelta. (s.f.). *El blog de texdelta*. Recuperado el Septiembre de 2021, de Información sobre los geotextiles y tejidos técnicos para la construcción: <https://texdelta.com/blog/aplicaciones-y-ventajas-del-uso-de-fibras-de-polipropileno/>

UAdeC. (s.f.). Identificación y evaluación del riesgo de la corrosión en estructuras de concreto armado en plantas industriales sometidas a un ambiente ácido. *CienciAcierta Revista científica, tecnológica y humanista*. doi:ISSN: 2683-1848

United Nations Environmental Programme, U. (2018). *Our planet is drowning in plastic pollution*. Recuperado el Septiembre de 2021, de <https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/>.

Víctor Yepes. (28 de Octubre de 2016). *El blog de Víctor Yepes*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/10/28/>