



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**

**“COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE MORTEROS DE CP CON  
SUBSTITUCIONES PARCIALES MINERALES, ORGÁNICAS, DE FIBRAS Y  
RESIDUOS INDUSTRIALES A EDADES DE 1000 DÍAS”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**ROSALÍA RUIZ RUIZ**

**ASESOR:**

**DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

**COASESORES:**

**M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA**

**DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA**

**Morelia, Mich., Diciembre de 2015**





## Índice

<b>Índice de tablas</b> .....	V
<b>Índice de figuras</b> .....	X
<b>Resumen</b> .....	xiv
<b>Summary</b> .....	xv
<i>Dedicatorias</i> .....	xvi
<i>Agradecimientos</i> .....	xvii
<b>Objetivos</b> .....	xviii
<b>1.- INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2.- MARCO TEÓRICO</b> .....	3
2.1.- Cementos.....	3
2.1.1. - Historia del cemento.....	3
2.1.2. - Fabricación del Cemento Pórtland .....	9
2.1.3. - Química del cemento.....	13
2.1.4. - Hidratación del Cemento .....	18
2.1.5. - Tipos de Cementos Portland .....	25
2.1.6.- Producción y consumo de cemento en México .....	30
2.1.7.- Emisiones de CO <sub>2</sub> y eficiencia energética de la industria cementera .....	35
2.2.- Puzolanas .....	38
2.2.1.- Clasificación de las puzolanas.....	38
2.2.2.- Reacción puzolánica .....	41
2.2.3.- Puzolanidad y reactividad puzolánica.....	44



2.2.4.- Uso de las puzolanas de estudio en la elaboración de morteros.....	45
2.2.4.1.- Metacaolín (MK).....	45
2.2.4.2.- Perlita natural (PN).....	47
2.2.4.3.- Perlita expandida (PE) .....	47
2.2.4.4.- Ceniza de bagazo de caña (CBC) .....	48
2.2.4.5.- Ceniza de elaboración de ladrillo (CEL).....	49
2.2.4.6.- Fibra de nopal (FN).....	49
2.2.4.8.- Ceniza de horno BOF (CBOF) .....	51
2.2.4.9.- Carbón mineral (CM).....	51
2.3.- Morteros.....	52
2.3.1.- Clasificación de los morteros.....	52
2.3.2.- Componentes de los morteros.....	55
2.3.2.1.- Aglutinantes .....	56
2.3.2.2.- Agregados pétreos.....	56
2.3.2.3.- Agua.....	58
2.3.2.4.- Aditivos .....	60
2.3.3.- Uso de los morteros .....	61
2.3.4.- Agentes que degradan a los morteros.....	61
<b>3.- METODOLOGÍA.....</b>	<b>63</b>
3.1.- Materiales.....	63
3.1.1.- Cemento.....	63
3.1.2.- Substituciones parciales del cemento .....	64
3.1.2.1.- Minerales .....	65



---

3.1.2.2.- Orgánicas.....	66
3.1.2.3.- Fibras .....	67
3.1.2.4.- Residuos industriales .....	68
3.1.3.- Agregados pétreos .....	69
3.1.4.- Agua .....	70
3.1.5.- Aditivos .....	71
3.2.- Diseño experimental .....	71
3.2.1.- Caracterización de materiales .....	71
3.2.1.1.- Cementantes.....	71
3.2.1.2.-Agregados.....	72
3.2.2.- Diseño de mezcla .....	73
3.2.3.- Preparación de mezclas .....	74
3.2.4.- Elaboración de especímenes .....	75
3.2.5.- Ensayos realizados .....	77
3.2.5.1.- Absorción capilar .....	78
3.2.5.2.- Resistividad eléctrica húmeda de los morteros a 1000 días de su fabricación .....	80
3.2.5.3.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los morteros a 1000 días de su fabricación.....	83
3.2.5.4.- Resistencia a la compresión de los morteros a 360 días de su fabricación .....	86
<b>4.-RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>88</b>
4.1.- Caracterización de materiales.....	88
4.2.- Absorción capilar de los morteros a 1000 días de su fabricación	91
4.2.1.- Absorción capilar de los morteros testigo.....	94



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con sustituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



---

4.2.2.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones minerales .....	97
4.2.3.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones orgánicas.....	100
4.2.4.- Absorción capilar de los morteros con sustitución de fibra de nopal .....	102
4.2.5.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones industriales .....	104
4.3.- Resistividad eléctrica húmeda de los morteros a 1000 días de su fabricación .....	107
4.4.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los morteros a 1000 días de su fabricación.....	110
4.5.- Resistencia a la compresión de los morteros a 360 días de su fabricación .....	114
4.6.- Comportamiento físico-mecánico a través del tiempo.....	118
4.7.- Clasificación paramétrica de los resultados a 1000 días .....	146
<b>5.- CONCLUSIONES</b> .....	150
<b>Bibliografía</b> .....	152



## Índice de tablas

Tabla 1. –Hitos en la producción del cemento Pórtland(Newman & Choo, 2003).....	8
Tabla 2. – Componentes principales del cemento Pórtland(Neville & Brooks, 2010).....	14
Tabla 3 .- Influencia de la mayoría de constituyentes menores en el proceso de fabricación (Newman & Choo, 2003).....	17
Tabla 4. Principales tipos de cemento (Neville & Brooks, 2010).....	27
<b>Tabla 5. Valores promedio de composición de los diferentes tipos de cemento Pórtland(Neville &amp; Brooks, 2010).....</b>	<b>28</b>
Tabla 6.- Tipos de cemento de acuerdo con la norma ASTM C 150. ....	28
Tabla 7.- Clasificación de los cementos de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010. ....	29
Tabla 8.- Requerimientos químicos .....	41
Tabla 9.- Requerimientos de la especificación por proporciones (ASTM C270-14, 2014).....	54
Tabla 10.- Requerimientos de la especificación por propiedades (ASTM C270-14, 2014).....	54
Tabla 11.- Tipos de morteros (N-CMT-2-01-004/02, 2002).....	55
Tabla 12.- Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010).....	57
Tabla 13.- Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE-2004).....	59
Tabla 14.- Factores del agua de mezclado que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010).....	60
Tabla 15.- Diseño de mezclas (Arreola Sánchez, M., 2013).....	74



Tabla 16- Cantidades y/o relaciones de las mezclas (Arguello Hernández, S.del C., 2012). .....	75
Tabla 17.- Riesgo de corrosión de acuerdo con el valor de resistividad eléctrica (DURAR.CYTED, 1998).....	81
<b>Tabla 18.- Criterios de evaluación mediante velocidad de pulso ultrasónico (DURAR.CYTED, 1998).....</b>	<b>84</b>
Tabla 19.- Composición química de los materiales cementantes. ....	88
Tabla 20.-Composición química de los agregados. ....	90
Tabla 21.- Caracterización de los agregados (Bernabé Reyes, C., 2015). .....	90
Tabla 22.-Datos resultantes de ensayo de absorción capilar para la probeta FN 2.0%-1. ....	92
Tabla 23.- Valores estimados de los parámetros del ensayo de absorción capilar para FN 2.0%-1 .....	93
Tabla 24.- Comportamiento físico-mecánico del mortero sin adiciones (T) a través del tiempo. ....	119
Tabla 25.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 5% a través del tiempo. ....	119
Tabla 26.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 10% a través del tiempo. ....	120
Tabla 27.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 15% a través del tiempo. ....	121
Tabla 28.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 20% a través del tiempo. ....	121
Tabla 29.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 30% a través del tiempo. ....	122
Tabla 30.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 5% a través del tiempo. ....	123
<b>Tabla 31.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 10% a través del tiempo.....</b>	<b>123</b>



Tabla 32.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 5% a través del tiempo.....	124
Tabla 33.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 20% a través del tiempo.....	125
Tabla 34.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 30% a través del tiempo.....	125
Tabla 35.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 5% a través del tiempo.....	126
Tabla 36.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 10% a través del tiempo.....	126
Tabla 37.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 15% a través del tiempo.....	127
Tabla 38.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 20% a través del tiempo.....	128
Tabla 39.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 30% a través del tiempo.....	128
Tabla 40.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 5% a través del tiempo.....	129
Tabla 41.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 10% a través del tiempo.....	130
Tabla 42.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 15% a través del tiempo.....	130
Tabla 43.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 20% a través del tiempo.....	131
Tabla 44.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 30% a través del tiempo.....	131
Tabla 45.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 5% a través del tiempo.....	132
Tabla 46.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 10% a través del tiempo.....	132



Tabla 47.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 15% a través del tiempo. ....	133
Tabla 48.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 20% a través del tiempo. ....	134
Tabla 49.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 30% a través del tiempo. ....	134
Tabla 50.- Comportamiento físico-mecánico del mortero sin adiciones (T1) a través del tiempo. ....	135
Tabla 51.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 5% a través del tiempo. ....	135
Tabla 52.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 10% a través del tiempo. ....	136
Tabla 53.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 15% a través del tiempo. ....	136
Tabla 54.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 20% a través del tiempo. ....	137
Tabla 55.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 30% a través del tiempo. ....	138
Tabla 56.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 5% a través del tiempo. ....	138
Tabla 57.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 10% a través del tiempo. ....	139
Tabla 58.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 15% a través del tiempo. ....	139
Tabla 59.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 20% a través del tiempo. ....	140
Tabla 60.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 30% a través del tiempo. ....	140
Tabla 61.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 5% a través del tiempo. ....	141



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



---

Tabla 62.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 10% a través del tiempo. ....	142
Tabla 63.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 15% a través del tiempo. ....	142
Tabla 64.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 20% a través del tiempo. ....	143
Tabla 65.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 30% a través del tiempo. ....	143
Tabla 66.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 0.5% a través del tiempo. ....	144
Tabla 67.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 1.0% a través del tiempo. ....	144
Tabla 68.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 1.5% a través del tiempo. ....	145
Tabla 69.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 2.0% a través del tiempo. ....	145
Tabla 70.- Parámetros de clasificación .....	146
Tabla 71.-Calificación por prueba. ....	147
Tabla 72.-Calificación final .....	148



## Índice de figuras

Figura 1.- Gran pirámide de Giza, Egipto. ....	4
Figura 2. Faro Eddystone, Inglaterra. ....	5
Figura 3.- Etapas en la producción tradicional del cemento Portland (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). ....	11
Figura 4.- Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través de la proceso seco (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).....	13
Figura 5.- Composición química típica del clínker de cemento Pórtland(Newman & Choo, 2003).....	16
Figura 6.- Ilustración simplificada de la hidratación de la pasta del cemento (Newman & Choo, 2003). ....	22
Figura 7.- Calor de hidratación de una pasta de cemento determinado mediante calorimetría de conducción a 20°C (Newman & Choo, 2003).....	24
Figura 8.-Participación por región en la producción de cemento en 2012 (%) (FICEM, 2013). ....	31
Figura 9.- Participación por región el consumo de cemento en 2012 (%) (FICEM, 2013).....	32
Figura 10.-Panorama de producción y consumo per cápita en la región de América Latina y el Caribe en 2012 (FICEM, 2013). ....	33
Figura 11.-Producción de cemento (en miles de toneladas) en la región de América Latina y el Caribe (FICEM, 2013).....	34
Figura 12.- Consumo de cemento (en miles de toneladas) en la región de América Latina y el Caribe (FICEM, 2013).....	35
Figura 13.-Emisiones netas específicas promedio de CO <sub>2</sub> por tonelada de producto cementante (FICEM, 2013). ....	36
Figura 14.-Consumo de energía térmica por tonelada de clínker. ....	37
Figura 15.-Consumo de energía eléctrica por tonelada de cemento. ....	38
Figura 16.- Cemento CPC 30R RS.....	64



Figura 17.-Ubicación de los materiales de estudio .....	65
Figura 18.- Minerales: a) MK, b) PE y c) PN.....	66
Figura 19.- Orgánicas: a) CBC y b) CEL.....	67
Figura 20.- Fibra de nopal ( (Núñez Hurtado, J.A., 2013).....	68
Figura 21.- Residuos industriales: a) EAH, b) CBOF y c) CM.....	69
Figura 22.- Río El Cuervo, Huajúbaro, Michoacán (Arguello Hernández, S.del C., 2012). .....	70
Figura 23.- Fluidificante SikaCem.....	71
Figura 24.- Equipo y modo de mezclado (Arreola Sánchez, M., 2013)....	75
Figura 25.- Orden de apisonado de capas: a) capas 1 y 3 y b) capas 2 y 4. .....	76
Figura 26.- Elaboración de especímenes: a) cubos y b) cilindros.....	77
Figura 27.- Curado de especímenes mediante inmersión en agua. ....	77
Figura 28.- Método propuesto por Göran Fagerlund (Göran, 1986) .....	79
Figura 29.- Determinación de resistividad eléctrica: a) medición del diámetro, b) colocación de muestra sobre esponja y placa metálica y c) montaje de la muestra y aplicación de corriente. ....	82
Figura 30.- Determinación de velocidad de pulso ultrasónico: a) determinación de dimensiones, b) calibración del equipo, c) tránsito del pulso a través de la muestra y d) registro de velocidad.....	86
Figura 31.- Determinación del esfuerzo a la compresión en cubos: a) cubo sujeto a compresión y b) aplicación de carga de compresión (Arguello Hernández, S.del C., 2012). .....	87
Figura 32.- Gráfica de ensayo de absorción capilar para la probeta FN-2.0%. .....	93
Figura 33. Resistencia a la penetración del agua (m) T vs T1.....	94
Figura 34.- Coeficiente de absorción capilar (k) T vs T1.....	95
Figura 35.- Porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) T vs T1.....	95
Figura 36. Sorción capilar (S) T vs T1. ....	96



Figura 37.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones minerales. ....	97
Figura 38.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones minerales. ....	98
Figura 39.- Figura 34.-Porosidad efectiva en morteros con sustituciones minerales.....	98
Figura 40.- Sorción capilar en morteros con sustituciones minerales....	99
Figura 41.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones orgánicas. ....	100
Figura 42.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones orgánicas. ....	100
Figura 43.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones orgánicas. ....	101
Figura 44.- Sorción capilar en morteros con sustituciones orgánicas. .	101
Figura 45.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones de fibra de nopal. ....	102
Figura 46.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones de fibra de nopal. ....	103
Figura 47.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones de fibra de nopal. ....	103
Figura 48.- Sorción capilar en morteros con sustituciones de fibra de nopal. ....	104
Figura 49.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones de residuos industriales. ....	105
Figura 50.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones de residuos industriales. ....	105
Figura 51.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones de residuos industriales. ....	106
Figura 52.- Sorción capilar en morteros con sustituciones de residuos industriales. ....	106



Figura 53.- Resistividad eléctrica T vs T1.....	107
Figura 54.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones minerales.....	108
Figura 55.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones orgánicas.....	108
Figura 56.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones de fibra de nopal. ....	109
Figura 57.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones de residuos industriales.....	109
Figura 58.- Velocidad de pulso ultrasónico T vs T1. ....	111
Figura 59.- Valores de VPU en morteros con substituciones minerales. ....	112
Figura 60.- Valores de VPU en morteros con substituciones orgánicas. ....	112
Figura 61.- Valores de VPU en morteros con substituciones de fibra de nopal. ....	113
Figura 62.- Valores de VPU en morteros con substituciones de fibra de nopal. ....	113
Figura 63.- Resistencia a la compresión T vs T1.....	115
Figura 64.- Resistencia a la compresión en morteros con substituciones minerales.....	116
Figura 65.- Resistencia a la compresión en morteros con substituciones orgánicas.....	116
Figura 66.- Resistencia a la compresión de fibra de nopal. ....	117
Figura 67.- Resistencia a la compresión en morteros con substituciones de residuos industriales.....	117



## Resumen

La presente investigación consiste en la caracterización físico-mecánica de morteros base cemento con substituciones parciales de distintos materiales potencialmente puzolánicos, con la finalidad de reducir el consumo de cemento Pórtland (CP) en la elaboración de morteros y/o concretos, sin que haya decremento de sus características mecánicas y de durabilidad. Además se pretende analizar la factibilidad de uso de algunos materiales que son provenientes de procesos industriales y que normalmente son considerados como desechos, es decir, no se les da otro uso. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, nuestra contribución al cuidado del medio ambiente sería doble: por un lado, la disminución del cemento empleado ocasionaría una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y por otro lado, la disminución de residuos sólidos depositados en el suelo. Los materiales substitutos fueron: minerales de alta temperatura como metacaolín (MK), perlita expandida (PE) y perlita natural (PN); cenizas orgánicas como ceniza de bagazo de caña (CBC) y ceniza de elaboración de ladrillo (CEL); fibra de nopal (FN) y residuos industriales como escoria de alta horno (EAH), ceniza del horno BOF (CBOF) y carbón mineral (CM). Se elaboraron especímenes de mortero con substituciones de 5, 10, 15, 20 y 30% de MK, PE, PN, CBC, CEL, EAH, CBOF y CM, y de 1.0, 1.5 y 2.0% de FN. Los especímenes fueron ensayados a los 1000 días de curado. Los ensayos realizados fueron: absorción capilar, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica. Además de los ensayos realizados; se recopilaron, analizaron y compararon los resultados obtenidos en investigaciones precursoras a ésta, con la finalidad de ver el comportamiento de estas substituciones en el tiempo. Los resultados muestran que los morteros siguen desarrollando sus propiedades a lo largo del tiempo, principalmente la resistividad eléctrica que tuvo un incremento notable con respecto a los 360 días. Las substituciones que tuvieron el comportamiento más adecuado, incluso superior al testigo fueron CBC 20%, EAH 15% y PN 30%. De acuerdo con esto, tales substituciones podrían ser usadas como reemplazamiento parcial del CP en la elaboración de morteros.

**Palabras clave:** morteros, cemento, puzolanas, durabilidad, residuos



## Summary

This research consists of physical-mechanical characterization of cement mortars with partial replacements of different pozzolanic materials, in order to reduce the consumption of Pórtlandcement (CP) in the production of mortar or concrete, without demerit of its mechanical properties and durability. Besides, it will analyze the feasibility of use of some materials that are coming from industrial processes that they are normally considered as waste. Accordingly, our contribution to environmental protection would be double: first, the reduction of cement used would cause a reduction in CO<sub>2</sub> emissions and on the other hand, the reduction of solid waste deposited on the ground. The substitute materials were: minerals of high temperature as metakaolin (MK), expanded perlite (PE) and natural perlite (PN); organic ash as sugar cane bagasse ash (CBC) and ash of handmade clay brick elaboration (CEL); white cactus opuntia fibers (FN) and industrial waste as blast furnace slag (EAH), basic oxygen furnace slag (CBOF) and mineral carbide (CM). Specimens of cement mortar with substitutions of 5, 10, 15.20 and 30% MK, PE, PN, CBC, CEL, EAH, CBOF and CM, and 1.0, 1.5 and 2.0% FN were developed. The test age was 1000 days. Tests as capillary absorption, electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity were performed. Besides, the results obtained in previous investigations were collected, analyzed and compared to evaluate the behavior of these substitutions in the time. The results show that the mortars continue to develop their properties over time, mainly electrical resistivity that had a significant increase after 360 days. Substitutions that had the behavior most appropriate were CBC 20%, 15% EAH and PN 30%. Accordingly, such substitutions could be used as a partial replacement of the CP in the preparation of mortars.

**Key words:** mortars, cement, pozzolans, durability, waste



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



*Dedicatorias*

*A Dios, por regalarme la vida y permitirme llegar a este maravilloso día en el que conquistaré una de mis metas.*

*A mis padres: Bernardo y Teresa; por su cariño, comprensión y todos esos sacrificios que han hecho por darnos mejores oportunidades que las que ellos tuvieron.*

*A mis hermanos: Chuya, Berna, Gildo, Juan, Tere, José, Diana y Rafa; por tan gratos momentos que he vivido con ustedes y por su apoyo moral y económico.*

*A mi novio, por apoyarme en la toma de decisiones importantes y por ser mi motivación.*



### *Agradecimientos*

*A la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H., por la formación académica integral recibida por parte de los profesores que ahí laboran.*

*A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán; por la confianza, orientación y el apoyo incondicional que siempre me ha brindado le estaré eternamente agradecida.*

*A mis coasesores, el M.A. Wilfrido Martínez Molina y el Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, por el soporte técnico-académico otorgado.*

*A la M.I.T. Cindy, el Dr. Hugo Luis y el Ing. Moisés, por las facilidades brindadas en la realización de este proyecto.*

*A los integrantes del proyecto de cenizas puzolánicas: Mauricio, Sandra, Cipriano, José Luis, Miguel Ángel, Luis y Antonio; por la información y asistencia técnica brindada, ya que sin ésta no hubiera sido posible la realización de la presente investigación.*

*A mis compañeros de trabajo: Don Jesús, Don Rube, Don Chora, Sergio, Judith, Isaías, Noel, Marco y Eduardo, por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo.*

*A los jóvenes de servicio social, amigos y a todos los que de alguna forma u otra colaboraron activamente en el desarrollo de esta investigación.*



## **Objetivos**

### **General:**

Evaluar la factibilidad del uso de algunos materiales potencialmente puzolánicos como substitutos parciales del cemento Portland, mediante la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas, con la finalidad de encontrar materiales que además de tener un comportamiento mecánico adecuado tengan ciertas características de durabilidad.

### **Específicos:**

- ❖ Dar continuidad a la investigación sobre la utilización de materiales puzolánicos como substitutos parciales de cemento Portland, realizada en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, adscrito a la Facultad de Ingeniería de Civil de la U.M.S.N.H.
- ❖ Aprovechar algunos residuos agrícolas e industriales potencialmente puzolánicos, generados en el estado de Michoacán.
- ❖ Evaluar algunas propiedades físicas y mecánicas de morteros base cementicia con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y de residuos industriales.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos en investigaciones previas con los de la presente investigación.
- ❖ Hacer una clasificación paramétrica para cada substitución de acuerdo con los criterios de durabilidad.



## **1.- INTRODUCCIÓN**

La industria de la construcción a nivel mundial está creciendo a pasos agigantados y con ello la producción de los materiales más utilizados en dicha industria está aumentando considerablemente; tal es el caso del cemento Pórtland (CP), principal componente en la elaboración de morteros y concretos que son ampliamente utilizados en la construcción y/o reparación de obras civiles. El impacto resultante del uso del cemento es considerable ya que por cada tonelada de CP producida se emite aproximadamente 629Kg. de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo cual es preocupante ya que este es uno de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global (FICEM, 2013). Con el objetivo de disminuir estas emisiones, algunas instituciones se han interesado en la investigación de diversos materiales puzolánicos que sustituyan parcialmente al CP, pero que tengan un impacto menor en el medio ambiente.

Tradicionalmente, las estructuras han sido diseñadas tomando en cuenta únicamente los criterios de resistencia mecánica; sin embargo, muchas de estas estructuras no han permanecido en condiciones adecuadas a lo largo de la vida útil para la cual fueron diseñadas. Por esta razón, en los últimos años el término durabilidad ha cobrado gran interés entre los investigadores (Ruiz, y otros, 2015) Un factor determinante para proveer durabilidad es elaborar concretos con baja porosidad, ya que esto frenaría el ingreso de agentes agresivos a la matriz cementicia (Newman & Choo, 2003). Con la intención de proveer durabilidad al concreto y mortero reforzado, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas (Águila & Soso, 2008).

Además el uso de los materiales puzolánicos, permite reducir la cantidad de desechos depositados en el medio ambiente, ya que muchos de los subproductos derivados en los procesos agroindustriales e industriales son cenizas y residuos con un gran potencial puzolánico. Por lo tanto, el uso de estos



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



materiales como sustitutos del cemento redundan en un impacto ecológico y favorable al medio ambiente, aunado a la mejora de sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad (Arreola Sánchez, M., 2013).

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se buscó que algunos de los materiales objeto de estudio fueran provenientes de algún proceso agroindustrial o industrial de la región, tal es el caso de CBC, EAH, CBOF, CM y FN. En nuestra región tienen gran presencia las industrias azucarera (Taretan) y siderúrgica (Lázaro Cárdenas). La CBC es un residuo del proceso de producción del azúcar; se estima que en México se producen 57 millones de toneladas de caña de azúcar al año, de las cuales 20 millones corresponden al bagazo aproximadamente (Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, 2014). La industria siderúrgica tuvo una producción de 18,110,111 toneladas de acero en 2011, de las cuales el 70% corresponde a la producción mediante horno eléctrico y el 30% restante al de convertidor de oxígeno; mientras que la producción de coque y arrabio fue de 2,121,866 y 4,609,087 toneladas respectivamente (INEGI, 2014). En dicha producción se generan algunos residuos que representan entre un 15 y 20% de la producción total de acero (Catells, 2012). Algunos de estos residuos son EAH (250-300kg/tonelada de producción), residuo de la producción de arrabio en alto horno; CBOF (150-250 kg/tonelada de producción), ceniza residual del proceso de convertidor de oxígeno y CM, residuo sólido del proceso de coquización (CMIC, 2006).

Otros de los materiales utilizados en esta investigación son MK, PN y PE, que ya han sido ampliamente investigados y han mostrado resultados favorecedores. Éstos se encuentran disponibles en el mercado y tienen una alta producción.



## **2.- MARCO TEÓRICO**

### **2.1.- Cementos**

El Cemento Pórtland es un sílico aluminato de calcio, que se obtiene mediante la cocción de material calcáreo y arcilloso a una temperatura de clinkerización, que es de 1400°C aproximadamente (Neville & Brooks, 2010). Los cementos hidráulicos al entrar en contacto con el agua generan una reacción química llamada hidratación, la cual ocasiona el fraguado de éstos. Durante la hidratación del cemento, se forma una pasta que al ser adicionada a los agregados actúa como aglutinante y une los agregados, ya sea para formar morteros y/o concretos que son ampliamente utilizados en la industria de la construcción (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

#### **2.1.1. - Historia del cemento**

El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Galilea, Israel. Se trata de un concreto de cal preparado con caliza calcinada para producir cal rápida, la cual al mezclarse con agua y piedra se endureció y formó el concreto (Brown, 1996).

Alrededor del 2500 AC, se empleó un material cementante para unir los bloques que conforman la gran pirámide de Giza, en el Egipto antiguo. De acuerdo con algunos informes se dice que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la quema del sulfato de calcio. En 500 AC, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.



Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 AC. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante.



**Figura 1.- Gran pirámide de Giza, Egipto.**

Fue en el siglo II AC que los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. Este descubrimiento tuvo un efecto importante en la industria de la construcción. El material no era arena, sino una ceniza volcánica fina, que contenía sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico. Este material fue utilizado en famosas construcciones, tales como: el teatro en Pompeya, el Coliseo y el Panteón en Roma.



A mediados del siglo XVIII, John Smeaton descubrió porque algunas cales poseían propiedades hidráulicas, es decir, podían reaccionar con el agua para formar hidratos durables que resistieran la acción del agua. Encontró que las calizas impuras y blandas que contenían material arcilloso, producían los mejores cementos hidráulicos.



**Figura 2. Faro Eddystone, Inglaterra.**

A mediados del siglo XVIII, John Smeaton descubrió porque algunas cales poseían propiedades hidráulicas, es decir, podían reaccionar con el agua para formar hidratos durables que resistieran la acción del agua. Encontró que las calizas impuras y blandas que contenían material arcilloso, producían los mejores cementos hidráulicos. Smeaton empleó este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del Faro Eddystone en el Canal de la Mancha, sudoeste de Plymouth, Inglaterra. La operación del canal

comenzó en 1759. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente.



La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma de “terrón”, mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación. El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento Portland.

El cemento natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX y se empleó en la construcción del canal Erie en 1818 (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El término "cemento Portland" se aplicó por primera vez en 1824 por Joseph Aspdin en su patente británica No. 5022, que describe un procedimiento para la fabricación de piedra artificial mediante la mezcla de cal con la arcilla y calcinación en un horno de cuba. El material calcinado (clínker) era molido para producir cemento. Se utilizó el término “Portland” debido a la similitud del producto endurecido al de la piedra de Portland, en el condado de Dorset y también porque esta piedra tenía un excelente reputación por su rendimiento. Si bien Joseph Aspdin no fue el primero en producir un cemento de silicato de calcio, su patente le dio prioridad para el uso del término. Otros trabajadores fueron activos al mismo tiempo o antes, siendo el más notable Louis Vicat en Francia.

Los cementos producidos en la primera mitad del siglo XIX no tenían la misma composición que los cementos Portland modernos debido a que la temperatura alcanzada no era suficientemente alta para formar el componente principal de los cementos modernos, el silicato tricálcico ( $C_3S$ ). El único silicato presente era el silicato dicálcico, que era el menos reactivo (Newman & Choo, 2003).

En 1845, I.C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento Portland como ahora lo conocemos. Este cemento se volvió la elección



popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en Bélgica, Francia y Alemania aproximadamente en el mismo periodo y la exportación de estos productos de Europa para los Estados Unidos comenzó en 1865. El primer embarque de cemento Pórtland para los EE.UU. fue en 1868. El primer cemento Pórtland producido en EE.UU. se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania, en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principio del siglo XX: 1888 en Brasil, 1897 en Guatemala, 1898 en Cuba, 1903 en México, 1907 en Venezuela, 1908 en Chile, 1909 en Colombia, 1912 en Uruguay, 1916 en Perú, 1919 en Argentina, 1923 en Ecuador, 1926 en Paraguay, 1928 en Bolivia y más recientemente en 1936 en Puerto Rico, 1941 en Nicaragua y 1949 en El Salvador (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

A principios del siglo XX se empezó a consumir cemento en México, el cual era importado de Inglaterra, y para 1906 se constituyó la primera Compañía de cementos Pórtland en Tolteca, Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. Durante la Revolución Mexicana y la crisis mundial de 1929, el desarrollo de la industria cementera mexicana se vio mermado; sin embargo, su mayor impulso inició a partir de 1940 con el crecimiento del mercado interno y el proceso de urbanización cuando la industria logró expandirse en todo el territorio. Durante la década de los 80's, la industria cementera mexicana se vio afectada por el periodo de crisis y estancamiento que tuvo la economía mexicana (Kumarán & González, 2008).

Las principales innovaciones técnicas en la fabricación del cemento han tenido lugar en los últimos 150 años como se muestra en la Tabla 1.

Fue la introducción del horno rotatorio al final del siglo XIX que permitió la fabricación de un producto homogéneo, el cual había experimentado una temperatura lo suficientemente alta para asegurar la formación de  $C_3S$ .



Durante el siglo XX, la naturaleza del producto había cambiado relativamente poco en términos de su composición química y mineral, pero había habido considerables avances en la tecnología de producción que resulta en una mayor eficiencia energética, la mejora del control de calidad, menor impacto ambiental y la intensidad del trabajo inferior.

**Tabla 1. –Hitos en la producción del cemento Pórtland(Newman & Choo, 2003).**

Año	Hito
2000	Multietapas de control de emisión-combustión
	Nueva tecnología del molino horizontal
	Rodillos de alta presión para premolienda del cemento.
	Control automático del horno usando sistemas expertos.
1980	Separador de alta eficiencia introducido para molienda del cemento.
	Proceso precalcinador desarrollado.
1960	Análisis químico rápido de Fluorescencia de rayos X (FRX).
	Proceso precalentador de suspensión es introducido.
1940	Proceso Lepol (nódulo) introducido.
	Introducción de silos de mezcla de neumáticos para la harina cruda.
1920	Primer precipitador electrostático instalado en fábricas de cemento.
1900	Sacos de papel para cementos son introducidos.
1880	Las Normas Británica (BS 12) y ASTM (C9) son publicadas.
	Los hornos rotatorios son introducidos.
	Molinos de tubo de molienda de cemento.
1860	Método de carbonato de cal desarrollado.
	J.Grant introdujo la prueba de resistencia a la tracción de los cementos.
1840	PW. Aspdin tiene una Planta de fabricación de cemento en Northfleet
1820	Patente del cemento Pórtlandconcedida a J. Aspdin

Cabe señalar que la introducción de la tecnología de horno rotatorio a principios del siglo XX coincidió con la publicación de las normas de cemento en el Reino Unido y los EE.UU. En Ambas normas se requieren determinar el esfuerzo de una briqueta de pasta de cemento para alcanzar los valores mínimos a los 7 y 28 días.



El control de la composición de clínker ha avanzado desde las proporciones en volumen a prueba y error a finales del siglo XIX hasta llegar a un control preciso utilizando técnicas de fluorescencia de rayos X.

Las continuas mejoras en los métodos de fabricación y el control de calidad combinado con las presiones competitivas del mercado han dado lugar a un aumento de 4 veces el esfuerzo a 28 días dado para un cemento Pórtlandtípico europeo de finales del siglo XIX. En Europa, este incremento ha sido controlado mediante la introducción de normas de cemento más altas que los límites más bajos de resistencia (Newman & Choo, 2003).

### **2.1.2. - Fabricación del Cemento Pórtland**

De acuerdo con la definición anteriormente dada al cemento Portland, se sabe que éste está hecho principalmente de una combinación de material calcáreo, como la caliza o tiza, y de sílice y alúmina encontradas como arcilla o esquisto. Como comúnmente el 80% de la mezcla cruda es caliza, a este material se le conoce como el material crudo primario. El material crudo secundario es normalmente el esquisto o arcilla (Newman & Choo, 2003). El proceso de fabricación consiste esencialmente en moler los materiales crudos hasta conseguir un polvo muy fino, mezclarlos en proporciones predeterminadas y calcinarlos en un molino rotatorio largo a una temperatura de 1400°C aproximadamente cuando el material es sintetizado y parcialmente fundido en Clínker. El clínker es enfriado y molido en un polvo fino, con un poco de yeso añadido, dando como resultado el cemento Pórtlandcomercial usado alrededor del mundo (Neville & Brooks, 2010).

En la figura 3 se muestran cada una de las etapas en la producción tradicional del cemento.

El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares. La Figura 4 ilustra desarrollos tecnológicos importantes, los cuales pueden mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco.

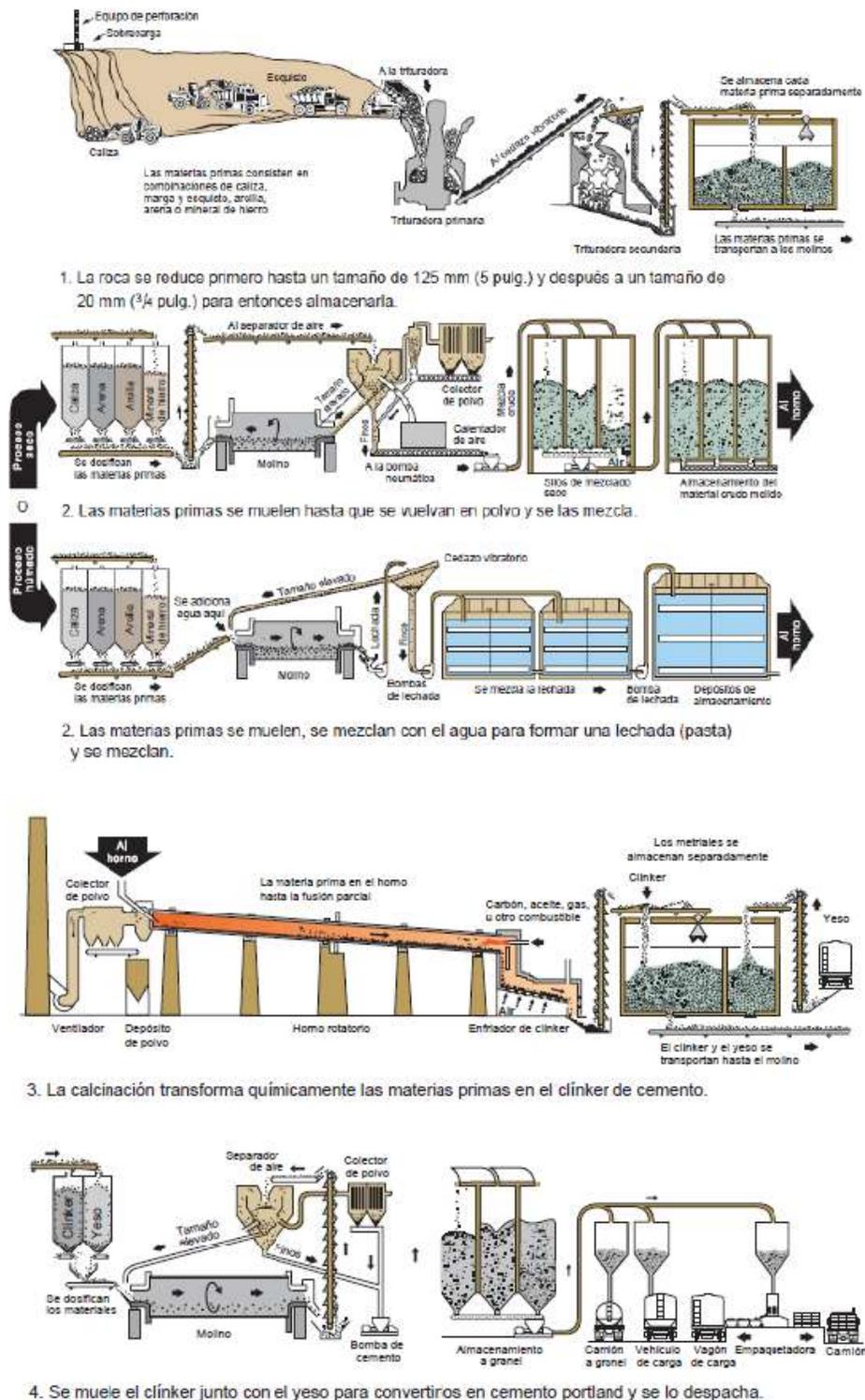
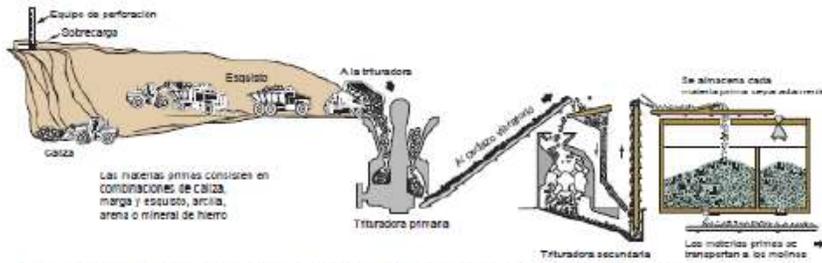
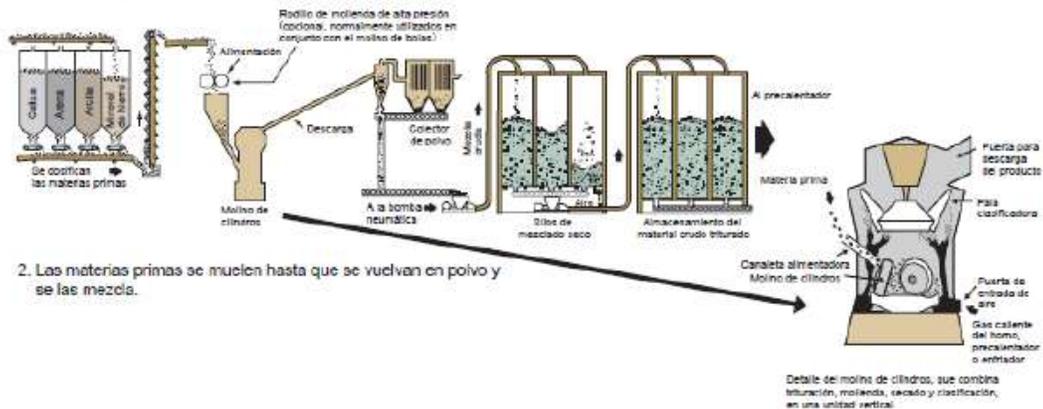


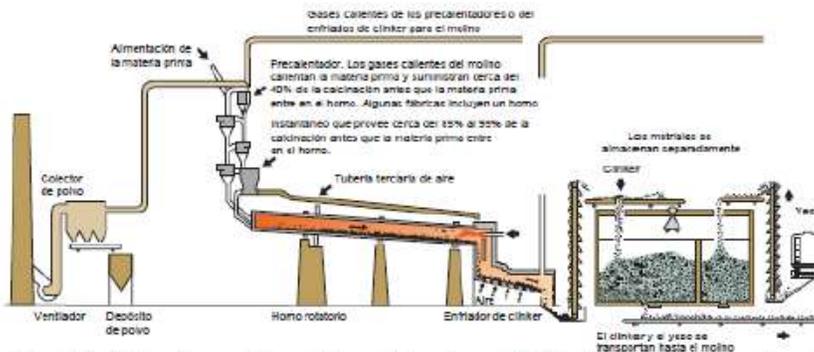
Figura 3.- Etapas en la producción tradicional del cemento Portland (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



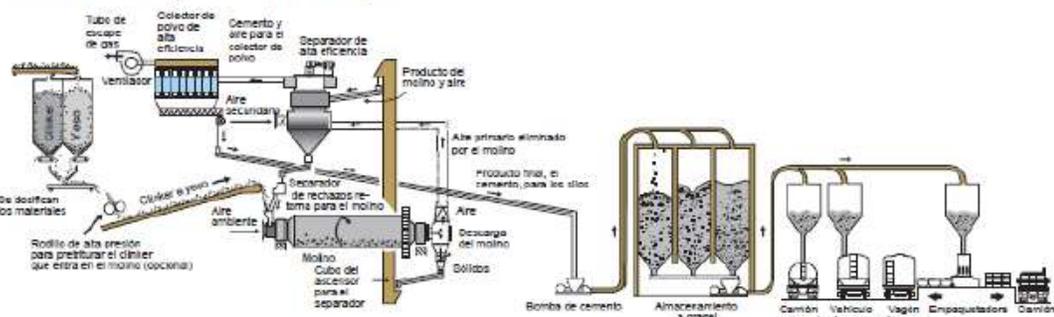
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.



2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.



4. Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.



**Figura 4.- Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través de la proceso seco (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)**

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de 3 a 25mm.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de retracción y el desarrollo de resistencia. El material molido, que es cemento, tiene un tamaño de partícula de 45µm aproximadamente (Kostmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### **2.1.3. - Química del cemento**

Los materiales crudos usados en la fabricación de cemento Pórtland están compuestos principalmente de cal, alúmina y óxido de hierro. Estos componentes interactúan entre ellos en el horno para formar una serie de productos más complejos, y, a parte de un pequeño residuo de cal sin combinar que no ha tenido el tiempo suficiente para reaccionar, un estado de equilibrio químico es alcanzado. Sin embargo, el equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento, y la velocidad de enfriamiento afectará el grado de cristalización y la cantidad de material amorfo en el clínker enfriado. Las propiedades de este material amorfo, conocido como vidrio, difieren considerablemente de los componentes cristalinos de una composición química nominalmente similar. Otra complicación surge de la interacción de la parte líquida del clínker con los componentes cristalinos ya presentes.



No obstante, el cemento puede ser considerado como estando en equilibrio congelado, es decir, los productos congelados son supuestos para reproducir el equilibrio existente a la temperatura de clinkerización. Esta suposición es, en efecto, hecha en el cálculo de la composición de los componentes de cementos comerciales: la composición potencial es calculada de las cantidades medidas de óxidos presentes en el clinker como si la cristalización completa de productos de equilibrio hubiera tenido lugar.

Los cuatro componentes considerados como los mejores constituyentes del cemento se enlistan en la Tabla 2, así como sus abreviaturas.

**Tabla 2. – Componentes principales del cemento Pórtland(Neville & Brooks, 2010).**

Componente	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Aluminoferrito tetracálcico	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Los silicatos, C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S, son los componentes más importantes, los cuales son los responsables de la resistencia de pasta de cemento hidratada. En realidad, los silicatos en el cemento nos son componentes puros, pero contienen óxidos de menor importancia en la solución sólida. Estos óxidos tienen efectos significativos en el arreglo atómico, la forma cristalina, y las propiedades hidráulicas de los silicatos.

La presencia de C<sub>3</sub>A en el cemento es indeseable: contribuye poco o nada a la resistencia del cemento, excepto a edades tempranas, y cuando ha endurecido la pasta del cemento es atacada por sulfatos, la formación de Sulfoaluminato de calcio (etringita) puede causar ruptura. Sin embargo, el C<sub>3</sub>A es benéfico en la fabricación de cemento ya que facilita la combinación de cal y sílice.



El  $C_4AF$  está presente en el cemento en pequeñas cantidades, y, coMParado con los otros 3 componentes, no afecta significativamente el comportamiento; sin embargo, reacciona con el yeso para formar sulfoferrita de calcio y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos.

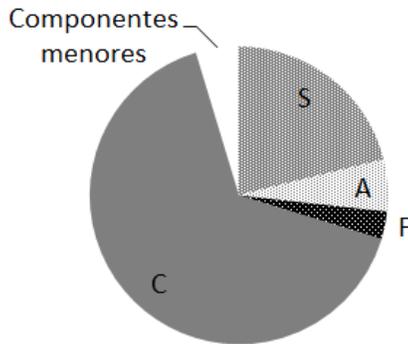
La cantidad de yeso agregado al Clínker es crucial, y depende del contenido de  $C_3A$  y el contenido de álcali del cemento. El incremento de la finura del cemento implica un incremento de la cantidad de  $C_3A$  disponible a edades tempranas, y plantea el requerimiento de yeso. Un exceso de yeso ocasiona la expansión y consecuente ruptura del cemento fraguado. El contenido óptimo de yeso es determinado con base en la generación del calor de hidratación de modo que una tasa deseable de reacción temprana se produce, lo que asegura que hay poco  $C_3A$  disponible para la reacción después de que toda la cantidad de yeso ha combinado (Neville & Brooks, 2010).

Se estima que aproximadamente el 95% de clínker se compone de los óxidos de  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  (pero presente en forma combinada como los minerales de clínker) y el resto se compone de los llamados constituyentes menores. En la figura 5 se muestra la composición química típica del clínker del cemento Portland.



Componentes principales	Abreviatura de los químicos del cemento	%
SiO <sub>2</sub>	S	21.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	5.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	3.0
CaO	C	65.5
		<hr/> 95.2

Componentes menores	%
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15
TiO <sub>2</sub>	0.3
MgO	1.5
SO <sub>3</sub> (S)	1.2
Pérdida por ignición	0.5
K <sub>2</sub> O	0.72
Na <sub>2</sub> O	0.18
Flúor	0.04
Cloro	0.02
Elementos traza	0.01
	<hr/> 4.67



**Figura 5.- Composición química típica del clínker de cemento Pórtland(Newman & Choo, 2003).**

La influencia de los componentes menores en la producción de cemento y las propiedades del cemento ha sido revisada. En la tabla 3 se indican los niveles típicos en Reino Unido de los constituyentes menores más comunes y resume su impacto en el proceso de fabricación de cemento. Los ingresos de óxidos de metales alcalinos (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), SO<sub>3</sub> y cloruro tienen que estar estrechamente controlados debido a que se volatilizan en el horno y pueden causar problemas operativos graves asociados a su condensación y la formación de acumulaciones en el horno “back-end” y el precalentador.



**Tabla 3 .- Influencia de la mayoría de constituyentes menores en el proceso de fabricación (Newman & Choo, 2003).**

Componente menor	Rangos típicos de los niveles en clínkers en UK	Influencia en el proceso
Na <sub>2</sub> O	0.07-0.22	Sulfatos alcalinos se volatizan en el horno y condensados en regiones de baja temperatura que dan como resultado acumulaciones y obstrucciones.
K <sub>2</sub> O	0.52-1.0	
SO <sub>3</sub>	0.5-1.5	
Flúor	0.01-0.20	Ayuda enormemente en la combinación mediante la mineralización.
Cloro	0.005-0.05	Cloruros alcalinos son altamente volátiles y provocan acumulaciones y obstrucciones.
MgO	0.8-2.5	Ligera acción fundente.
Metales traza	5-100ppm	Ligero-pero algunos (talio) tienen que ser minimizados para limitar las emisiones al ambiente.

Los metales alcalinos Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O tienen una fuerte afinidad por SO<sub>3</sub> y una fase líquida que contiene Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iones es formada, la cual es inmisible con el principal líquido de clínker (C<sub>3</sub>A fundido y C<sub>4</sub>AF). Al enfriar esta se cristaliza para producir sulfatos alcalinos como K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, apthitalite (3K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y langbeinita calcio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·2CaSO<sub>4</sub>). Los productos de cristalización dependen de los niveles relativos de los dos óxidos alcalinos y el nivel de SO<sub>3</sub>. Si hay SO<sub>3</sub> insuficiente para combinarse con los óxidos de metales alcalinos entonces éstos pueden entrar en solución sólida en el aluminato y fases de silicato. C<sub>2</sub>S puede ser estabilizado a temperaturas superiores a 1250°C impidiendo así la formación de C<sub>3</sub>S. Una deficiencia de SO<sub>3</sub> en el clínker se asocia



con una mayor actividad de  $C_3A$  y dificultades en el logro satisfactorio de la reología del concreto a una edad temprana. El flúor se encuentra naturalmente en algunos depósitos de piedra caliza, por ejemplo, en los Apeninos en Inglaterra, y tiene un efecto beneficioso sobre la combinación de clínker. Actúa como un flujo y mineralizador, aumentando la cantidad de líquido formado a una temperatura dada y estabiliza  $C_3S$  debajo  $1250^{\circ}C$ . El nivel en el clínker, sin embargo, debe ser controlado debajo de  $\sim 0,25\%$  a fin de evitar una reducción marcada en la reactividad de los principios de cemento. Los constituyentes menores tienen también que ser controlados por su impacto en las propiedades del cemento y también en la durabilidad del concreto. Relacionado con esto, los niveles de álcalis,  $SO_3$ , cloruro y  $MgO$  también están limitados por normas o códigos de prácticas de cemento nacionales (Newman & Choo, 2003).

#### **2.1.4. - Hidratación del Cemento**

Hasta ahora, hemos hablado del cemento en forma de polvo, pero el material de interés en la práctica es la pasta de cemento fraguado. Lo que ocurre es que, en presencia de agua los silicatos y aluminatos de cemento Pórtland forman productos de hidratación o hidratos, que a su vez producen una masa dura y firme - la pasta de cemento endurecida. Como se mencionó anteriormente, los 2 silicatos de calcio ( $C_3S$  y  $C_2S$ ) son los principales componentes cementicios en el cemento, siendo la hidratación más rápida en el primero que en el segundo. En los cementos comerciales, los silicatos de calcio contienen pequeñas impurezas de algunos de los óxidos presentes en el clínker. Estas impurezas tienen un efecto importante en las propiedades de los silicatos hidratados. El  $C_3S$  impuro es conocido como alita y el  $C_2S$  impuro como belita.

El producto de hidratación de  $C_3S$  es el hidrato micro cristalino  $C_3S_2H_3$  con un poco de cal separada como  $Ca(OH)_2$  cristalino; el  $C_2S$  se comporta similarmente, pero claramente contiene menos cal. Hoy en día, los hidratos de silicato de calcio son descritos como C-S-H, anteriormente referido como gel



tobermorita, el cual es el principal pegamento entre las partículas de los agregados que forman el concreto (Neville & Brooks, 2010).

Una característica importante de la hidratación de  $C_3S$  es que después del estallido inicial de reacción con el agua pasa a través de un estado latente, o de inducción, período en el que la reacción parece estar suspendida. Esto es de importancia práctica porque permite que el concreto sea colocado y compactado antes de que el fraguado y endurecimiento comience.

Varias teorías han sido desarrolladas para explicar este período de reposo. La más aceptada establece que la reacción inicial forma una capa protectora de C-S-H en la superficie de la  $C_3S$  y el período de reposo termina cuando ésta se destruye o se hace más permeable por el envejecimiento o un cambio en la estructura. La reacción también puede ser inhibida por el tiempo necesario para la nucleación del principal producto de C-S-H una vez que el agua recupere el acceso a los cristales  $C_3S$ .

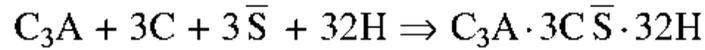
Las reacciones preparadas en laboratorio de  $C_3A$  y  $C_4AF$  con agua, solas o en presencia de sulfato de calcio e hidróxido de calcio han sido ampliamente estudiadas. Sin embargo, los resultados deberán interpretarse con cautela ya que la composición de las fases de aluminato en el Clínker industrial difiere considerablemente de las preparaciones sintéticas y la hidratación en los cementos es fuertemente influenciada por la mayor cantidad de silicatos reaccionando y por la presencia de álcalis.

En ausencia de sulfato de calcio soluble, el  $C_3A$  reacciona rápidamente para formar las fases  $C_2AH_8$  y  $C_4AH_{19}$ , las cuales posteriormente se convierten en  $C_2AH_6$ . Esta es una reacción rápida y altamente exotérmica.

Si el yeso finamente molido es mezclado con el  $C_3A$  antes de mezclarlo con agua luego las reacciones iniciales serán controladas por la formación de una



capa protectora de etringita en la superficie de los cristales de C<sub>3</sub>A. La reacción se resume de la siguiente manera:

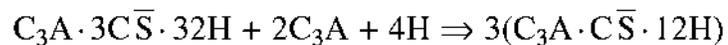


donde S representa SO<sub>3</sub> y H representa H<sub>2</sub>O,

C<sub>3</sub>A + calcio disuelto (Ca<sup>2+</sup>) + sulfato disuelto (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) + agua = etringita

Cuanto más rápida sea la disolución de las formas deshidratadas de yeso se asegura un suministro adecuado de iones de calcio y sulfato disueltos y será más eficaz en el control de la reacción finamente dividido o de formas altamente reactivas de C<sub>3</sub>A.

En la mayoría de cementos Pórtlandcomerciales habrá sulfato disponible insuficiente para la formación de la etringita. Cuando el sulfato disponible ha sido consumado, la etringita reacciona con el C<sub>3</sub>A para formar una fase con menor contenido de SO<sub>3</sub> conocida como monosulfato. La reacción puede resumirse como:



Muchos estudios han demostrado que la hidratación de C<sub>4</sub>AF (o más correctamente la solución sólida C<sub>2</sub>A-C<sub>2</sub>F) es análoga a la de C<sub>3</sub>A pero ocurre más lentamente (Taylor H. , 1997). El hierro entra en solución sólida en las estructuras cristalinas de etringita y la sustitución de monosulfato por aluminio. Con el fin de reflejar la composición variable de etringita y monosulfato formado por mezclas de C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF se denominan, respectivamente, como AFt (aluminio-ferrita trisulfato hidratado) y AFm (aluminio-ferrita monosulfato hidratado) fases.

La hidratación del cemento Pórtlandes bastante más compleja que la de los minerales constituyentes descritos anteriormente. En la figura 6 se muestra el desarrollo de la estructura hidratada en la pasta de cemento.



Cuando el cemento se mezcla primero con agua algunos de los sulfato de calcio añadido (en particular si están presentes en formas deshidratadas, y la mayoría de los álcalis presentes), disolverá rápidamente. Si la langbeinita de calcio está presente, a continuación se proporcionan calcio y iones sulfato en solución, que están disponibles para la formación de etringita. El suministro de sulfato de calcio soluble controla la hidratación  $C_3A$ , evitando así un fraguado relámpago. El clínker molido mezclado con agua sin sulfato de calcio añadido fragua rápidamente con la evolución del calor dando como resultado una hidratación descontrolada Del  $C_3A$ .

El cemento entonces entra en un período de reposo cuando la tasa de pérdida de trabajabilidad es relativamente lenta. Será más rápida, sin embargo, a temperaturas ambiente elevadas (por encima de 25 °C). El tiempo de fraguado es una función de la mineralogía del clínker (particularmente nivel de cal libre), así como su química y finura. Cuanto más fino es el cemento y más alto el nivel de cal libre, es más corto el tiempo de fraguado en general. El fraguado se debe en gran parte a la hidratación del  $C_3S$  y representa el desarrollo de la estructura hidratada, lo cual eventualmente resulta en resistencia a la compresión.

El gel C-S-H que se forma alrededor de los granos más grandes de  $C_3S$  y  $C_2S$  se forma in situ y es bastante denso y sin rasgos distintivos cuando se observa mediante un microscopio electrónico. Este material se forma inicialmente bordes de reacción en el material deshidratado, pero a medida que avanza la hidratación el material anhidro es paulatinamente reemplazado y sólo las partículas más grandes conservarán un núcleo sin reaccionar después de 7 años de hidratación. Este hidrato denso es conocido como "producto interno".

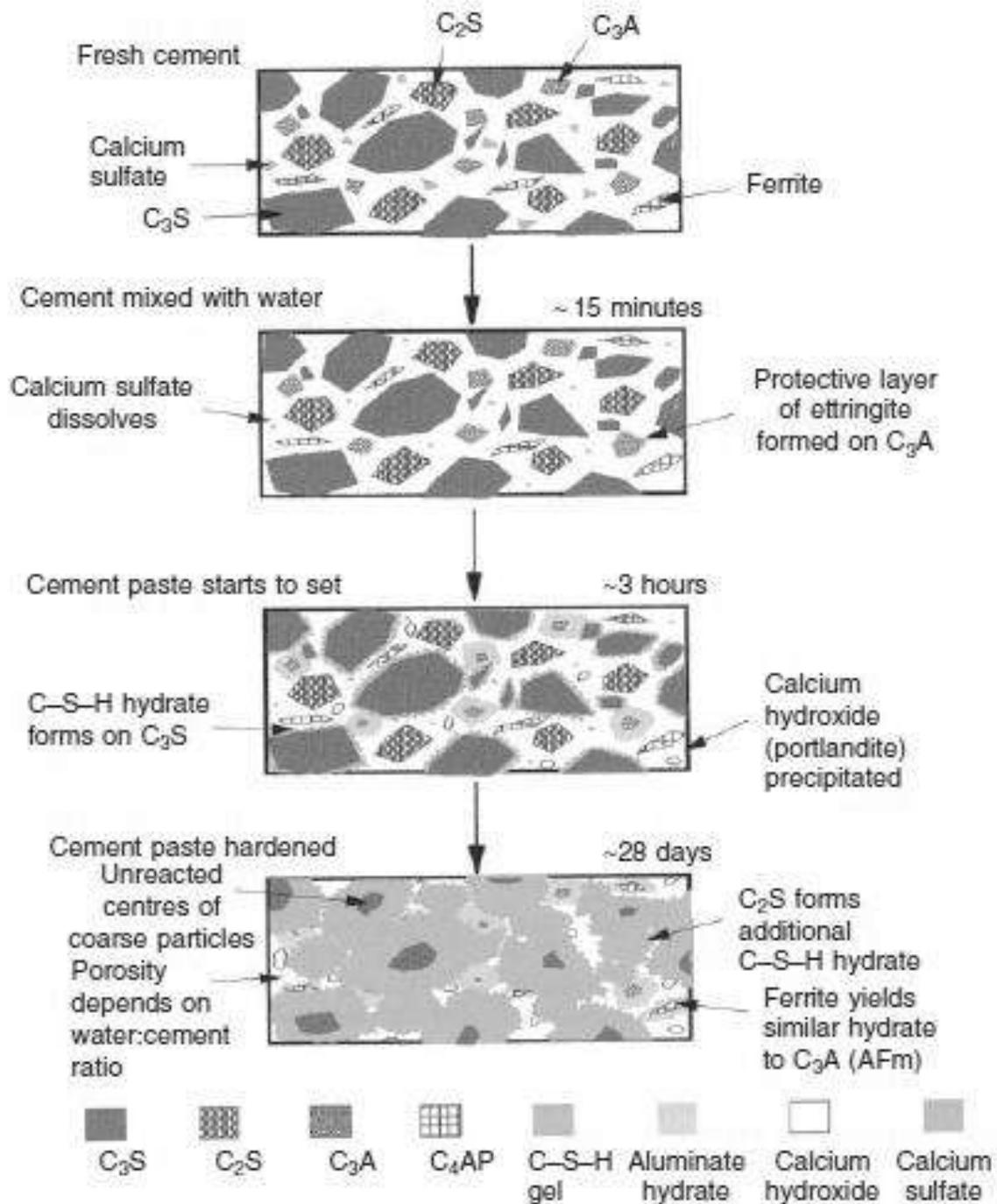


Figura 6.- Ilustración simplificada de la hidratación de la pasta del cemento (Newman & Choo, 2003).



El gel C-S-H que se forma alrededor de los granos más grandes de  $C_3S$  y  $C_2S$  se forma in situ y es bastante denso y sin rasgos distintivos cuando se observa mediante un microscopio electrónico. Este material se forma inicialmente bordes de reacción en el material deshidratado, pero a medida que avanza la hidratación el material anhidro es paulatinamente reemplazado y sólo las partículas más grandes conservarán un núcleo sin reaccionar después de 7 años de hidratación. Este hidrato denso es conocido como “producto interno”.

El producto de hidratación externo se forma en lo que originalmente era un espacio lleno de agua y también en el espacio ocupado por los granos más pequeños de cemento y por el material intersticial ( $C_3A$  y  $C_4AF$ ). Cuando se usa el microscopio electrónico, puede ser visto por contener cristales de  $Ca(OH)_2$ , AFm/AFt y también C-S-H con una morfología laminar. La estructura del producto externo es grandemente influenciada por la relación Agua/Cemento (A/C) inicial, la cual determina la porosidad de la pasta y consecuente desarrollo de resistencia.

La hidratación del cemento Pórtland involucra reacciones exotérmicas, ya que hay liberación de calor. El progreso de las reacciones puede ser monitoreado usando técnicas de calorimetría isoterma de conducción. En la figura 7 se muestra el calor de hidratación de una pasta de cemento, determinada mediante la técnica anteriormente mencionada.

El hombro en el pico principal de hidratación que se ve a menudo en ~ 16 horas se asocia con la renovada formación de etringita que se cree que se produce como resultado de la inestabilidad de la capa protectora etringita. En algunos cementos con una baja relación de  $SO_3$  a  $C_3A$  puede ser asociado con la formación de Mono sulfato. La liberación de calor es favorable en clima frío y en las operaciones de prefabricados donde el aumento de la temperatura acelera el desarrollo de la fuerza y acelera el proceso de producción. Sin embargo, en el colado de concreto masivo el aumento de temperatura, y en particular la diferencia



de temperatura entre el núcleo de hormigón y la superficie puede generar tensiones que dan lugar al craqueo térmico.

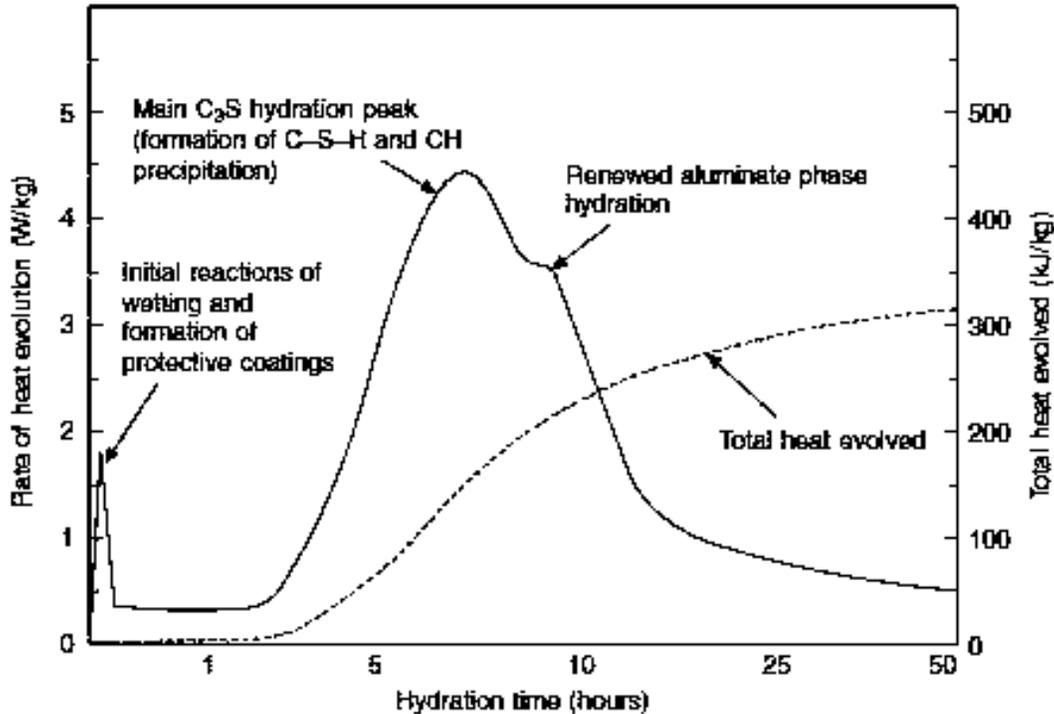


Figura 7.- Calor de hidratación de una pasta de cemento determinado mediante calorimetría de conducción a 20°C (Newman & Choo, 2003).

El hombro en el pico principal de hidratación que se ve a menudo en ~ 16 horas se asocia con la renovada formación de etringita que se cree que se produce como resultado de la inestabilidad de la capa protectora etringita. En algunos cementos con una baja relación de  $SO_3$  a  $C_3A$  puede ser asociado con la formación de Mono sulfato. La liberación de calor es favorable en clima frío y en las operaciones de prefabricados donde el aumento de la temperatura acelera el desarrollo de la fuerza y acelera el proceso de producción. Sin embargo, en el colado de concreto masivo el aumento de temperatura, y en particular la diferencia de temperatura entre el núcleo de hormigón y la superficie puede generar tensiones que dan lugar al craqueo térmico.



El aumento de temperatura experimentado depende de una serie de factores, que incluyen:

- Temperatura de colocación
- Contenido de cemento
- Dimensiones mínimas de colado
- Tipo de encofrado
- Tipo de cemento (finura, contenidos  $C_3S$  y  $C_3A$ )

El calor de hidratación del cemento (durante las primeras ~ 48 horas) es más alto para los cementos finamente molidos con un alto contenido de  $C_3S$  (> 60%) y de  $C_3A$  (> 10%). A los 28 días para un cemento Pórtlandtípico curado a 20 °C se espera que esté ~ 90% hidratado. El grado de hidratación está fuertemente influenciado por la finura de cemento y, en particular las proporciones de partículas gruesas en el cemento. Los granos de cemento que son más gruesas que ~ 30 micras probablemente nunca hidratarán completamente (Newman & Choo, 2003).

### **2.1.5. - Tipos de Cementos Portland**

Hasta ahora, hemos considerado el cemento Pórtland como un material genérico. Sin embargo, cuando está hidratado, los cementos difieren en su composición química exhibiendo diferentes propiedades. Por tanto, debería ser posible seleccionar mezclas de materias primas para la producción de cementos con diversas propiedades deseadas. De hecho, muchos tipos de cemento están disponibles comercialmente, y cementos de adiciones especiales pueden ser producidos para usos especiales (Neville & Brooks, 2010).

Todos los países desarrollados tienen sus propias normas nacionales para cementos. Estos estándares definen la composición de cemento permitido y los requisitos de desempeño establecidos para propiedades tales como el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia a la compresión.



En el pasado, las normas nacionales de cemento en muchos países han sido fuertemente influenciadas por las desarrolladas en el Reino Unido y publicadas por la British Standards Institution (BSI) y por las desarrolladas en los EE.UU. y publicadas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). En 1991 El BSI publicó las normas de cemento revisadas, las cuales están estrechamente alineadas con el proyecto de norma europea para los cementos comunes. Esta Norma europea (EN 197-1) fue adoptada en 2000 por los siguientes países europeos: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza y el Reino Unido (Newman & Choo, 2003). En la tabla 4 se enlistan los principales tipos de cemento clasificados mediante las normas BS, ASTM y la BS EN, mientras que en la tabla 5 se presentan los valores promedio de composición de los componentes.

Muchos de los cementos han sido desarrollados para asegurar buena durabilidad del concreto bajo una variedad de condiciones. Esto no ha sido posible, sin embargo, encontrar la composición del cemento es una respuesta completa al problema de durabilidad del concreto: las propiedades físicas y mecánicas del concreto endurecido, tales como resistencia, contracción, permeabilidad, resistencia al intemperismo, y fluencia, también son afectados por otros factores de la composición del cemento, aunque esto determina un alto grado de aumento de resistencia.

La división de los cementos en diferentes tipos no es más que una clasificación amplia y a veces pueden existir grandes diferencias entre cementos del mismo tipo nominalmente.

Los métodos de fabricación han mejorado constantemente a lo largo de los años, y se ha producido un continuo desarrollo de cementos para servir a diferentes propósitos con un cambio correspondiente en las especificaciones (Neville & Brooks, 2010).



Los cementos Pórtlandse producen de acuerdo con las especificaciones ASTM C 150, AASHTO M85 o ASTM C 1157.

**Tabla 4. Principales tipos de cemento (Neville & Brooks, 2010).**

Clasificación tradicional		Clasificación Europea [BS 8500-1: 2006]	
Británica	Americana		
PórtlandOrdinario [BS 12]	Tipo I [ASTM C 150]	Tipo (CEM) I	Portland
PórtlandRápido endurecimiento [BS 12]	Tipo III [ASTM C 150]	Tipo IIA	Pórtlandcon 6 a 20% de ceniza volante, escoria de alto horno granulada molida, caliza o 6 a 10% de humo de sílice
Pórtlandbajo calor de hidratación [BS 1370]	TipoIV [ASTM C 150]		
Cemento modificado	Tipo II [ASTM C 150]	Tipo IIB-S	Pórtlandcon 21 a 35% de escoria de alto horno granulada molida
Pórtlandresistente a los sulfatos (SRPC) [BS 4027]	Tipo V [ASTM C 150]		
PórtlandAlto horno (Cemento de escoria) [BS 146]	Tipo IS Tipo S Tipo I (SM) [ASTM C 595]	Tipo IIB-V	Pórtlandcon 21 a 35% de ceniza volante
Alta escoria de Alto horno [BS 4246]		Tipo IIB+SR	Pórtlandcon 25 a 35% de ceniza volante con resistencia a los sulfatos mejorada
PórtlandBlanco [BS 12]		Tipo IIIA	Pórtlandcon 36 a 65% de escoria de alto horno granulada molida
Pórtlandpuzolánico [BS 6588; BS 3892]	Tipo IP Tipo P Tipo I (PM) [ASTM C 595]	Tipo IIIA+SR	Pórtlandcon 36 a 65% de escoria de alto horno granulada molida con resistencia a los sulfatos mejorada
		Tipo IIIB	Pórtlandcon 66a 80% de escoria de alto horno granulada molida
		Tipo IIIB+SR	Pórtlandcon 66 a 80% de escoria de alto horno granulada molida con resistencia a los sulfatos mejorada
		Tipo IIIC	Pórtlandcon 81 a 95% de escoria de alto horno granulada molida
		Tipo IVB-V	Pórtlandcon 36 a 55% de ceniza volante



**Tabla 5. Valores promedio de composición de los diferentes tipos de cemento Pórtland(Neville & Brooks, 2010).**

Tipo de cemento	Composición en porcentaje							
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	CaO libre	MgO	Pérdida por ignición
I	59.0	15.0	12.0	8.0	2.9	0.8	2.4	1.2
II	46.0	29.0	6.0	12.0	2.8	0.6	3.0	1.0
III	60.0	12.0	12.0	8.0	3.9	1.3	2.6	1.9
IV	30.0	46.0	5.0	13.0	2.9	0.3	2.7	1.0
V	43.0	36.0	4.0	12.0	2.7	0.4	1.6	1.0

La ASTM C 150 (ASTM C 150-04, 2004), Especificaciones de Norma para el Cemento Pórtland(Standard Specification for PórtlandCement), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, tal y como se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 6.- Tipos de cemento de acuerdo con la norma ASTM C 150.**

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 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

En México, la clasificación de los cementos es publicada en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010 Cementantes hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba. En la tabla 7 se muestra la clasificación de cementos de acuerdo con esta norma.



**Tabla 7.- Clasificación de los cementos de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010.**

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento PórtlandOrdinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento PórtlandPuzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
CPEG	Cemento Pórtlandcon Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento PórtlandCompuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento PórtlandCon Humo de Sílice	40R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

De acuerdo con la norma citada arriba, hay seis tipos básicos de cementos:

- CPO, que es el cemento Pórtlandordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza.
- CPP, que es el cemento Pórtlandpuzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total del cemento;
- CPEG, que es el cemento Pórtlandcon escoria de alto horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria.
- CPC, que es el cemento Pórtlandcompuesto, se compone de clínker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones se pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado, la cantidad de clínker y yeso debe ser del 50% al 94%.



- CPS, que es el cemento Pórtland con humo de sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice.
- CEG, que es el cemento con escoria de alto horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como RS – resistente a sulfatos; BRA – baja reactividad álcali-agregado; BCH – bajo calor de hidratación; B – blanco.

Los cementos aún se dividen en clases de resistencia: 20, 30, 40, las cuales designan resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>, 300 kg/cm<sup>2</sup> y 400 kg/cm<sup>2</sup>), respectivamente. Hay aún más dos clases de resistencia: 30R y 40R, que además de presentar resistencia a compresión mínima a los 28 días de 30 MPa y 40 MPa, respectivamente, también deben presentar resistencia a compresión a los 3 días de 20 MPa (200 kg/cm<sup>2</sup>) y 30 MPa (300 kg/cm<sup>2</sup>), respectivamente. La norma también especifica resistencias máximas a los 28 días, para las clases 20, 30 y 30R. El tiempo mínimo de fraguado inicial de todas las clases es 45 minutos.

Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial. Por ejemplo, un cemento Pórtland puzolánico de clase resistente 30R, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se designaría como CPP 30R BRA/BCH.

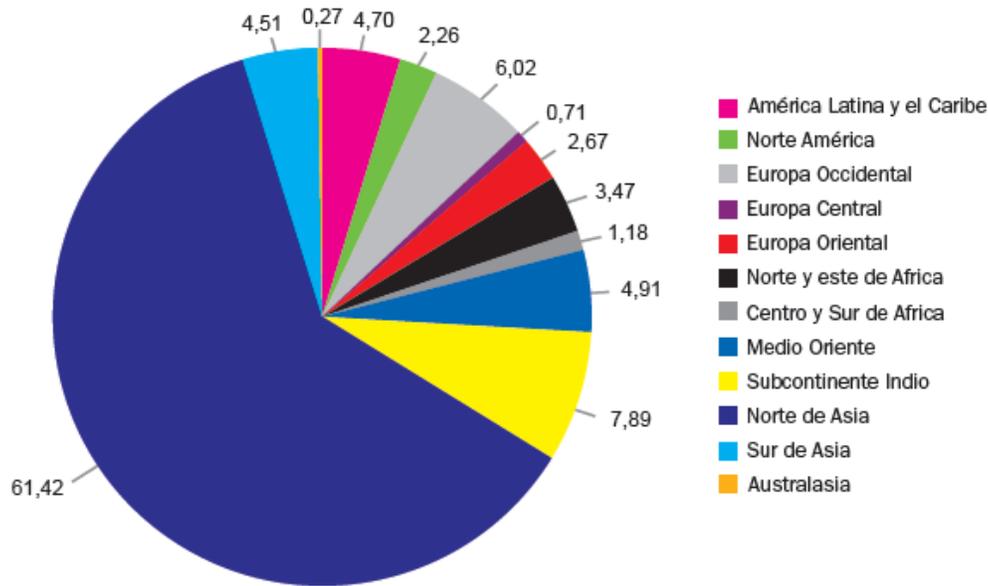
#### **2.1.6.- Producción y consumo de cemento en México**

En los últimos años la producción de cemento a nivel mundial ha tenido un incremento significativo. En el reporte de actividades de CEMBUREAU de 2012, se estima que la producción global de cemento en ese año alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3% en comparación al año anterior. China representa el 59,3% del total de la producción global de cemento, por tanto se mantiene como el principal productor.

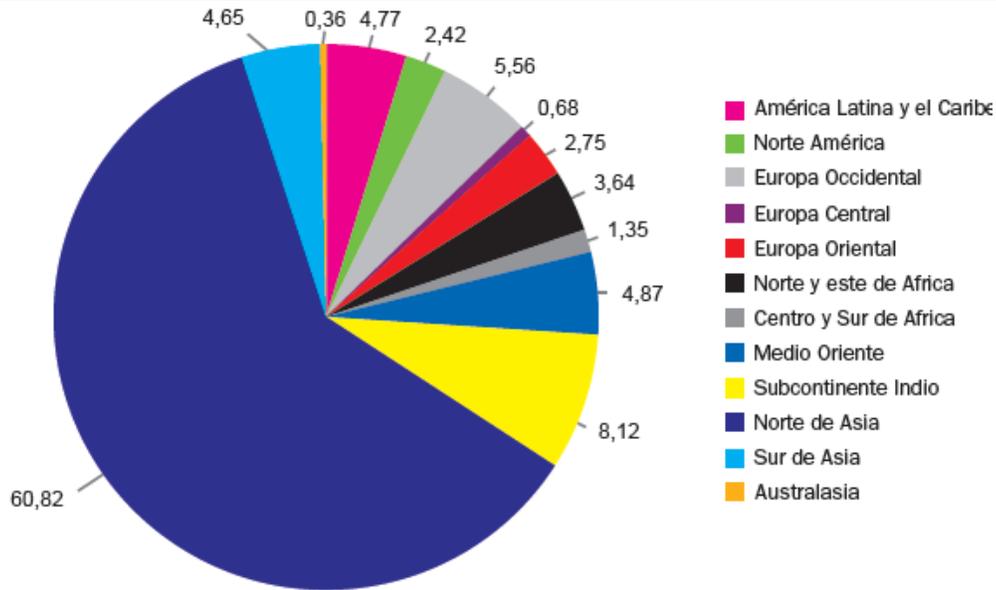


De acuerdo con datos publicados en el informe estadístico 2013 del FICEM, la región que tuvo mayor participación en la producción del cemento en el 2012 fue la conformada por países del Norte de Asia (61.42%), seguida por el Subcontinente Indio (7.89%), Centro y Sur de África (6.02%), Medio Oriente (4.91%) y América Latina y el Caribe (4.70%), tal y como se aprecia en la figura 8.

En lo que corresponde al consumo de cemento, la participación por regiones fue similar al de la producción, encabezando la lista la región del Norte de Asia (FICEM, 2013), tal y como se muestra en la figura 9.



**Figura 8.-Participación por región en la producción de cemento en 2012 (%) (FICEM, 2013).**



**Figura 9.- Participación por región el consumo de cemento en 2012 (%) (FICEM, 2013).**

Se estima que en 2012 la producción de cemento en América Latina y el Caribe haya alcanzado los 180 millones de toneladas, ocupando con ello el quinto puesto a nivel mundial en cuanto a producción del cemento se refiere. Es decir, tuvo un crecimiento del 5.10%, inferior al registrado en el 2011,6.26%. Los países que tuvieron una producción mayor a 10 millones de toneladas de cemento en el 2012 fueron Brasil, México, Colombia y Argentina; mientras que los países con mayor consumo per cápita fueron Panamá (644kg/hab), Guadalupe Martinica (544kg/hab), Trinidad y Tobago (385kg/hab) y Barbados (354kg/hab), tal y como se aprecia en la figura 10. El consumo de cemento per cápita en México para el año 2012 fue de 305kg/hab (FICEM, 2013). Sin embargo, de acuerdo con la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM, 2015), el consumo per cápita en México en el 2014 disminuyó a 294kg/hab.



### PRODUCCIÓN DE CEMENTO

- 0 - 1 millones de toneladas
- 1 - 5 millones de toneladas
- 5 - 10 millones de toneladas
- > 10 millones de toneladas

- (1) Estos datos son preliminares
- (2) Estimación FICEM

Fuente: Institutos, Cámaras y Asociaciones de cemento de América Latina [Ref. 10].  
International Cement Review [Ref. 11].

Figura 10.-Panorama de producción y consumo per cápita en la región de América Latina y el Caribe en 2012 (FICEM, 2013).



En la Figura 11 se presenta la producción de cemento que ha tenido cada uno de los países que conforman la región de América Latina y el Caribe en durante los años 2010, 2011 y 2012. Se aprecia que durante el 2012, Brasil mantiene el liderazgo en la producción de cemento seguido de México, Colombia y Argentina. La producción de cemento en México fue de 36.8 millones de toneladas en 2012, lo cual representa el 20.47% de la producción en la región (FICEM, 2013). De acuerdo con la información de la CANACEM, la producción de cemento en México en el 2014 fue de 36.6 millones de toneladas.

PAÍS	2010	2011	2012
Argentina	10.423	11.592	10.716
Barbados	229	223	175
Bolivia	2.414	2.658	2.714
Brasil	59.117	64.093	68.809
Chile	4.417	4.650	5.044 <sup>(2)</sup>
Colombia	9.505	10.779	10.925
Costa Rica	1.500	1.400	1.400 <sup>(2)</sup>
Cuba	1.730	1.736	1.825
Ecuador	5.287	5.706	6.025
El Salvador	1.290 <sup>(1)</sup>	1.320 <sup>(1)</sup>	1.380 <sup>(1)</sup>
Guadalupe y Martinica	441	431	435
Guatemala	2.794	2.850	2.880
Haití	nd	nd	nd
Honduras	1.600	1.620	1.730 <sup>(1)</sup>
Jamaica	723	766	760
México	34.503	35.398	36.800 <sup>(1)</sup>
Nicaragua	600 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	730 <sup>(1)</sup>
Panamá	1.491	1.766	2.252
Paraguay	1.100 <sup>(1)</sup>	820 <sup>(1)</sup>	800 <sup>(1)</sup>
Perú	8.298	8.499	9.847
Puerto Rico	697	717	743
República Dominicana	4.100	3.800	4.000
Trinidad y Tobago	791	827	654
Uruguay	834	968	872
Venezuela	7.120 <sup>(1)</sup>	7.760 <sup>(1)</sup>	8.280 <sup>(1)</sup>
<b>América Latina y el Caribe</b>	<b>161.004 <sup>(3)</sup></b>	<b>171.079 <sup>(3)</sup></b>	<b>179.796 <sup>(3)</sup></b>

Fuente: Institutos, Cámaras y Asociaciones de cemento de América Latina [Ref. 10].

(1) International Cement Review [Ref. 11].

(2) Datos preliminares

(3) Estos totales no incluyen a Haití.

**Figura 11.-Producción de cemento (en miles de toneladas) en la región de América Latina y el Caribe (FICEM, 2013).**

El consumo en América Latina y el Caribe fue de 180 millones de toneladas en el 2012, dicha cantidad representa el 4.77% del consumo a nivel



mundial. En la figura 12 se muestra el consumo que ha tenido cada uno de los países que conforman la región mencionada anteriormente. Los países que tuvieron crecimiento en el consumo de cemento superior al 10% fueron Panamá, Perú y Chile, mientras que Argentina tuvo una disminución del 8.17%. México presentó un aumento del 3.44% y se ubica como el segundo consumidor de cemento en la región (35.6 millones de toneladas) (FICEM, 2013). El consumo de cemento en México disminuyó a 35.2 millones de toneladas en el 2014 según la información de la CANACEM.

PAÍS	2010	2011	2012
Argentina	10.194	11.386	10.456
Barbados	112	103	98
Bolivia	2.449	2.689	2.915
Brasil	60.008	64.972	69.324
Chile	4.456	5.071	5.690 <sup>(2)</sup>
Colombia	8.921	10.155	10.496
Costa Rica	1.275	1.350	1.350 <sup>(2)</sup>
Cuba	1.430	1.298	1.372
Ecuador	5.287	5.706	6.025
El Salvador	1.400 <sup>(1)</sup>	1.430 <sup>(1)</sup>	1.480 <sup>(1)</sup>
Guadalupe y Martinica	440	432	434
Guatemala	2.794	2.850	2.880
Haití	1.120	1.398	1.388
Honduras	1.500 <sup>(2)</sup>	1.500 <sup>(1)</sup>	1.580 <sup>(1)</sup>
Jamaica	696	724	700
México	33.900	34.416	35.600 <sup>(1)</sup>
Nicaragua	600 <sup>(2)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	730 <sup>(1)</sup>
Panamá	1.597	1.806	2.400
Paraguay	1.640 <sup>(2)</sup>	1.460 <sup>(1)</sup>	1.280 <sup>(1)</sup>
Perú	8.496	8.838	10.176
Puerto Rico	771	811	835
República Dominicana	3.100	2.800	2.600
Trinidad y Tobago	548	535	512
Uruguay	664	767	829
Venezuela	7.120 <sup>(2)</sup>	7.760 <sup>(1)</sup>	8.280 <sup>(1)</sup>
<b>América Latina y el Caribe</b>	<b>160.518</b>	<b>170.957</b>	<b>179.430</b>

Fuente: Institutos, Cámaras y Asociaciones de cemento de América Latina [Ref. 10].

(1) International Cement Review [Ref. 11].

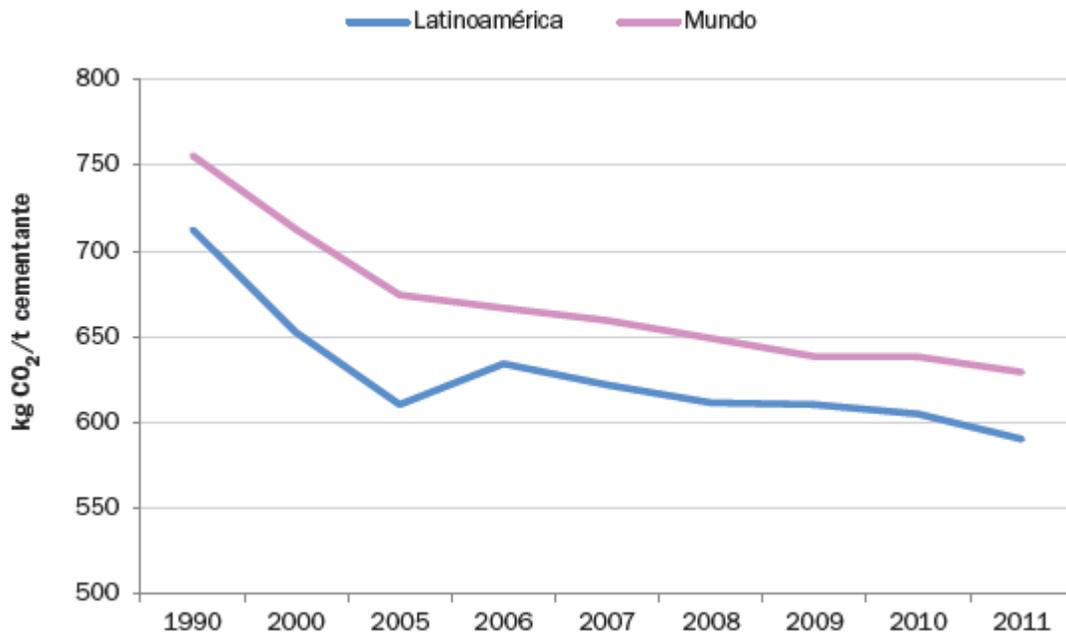
(2) Datos preliminares

**Figura 12.- Consumo de cemento (en miles de toneladas) en la región de América Latina y el Caribe (FICEM, 2013).**

### **2.1.7.- Emisiones de CO<sub>2</sub> y eficiencia energética de la industria cementera**



La industria del cemento es responsable de cerca del 5% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico. Por esta razón, la industria cementera ha buscado diversas alternativas para mejorar los procesos de producción de cemento que permitan disminuir dichas emisiones. Como puede observarse en la figura 13, las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial y a nivel Latinoamérica han disminuido en los últimos años. En 2011, las emisiones específicas netas promedio de CO<sub>2</sub> por tonelada de producto cementante a nivel mundial fueron de 629kg, mientras que para Latinoamérica fue de 590kg



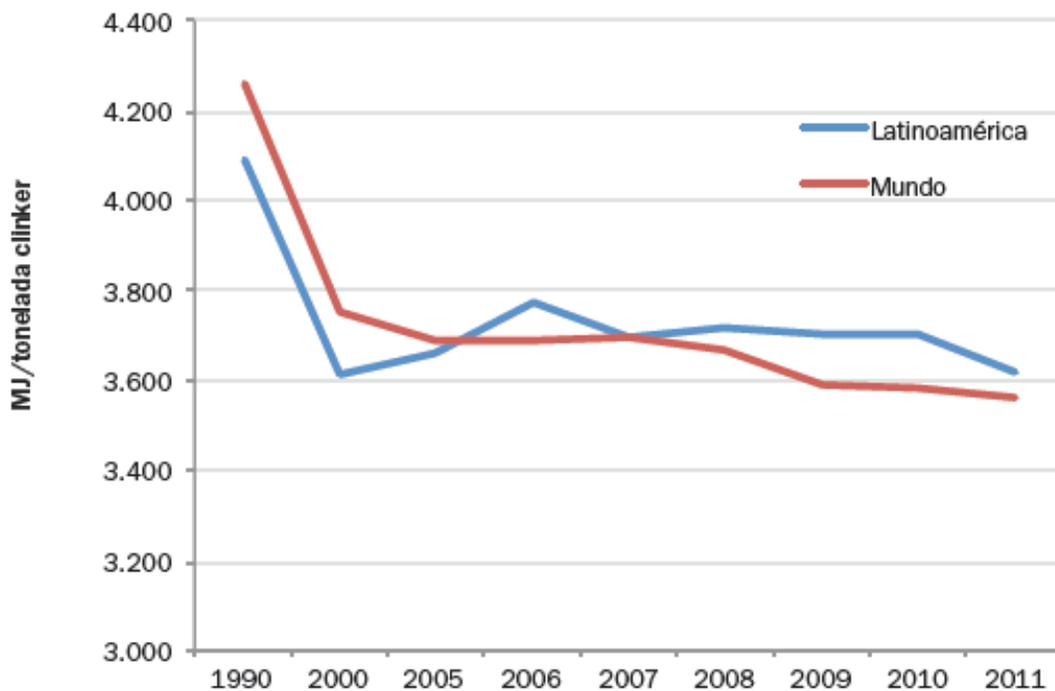
**Figura 13.-Emisiones netas específicas promedio de CO<sub>2</sub> por tonelada de producto cementante (FICEM, 2013).**

Otro de los problemas a los que se enfrenta la industria del cemento es a los altos consumos de energía (térmica y eléctrica) requeridos para su producción. Entre 2007 y 2010 el consumo de energía térmica por tonelada de clínker en América Latina se mantuvo prácticamente constante, alrededor de 3.700 MJ/t clínker. En 2011, el consumo de energía térmica en Latinoamérica para producir una tonelada de clínker fue de 3.623MJ/t clínker, superando ligeramente al promedio mundial

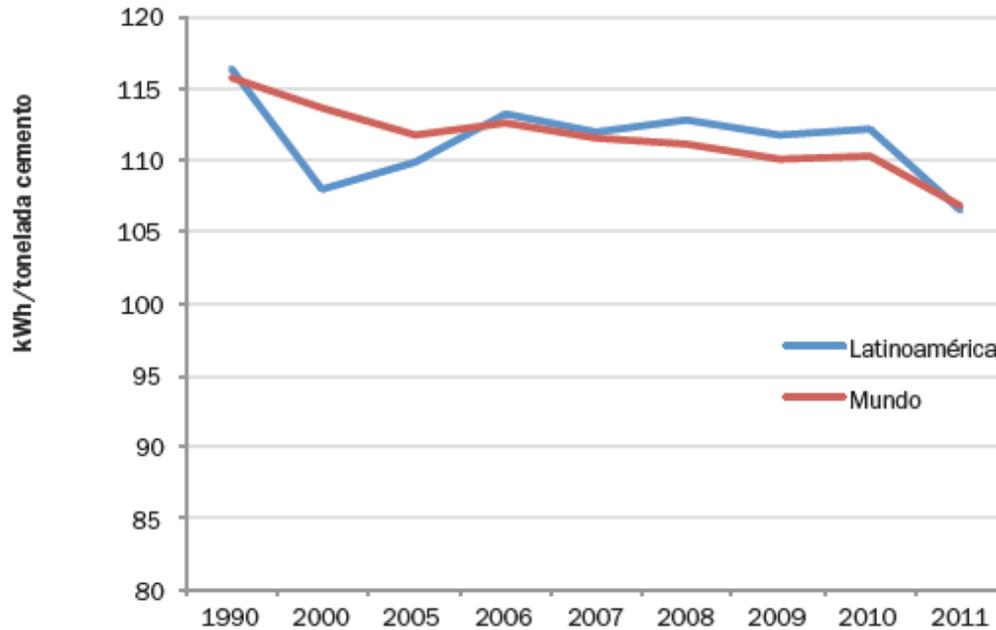


en 1,7% (Ver figura 14). Esta variación se debe a las diferencias de tecnologías, como un mayor uso de hornos secos con precalentador y sin precalcinador.

Desde 2006 a 2010 el consumo de energía eléctrica de la industria del cemento latinoamericana fue ligeramente superior al promedio mundial, alrededor de 1%. En 2011, el consumo de energía en Latinoamérica para producir una tonelada de cemento coincide con el valor promedio a nivel mundial, 107 kWh por tonelada de cemento (Ver figura15), lo cual conjuntamente con el consumo de energía térmica para la producción de clínker, indica que la industria latinoamericana se encuentra muy capacitada y migrando a tecnologías más eficientes (FICEM, 2013).



**Figura 14.-Consumo de energía térmica por tonelada de clínker.**



**Figura 15.-Consumo de energía eléctrica por tonelada de cemento.**

## **2.2.- Puzolanas**

Una puzolana es un material que contiene sílice natural o artificial en una forma reactiva. Por sí mismas, las puzolanas tienen poco o nulo valor cementante. Sin embargo, si son finamente divididas y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con los álcalis para formar compuestos cementantes. Las puzolanas se deben dividir finamente con la finalidad de exponer una mayor área superficial a las soluciones alcalinas para que la reacción proceda. Algunos ejemplos de materiales puzolánicos son: cenizas volcánicas, piedra pómez, pizarras opalina, arcilla quemada y cenizas volantes. La sílice en una puzolana tiene que ser amorfa o vítrea, para ser reactiva. Las cenizas volantes de una central térmica de carbón son puzolanas que dan como resultado baja permeabilidad en el concreto, lo cual provoca que sea más durable y capaz de resistir la penetración de los productos químicos nocivos (Newman & Choo, 2003).

### **2.2.1.- Clasificación de las puzolanas**



Existen distintos sistemas de clasificación para las puzolanas basados en distintos criterios. Sistemas según su composición química, según su composición mineralógica, según sus propiedades físicas, según su reactividad, pero el sistema más comúnmente utilizado es aquel que clasifica a las puzolanas según su origen, natural o artificial.

Las puzolanas naturales son materiales vítreos amorfos, que normalmente se clasifican en cuatro grupos:

1. Materiales volcánicos: son ricos en vidrio en un estado inalterado o parcialmente alterado. Éstos se encuentran en todo el mundo en regiones volcánicas. Son el resultado de la explosión de magma que enfrió rápidamente para formar vidrio microporoso. A menudo estos materiales se componen de > 50 por ciento de sílice, seguido por alúmina, óxidos de hierro y cal. A menudo tienen un alto contenido álcalis de hasta 10 por ciento.
2. Tobas: donde un vidrio volcánico ha sido transformado parcial o totalmente en compuestos zeolíticos debido a la intemperie. La gama de la composición química es similar a la de los materiales volcánicos. La pérdida por ignición es una indicación del grado de transformación que se ha producido debido a la meteorización.
3. Sedimentarias: son ricas en diatomeas opalinas. Las diatomeas son los esqueletos de organismos que se componen principalmente de ópalo. Tienen alto contenido de sílice; sin embargo, estos materiales son a menudo contaminados con arcilla
4. Diagenéticas: son ricas en sílice amorfa y derivados de la meteorización de rocas silíceas. Éstas normalmente son altas en sílice y baja en otros óxidos, dependiendo de la composición mineral de las rocas madres.

Dentro de las puzolanas naturales, las tobas se encuentran entre las más reactivas, debido a su alto contenido en zeolitas. Las zeolitas son básicamente



aluminosilicatos con espacios intermoleculares de entre 3 y 10 Å que contienen moléculas de agua en movimiento facilitando el intercambio iónico, fenómeno fundamental en la reacción puzolánica. Su composición básica consiste en aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno (Newman & Choo, 2003).

Las puzolanas artificiales se obtienen como subproducto de distintos procesos industriales y agrícolas. Existe una gran variedad dentro de este grupo, y evidentemente se encuentra en pleno proceso de expansión debido a su amplísimo campo de investigación. Algunos ejemplos de éstas son: las cenizas de cenizas volantes, la escoria de alto horno, la arcilla cocida, la ceniza de cáscara de arroz, la ceniza de hoja de maíz, la ceniza de bagazo de caña de azúcar, etc.

La norma americana (ASTM C 618-03, 2003) clasifica las puzolanas en tres grandes grupos como se muestra enseguida:

- Clase N: Puzolanas naturales en bruto o calcinadas, que cumplen con los requisitos aplicables para la clase en este documento, como algunas tierras de diatomeas; sílex opalina y lutitas, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y esquistos.
- Clase F: Cenizas volantes que normalmente se producen por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables de esta clasificación. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.
- Clase C: Cenizas volantes que normalmente se producen a partir del lignito y carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables a esta clasificación. Esta clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

De acuerdo con la norma (ASTM C 618-03, 2003), para que un material sea considerado puzolana debe cumplir con los requerimientos químicos especificados en la tabla siguiente:



**Tabla 8.- Requerimientos químicos**

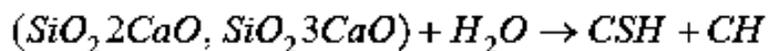
Requerimiento	Clase		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , mínimo %	70.0	70.0	50.0
SO <sub>3</sub> , máximo %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad , máximo %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición, máximo %	10.0	6.0*	6.0
* El uso de la puzolana clase F con pérdidas por ignición de hasta 12 % puede ser aprobado por el usuario si los registros de comportamiento son aceptables o los resultados de laboratorio lo avalan.			

Con todos los materiales puzolánicos, la graduación y la forma de partícula tendrán un efecto significativo sobre las necesidades de agua del concreto. Las puzolanas de origen natural a menudo tienen forma irregular, lo cual aumentará la demanda de agua a menos de que se utilicen plastificantes para compensar (Newman & Choo, 2003).

### 2.2.2.- Reacción puzolánica

La denominada reacción puzolánica es principalmente la que se da entre el óxido de Silicio o sílice (SiO<sub>2</sub>), la cal o hidróxido de Calcio Ca (OH)<sub>2</sub>, conocido como portlandita) y el agua, para producir silicatos de calcio hidratados (en adelante CSH). Es una reacción equivalente a la que se da en el cemento Pórtlandy se obtiene un producto muy similar. Además de esta reacción se producen otras secundarias, como la que da como resultado el C<sub>3</sub>A.

La reacción de hidratación del cemento Pórtland puede simplificarse, sin tener en cuenta la estequiometría ni las fases aluminosas, de la siguiente manera:



En esta ecuación SiO<sub>2</sub>2CaO y SiO<sub>2</sub>3CaO (silicatos dicálcico y tricálcico) son los componentes principales del cemento portland, y CSH y CH (hidróxido de

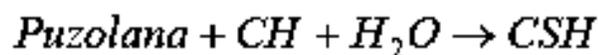


calcio, CaOH) son los productos de la reacción. Mientras que el CSH podría definirse como el “pegamento” del cemento, y principal responsable de su resistencia e impermeabilidad, el CH no tiene valor cementante y se disuelve fácilmente en medios agresivos. La principal aportación de este compuesto es la de mantener un ambiente alcalino (pH alto) que ayuda a proteger de la corrosión las armaduras en el cemento armado. La capacidad cementante de estos compuestos es debida, entre otras cosas, a su estructura atómica. El CSH posee una estructura altamente amorfa, con gran cantidad de ramificaciones que al entrecruzarse unas con otras forman un conjunto sólido, salpicado por partículas de CH, cristalinas, y que suponen puntos de ruptura del entramado amorfo, creando puntos débiles en la estructura global.

Los granos de cemento, al contacto con el agua comienzan a desarrollar unos filamentos a su alrededor que en su conjunto forman el denominado “gel”. Los filamentos de cada grano se van entrelazando con los pertenecientes a los granos vecinos y así se forma la estructura ramificada de la figura.

Pero esta red no ocupa todo el volumen de la mezcla. Como hemos visto se ve salpicada por partículas de CH, pero además existen espacios libres donde esta red no puede llegar debido al relativo gran tamaño de las partículas, dejando una serie de huecos que contienen moléculas de agua. Debido a la diferencia de densidad esta agua tiende a salir hacia la superficie, formando en su camino los denominados poros capilares, que terminan debilitando la estructura global, al igual que las partículas de CH.

Por su parte la reacción puzolánica tendría la siguiente forma:



Es decir, no produce cal, sino que la consume, siendo el CSH su principal producto de reacción. Por tanto, si se adiciona cierta cantidad controlada de



puzolana dentro del cemento Pórtland ésta reaccionaría con el CH producto de la hidratación provocando la reducción de fases no deseadas y transformándolas en otras que contribuirían al aumento de su resistencia. La nucleación del CH alrededor de las partículas de puzolana, más finas, y distribuidas por toda la red reemplazará los cristales de CH (grandes y orientados) por otros cristales (mucho más pequeños y amorfos) procedentes de la reacción puzolánica.

Hay que tener en cuenta que si el consumo de CH resulta excesivo puede derivar en un problema de auto-neutralización debido al desequilibrio creado entre los elementos de reacción, pudiendo conducir a la destrucción parcial de la matriz. Este efecto sería especialmente grave en el caso concreto del hormigón armado, ya que favorecería la corrosión del acero.

Cabe señalar que, además de estos productos, la reacción puzolánica da lugar a muchos otros que influirán de distinta manera en las propiedades de la mezcla final.

Además de los efectos derivados de la componente química de la adición son igualmente importantes aquellos derivados de la componente física, relacionados con su tamaño de partícula y su superficie específica. Aunque depende del tipo de puzolana y del proceso de molienda (en su caso) éstas presentan generalmente tamaños de grano muy pequeños, esto es, una gran superficie específica. Estas partículas minúsculas se introducen en la red creada por el cemento, situándose entre sus granos y desarrollando sus propios filamentos de gel, y promoviendo una mayor compacidad de la mezcla que da como resultado una menor porosidad y por tanto una mayor resistencia e impermeabilidad.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se puede resumir que:

- La reacción puzolánica consume CH en lugar de generarlo, lo que hace más resistentes a las mezclas en ambientes ácidos.



- Debido a su pequeño tamaño de grano las puzolanas rellenan muy eficientemente los espacios muertos dificultando la formación de los poros capilares que se generan en la hidratación del cemento.
- Es una reacción lenta, por lo que la liberación de calor también lo será, aportando estabilidad, pero retrasando el fraguado (Gómez, 2009).

### **2.2.3.- Puzolanidad y reactividad puzolánica**

Estos dos términos son básicos a la hora de analizar las cualidades de un material para formar compuestos cementantes mediante la reacción puzolánica. Como se ha descrito, los factores que determinan la puzolanidad de un compuesto son su contenido en sílice amorfa (una baja cristalinidad, y por tanto una estructura netamente amorfa resulta un factor crítico para que la puzolana resulte reactiva) y su tamaño de partícula. Ahora bien, no todos los compuestos que posean estas características similares se comportan de la misma manera, sino que su capacidad vendrá determinada por su reactividad.

Existen varios métodos para evaluar esta reactividad, no resultando ninguno de ellos concluyente al 100% a la hora de evaluar las bondades de una puzolana para su uso como adición activa. Es por esto que resulta recomendable la combinación de varios de estos métodos para una correcta selección.

a) Medida de la reducción de contenido de CH con el tiempo; la desaparición paulatina de la cal indica que ha reaccionado de alguna manera, y se ha combinado para formar otros compuestos. Si bien esta observación no es definitiva para asegurar un aumento de la resistencia, sí lo es en sentido negativo para descartar aquellas combinaciones en las que no se produzca dicha reducción.

b) Medida de la reducción de poros capilares con el tiempo; los productos de la reacción deben precipitarse alrededor de los granos ocupando espacios vacíos entre los granos de cemento. Según avanza la reacción estos productos se



expanden evitando la formación de poros capilares e incluso cerrando parte de los ya formados. Puede darse una disminución del contenido de CH y no observarse una reducción significativa de la porosidad de la matriz, lo que podría entenderse como una reacción insuficiente. Este es un método que puede orientar la investigación en uno u otro sentido, pero nunca resultar definitivo.

c) Observación microscópica; mediante la utilización del microscopio electrónico puede observarse la formación de los productos de reacción gracias a su morfología característica. Al igual que el primero de los métodos descritos éste puede considerarse sólo definitivo en caso negativo, si no se observan los productos esperados se puede descartar la mezcla.

d) Medida del aumento de la resistencia mecánica; éste puede considerarse como la evidencia más fiable de que realmente se ha producido la reacción, además de tratarse de la verificación definitiva de si se han logrado o no los objetivos, al menos en parte.

Todos estos métodos deben evaluarse teniendo en cuenta la menor velocidad de la reacción puzolánica, por lo que es necesario realizar comprobaciones intermedias y dar a las muestras el suficiente tiempo para desarrollar la reacción (al menos 28 días) (Gómez, 2009).

## **2.2.4.- Uso de las puzolanas de estudio en la elaboración de morteros**

### **2.2.4.1.- Metacaolín (MK)**

El metacaolín es un material silicoaluminoso activado que se obtiene mediante la calcinación a 650-800°C de una arcilla llamada caolín (Sabir, Wild, & Bai, 2001), la cual es producto de la descomposición natural de los feldespatos y otros minerales de arcilla. Las propiedades físicas del metacaolín dependen en gran medida de la calidad de la materia prima utilizada, la temperatura de calcinación y los procesos de acabado; normalmente tiene gran finura y elevada actividad puzolánica (De Silva, 1993). Debido a su estructura altamente



desorganizada reacciona muy rápidamente con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación de los cementos Portland, lo que origina la formación de hidratos cementicios estables e insolubles. La reacción puzolánica reduce la permeabilidad y porosidad de la pasta de cemento haciéndola más fuerte y significativamente más durable (Newman & Choo, 2003).

El caolín está constituido en esencia por silicatos aluminicos hidratados (Huertos, 1974), las especies mineralógicas comúnmente presentes son principalmente caolinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), feldespato potásico ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) (Kakali, Perrak, Tsvilis, & Badogiannis, 2001).

El tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la formación del metacaolín ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) o Mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) (Moya, 1998).

La reacción que nos indica la formación del Metacaolín es la siguiente:



De acuerdo con Newman (2003), el uso del metacaolín como reemplazo parcial de cemento en las mezclas de hormigón diseñado adecuadamente se ha demostrado que:

- Mejora la cohesión y reduce el sangrado del concreto fresco
- Aumenta resistencia a la compresión
- Reduce la contracción por secado
- Mejora la resistencia a la congelación-descongelación
- Mejora la resistencia a los sulfatos
- Aumenta la resistencia a la penetración de iones cloruro
- Mejora la resistencia a los ácidos



- elimina la reacción álcali-sílice

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se puede decir que la adición de metacaolín a las mezclas de morteros y concretos resulta benéfica, ya que mejora significativamente el comportamiento mecánico y la durabilidad de éstos.

#### **2.2.4.2.- Perlita natural (PN)**

La perlita es una roca volcánica vítrea que contiene aproximadamente 70-75% de  $\text{SiO}_2$  y 12-18%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tiene un alto contenido de agua (entre 2 y 5%), lo cual ocasiona que se expanda y se convierta en un material celular de muy baja densidad cuando es calentado a altas temperaturas (Gunning, 1994) . La perlita natural tiene una densidad cercana a  $1100\text{kg/m}^3$ , mientras que la de la perlita expandida es 10 veces menor aproximadamente (TERMOLITA , 2015).

Debido a su estructura vítrea y su alto contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la perlita es considerada como puzolana. Existe un gran número de publicaciones en la literatura donde se discute los beneficios de su uso en la industria de la construcción. Dependiendo del tipo y la cantidad, su uso puede proporcionar las siguientes ventajas: reducción del consumo del cemento Portland, provee trabajabilidad, baja permeabilidad, alta durabilidad, alta resistencia, etc. Además, los yacimientos de esta roca son muy abundantes; se estima que existen reservas de perlita de 6700 millones de toneladas aproximadamente (Erdem, Meral, Tokyay, & Erdogan, 2007).

Algunas investigaciones muestran que el polvo de perlita mineral y expandida adicionados a los morteros tiene alto potencial para suprimir el deterioro por la expansión álcali-sílice debido a su estructura porosa (Bektas, Turanli, & Monteiro, 2005).

#### **2.2.4.3.- Perlita expandida (PE)**



La perlita es uno de los cristales volcánicos naturales, y por tanto, está relacionada con la pómez. Sin embargo, no tiene una estructura física como la de la piedra pómez, sino que es una roca densa, cristalina, que, como su nombre implica, tiene cepas concéntricas semejantes a las de la cebolla. Cuando la roca triturada se calienta directamente sobre las llamas hasta su punto de fusión, o sea aproximadamente 1800°C se expande en ocasiones con decrepitación, formando un material celular ligero que se ha encontrado útil como agregado, y cuya densidad oscila entre 64 y 180Kg/m<sup>3</sup>.

La adición de perlita expandida, agregado liviano, se sabe que reduce significativamente la densidad de los morteros a base de cemento y mejorar sus propiedades térmicas (Demirbog~a R, Gu~l R, 2003), resistencia a la congelación-descongelación (Demirbog~a R, Gu~l R, 2004) y las propiedades acústicas (Yilmazer S., 2005). Su uso en los elementos estructurales se ha promovido en los miembros de carga dinámica, donde en el consiguiente descenso en el peso del concreto es esperado para limitar los daños durante los terremotos (Topcu I.B.; Isikdag B., 2008), sobre todo después de refuerzo adecuado con fibras. En la mayoría de los estudios, la perlita se ha utilizado como un reemplazo para el cemento Portland, como un relleno microscópico ligero o para reemplazar una porción de la arena. Si bien se reconoce su actividad puzolánica, su papel en morteros ligeros es en gran parte la de un agregado inerte (Torre M.L. ; García Ruiz P.A., 2009).

#### **2.2.4.4.- Ceniza de bagazo de caña (CBC)**

La industria azucarera utiliza grandes cantidades de bagazo de caña como combustible para proveer de energía eléctrica y calorífica a sus fábricas, como resultado de esta operación se obtienen también cantidades importantes de CBC. México es uno de los países líderes en el cultivo de caña de azúcar, cuya producción estimada en 2014 fue de 57 millones de toneladas de caña de azúcar, con la cual se elaboraron 6.7 millones de toneladas de azúcar (Financiera



Nacional de Desarrollo Agropecuario, 2014). En Michoacán para el periodo 2013-2014 se produjeron 1.5 millones de toneladas de caña de azúcar, de los cuales se obtuvieron 424,170 toneladas de bagazo de caña (Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR, 2015).

La ceniza de bagazo de caña es uno de los principales subproductos generados en todo el mundo y puede ser utilizado como un aditivo mineral debido principalmente a su alto contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) (Cordeiro C. , Toledo, Tavares, & Fairbairn, 2008), generalmente en cantidades superiores al 60% en masa. De acuerdo con las condiciones de cocción adoptadas, es posible mantener la sílice contenida en el bagazo en estado amorfo (Cordeiro, Toledo, & Fairbairn, 2009).

#### **2.2.4.5.- Ceniza de elaboración de ladrillo (CEL)**

Otro proceso industrial o agroindustrial que genera cenizas, con aparente potencial puzolánico, es la elaboración y cocción de tabiques de arcilla. Durante la cocción de dichas piezas se calcina madera como fuente de calor (el tipo de madera varía según la región donde se ubiquen los productores de tabiques). En este proceso se quema no solo madera, también se llega a calcinar aserrín, cascaras de coco y residuos municipales de diferentes tipos (Arreola Sánchez, M., 2013).

La CEL resulta de la quema de la leña utilizada para la cocción de los tabiques de arcilla recocida, por lo cual Esta ceniza es un residuo industrial que prácticamente se desecha, exceptuando el uso que le dan los propios tabiqueros, que la pueden utilizar como desmoldante, durante la elaboración de los ladrillos (Bernabé Reyes, C. , 2012)

#### **2.2.4.6.- Fibra de nopal (FN)**

El nopal pertenece al género *Opuntia*, de la familia de las cactáceas y su nombre científico es *Opuntia Ficus Índica*. Esta planta es originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos y su cultivo contribuye a la



alimentación, nutrición y salud de los seres humanos. Además se utiliza en la agroindustria alimentaria; complementa la alimentación animal; es fuente potencial de bioenergía; y ayuda a un mejor manejo del medio ambiente.

En el ámbito de la construcción en México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua, por lo cual ha sido utilizado como impermeabilizante. Además se ha encontrado que los morteros adicionados con baba de nopal tienen una alta resistencia mecánica, una protección impermeable creciente y características antihongos (Cárdenas,A.;Arguelles, W.M. and Goycoolea F.M., 2002).

El nopal es deshidratado para producir harina de nopal y comercializarlo, el proceso básicamente consiste en el secado, trituración y pulverización. En años recientes se han realizado algunas investigaciones adicionando fibra de nopal en la elaboración de morteros y/o concretos, las cuales indican que es benéfico el reemplazo de CP por FN hasta 2.0% de su masa ( Torres Acosta, Celis Martínez, Martínez Molina, & Lomelí González, 2010).

#### **2.2.5.7.- Escoria de Alto Horno (EAH)**

La escoria de alto horno es un subproducto de la fabricación de arrabio a partir de mineral de hierro, caliza y coque. La escoria es enfriada rápidamente, lo que ocasiona que sea un material casi completamente amorfo. Su composición química depende principalmente de la del mineral de hierro y potencialmente contiene de 27-40% de  $\text{SiO}_2$ , 30-50%  $\text{CaO}$ , 5-15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y 1-10% de  $\text{MgO}$  (Bellmann & Stark, 2009). La EAH ha sido utilizada como material cementante suplementario por más de 100 años y existe un amplio conocimiento de su aplicación. La mayor parte de la EAH ha sido utilizada para elaborar cementos compuestos y cementos de escoria. Actualmente, hay un gran interés en la aplicación de este material alternativo debido a que la producción de cementos de escoria reduce las emisiones de  $\text{CO}_2$  (Taylor, Richardson, & Brydson, 2010). En



los últimos años, se ha realizado investigaciones sobre el efecto de adicionar EAH a los morteros o concretos con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y proveer durabilidad. Algunas investigaciones indican que el reemplazamiento de CP por EAH baja la porosidad y absorción de agua a edades tardías (90 a 360 Días), además de que disminuye la difusión de cloruros (Hadj-sadok, Kenai, Courard, & Darimont, 2011).

En otras investigaciones la EAH ha sido utilizado como reemplazo total del CP y activada mediante álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$ , dando resultados muy favorables en propiedades mecánicas (Espinoza & Escalante, 2008), (Espinoza Pérez & Escalante García, 2011).

#### **2.2.4.8.- Ceniza de horno BOF (CBOF)**

En la industria siderúrgica, además de los productos de hierro y acero, en los procesos de fabricación se generan muchos tipos de residuos sólidos, que se descargan en forma de polvo, lodo, cenizas y escoria. Uno de los subproductos de la fabricación del acero es la escoria del horno de oxígeno básico, cuya producción es de 100-150kg por tonelada de acero. La CBOF está compuesta principalmente por calcio, silicio y hierro, y tienen una alta gravedad específica, resistencia a la compresión y a la abrasión (Shi, 2002). Muchos estudios han reportado que la CBOF tiene potencial para ser usada en la producción de cemento, construcción de carreteras y concreto asfáltico. Sin embargo, algunas investigaciones indican que el alto contenido de  $\text{CaO}$  libre que contiene puede causar problemas de expansión volumétrica. Otros estudios indican que la carbonatación que presentan resulta benéfica para el comportamiento mecánico de los morteros (Ming-Sheng, Ying-Liang, & Jhih-Hua, 2015).

#### **2.2.4.9.- Carbón mineral (CM)**

El carbón mineral es un material vegetal de origen fósil que se desarrolla durante el periodo carbonífero y queda sepultado bajo agua y yacimientos tóreos



que lo protegen de la putrefacción. Se produce una descomposición lenta, resultado de la cual es la formación de turba, primera etapa de la metamorfosis del tejido vegetal en carbón. Durante este primer periodo se forman y desprenden dióxido de carbono, metano y agua. Durante las fases sucesivas de la metamorfosis, el contenido de carbón aumenta (Amarocho Cortés, E. ; Oliveros Villamizar, G. , 2000).

El carbón es utilizado como fuente de energía para la producción del cemento. Se necesitan grandes cantidades de energía para producir cemento. Los hornos suelen quemar carbón en forma de polvo y consumen unos 450g de carbón por cada 900g de cemento producido.

Los productos de combustión del carbón (CCP) también juegan un papel importante en la producción del cemento. Los CCP son los subproductos generados al quemar carbón en las centrales eléctricas de combustión de carbón. Estos subproductos incluyen cenizas en suspensión, cenizas de suelo, escoria de caldera y yeso de desulfurización de gases. Las cenizas en suspensión, por ejemplo, pueden utilizarse para sustituir o complementar al cemento en el hormigón. El reciclaje de los productos derivados de la combustión del carbón resultan beneficiosos para el medio ambiente, ya que sirven para sustituir materias primas primarias (Instituto Mundial del Carbón, 2005).

## **2.3.- Morteros**

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes que resultan de combinar arena y agua con uno o dos materiales cementantes, que pueden ser cemento Portland, cemento Pórtlandy cal, cemento Pórtlandy cemento de albañilería (N-CMT-2-01-004/02, 2002).

### **2.3.1.- Clasificación de los morteros**

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición:



- Mortero físico. El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.
- Mortero químico. El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.
- Mortero aéreo. Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.
- Mortero bituminoso. Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.
- Mortero hidráulico. Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza & Brito Benítez, 2004).

La norma ASTM C270 (ASTM C270-14, 2014) incluye al mortero para uso en construcciones de mampostería de concreto, reforzado y no reforzado. La norma presenta 2 alternativas: Especificación por proporciones y especificación por propiedades. Cuando no se indique cuáles son las especificaciones a seguir, regirá la especificación de las proporciones.

De acuerdo con la norma citada anteriormente, conforme a las especificaciones de proporción; el mortero consistirá en una mezcla de materiales cementantes, agregados y agua, que tendrán distintas proporciones según el tipo de mortero, tal y como se muestra en la tabla siguiente:



**Tabla 9.- Requerimientos de la especificación por proporciones (ASTM C270-14, 2014).**

NOTA: 2 materiales inclusores de aire no deberán ser combinados en un mortero.

PROPORCIÓN EN VOLUMEN (MATERIALES CEMENTICIOS)										
Mortero	Tipo	Cemento <sup>A</sup>	Mortero Cemento			Cemento de Mampostería			Cal hidratada o macilla de cal	Razón de agregados (condiciones de humedad y sueltos)
			M	S	N	M	S	N		
Cal-Cemento	M	1							1/4	No menos que 2 1/4 y no más de 3 veces la suma de los volúmenes separados de los materiales cementantes
	S	1						arriba 1/4 a 1/2		
	N	1						arriba 1/2 a 1 1/4		
	O	1						arriba 1 1/4 a 2 1/2		
Mortero Cemento	M	1			1					
	M		1							
	S	1/2			1					
	S			1						
	N				1					
Cemento de mampostería	O				1					
	M	1						1		
	M					1				
	S	1/2						1		
	S						1			
	N							1		
O								1		

<sup>A</sup> Cementos especificados en la sección 4.1.1 de esta norma.

En el caso de los morteros con especificaciones por propiedades, éstos serán ensayados en Laboratorio para verificar que cumplan con las propiedades que se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10.- Requerimientos de la especificación por propiedades (ASTM C270-14, 2014).**

REQUERIMIENTOS DE LA ESPECIFICACIÓN POR PROPIEDADES <sup>A</sup>					
Mortero	Tipo	Promedio mínimo de resistencia a la compresión a los 28 días, psi (MPa)	Retención de Agua, % mínimo	Contenido de Aire, % máximo <sup>B</sup>	Razón de agregados (condiciones de humedad y sueltos)
Cal-Cemento	M	2500 (17.2)	75	12	No menos que 2 1/4



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



	S	1800 (12.4)	75	12	y no más de 3 veces la suma de los volúmenes separados de los materiales cementantes
	N	750 (5.2)	75	14 <sup>C</sup>	
	O	350 (2.4)	75	14 <sup>C</sup>	
Mortero Cemento	M	2500 (17.2)	75	12	
	S	1800 (12.4)	75	12	
	N	750 (5.2)	75	14 <sup>C</sup>	
Cemento de mampostería	O	350 (2.4)	75	14 <sup>C</sup>	
	M	2500 (17.2)	75	18	
	S	1800 (12.4)	75	18	
	N	750 (5.2)	75	20 <sup>D</sup>	
	O	350 (2.4)	75	20 <sup>D</sup>	
A Únicamente para morteros preparados en laboratorio.					
B Ver nota 5 de la norma.					
C Cuando refuerzo estructural es incorporado en morteros de cal-cemento o morteros cemento, el contenido máximo aire deberá ser de 12%.					
D Cuando refuerzo estructural es incorporado en morteros de cemento de mampostería, el contenido máximo aire deberá ser de 18%.					

De acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los morteros utilizados para los trabajos de albañilería, tales como juntas, aplanados y firmes, se clasifican de la siguiente manera:

**Tabla 11.- Tipos de morteros (N-CMT-2-01-004/02, 2002).**

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
I	1	0	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen.
	1	0 a ½	0	
II	1	0	¼ a ½	
	1	½ a 1	0	
III	1	0	½ a 1 ¼	

### 2.3.2.- Componentes de los morteros



Los morteros están compuestos básicamente por un material aglutinante, agregados pétreos inertes y agua. De acuerdo con la norma (ASTM C109/C 109M-02, 2002) los morteros de cemento estándar deberán tener 2.75 partes de arena graduada por cada parte de cemento en masa para una relación agua-cemento de 0.485 para todos los cementos Pórtlandy de 0.460 para todos los cementos Pórtlandcon aire incluido. La cantidad de agua de mezclado para otros cementos Pórtlandy Pórtlandcon aire incluido deberá ser la que produzca una fluidez de  $110 \pm 5$  determinada de acuerdo con el procedimiento dado en la norma ASTM C 1437.

### **2.3.2.1.- Aglutinantes**

Los aglutinantes son materiales que al ser mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica, los cuales pueden ser: cal, cemento, yeso, arcilla, entre otros. Éstos sirven para aglomerar, adherir, unir, etcétera. Debido a que los aglutinantes puros presentan cambios volumétricos, se agrietan durante el endurecimiento; por lo cual resulta necesario mezclarlos con arena en porcentajes determinados (Rivera Flores, E.). Normalmente en los morteros de cemento Portland, el material aglutinante es únicamente el cemento; sin embargo, también pueden ser utilizadas algunos materiales puzolánicos con la finalidad de mejorar algunas características del mortero, o inclusive disminuir la cantidad de cemento empleada.

Debido a que el cemento y las puzolanas se abordaron ampliamente en subtemas anteriores, ya no será necesario abordarlos nuevamente aquí.

### **2.3.2.2.- Agregados pétreos**

El agregado para ser utilizado en morteros deberá ser arena natural o manufacturada. La arena manufacturada es el producto obtenido de la trituración de grava, piedra y escoria de alto horno enfriada con aire especialmente procesada para asegurar una granulometría adecuada (ASTM C 144, 2011).



La arena funciona como relleno inerte que favorece la economía de la producción, trabajabilidad y reduce la contracción, además que favorece el incremento de la resistencia a compresión. Un aumento en el contenido de arena aumenta el tiempo de fraguado de un mortero de albañilería, pero reduce el potencial de agrietamiento debido a la contracción de la articulación del mortero.

Agregado bien graduado reduce la separación de materiales en mortero plástico, que reduce el sangrado y mejora trabajabilidad. Arenas deficientes de finos producen morteros ásperos, mientras que arenas con finos excesivos producen morteros débiles y aumentan la contracción (ASTM-C270, 2014).

Sin duda los agregados juegan un papel importante en el desempeño de las mezclas, no solo por el hecho de proporcionar resistencia mecánica, si no que una mala elección del árido puede representar problemas graves a la estructura. Estos problemas pueden ser derivados de las propiedades físicas del agregado, pero también pueden deberse a las reacciones químicas desarrolladas entre los álcalis del cemento y los componentes minerales del agregado. Deberá cuidarse la forma de las partículas, ya que cantidades excesivas de partículas planas y alargadas pueden generar problemas con la trabajabilidad. La elaboración de morteros requiere que sus componentes básicos tengan las proporciones adecuadas de acuerdo con las necesidades de resistencia y fluidez requeridas. En la tabla siguiente se observan algunos de los factores característicos de los agregados y la forma en que se manifiestan (NMX-C003, 2010).

**Tabla 12.- Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010).**

Factor	Se manifiesta en:
Contaminación por materia orgánica o vegetal (troncos, hojas, raíces, etc.)	Inhibición de reacciones puzolánicas, falta de resistencia, agrietamientos, poca trabajabilidad y plasticidad.
Alto índice de lajas	Problemas estructurales y de resistencia.



Granulometría no adecuada	Falta de adhesión, problemas de resistencia, mayor requerimiento de aglomerante.
Alto contenido de finos	Mayor requerimiento de aglomerantes, problemas de adhesión entre partículas.

### **2.3.2.3.- Agua**

El agua de las mezclas desarrolla tres funciones: dar trabajabilidad, hidratar al cemento y facilita la carbonatación de la cal. La cantidad de agua dependerá de los ingredientes del mortero, y usualmente el agua potable es aceptada para las mezclas (ASTM C270-14, 2014).

Las aguas a las que se refiere la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE, que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 13. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la tabla 13, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).



**Tabla 13.- Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción (NMX-C-122-ONNCCE-2004).**

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en ppm	Cementos sulfioresistentes Límites en ppm
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL(a)		
Para concreto con acero de pre-esfuerzo y piezas de puente	400 ( c )	600 ( c )
Para otros concretos reforzados en ambientes húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 ( c )	1000 ( c )
Sulfato como SO <sub>4</sub> = (a)	3000	3500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto , como CO <sub>2</sub>	5	3
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 ( b )	150 ( b )
Valor del pH	≥ 6	≥ 6.5
<p>(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.</p> <p>(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto arrojen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.</p> <p>( c ) Cuando se use cloruro de calcio CaCl<sub>2</sub> como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.</p>		

La norma mexicana NMX-C-003 describe efectos que causa el agua en las mezclas según su calidad, como se aprecia en la tabla 14.



**Tabla 14.- Factores del agua de mezclado que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010).**

Factor	Se manifiesta en:
Contaminación con aceite	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.
Alta acidez	Mayor requerimiento de aglomerante.
Alto contenido de sales	Inhibición de las reacciones de la cal con los componentes de la mezcla, falta de resistencia, agrietamientos y poca plasticidad.

#### **2.3.2.4.- Aditivos**

Los aditivos son productos químicos, añadidos al concreto, mortero o lechada de cemento en el momento de la mezcla, para modificar las propiedades, ya sea en estado húmedo, inmediatamente después de la mezcla o después de que la mezcla se haya endurecido. Éstos pueden ser una sola sustancia química o una mezcla de varias sustancias químicas y pueden ser suministrados en forma de polvos, pero la mayoría son soluciones acuosas debido a que en esta forma son más fáciles de dispersar con precisión. La dosificación puede ser expresada como litros o kg por 100 kg de cemento.

Los aditivos se usan principalmente para:

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
- Conservación de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado.



A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción (Arreola Sánchez, M., 2013).

### **2.3.3.- Uso de los morteros**

Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos (Constructor Civil, 2015).

Existen en el mercado microconcreto y morteros industrializados ya adecuadamente dosificados para uso en reparaciones y refuerzos según el tipo de problema patológico que se presente, según las características de la zona a ser reparada, por ejemplo, vertical u horizontal, y resistentes a la agresividad del medio ambiente. Están incluidos en este grupo los concreto proyectados, tanto vía seca como vía húmeda. Normalmente usan áridos gruesos de tamaño máximo característico igual a 9 mm, lo que en realidad los clasificaría como microconcreto o morteros proyectados.

Los materiales avanzados, formulados a base de resinas y combinaciones de resinas con otros materiales - fibras, *filler*, etc. - se establecieron como respuesta científico-técnica moderna a las exigencias de desempeño y durabilidad en continua evolución en todo el mundo, especialmente en las situaciones en que el concreto necesita ser modificado o donde su uso es inadecuado (Helene & Pereira, 2003).

### **2.3.4.- Agentes que degradan a los morteros**



Los materiales cerámicos constan en su mayoría de más de una fase. Tanto el concreto como el mortero son cerámicos multifásicos, cuyo deterioro ofrece sugestivo interés en vista de su exposición a la intemperie en carreteras, al mar y las instalaciones portuarias y a sustancias químicas en extensas instalaciones manufactureras o sanitarias. Tanto el ataque interno como externo puede ocasionar su deterioro; en ambos casos, su durabilidad depende de la composición química de los agregados (arena, grava, etc.), y del CP. Para resistir el ataque exterior, un concreto debe de ser impermeable a las soluciones reactivas, propiedad que depende de la correcta formulación, del mezclado, la compactación y el curado (Guy, 1980). De acuerdo con esto, si se busca elaborar un concreto de buena calidad, el parámetro que debemos controlar es la porosidad, ya que está íntimamente relacionada con la permeabilidad. Los concretos y/o morteros pueden sufrir deterioros por lo siguiente:

- ❖ Ataque por sulfatos. Algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática (Aguirre, A.R. & Mejía de Gutiérrez, R., 2013). El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generan agrietamientos por donde posteriormente ingresan otros agentes que pueden acelerar el deterioro, como por ejemplo, los iones cloruro (Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P. & Polder, R., 2004).
- ❖ Reacción álcali-sílice (RAS), se da principalmente con áridos que contienen ciertas formas amorfas de sílice, son muy lentas y sus efectos solo se pueden observar a través del tiempo. Las condiciones necesarias para que se produzca la reacción son: la presencia de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), un árido reactivo, humedad del orden de 80-85% y temperatura. La concentración permisible de álcalis en el concreto debe ser de  $3 \text{ kg/m}^3$  y de 0.6% en



cementos expresado en  $\text{Na}_2\text{O}$  (Mejía, 1999). Los materiales puzolánicos ayudan a mitigar la expansión provocada por la reacción álcali-sílice, siendo el más efectivo la adición de humo de sílice en porcentajes de 8 a 10% (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

- ❖ Ataque por cloruros, el cual puede provenir de iones cloruros que pueden estar presentes en la mezcla o de cloruros que ingresan del exterior. Los iones cloruros una vez que penetran el concreto se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros no generan daños graves, pero los segundos se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruirla capa pasiva e iniciar el proceso de corrosión. La movilidad de los iones cloruro dentro del hormigón está relacionada con su permeabilidad. La presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto (Aguirre, A.R. & Mejía de Gutiérrez, R., 2013).

### **3.- METODOLOGÍA**

#### **3.1.- Materiales**

##### **3.1.1.- Cemento**

El cemento utilizado en la presente investigación es un CPC 30R RS de la marca Tolteca. La nomenclatura anterior significa que se trata de un Cemento Pórtland Compuesto de clase 30R, lo cual implica que la resistencia mínima especificada a 3 días es de 20MPa; además este tipo de cemento es resistente a los sulfatos.



**Figura 16.- Cemento CPC 30R RS**

### **3.1.2.- Substituciones parciales del cemento**

Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad del presente estudio es reducir el consumo del CP en la elaboración de morteros, para lo cual se ha elegido usar materiales que tengan cierto potencial puzolánico, tales como: minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas, residuos industriales y fibras. Todos los materiales de substitución fueron tamizados por la malla 200 para ser utilizados en la elaboración de morteros, debido a que se requiere que éstos sean finamente divididos para que aumente su área superficial y con ello su reactividad puzolánica. Aunado a lo mencionado anteriormente, también se buscó que estos materiales pudieran obtenerse en la región y sus alrededores. En la siguiente figura se muestran la ubicación de donde fueron obtenidos los materiales sujetos de estudio.





## **Figura 17.-Ubicación de los materiales de estudio**

### **3.1.2.1.- Minerales**

Este grupo abarca 3 materiales que fueron activados térmicamente, lo cual ocasiona que su potencial reactivo aumente considerablemente. Dentro de éste están los siguientes materiales:

- **Metacaolín (MK)**, el cual se obtiene de la calcinación a 650-800°C de una arcilla llamada caolín (Sabir, Wild, & Bai, 2001).
- **Perlita natural (PN)** es un mineral de origen volcánico que contiene agua molecular y se expande hasta 20 veces su volumen original cuando se calienta lo suficiente, adquiriendo gran ligereza y capacidad aislante. Este material fue proporcionado por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V. (Arreola Sánchez, M., 2013).



- **Perlita expandida (PE)**, la cual fue proporcionada por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V. misma que la tiene clasificada como “MICROSIL 325 S”, el cual tiene un tamaño partícula controlado de 44 $\mu$ m; es decir que pasa la malla N° 325, según la ficha técnica del producto (Arreola Sánchez, M., 2013).



**Figura 18.- Minerales: a) MK, b) PE y c) PN.**

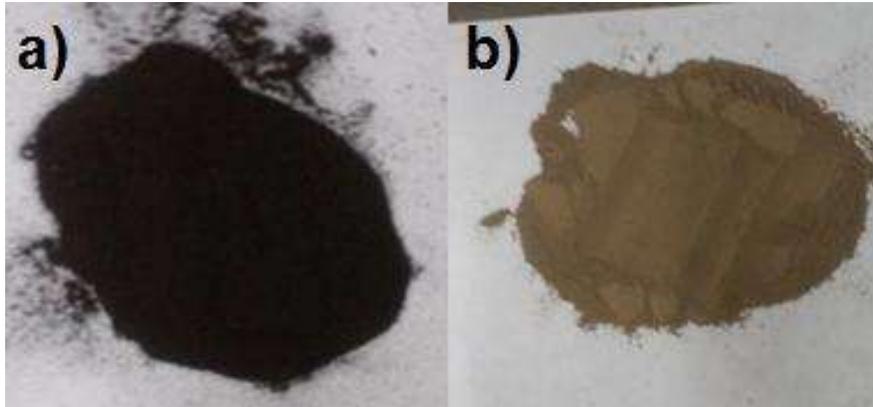
### 3.1.2.2.- Orgánicas

En este grupo se incluye aquellos materiales que son subproductos del algún proceso agroindustrial, los cuales normalmente tiene un alto potencial puzolánico debido a su alto contenido de silicatos. Los materiales pertenecientes a este grupo son:

- **Ceniza de bagazo de caña (CBC)**, que se obtiene de la calcinación del bagazo, que es un residuo fibroso de la molienda de la caña. La obtención de este material fue posible gracias a las facilidades otorgadas por el Ingenio Azucarero “Lázaro Cárdenas”, ubicado en el municipio de Taretan, Michoacán. La actividad principal de éste es la producción de azúcar estándar y refinada (Rodríguez Bucio, 2012).
- **Ceniza de elaboración de ladrillo (CEL)** es producto de la quema de leña utilizada para la cocción de los tabiques de arcilla. La obtención de la CEL se obtuvo en las tabiquerías que se encuentran en comunidades aledañas a la ciudad de Morelia. Esta ceniza es un producto industrial que prácticamente se desecha, exceptuando el uso que le dan los propios



tabiqueros, que la pueden utilizar como desmoldante, durante la elaboración de los ladrillos. La tabiquería se encuentra en las coordenadas  $19^{\circ} 38'15.01''N$  y  $101^{\circ}14'13.46''$ , cuyo territorio corresponde a la tenencia Morelos (Bernabé Reyes, C. , 2012).



**Figura 19.- Orgánicas: a) CBC y b) CEL.**

### **3.1.2.3.- Fibras**

El último grupo corresponde a fibras orgánicas y considera a los materiales que son de origen orgánico o sintético que no hayan sufrido ningún cambio térmico antes de ser considerados como materiales con potencial puzólánico. Este grupo incluye únicamente a las **fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco (FN)**, comúnmente conocidas como fibra de nopal. Este material fue utilizado en polvo (Ver figura 20), tal y como fue proporcionado por industrias “CU-CÚ” (Núñez Hurtado, J.A., 2013).



**Figura 20.- Fibra de nopal ( (Núñez Hurtado, J.A., 2013).**

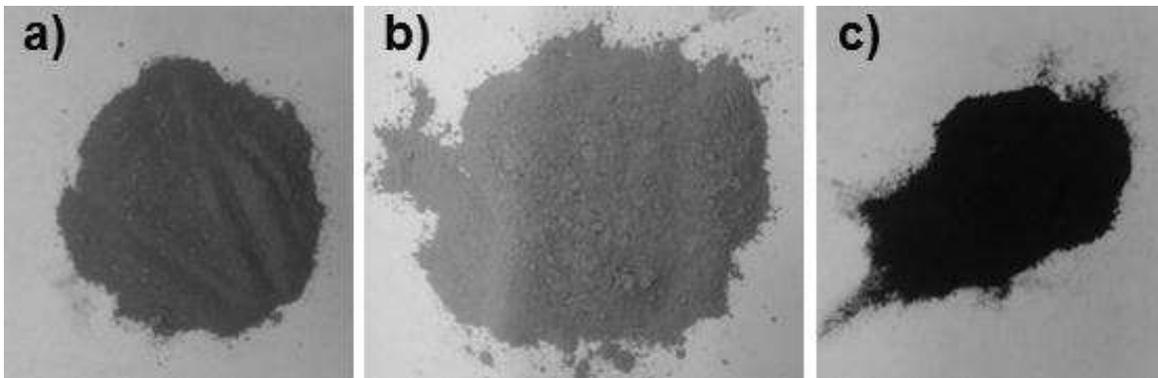
#### **3.1.2.4.- Residuos industriales**

Este grupo contempla materiales que son subproductos de procesos 100% industriales, tales como residuos de plantas cementeras, siderúrgicas, geotérmicas o termoeléctricas. Esta investigación incluye únicamente subproductos de procesos siderúrgicos, tales como:

- **Escoria de alto horno (EAH)**, la cual es resultado de la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flota en el baño de fundición del metal y se separa del mismo para su posterior enfriamiento. La EAH empleada en este trabajo es proveniente de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, localizada al sur del estado y cuya distancia a la capital del Estado es de 401 km. El material viene en forma granular, por lo cual es molido en el laboratorio hasta adquirir un tamaño que pase la malla N° 200 para poder ser utilizado como sustituto del cemento Pórtland (Cruz Jiménez, L., 2012).
- **Ceniza de horno blast oxigen furnace (CBOF)**, que es un subproducto generado en el horno Blast Oxigen Furnace, el cual es utilizado en la fabricación del acero. Este material al igual que la EAH, proviene de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. Viene en forma granular y únicamente fue tamizado hasta una finura que pasa la malla N°200 (Arreola Sánchez, M., 2013).



- **Carbón mineral (CM)**, el cual es un desecho del coque utilizado para la fabricación del acero. Cabe mencionar que este residuo no es utilizado en ningún otro proceso y se tiene como desecho en los tiraderos de la empresa. Este material proviene de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas al igual que la EAH y el CBOF. El material viene en forma granular, pero es molido en el laboratorio hasta adquirir un tamaño que pase la malla N° 200 para poder ser utilizado como sustituto del cemento Pórtland(Cruz Jiménez, L., 2012).



**Figura 21.- Residuos industriales: a) EAH, b) CBOF y c) CM.**

### **3.1.3.- Agregados pétreos**

En la elaboración de morteros se utiliza como agregado pétreo la arena de origen volcánico; el más comúnmente utilizado es la arena negra triturada proveniente de basalto, también la arena de río o las calizas también funcionan. Las arenas de grano redondeado proporcionan un mortero más fácil de trabajar que las arenas trituradas (Rivera Flores, E.), por lo cual resulta adecuado utilizar arenas de río.

En la presente investigación se utilizaron 2 tipos de arena, ambos son materiales de río con un alto contenido de cuarzo, los cuales fueron cribados para cumplir con las especificaciones de la norma (ASTM C109/C 109M-02, 2002) que dice que la arena empleada en la elaboración de especímenes cúbicos de mortero



debe tener características similares a la arena de Ottawa, la cual tiene alto contenido de sílice y su granulometría deberá estar comprendida entre las mallas N°16 y 30 (ASTM C-778-02, 2002).

Las arenas empleadas fueron extraídas de los ríos Lerma y Huajúmbaro, ubicados en Guanajuato y Michoacán respectivamente. La arena del río Lerma fue empleada en morteros con substituciones parciales de CM, EAH, CBOF y FN, mientras que la de Huajúmbaro se utilizó en los morteros de MK, PN, PE, CBC y CEL (Arguello Hernández, S.del C., 2012).



**Figura 22.- Río El Cuervo, Huajúmbaro, Michoacán (Arguello Hernández, S.del C., 2012).**

### **3.1.4.- Agua**

El agua para uso en la construcción debe ser potable, es decir, líquida, transparente, inodora, incolora e insípida y cumplir con las especificaciones de la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004. En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El agua se tomó tal y como venía para así realizar las mezclas lo más apegado posible al agua que se utiliza en la obra, es decir, en condiciones reales (Arreola Sánchez, M., 2013).



### 3.1.5.- Aditivos

De acuerdo con la norma ASTM C 270-14 para relaciones A/C distintas a las ahí estipuladas, deberá cumplirse que la mezcla tenga una fluidez de  $110 \pm 5$ . Debido a que algunos de los materiales de sustitución empleados en este trabajo requieren una alta demanda de agua se utilizó una relación A/C de 1.01; sin embargo, en algunas ocasiones no se lograba la fluidez requerida, por lo que fue necesario agregar un aditivo fluidificante a las mezclas de MK 20 y 30%, PE 20 y 30%, CEL 15, 20 y 30% y FN 2.0%. El aditivo empleado fue SikaCem Fluidificante (Ver figura 23), el cual incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aproximadamente. La dosificación recomendada por el fabricante es de 200g de SikaCem por cada saco de 50kg, es decir 4g por Kg de cemento (Arguello Hernández, S.del C., 2012).



Figura 23.- Fluidificante SikaCem.

## 3.2.- Diseño experimental

### 3.2.1.- Caracterización de materiales

#### 3.2.1.1.- Cementantes



Los materiales cementantes fueron caracterizados mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), la cual es una técnica espectrométrica que permite conocer la composición química de una muestra analizando la emisión de rayos X de los elementos presentes en ella. Las muestras a analizar pueden ser líquidas o sólidas. Una de las ventajas de este tipo de análisis, es que son pruebas "no destructivas". A nivel de cerámica, es una de las formas utilizadas para determinar la composición por óxidos de una arcilla o de una pasta cerámica (Manjón Miguel & Martínez Martínez, 2007).

El fenómeno de fluorescencia de rayos-X se puede describir en dos etapas: excitación y emisión. En la primera etapa si se considera un sistema en su estado fundamental, es decir de menor energía, al aplicarse una energía de una magnitud suficiente, ésta puede ser absorbida por el sistema, pasando éste a un estado de mayor energía o estado excitado debido a la salida de electrones del átomo. A la excitación producida por rayos X que provienen del tubo de rayos-X, se le llama radiación primaria o fotones de rayos-X primarios. En la segunda etapa los estados excitados son inestables, y el átomo tiende a volver a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones desde los niveles más externos hacia los niveles más internos, para ocupar los huecos producidos. Este proceso produce desprendimiento de energía en forma de radiación de rayos-X secundaria llamada fluorescencia de rayos-X (Instituto de Energías Renovables UNAM).

La caracterización se realizó en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X-LUGIs, perteneciente al Departamento de Geoquímica de la UNAM. El análisis se realizó con la muestra fundida en "base seca".

### **3.2.1.2.-Agregados**

Los agregados también fueron caracterizados mediante Fluorescencia de Rayos X al igual que los cementantes. Además, se realizaron las pruebas típicas realizadas a los agregados para saber si son adecuados para su uso en morteros.



Todos los ensayos fueron realizados por triplicado. A continuación se hace una pequeña descripción de éstas:

- ❖ Humedad actual, la cual se realiza para conocer el porcentaje de agua que contiene una muestra en estado natural.
- ❖ Humedad de absorción, la cual se realiza para conocer el porcentaje de agua que es capaz de retener un material.
- ❖ Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S.), la cual nos indica la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen cuando el material no tiene algún acomodo.
- ❖ Masa volumétrica seca varillada (M.V.S.V.), la cual nos indica la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen cuando el material es compactado
- ❖ Sedimentación, la cual nos permite determinar si el contenido de material fino que contiene la arena es aceptable
- ❖ Colorimetría, la cual nos permite determinar si el contenido de materia orgánica presente en la arena es adecuado.
- ❖ Material que pasa la malla 200, la cual nos permite conocer la cantidad de materia fina que contiene la arena.
- ❖ Contenido de terrones de arcilla, la cual nos permite conocer el contenido de éstos en la arena, ya que éstos son partículas de baja resistencia estructural y afectan al mortero.
- ❖ Densidad, la cual es de gran importancia ya que está relacionada con la resistencia.
- ❖ Módulo de finura, el cual deberá estar entre 2.3 y 3.1 para su uso en mortero.
- ❖ Gravedad específica, la cual nos permite conocer la densidad relativa del agregado.

### **3.2.2.- Diseño de mezcla**



Después de varios estudios preliminares, tanto de los materiales de sustitución de CP como de las proporciones adecuadas para la mezcla, se llegó a un diseño de mezcla definitivo, el cual es presentado en la tabla 15. La relación Agua/Cementante (A/C) se fijó en 1.01 (que fue la necesaria para que la mezcla testigo cumpliera con la fluidez de  $110 \pm 5$ ) y el fluidificante se usó únicamente en aquellas mezclas que no cumplieran con la trabajabilidad. La relación Arena/cementante (Arena/C) utilizada fue de 2.75. Los porcentajes de sustitución utilizados fueron de 5, 10, 15, 20 y 30% para MK, PN, PE, EAH, CBOF, CEL, CBC y CM, mientras que para FN se utilizaron sustituciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% con respecto al peso del CP (Arreola Sánchez, M., 2013).

**Tabla 15.- Diseño de mezclas (Arreola Sánchez, M., 2013).**

Parámetro	Sustituciones para CBC, CCV, CEL, PE, PN, CBOF, CM, EAH y MK					
	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	5	10	15	20	30
R. agua/cementante	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
R. arena/cementante	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

Parámetro	Sustituciones para FN					
	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	4.0%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	5	10	15	20	30
R. agua/cementante	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
R. arena/cementante	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

### 3.2.3.- Preparación de mezclas

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se prepararon mezclas de mortero con relaciones A/C de 1.01 y Arena/C de 2.75. Las cantidades necesarias de cementante, agua y arena fueron fijadas de acuerdo con el volumen requerido para el llenado de especímenes por colada. En la tabla 16 se resume las cantidades y relaciones empleadas en la preparación de estas mezclas.

Cada mezcla se realizó dentro de una cubeta de 18 litros de capacidad aproximadamente y fue mezclada mediante un taladro marca Bosch con potencia



de 750W y 3500rpm, adicionado con unas aspas mezcladoras, tal y como se muestra en la figura 24.

**Tabla 16- Cantidades y/o relaciones de las mezclas (Arguello Hernández, S.del C., 2012).**

Elemento	Cantidad
Cementante (g)	1481.0
Agua (ml)	1495.0
Arena (g)	4072.8
Relación A/C	1.01
Relación Arena /C	2.75



**Figura 24.- Equipo y modo de mezclado (Arreola Sánchez, M., 2013).**

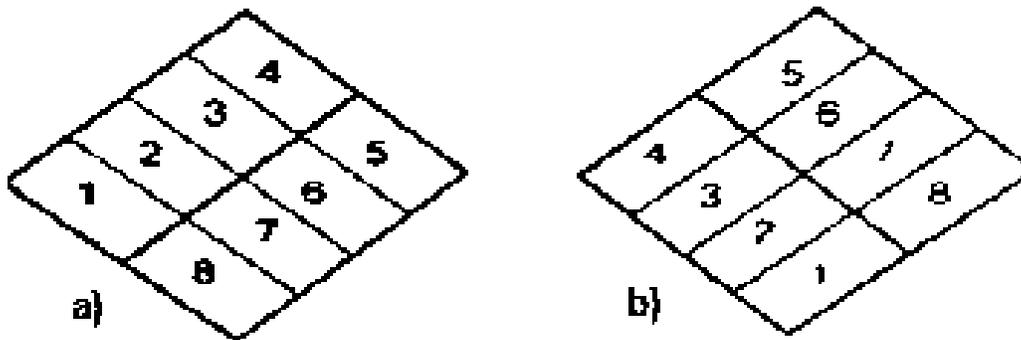
Una vez preparada la mezcla, fue determinada la fluidez de ésta mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 1437 (2001) para verificar que estuviera dentro del rango permitido. Luego se procedió a la elaboración de especímenes.

### **3.2.4.- Elaboración de especímenes**



Una vez preparadas las mezclas de mortero y determinada su fluidez, se procedió a la elaboración de especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos.

La elaboración de especímenes cúbicos se realizó de acuerdo con lo descrito en la norma ASTM C 109M (2012). Moldes de acero inoxidable y bronce, cuyas dimensiones son 5x5x5cm fueron recubiertos con aceite como desmoldante. Posteriormente, fueron llenados en cuatro capas de igual espesor aproximadamente; cada capa de mortero fue apisonada con 8 golpes, tal y como se muestra en la figura XX.



**Figura 25.- Orden de apisonado de capas: a) capas 1 y 3 y b) capas 2 y 4.**

Los especímenes cilíndricos fueron elaborados de acuerdo con la norma NMX-083-ONNCCE. Se utilizaron moldes de acero inoxidable de 5cm de diámetro x 10cm de altura, los cuales fueron recubiertos con aceite como desmoldante. Posteriormente, fueron llenados con la mezcla de mortero. El llenado se hizo en 2 capas de igual espesor aproximadamente, cada capa fue compactada mediante 25 penetraciones con una varilla punta de bala de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro y finalmente el espécimen fue enrasado mediante la varilla punta de bala (Arguello Hernández, S.del C., 2012).



**Figura 26.- Elaboración de especímenes: a) cubos y b) cilindros.**

De acuerdo con las normas ASTM C 511 (2003) y NMX-C-148 (2010), los especímenes permanecieron en el lugar donde fueron elaborados hasta que transcurrieron 24 horas aproximadamente; después de este tiempo los especímenes fueron desmoldados y curados mediante inmersión en agua hasta la edad de prueba. En la siguiente imagen se aprecia el curado de los especímenes mediante inmersión.



**Figura 27.- Curado de especímenes mediante inmersión en agua.**

### **3.2.5.- Ensayos realizados**

Todos los ensayos realizados se hicieron por triplicado a la edad de 1000 días, excepto el ensayo de compresión que no fue posible determinarlo a esta edad. Sin embargo, teniendo en cuenta que la resistencia a la compresión



después de cierta edad no varía significativamente, se decidió tomar los datos reportados a 360 días en investigaciones anteriores.

### **3.2.5.1.- Absorción capilar**

La absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el hormigón se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agresivos ambientales.

Este ensayo se realizó en 3 especímenes cilíndricos de 5cm. de espesor y siguiendo el método propuesto por Göran Fagerlund, el cual consiste en lo siguiente:

1. Las muestras se secan en el horno a una temperatura de 50°C hasta que la masa sea constante.
2. Las caras laterales curvas de las muestras se recubren con parafina, con la finalidad de que la absorción del agua sea unidireccional.
3. Se determina el peso inicial de las muestras ( $W_0$ ).
4. Se colocan las muestras sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, teniendo cuidado de que el nivel de agua sólo llegue a 3mm por encima de la cara inferior de la probeta de ensayo.
5. El cambio de peso ( $W_t - W_0$ ) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen (A) se registra a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48 horas, etc. hasta que no haya variación en la masa ( $W_t$ ).



**Figura 28.- Método propuesto por Göran Fagerlund (Göran, 1986)**

Los parámetros obtenidos de este ensayo se calculan con las fórmulas siguientes:

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

donde z representa la profundidad de penetración del agua al tiempo t.

$$k = \frac{Wt - W_0/A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2})$$

$$\varepsilon e = \frac{K\sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$

El coeficiente k puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico peso  $(Wt - W_0)/A$  en función de  $\sqrt{t}$ .

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando  $z=H$ .

Con la información anterior la Sorción Capilar, se calcula como:



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

De acuerdo con la Red temática DURAR (DURAR.CYTED, 1998), se puede realizar el ensayo de absorción capilar siguiendo la metodología propuesta por Göran Fagerlund (Göran, 1986), basada en la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y hormigones a través de 3 coeficientes: resistencia a la penetración del agua (m), coeficiente de absorción capilar (K) y porosidad efectiva ( $\epsilon e$ ). Los criterios de evaluación establecidos por esta Red temática indican que para un concreto durable, es decir, con una relación A/C < 0.4, se recomienda:

- Sorción capilar  $S \leq 3 \text{ mm/h}^{1/2}$  ( $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ ) para espesor de recubrimiento de 30mm en ambientes severos; en medios menos severos puede ser hasta  $6 \text{ mm/h}^{1/2}$  ( $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ ). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente.
- En cuanto al porcentaje de porosidad:

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

### **3.2.5.2.- Resistividad eléctrica húmeda de los morteros a 1000 días de su fabricación**

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el  $\text{K}\Omega\text{-cm}$  u  $\Omega\text{-m}$ . En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el



laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, Martínez Molina, Lomelí González, & Pérez Gallardo, 2010).

La resistividad eléctrica del concreto puede variar en un amplio intervalo, de  $10^1$  a  $10^5 \Omega\cdot m$ . En general, la resistividad eléctrica del concreto aumentará con el tiempo. Los aumentos serán mayores para el curado al aire que el curado húmedo. Esto se debe a que, para el curado húmedo el aumento de la resistividad se producirá principalmente debido al aumento de la hidratación del cemento y el llenado de los poros con productos de hidratación, mientras que para el curado al aire, la resistividad aumentará debido a la pérdida de humedad del concreto (Polder, Andrade, Elsener, J., Gulikers, & Weidert, 2000).

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los mostrados en la tabla siguiente:

**Tabla 17.- Riesgo de corrosión de acuerdo con el valor de resistividad eléctrica (DURAR.CYTED, 1998).**

Resistividad eléctrica	Riesgo de corrosión
$\rho > 200k\Omega\cdot cm$	Poco
$200 > \rho > 10k\Omega\cdot cm$	Moderado
$\rho < 10k\Omega\cdot cm$	Alto

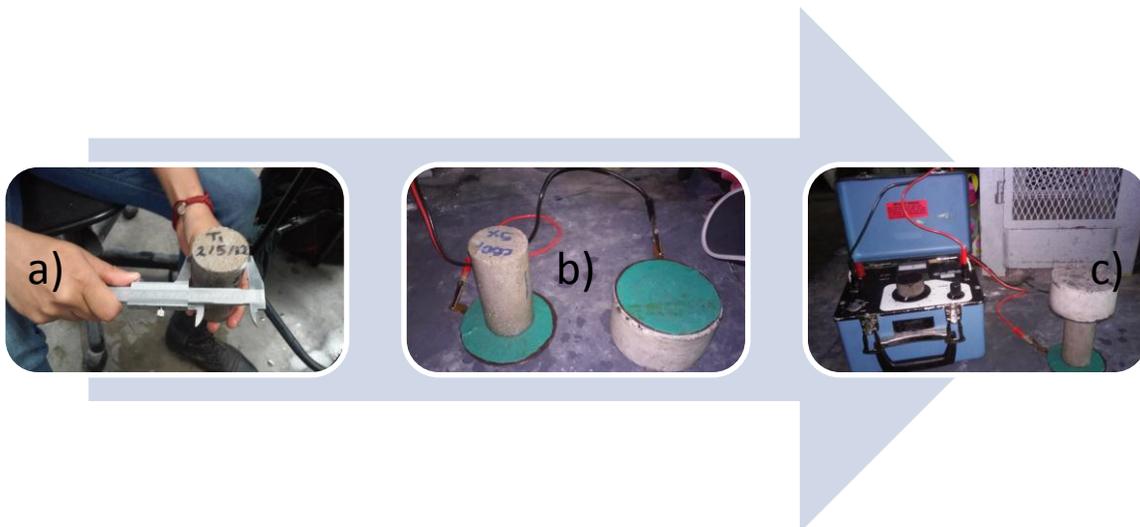
Deberá tenerse en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que controla la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el hormigón, por lo tanto no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura (DURAR.CYTED, 1998).



En la realización de este ensayo se utilizó un resistómetro marca Nilsson, mediante el cual se determina la resistividad en suelos y materiales porosos. El procedimiento empleado es acorde con la norma ASTM G57-12 (ASTM G57-12, 2012). Enseguida se resume el método:

1. Las dimensiones son determinadas; en este caso el diámetro.
2. Son revisadas la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. La muestra es montada en el equipo.
4. Las caras de la muestra a realizarle la prueba son colocadas entre dos esponjas húmedas y éstas últimas sobre las placas de cobre.
5. La muestra es sometida a una corriente y voltaje dados, mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras de la muestra.

Es importante mencionar que las muestras se conservaron saturadas hasta la realización de la prueba. En la imagen siguiente se muestra de manera resumida el procedimiento correspondiente a este ensayo.



**Figura 29.- Determinación de resistividad eléctrica: a) medición del diámetro, b) colocación de muestra sobre esponja y placa metálica y c) montaje de la muestra y aplicación de corriente.**



El valor obtenido en el equipo es resistencia eléctrica y es dado en  $\Omega$  o  $K\Omega$ . Para determinar la resistividad eléctrica se utiliza la fórmula siguiente:

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

Dónde:

$\rho$  = resistividad eléctrica en  $K\Omega$ -cm ( $\Omega$ -m)

Re = resistencia eléctrica que el equipo proporciona en  $K\Omega$  o  $\Omega$ .

A = área transversal de la muestra en  $cm^2$ .

L = longitud de la muestra en cm.

### **3.2.5.3.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los morteros a 1000 días de su fabricación**

Este método es una alternativa de NDT para evaluar la calidad del concreto, la cual se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La idea básica del método de velocidad de pulso ultrasónico es establecer que la velocidad de un pulso de onda de compresión a través de un medio depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio (Malhotra & Carino, 2004).

La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda. La determinación de la velocidad de pulso



ultrasónico nos da una idea de la homogeneidad del material, la cual es una cualidad del concreto por lo la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas (DURAR.CYTED, 1998).

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200m/s. Por tanto, para un trayecto de 300mm el tiempo de viaje es aproximadamente de 70 a 85 $\mu$ s. Es obvio que el instrumento debe ser muy exacto para mediciones con pequeños tiempos de tránsito. En la Red temática DURAR se presentan los criterios de evaluación para determinar la calidad del concreto, los cuales son presentados en la tabla 18.

**Tabla 18.- Criterios de evaluación mediante velocidad de pulso ultrasónico (DURAR.CYTED, 1998).**

<b>Velocidad de propagación (m/s)</b>	<b>Calidad del concreto</b>
<2000	Deficiente
2001-3000	Normal
3001-4000	Alta
>4000	Durable

Este ensayo se realizó en 3 especímenes cilíndricos de acuerdo con la norma ASTM C 597-09 (ASTM C 597-09, 2009).

El equipo utilizado en este ensayo fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 $\mu$ s; velocidad



de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 $\mu$ s; salida del transmisor hasta 1500V.

El procedimiento consiste en los siguientes pasos:

1. Las dimensiones de la muestra son determinadas; en este caso la longitud.
2. El equipo es calibrado cada día de prueba.
3. Se preparan las superficies de la muestra; en este caso se aplicó gel sobre éstas para lograr un mejor contacto entre los transductores y las caras de la muestra.
4. La muestra es colocada entre los transductores y se hace transitar un pulso electrónico a través de la muestra.
5. La velocidad de pulso electrónico medida con el equipo es registrada.

Es importante mencionar que al igual que en la determinación de resistividad eléctrica, en este ensayo las muestras también se conservaron saturadas hasta la realización de la prueba. En la figura 30 se aprecia el procedimiento descrito anteriormente.

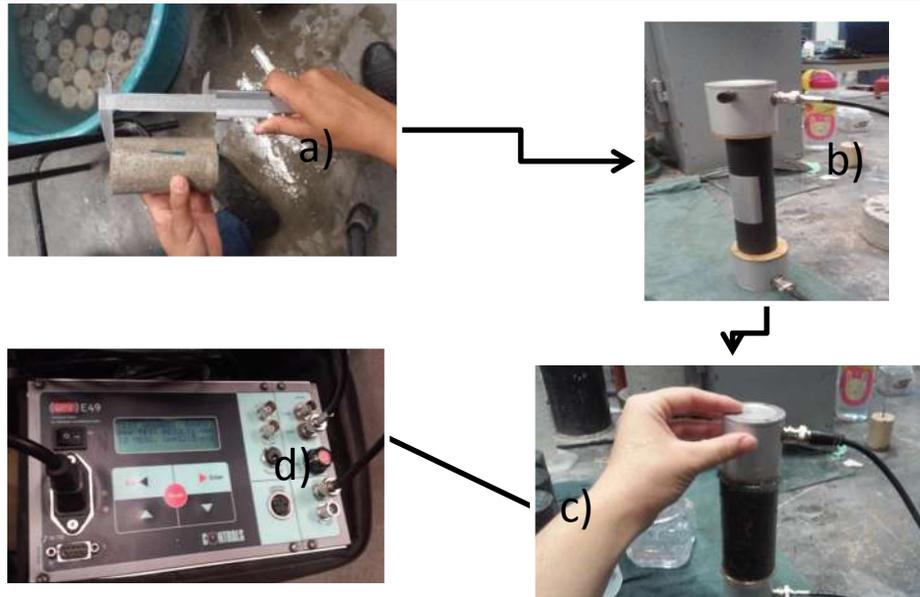


Figura 30.- Determinación de velocidad de pulso ultrasónico: a) determinación de dimensiones, b) calibración del equipo, c) tránsito del pulso a través de la muestra y d) registro de velocidad.

### 3.2.5.4.- Resistencia a la compresión de los morteros a 360 días de su fabricación

La determinación de la resistencia a la compresión se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C 109 / C 109M (2002), la cual especifica que esta prueba debe realizarse en especímenes cúbicos de 5cm de lado.



**Figura 31.- Determinación del esfuerzo a la compresión en cubos: a) cubo sujeto a compresión y b) aplicación de carga de compresión (Arguello Hernández, S.del C., 2012).**

La máquina de carga utilizada fue la Tinius Olsen en el rango de 5000kg y cuya aproximación es de 0.5kg. La aplicación de la carga fue a una velocidad constante hasta la falla del espécimen. La carga de falla fue registrada, para poder determinar el esfuerzo de compresión con la fórmula siguiente:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Dónde:

$\sigma$  = esfuerzo a la compresión en kg/cm<sup>2</sup>.

P= carga en kg.

A= área de la muestra en cm<sup>2</sup>.



## 4.-RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1.- Caracterización de materiales

#### 4.1.1.- Cementantes

En la tabla 19 se muestran los resultados de los análisis químicos de las adiciones estudiadas en esta investigación. Como se comentó en el capítulo anterior, estas pruebas químicas para obtención de los óxidos principales de los materiales utilizados se realizaron en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X-LUGIs, perteneciente al Departamento de Geoquímica de la UNAM, utilizando una muestra fundida base seca para el análisis.

**Tabla 19.- Composición química de los materiales cementantes.**

Compuesto	CPC 30R RS	MK	PE	PN	CBC	CEL	EAH	CF	CM	FN
SiO <sub>2</sub>	27.93	49.75	73.59	72.20	56.62	19.10	36.38	14.55		
TiO <sub>2</sub>	0.20	1.53	0.13	0.12	0.42	0.32	0.56	0.83		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.44	44.71	13.43	13.58	4.29	8.77	10.63	4.29		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.22	0.51	1.17	1.01	5.49	2.01	0.34	26.77		
MnO	0.08	0.01	0.05	0.07	0.23	0.54	0.42	2.42		
MgO	1.30	0.16	0.20	0.54	1.57	4.24	10.11	6.00		
CaO	49.77	0.04	1.33	1.05	2.01	27.87	37.55	37.46		
Na <sub>2</sub> O	0.67	0.23	2.92	3.22	0.24	0.55	0.30	0.03		
K <sub>2</sub> O	1.23	0.14	5.01	4.29	2.18	6.05	0.42	0.02		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.03	0.02	0.03	0.00	1.76	0.05	0.81		
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.59	94.97	88.18	86.79	66.40	29.87	47.35	45.61		
PXC	5.12	0.77	1.18	3.99	26.65	27.27	-0.72	4.79	86.00	88.00
SO <sub>3</sub>	3.37				0.24	0.80	1.93	0.80		

La norma ASTM C 618-03 indica que un material pueda considerarse puzolana clase N, si el contenido de óxidos responsables de la puzolanidad (SiO<sub>2</sub>



+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) corresponde al menos al 70% de su composición química, su contenido de SO<sub>3</sub> no excede el 4.0% y las pérdidas por calcinación (PXC) no rebasan el 10%. De acuerdo con esto, los materiales que corresponde a esta clasificación son: MK, PE y PN, por dicha razón se espera que las substituciones hechas con estos materiales tengan un comportamiento adecuado a lo largo del tiempo.

En el caso de las puzolanas clase C, su composición deberá estar formada por al menos 50% de óxidos, contenido máximo de SO<sub>3</sub> de 3.0% y PXC no mayores que 6%. Dentro de esta clasificación se podría incluir la CBC, ya que cumple todos los requisitos excepto el de PXC. La EAH también podría clasificarse como puzolana C, debido a que cumple con los requerimientos de contenido de SO<sub>3</sub> y pérdidas por calcinación; además su contenido de óxidos es muy cercano al 50% mínimo requerido. Si bien estos dos materiales no cumplen cabalmente todos los requerimientos químicos para ser considerados puzolanas, habrá que evaluar su comportamiento físico-mecánico en el tiempo y ver si es factible usarlos.

Hay otros materiales que no pudieron clasificarse como puzolanas, tal es el caso de CEL y CBOF. Sin embargo, algunos de éstos tienen un contenido adecuado de otros componentes que también son importantes en el buen desempeño de los concretos, tal es el caso del CaO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O, la porción alcalina de los óxidos de esta materia prima que proporciona una protección contra a la corrosión de acero que se embeba en el material base cemento que posee estas adiciones.

Por último, no se pudo determinar la composición química de CM y FN, debido a que las pérdidas por calcinación fueron muy grandes. En este caso, sólo queda analizar su comportamiento en los diferentes ensayos realizados y determinar si estas dos adiciones orgánicas puedan mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los morteros base cemento fabricados con ellos.

#### **4.1.1.- Agregados**



En la tabla 20 se muestran los resultados de los análisis químicos de los agregados utilizados en esta investigación, los cuales al igual que las adiciones fueron obtenidos mediante Fluorescencia de Rayos X . Mientras que en la tabla 21 se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas típicas realizadas a los agregados para determinar si son aptos para su uso en morteros, así como la normativa con la cual fueron realizadas.

**Tabla 20.-Composición química de los agregados.**

Compuesto	Arena de Huajúmbaro	Arena del Río Lerma
SiO <sub>2</sub>	78.185	77.569
TiO <sub>2</sub>	0.203	0.282
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.557	10.674
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.567	2.348
MnO	0.03	0.025
MgO	0.239	0.479
CaO	1.015	1.338
Na <sub>2</sub> O	2.666	2.232
K <sub>2</sub> O	3.577	3.083
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.036	0.075
PXC	1.19	2.2
SO <sub>3</sub>		

**Tabla 21.- Caracterización de los agregados (Bernabé Reyes, C., 2015).**

Prueba	Arena de Huajúmbaro	Arena del Río Lerma
Humedad actual (NMX-C-166-ONNCCE-2006)	0.75%	0.78%



Humedad de absorción (NMX-C-165-ONNCCE-2004)	3.18%	1.89%
M.V.S.S. (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	1.226 g/cm <sup>3</sup>	1.383 g/cm <sup>3</sup>
M.V.S.V. (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	1.331 g/cm <sup>3</sup>	1.462 g/cm <sup>3</sup>
Sedimentación	Aceptable (<30ml)	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE-1997)	Aceptable (escala 3)	Aceptable (escala 3)
Contenido de material fino (pasa malla 200) (NMX-C-084-ONNCCE-2006)	1.98%	ND
Contenido de terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE-2004)	2.43%	7.50%
Densidad	2.31 g/cm <sup>3</sup>	2.4 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de finura	2.42 (mediana)	2.03 (fina)
Gravedad específica	2.36	2.48

Como puede apreciarse en la tabla 20, la composición química de ambos agregados es muy similar y además tienen alto contenido de sílice. De acuerdo con la caracterización típica de los agregados presentada en la tabla 21, éstos son idóneos para su utilización en morteros. También se aprecia, que el agregado del Río Lerma presenta mayor densidad, M.V.S.S. y M.V.S.V. que el agregado de Huajúbaro, lo cual podría repercutir en su resistencia mecánica. Por otro lado, el agregado del Lerma presenta un alto porcentaje de terrones de arcilla, los cuales son partículas de baja resistencia estructural y podrían influir en la resistencia a la compresión de los morteros elaborados con esta arena.

#### **4.2.- Absorción capilar de los morteros a 1000 días de su fabricación**

La Tabla 22 en conjunto con la Figura 32 presenta una serie de datos resultantes de la prueba de Fagerlund de acuerdo al procedimiento detallado en la sección 3.2.4.1. A continuación se presentan como ejemplo los datos



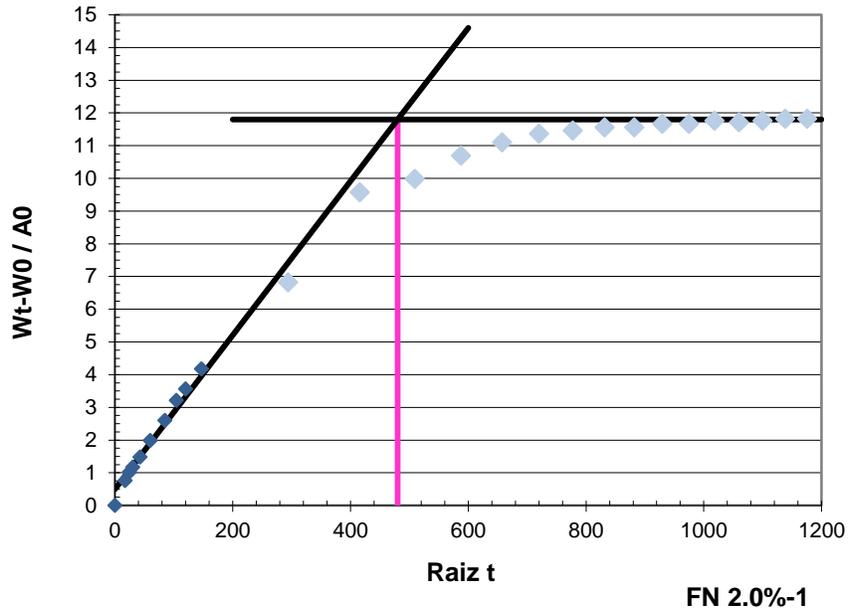
correspondientes a la probeta FN 2.0%-1; sin embargo, este procedimiento se hizo para cada probeta de las diferentes substituciones.

**Tabla 22.-Datos resultantes de ensayo de absorción capilar para la probeta FN 2.0%-1.**

Wo (kg) 0.15230		Área (m <sup>2</sup> ) 0.00196		
Tiempo	Raíz cuadrada	Altura	Wt	Wt -Wo/Ao
seg	(seg) <sup>0.5</sup>	(z)	kg	kg/m <sup>2</sup>
0	0.000	0.000	0.1523	0.000
300	17.321	0.048	0.1538	0.764
600	24.495	0.048	0.1543	1.019
900	30.000	0.048	0.1546	1.171
1800	42.426	0.048	0.1552	1.477
3600	60.000	0.048	0.1562	1.986
7200	84.853	0.048	0.1574	2.597
10800	103.923	0.048	0.1586	3.209
14400	120.000	0.048	0.1593	3.565
21600	146.969	0.048	0.1605	4.176
86400	293.939	0.048	0.1657	6.823
172800	415.692	0.048	0.1711	9.575
259200	509.117	0.048	0.1719	9.982
345600	587.878	0.048	0.1733	10.695
432000	657.267	0.048	0.1741	11.103
518400	720.000	0.048	0.1746	11.357
604800	777.689	0.048	0.1748	11.459
691200	831.384	0.048	0.1750	11.561
777600	881.816	0.048	0.1750	11.561
864000	929.516	0.048	0.1752	11.663
950400	974.885	0.048	0.1752	11.663
1036800	1018.234	0.048	0.1754	11.765
1123200	1059.811	0.048	0.1753	11.714
1209600	1099.818	0.048	0.1754	11.765
1296000	1138.420	0.048	0.1755	11.816



1382400	1175.755	0.048	0.1755	11.816
1468800	1211.941	0.048	0.1755	11.816



**Figura 32.- Gráfica de ensayo de absorción capilar para la probeta FN-2.0%.**

Se observa que la tendencia de los puntos es en forma curva conforme transcurre el tiempo. Esto significa que tiene alta resistencia a la penetración del agua, lo cual indica que tiene un porcentaje bajo de porosidad efectiva y por tanto, podría ser una substitución adecuada para proveer durabilidad.

En la Tabla 23 se muestran las estimaciones obtenidas usando los valores de la Tabla 22 y las ecuaciones de la Sección 3.2.4.1 para la resistencia a la penetración del agua (m), coeficiente de absorción capilar (k), porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) y absorción capilar (S), de la probeta FN 2.0%-1.

**Tabla 23.- Valores estimados de los parámetros del ensayo de absorción capilar para FN 2.0%-1**

Espécimen	Resistencia a la	Coeficiente de	Porosidad	Absorción capilar
-----------	------------------	----------------	-----------	-------------------



	penetración del agua (m)	absorción capilar (k)	efectiva ( $\epsilon\epsilon$ )	(S)
FN 2.0%	3.70E+07	0.0246	14.99	1.64E-04

#### 4.2.1.- Absorción capilar de los morteros testigo.

Antes de evaluar los parámetros de absorción capilar de agua de cada grupo de adiciones, se presentarán los resultados comparativos entre testigos en cada ensayo, para así corroborar que las dos arenas utilizadas de bancos diferentes, no generaron diferencias significativas entre los valores medidos de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros fabricados con ellas.

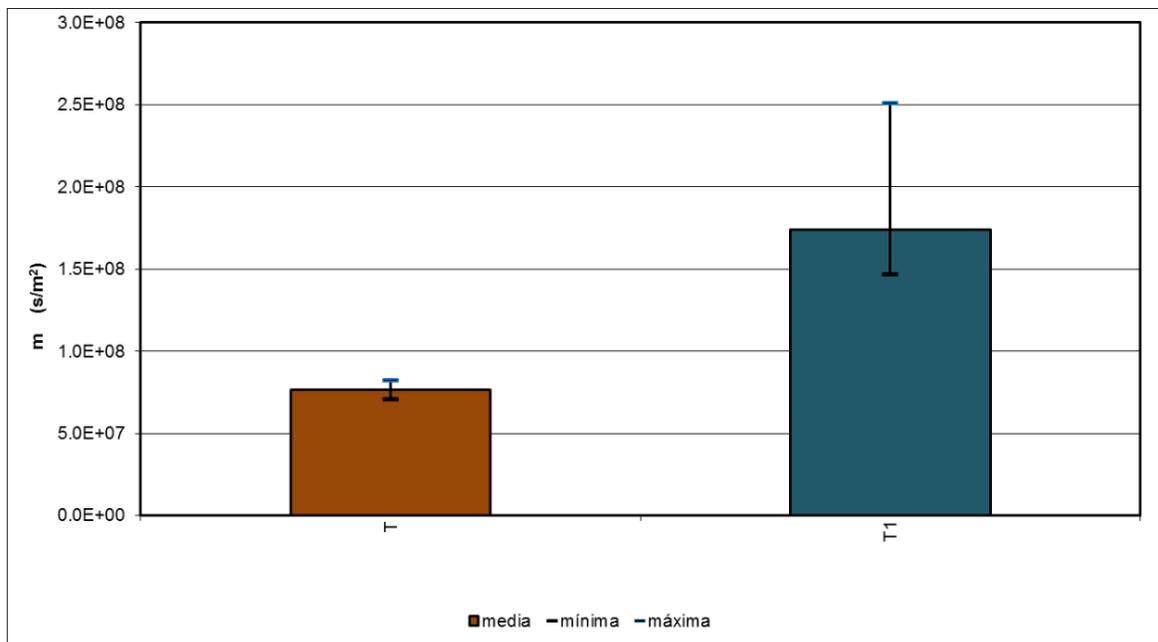


Figura 33. Resistencia a la penetración del agua (m) T vs T1.

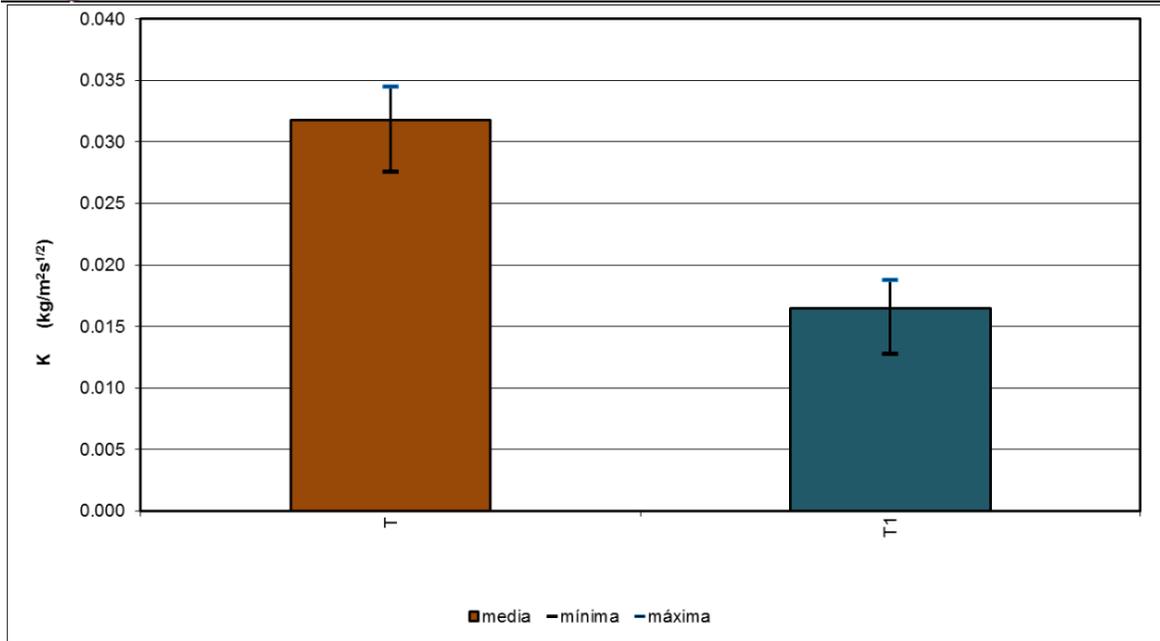


Figura 34.- Coeficiente de absorción capilar (k) T vs T1.

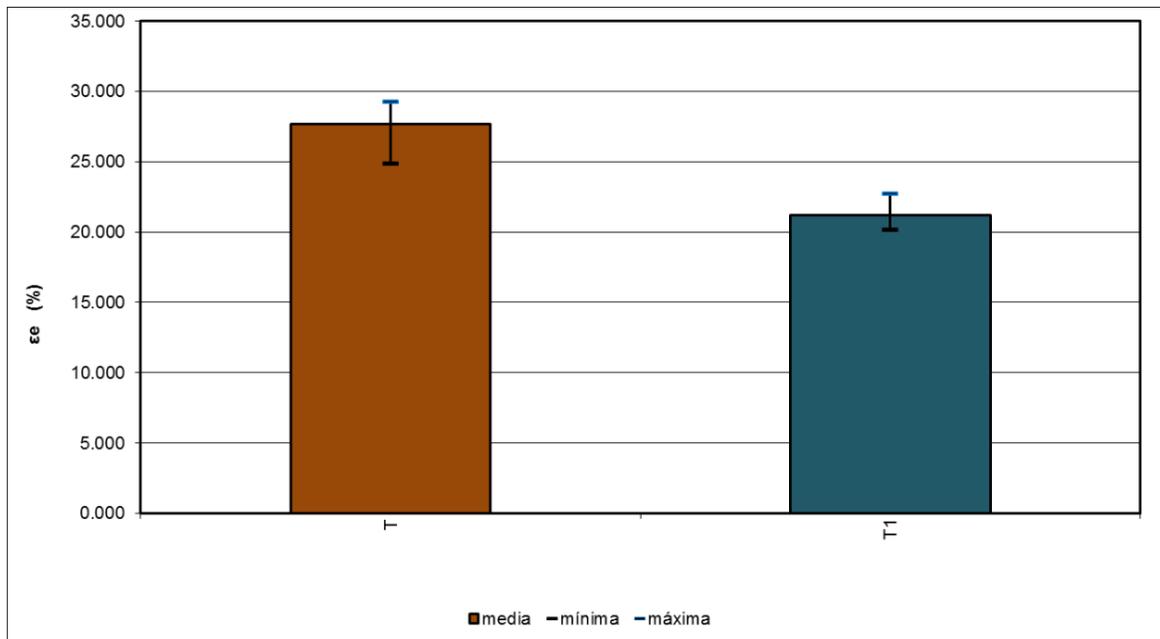
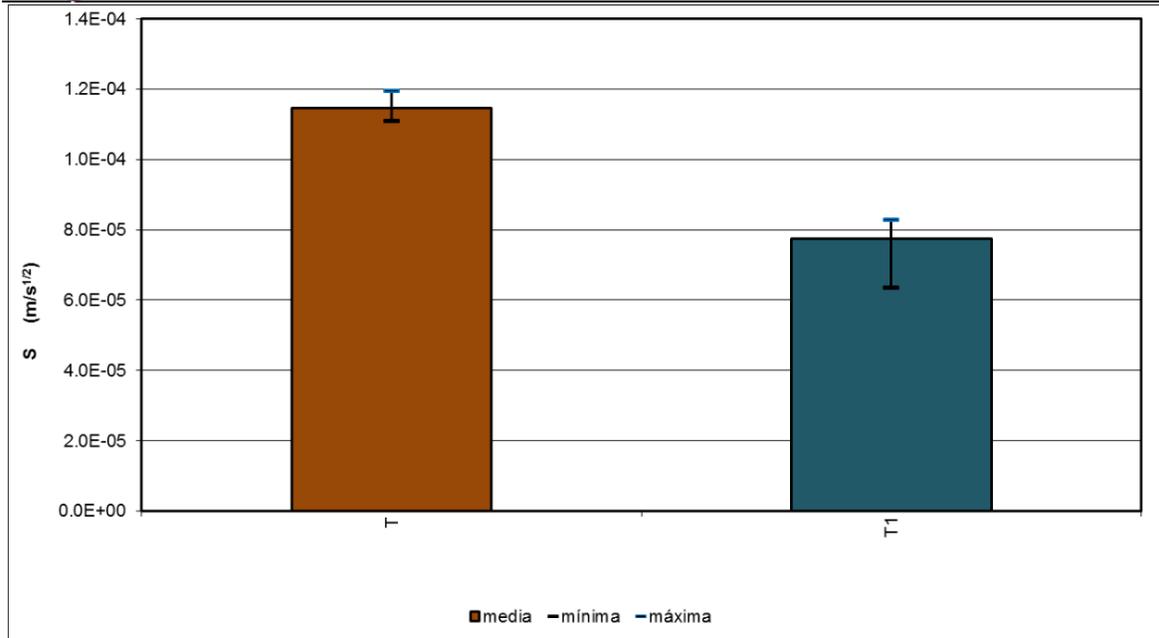


Figura 35.- Porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) T vs T1.



**Figura 36. Sorción capilar (S) T vs T1.**

Como puede apreciarse en las figuras 27 a la 30, en el ensayo de absorción capilar si se presentan diferencias significativas entre los morteros testigo (sin adiciones) elaborados con arena del Río Huajúbaro (T) y de Lerma (T1). Los morteros T1 presentaron mayor resistencia a la penetración del agua, mientras que su coeficiente de absorción capilar, su porosidad efectiva y la sorción capilar resultaron menores que las arrojadas por T. Lo cual significa que los morteros elaborados con arena del Río Lerma, podrían ser más adecuados cuando se requiere disminuir la absorción capilar de agua y evitar que agentes agresivos ingresen a la matriz de cemento más rápidamente.

Respecto a la variabilidad entre muestras de mortero, las correspondientes a T1 presentaron la mayor variación en la determinación de todos los parámetros de este ensayo, ya que como puede observarse en las figuras anteriores, el rango entre valores mínimo y máximo fue mayor en los testigos T1 con respecto a los testigos T.



Una vez demostrado la diferencia entre los valores de los dos testigos, se harán ahora las comparativas de los parámetros de absorción capilar de agua (o método de Fagerlund) entre cada uno de los morteros testigo y los morteros con adiciones fabricados con la arena similar a los testigos mencionados. A continuación se mostrarán las Figuras 37 a la 44 comparando los resultados obtenidos de los parámetros de absorción capilar de agua, de las mezclas fabricadas con la arena del Río Huajúmbaro y las Figuras 45 a la 52 comparando los resultados entre sí de los morteros fabricados con la arena de Lerma. Las gráficas mostradas en estas figuras están representando el valor promedio como la barra de color (histograma), y los valores mínimo y máximo de cada mezcla por las líneas inferior y superior, respectivamente, que aparecen sobrepuestas a la barra del histograma.

#### 4.2.2.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones minerales

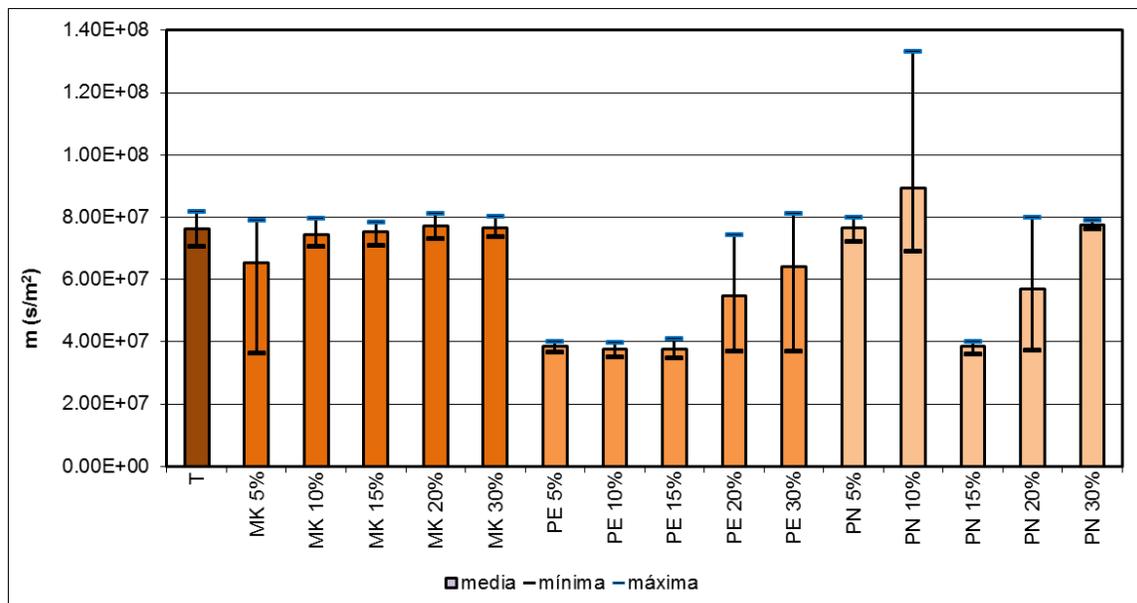


Figura 37.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones minerales.

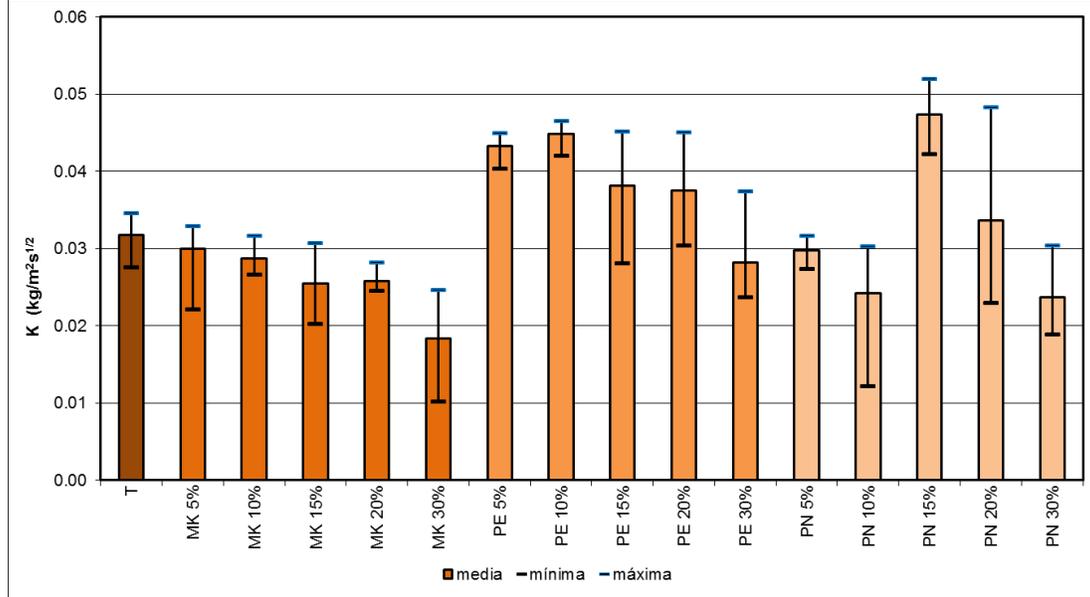


Figura 38.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones minerales.

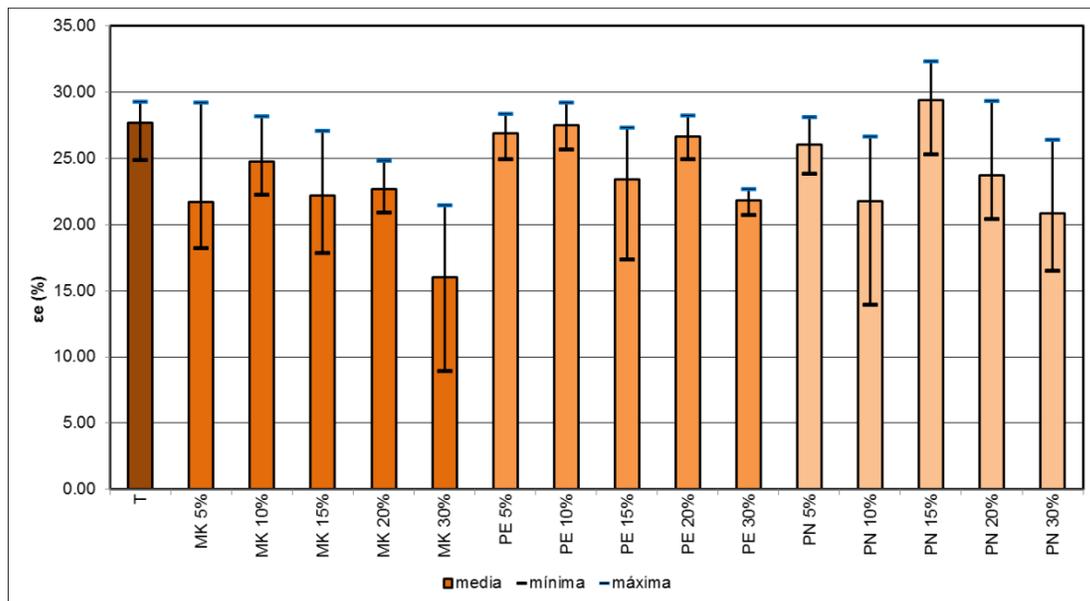
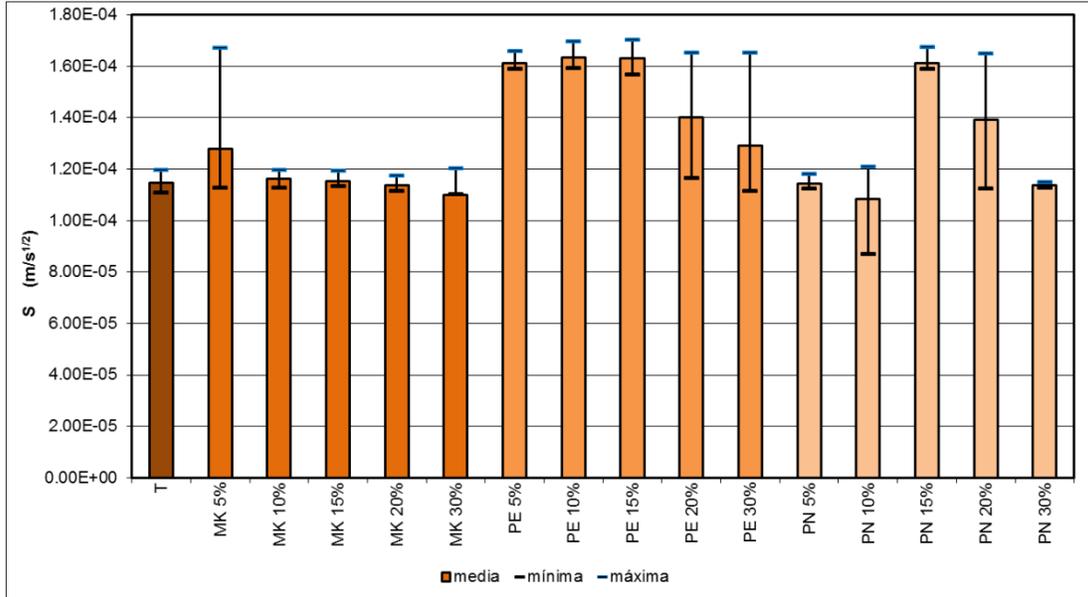


Figura 39.- Figura 34.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones minerales.



**Figura 40.- Sorción capilar en morteros con sustituciones minerales.**

Los resultados obtenidos en este ensayo, muestran que las sustituciones que presentaron mayor resistencia a la penetración del agua fueron PN 10 y 30%, MK 20 y 30%. Mientras que las sustituciones de 5,10 y 15% de PE únicamente resistieron la mitad de lo que presentó el testigo (T). En el caso del coeficiente de absorción capilar, éste fue menor en las sustituciones de 15,20 y 30% de MK, 30% de PE, 10 Y 30% de PN; mientras que las sustituciones de 15% de PN, 5 y 10% de PE fueron muy superiores al testigo. Los resultados de porosidad efectiva concordaron con los del coeficiente de absorción capilar, siendo la sustitución de 30% de MK la que presentó menor porosidad, y la de 15% PN tuvo la mayor porosidad. Respecto a la sorción capilar, MK 30%, PN 10 y 30% presentaron los valores más bajos. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, puede decirse que las sustituciones que tuvieron el comportamiento más adecuado fueron MK 30%, PN 10% y 30%, lo cual resulta lógico teniendo en cuenta que de acuerdo con la composición química estos materiales son puzolánicos. Sin embargo, en algunos de los resultados hubo mucha variación entre muestras, por lo cual sería



conveniente repetir la prueba para las sustituciones que se encuentren en este caso.

#### 4.2.3.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones orgánicas.

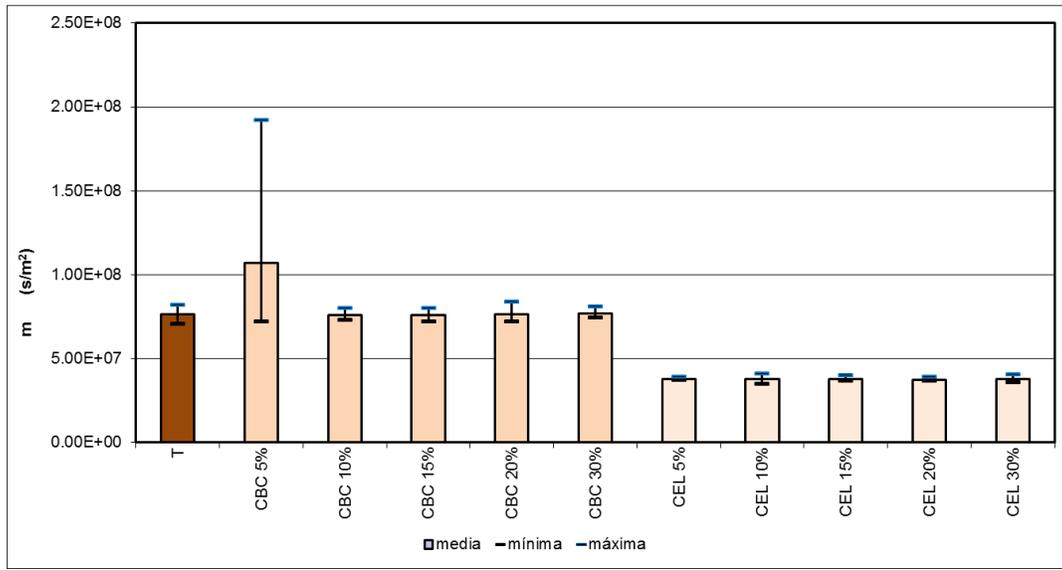


Figura 41.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones orgánicas.

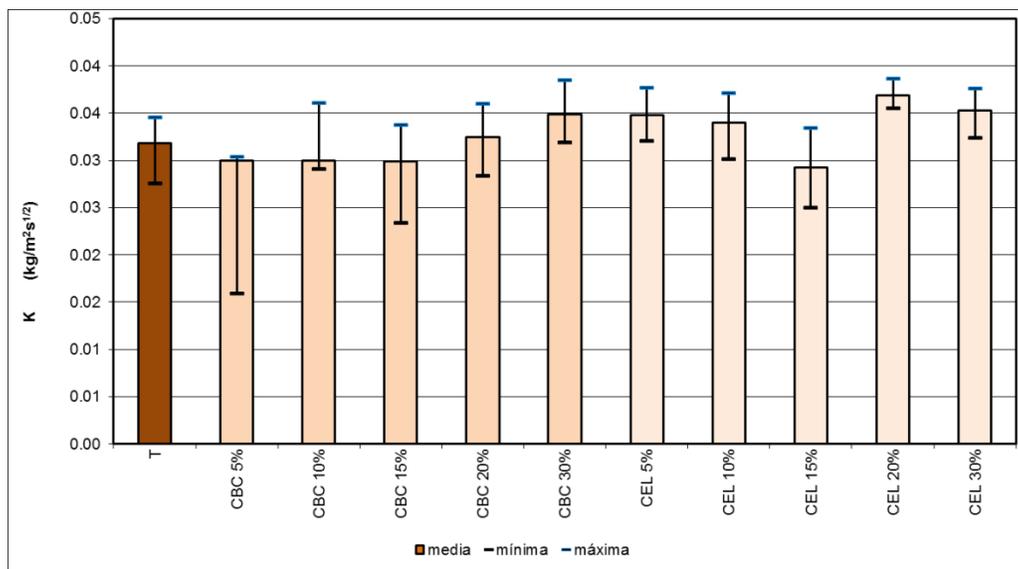


Figura 42.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones orgánicas.

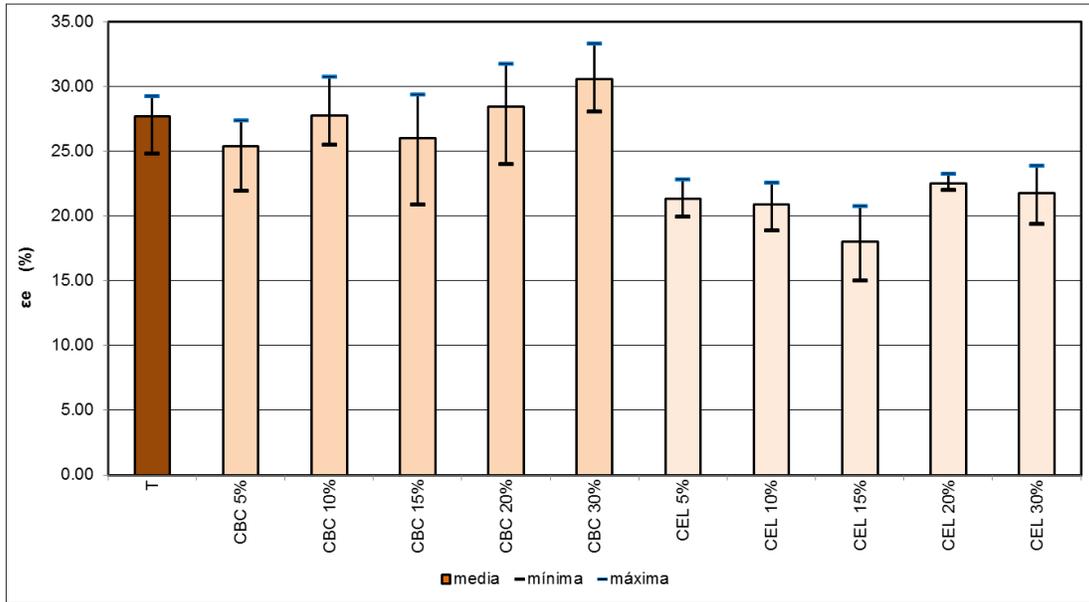


Figura 43.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones orgánicas.

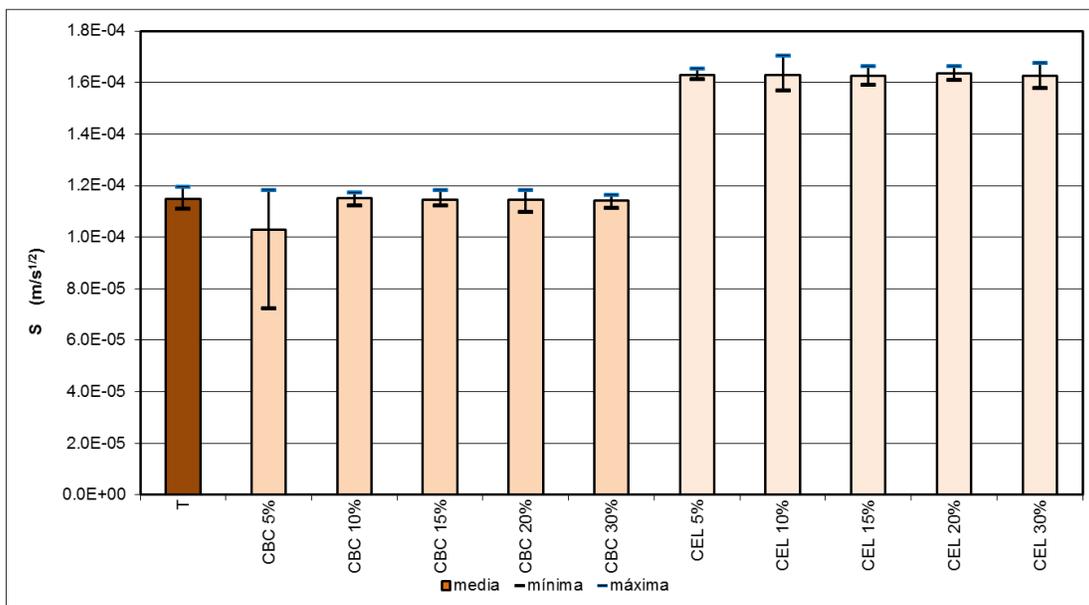


Figura 44.- Sorción capilar en morteros con sustituciones orgánicas.



La única sustitución orgánica que presentó mayor resistencia a la penetración del agua fue la de 5% de CBC, mientras que todas las sustituciones de CEL fueron muy inferiores al testigo. En lo que se refiere al coeficiente de absorción capilar, CEL 15%, CBC 5, 10 y 15% fueron las que presentaron los valores más pequeños. Todos las sustituciones orgánicas presentaron una porosidad efectiva inferior al testigo, excepto CBC 30%. En cuanto a la sorción capilar, todas las sustituciones de CEL fueron muy superiores al testigo; mientras que las sustituciones de CBC fueron inferiores, siendo el 5% de CBC la que resultó menor. De acuerdo con lo mencionado arriba, es difícil identificar los mejores resultados, ya que los resultados no son muy claros. Sin embargo, podría decirse que las sustituciones de 5, 10 y 15% de CBC mejoran las propiedades del mortero. Respecto a la variación de resultados entre muestras no fue muy grande, a excepción de las muestras de CBC 5%.

#### 4.2.4.- Absorción capilar de los morteros con sustitución de fibra de nopal

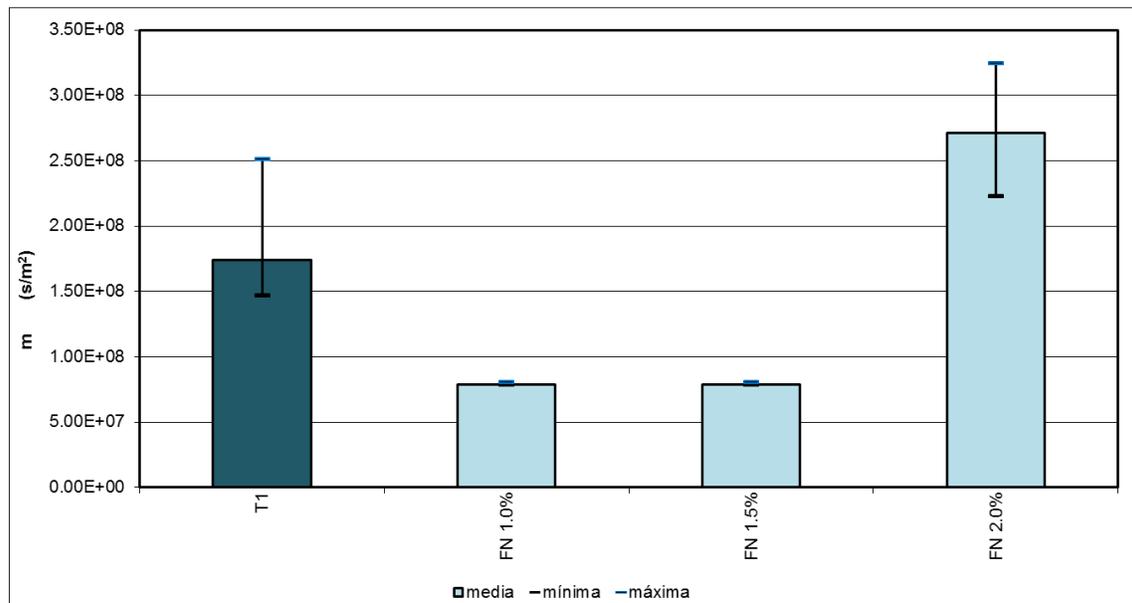


Figura 45.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones de fibra de nopal.

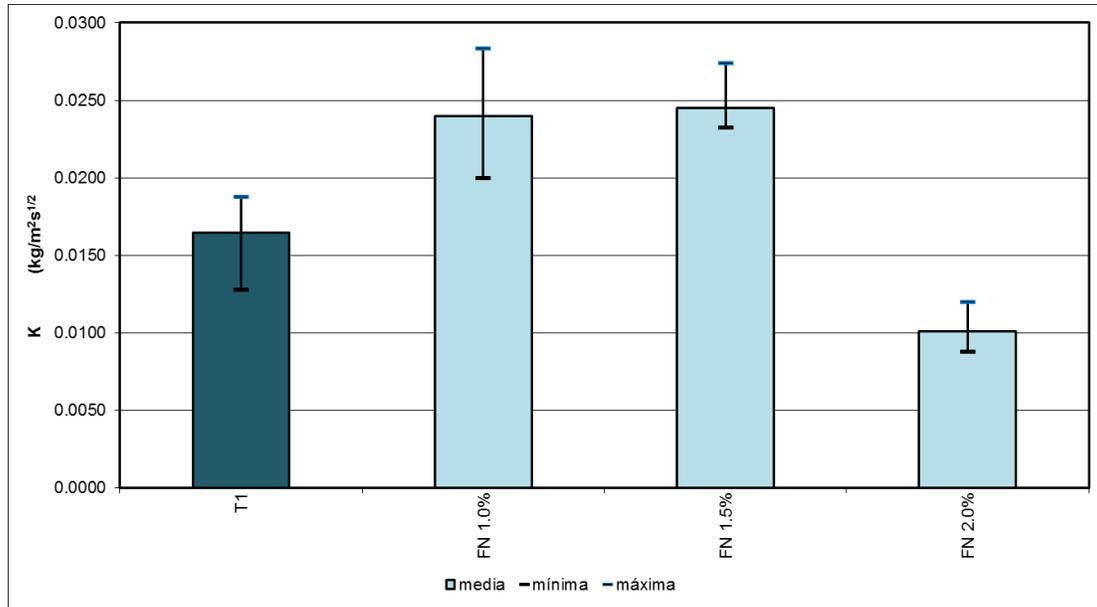


Figura 46.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con substituciones de fibra de nopal.

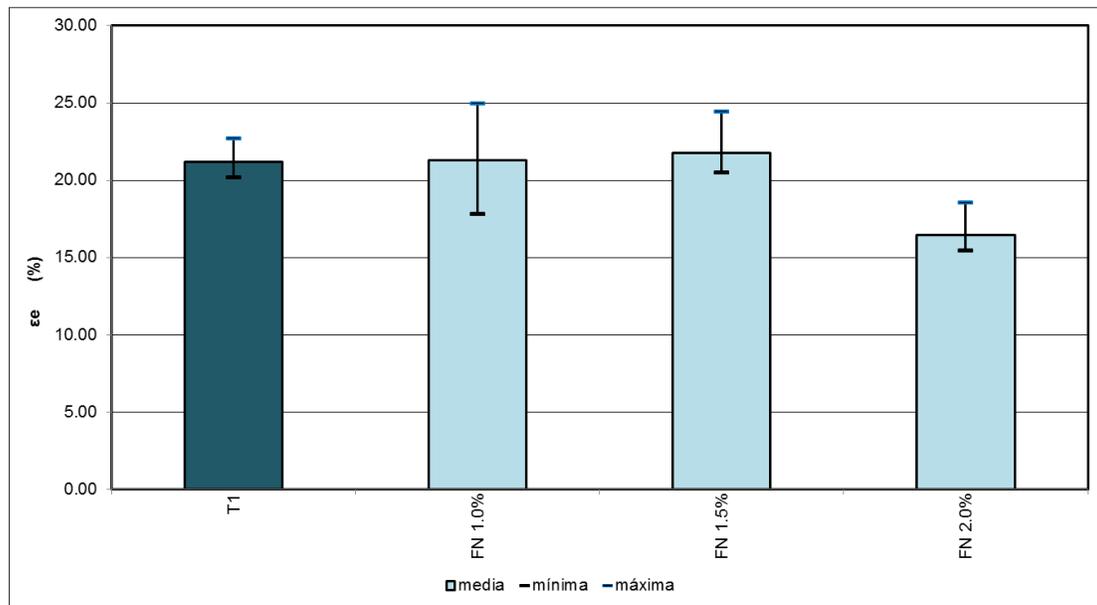


Figura 47.- Porosidad efectiva en morteros con substituciones de fibra de nopal.

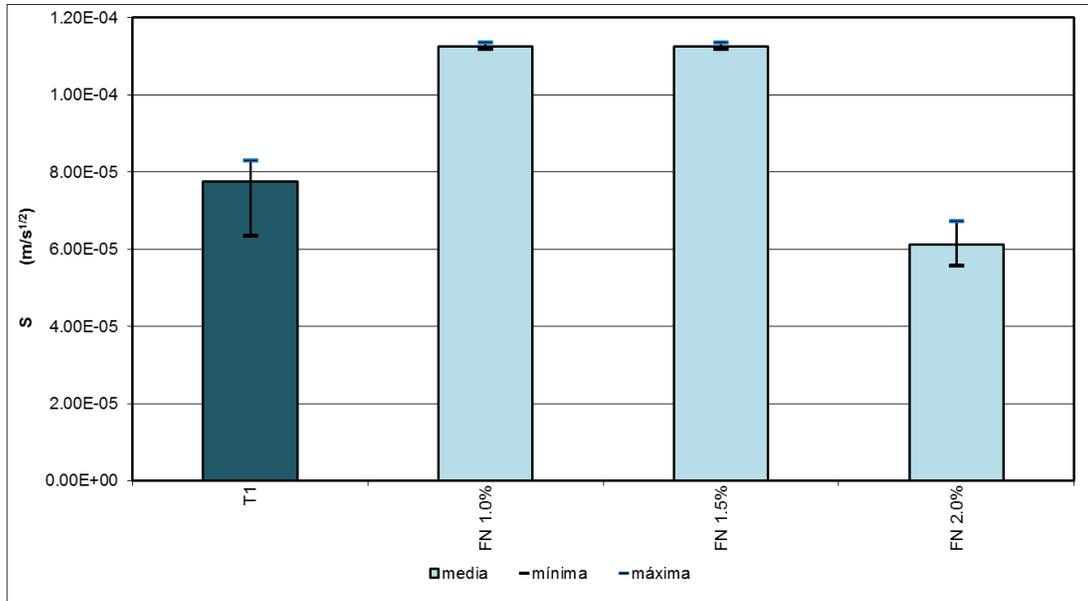


Figura 48.- Sorción capilar en morteros con sustituciones de fibra de nopal.

El mejor comportamiento de las sustituciones de FN ante este ensayo lo presentó la del 2.0%, la cual presentó la más alta resistencia a la penetración del agua y los valores más bajos en cuanto a coeficiente de absorción capilar, porosidad efectiva y sorción capilar se refiere. De acuerdo con lo expresado anteriormente, este porcentaje de sustitución podría ser adecuado para proveer durabilidad, ya que disminuye bastante la porosidad efectiva.

En cuanto a la variabilidad de resultados, puede notarse que esta fue mayor en los especímenes del testigo y de la sustitución del 2.0%, pero aún con esto los resultados son muy favorecedores para esta sustitución.

#### 4.2.5.- Absorción capilar de los morteros con sustituciones industriales

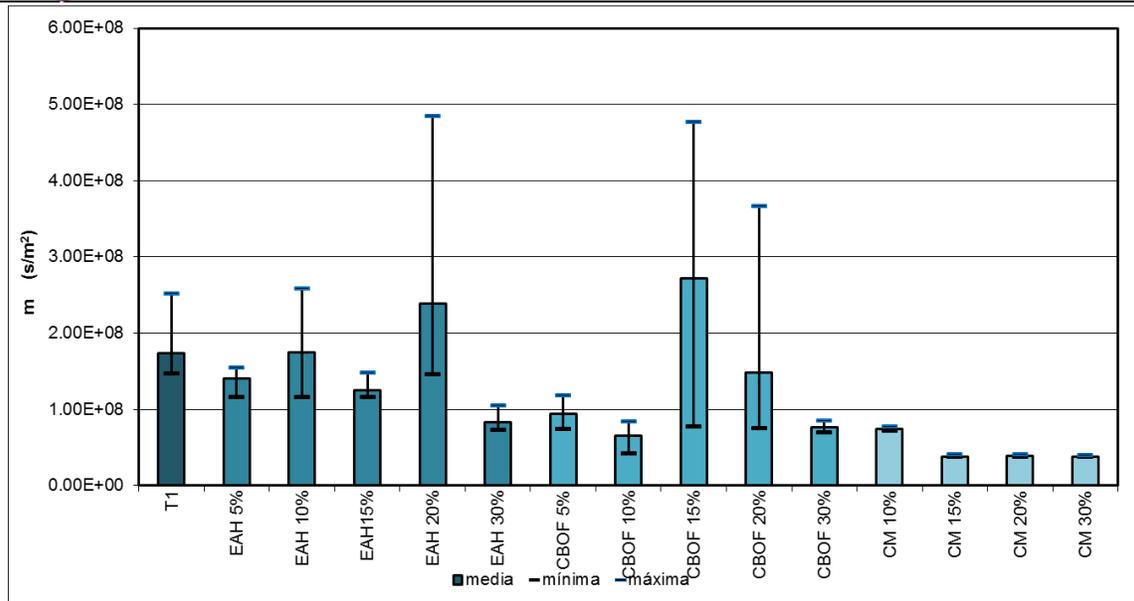


Figura 49.- Resistencia a la penetración del agua en morteros con sustituciones de residuos industriales.

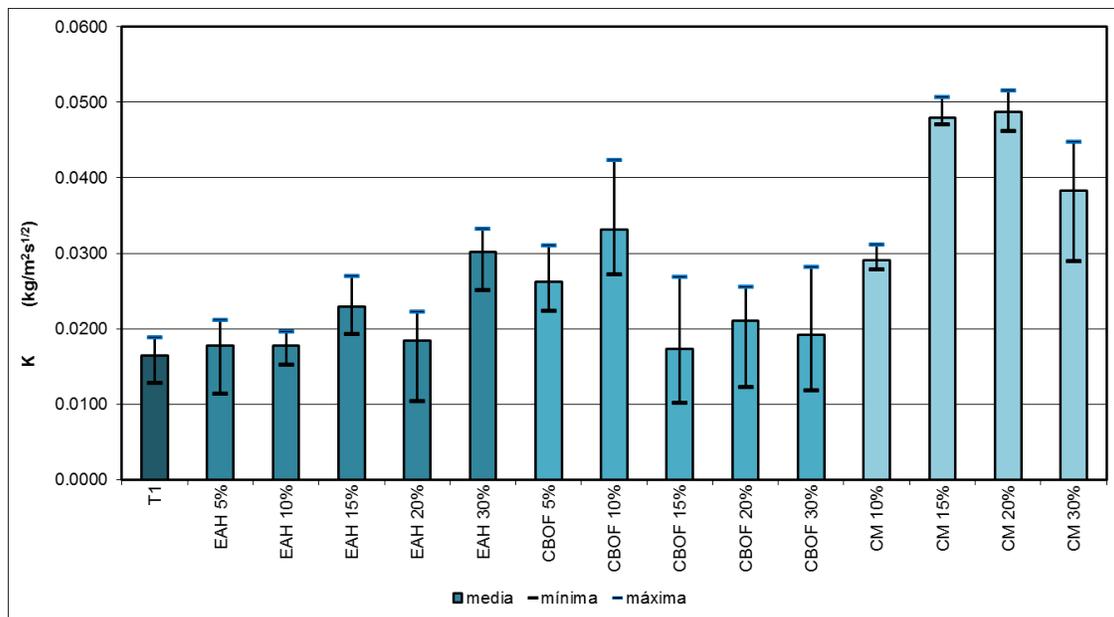


Figura 50.- Coeficiente de absorción capilar en morteros con sustituciones de residuos industriales.

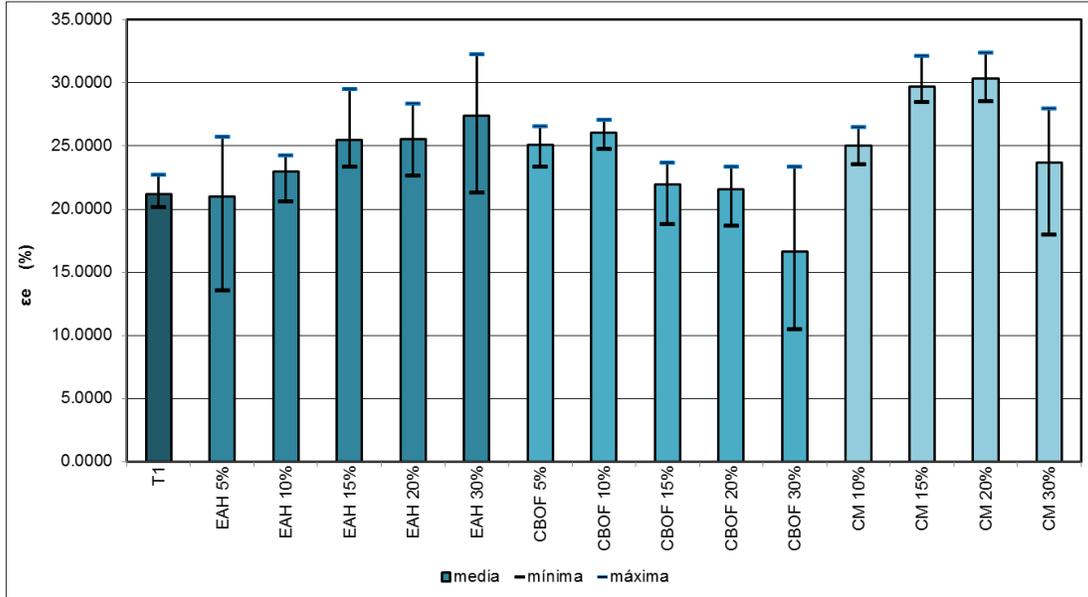


Figura 51.- Porosidad efectiva en morteros con sustituciones de residuos industriales.

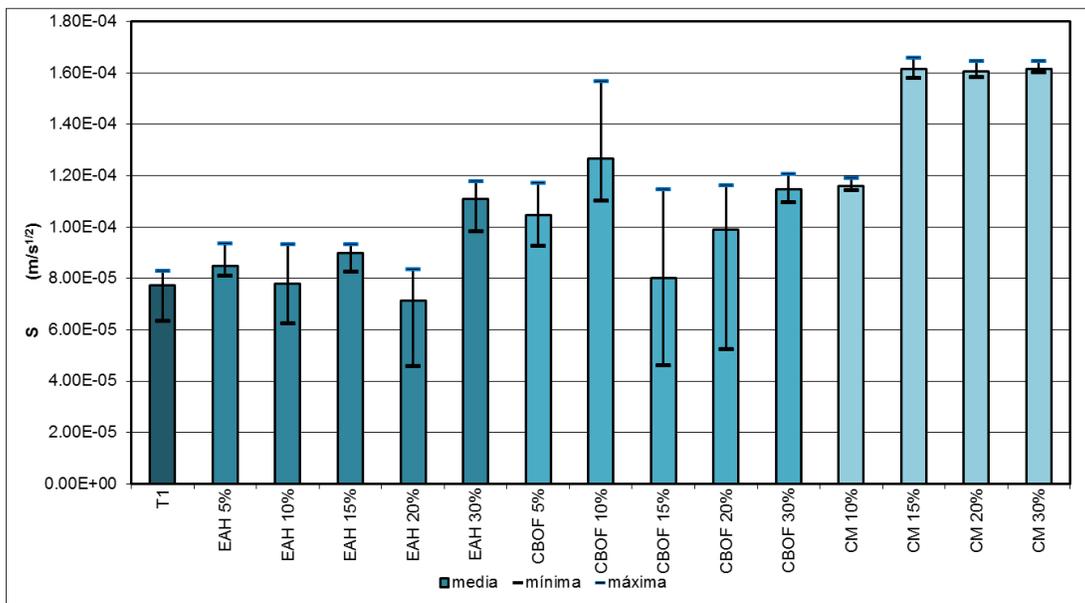


Figura 52.- Sorción capilar en morteros con sustituciones de residuos industriales.

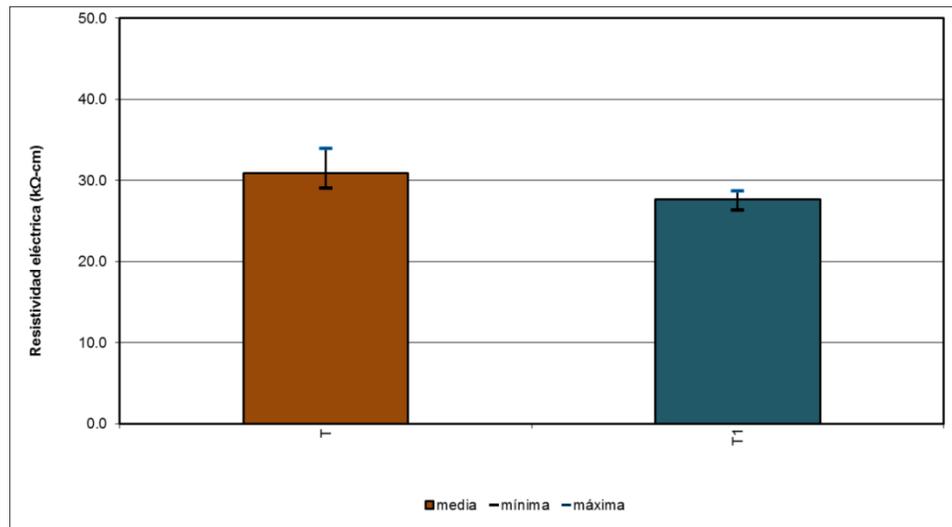
Finalmente, en el grupo de los residuos industriales se aprecia que las sustituciones de CBOF 15%, EAH 10 y 20% presentaron mayor resistencia a la



penetración del agua que el testigo (T1); mientras que CM 15, 20 y 30% tuvieron muy poca. El coeficiente de absorción capilar más pequeño lo tuvo CBOF 15% y los valores de EAH 5 y 10% fueron muy similares a T1; mientras que el coeficiente de CM 15 y 20% fue muy grande. En lo que respecta a porosidad efectiva, únicamente CBOF 30% y EAH 5% resultó inferior al testigo; mientras que los valores más grandes los presentaron CM 15 y 20%. La sorción capilar resultó menor en las substituciones de EAH 10 y 20%. Los resultados que presentaron mayores variaciones entre muestras fueron EAH 30%, CBOF 15 y 20%.

#### **4.3.- Resistividad eléctrica húmeda de los morteros a 1000 días de su fabricación**

Los resultados de resistividad eléctrica húmeda obtenidos en los especímenes de mortero evaluados a 1000 días de su fabricación se muestran en las Figuras 53 a la 57 de manera similar que los de absorción capilar, mediante barras de histogramas que representan el promedio de tres mediciones y los valores mínimo y máximo para observar la variabilidad observada entre los datos.



**Figura 53.- Resistividad eléctrica T vs T1.**

En lo que se refiere a resistividad eléctrica, ambos testigos tienen valores muy similares. Sin embargo, T1 es ligeramente menor que T aunque no por



mucho, por lo que los resultados de los morteros con las diferentes adiciones utilizadas podrán ser comparados contra cualquiera de los dos tipos de arena utilizados en esta investigación.

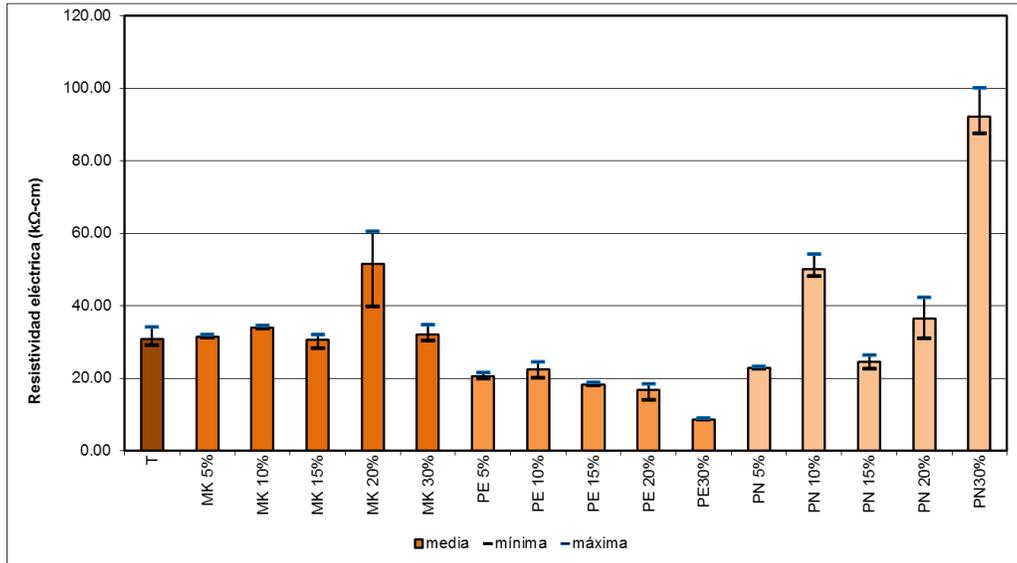


Figura 54.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones minerales.

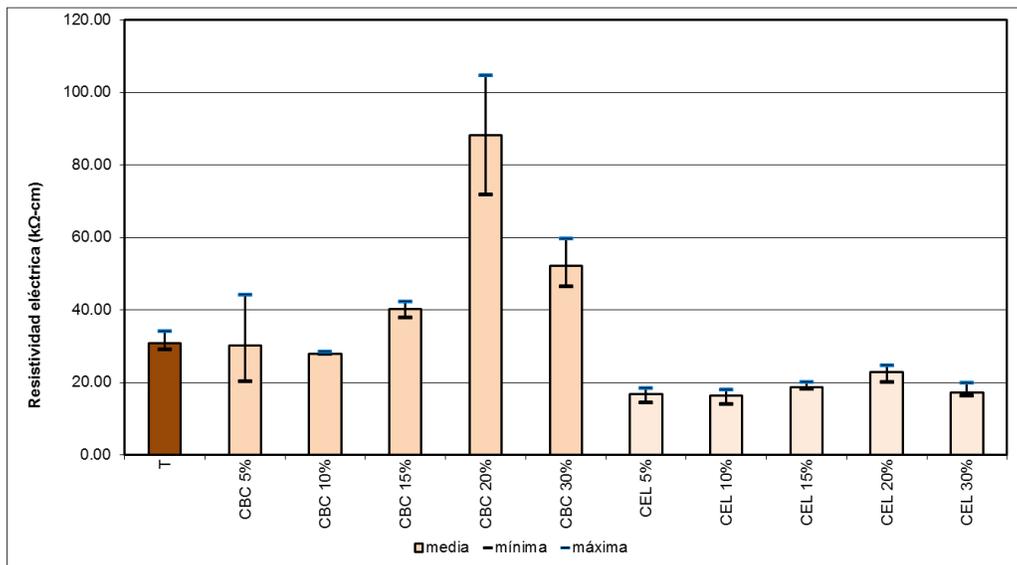


Figura 55.- Resistividad eléctrica en morteros con substituciones orgánicas.

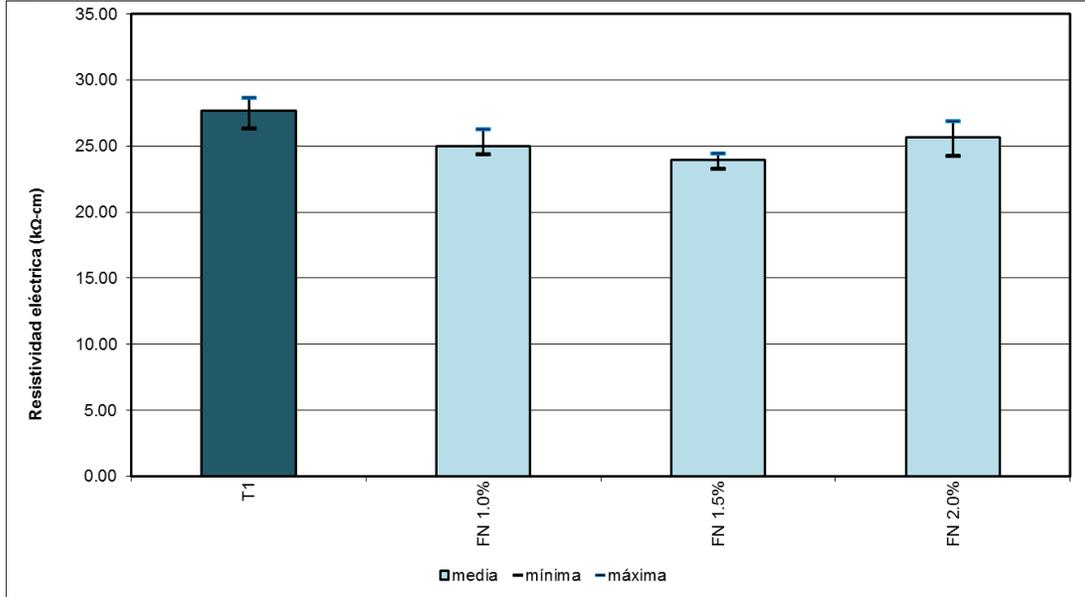


Figura 56.- Resistividad eléctrica en morteros con sustituciones de fibra de nopal.

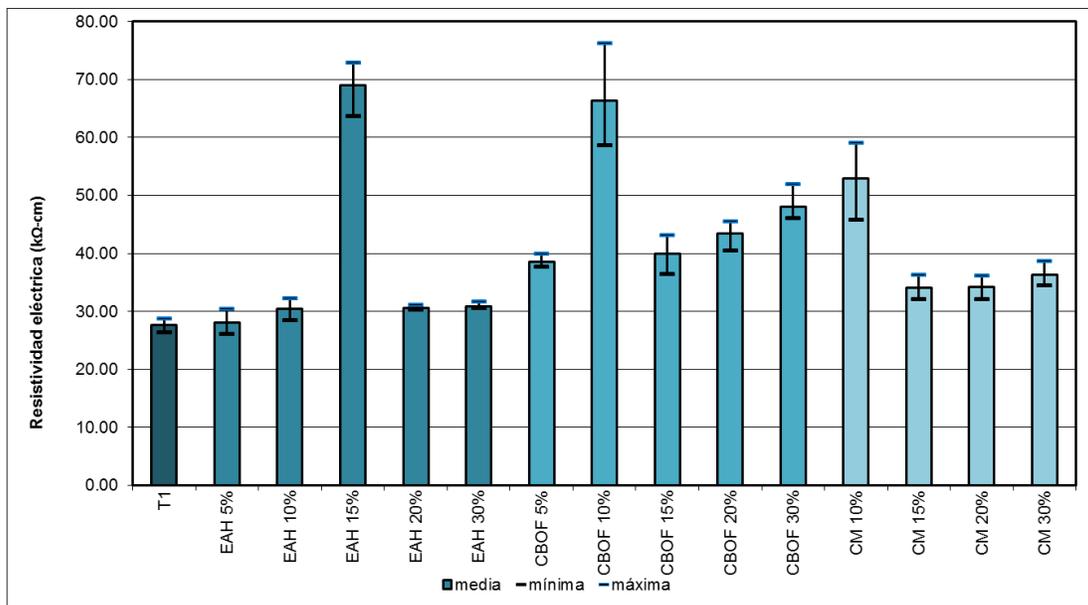


Figura 57.- Resistividad eléctrica en morteros con sustituciones de residuos industriales.

La resistividad eléctrica está íntimamente relacionada con la porosidad efectiva, por lo que se espera que los mejores resultados mostrados en el

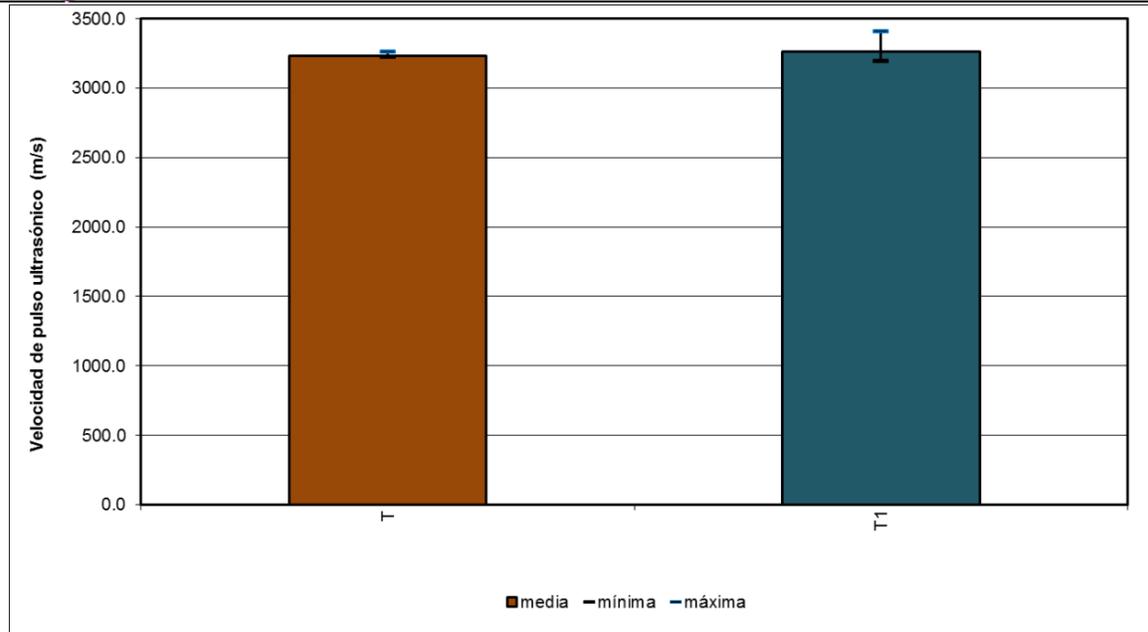


apartado anterior coincidan con los mostrados en éste. En el grupo de substituciones minerales, los que mostraron resultados superiores al testigo (T) fueron MK 10, 20 y 30%, PN 10, 20 y 30%, siendo este último el que resultó mucho mayor que el resto, lo cual concuerda con los resultados arrojados en la composición química y porosidad efectiva. En el grupo de los materiales orgánicos, las substituciones de CBC 15, 20 y 30% presentaron mayor resistividad eléctrica que T, mientras que las de CEL todas resultaron inferiores; tomando en cuenta los resultados de porosidad efectiva, observamos que CBC 15% concuerda con lo reportado en este ensayo. Las substituciones de FN resultaron ligeramente inferiores al testigo (T1). Sin embargo, sus valores son aceptables de acuerdo con los criterios de la RED DURAR. Todas las substituciones de residuos industriales fueron superiores a T1, siendo EAH 15% y CBOF 10% las que registraron los valores más altos. En el caso de los 2 últimos grupos, los resultados no concordaron con los de porosidad efectiva; sin embargo, hay que recordar que en el ensayo de absorción capilar hubo mayor variación de los resultados entre muestras de la misma substitución.

Es importante mencionar que si bien algunas substituciones no superaron al testigo, sus valores fueron aceptables, ya que todos se encuentran en el rango intermedio de riesgo de corrosión, es decir, están entre 10 y 200k $\Omega$ -cm. Además, algunas de ellas resultaron muy superiores a lo reportado en la literatura, tal es el caso de PN 30%, cuyo valor fue de 92 k $\Omega$ -cm.

Respecto a la variación entre los resultados de cada muestra, se aprecia que esta resultó menor con respecto a las variaciones que hubo en el ensayo de absorción capilar. La variabilidad mayor se presentó en las substituciones de CBOF 10% y CBC 20%.

#### **4.4.- Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los morteros a 1000 días de su fabricación**



**Figura 58.- Velocidad de pulso ultrasónico T vs T1.**

Al igual que en la resistividad eléctrica, los dos testigos arrojaron prácticamente el mismo resultado, siendo ligeramente mayor T1 que T, por lo que se podrían evaluar los valores de VPU con cualquiera de los dos tipos de arena utilizados. De nuevo los valores de VPU se representarán de manera similar a los valores mostrados de absorción capilar de agua y resistividad eléctrica húmeda, tal y como se muestra en las figuras 59 a 62.

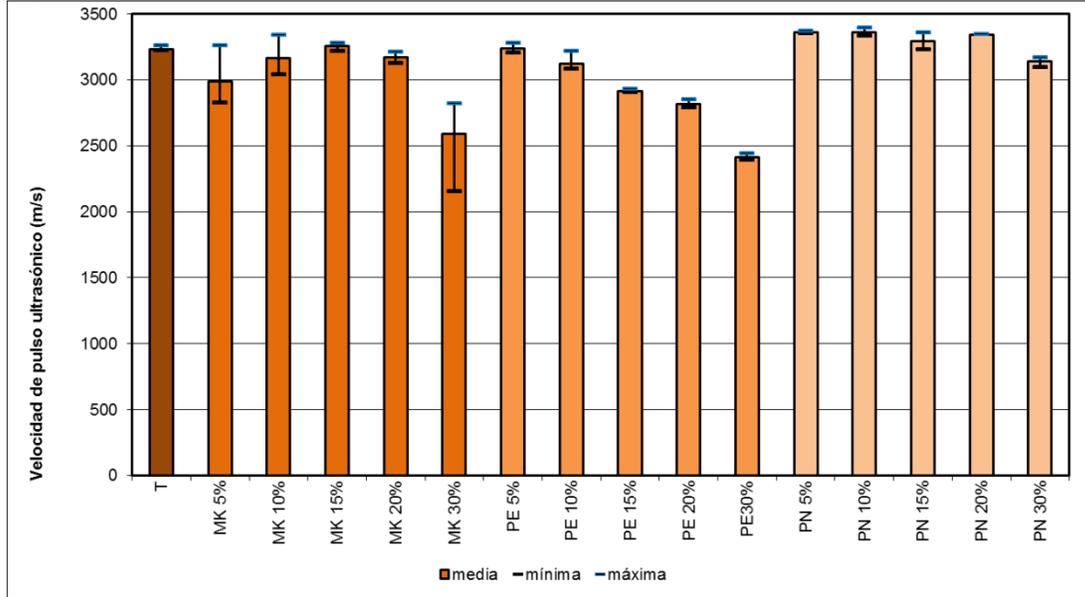


Figura 59.- Valores de VPU en morteros con sustituciones minerales.

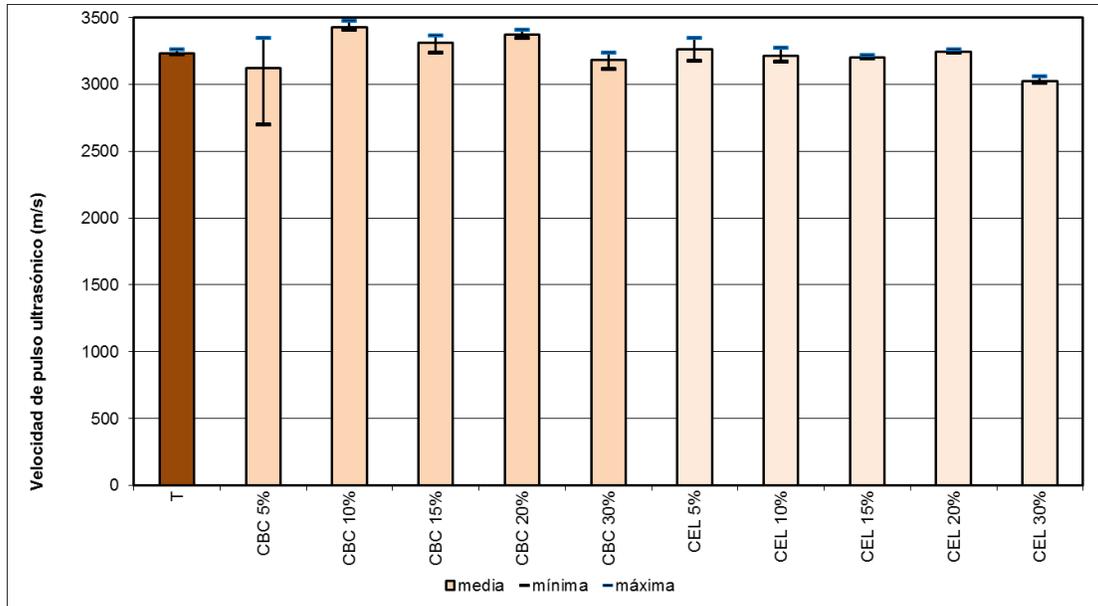


Figura 60.- Valores de VPU en morteros con sustituciones orgánicas.

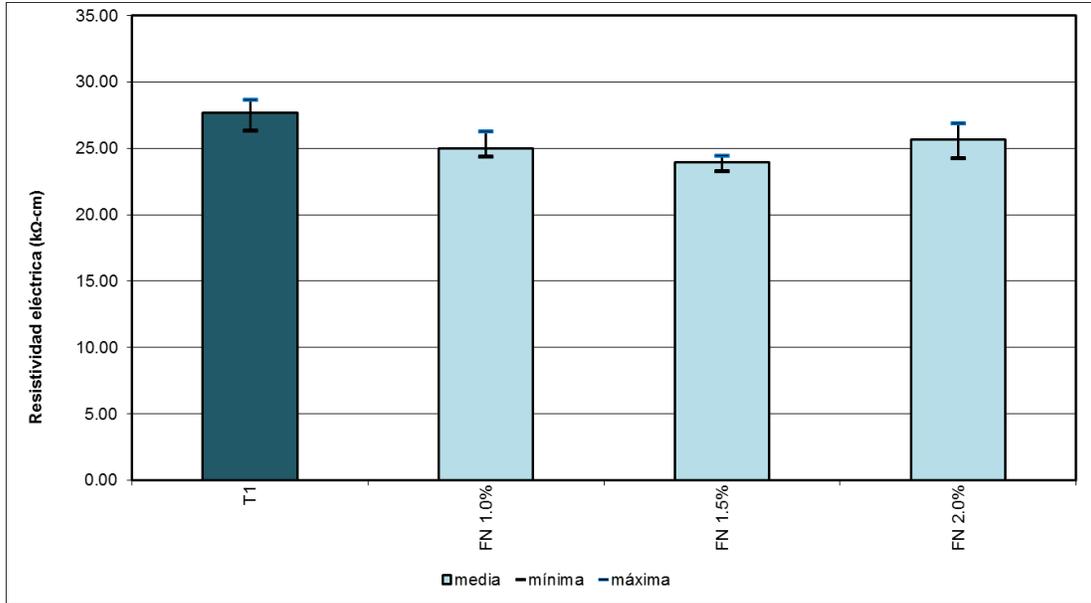


Figura 61.- Valores de VPU en morteros con sustituciones de fibra de nopal.

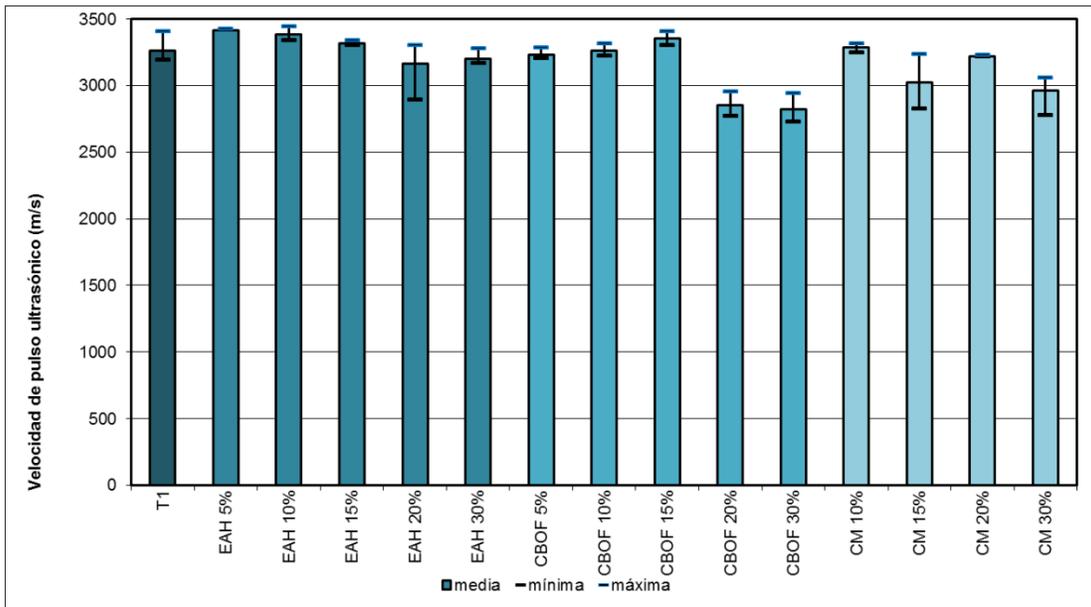


Figura 62.- Valores de VPU en morteros con sustituciones de fibra de nopal.



La VPU de un material poroso está relacionada con su densidad y resistencia mecánica; mientras mayor sean éstas, mayor será su VPU, por lo tanto menor su porosidad interna. Por tal razón son un indicador de la calidad del material. En la Fig. 52 se aprecia que la mayoría de las substituciones de PN, excepto la de PN 30% presentan los valores más altos de VPU; mientras que los valores más bajos corresponden a PE 30% y MK 30%. En el grupo de los materiales orgánicos mostrados en la Fig. 53, las substituciones de CBC 10,15 y 20% tuvieron el mejor comportamiento superando ligeramente a T, mientras que CEL 30% presentó el valor más bajo de todos los de este grupo. En el caso de las substituciones de fibra nopal mostradas en la Fig. 54, se aprecia que todas arrojan resultados prácticamente iguales a T1. En la fig. 55 se presentan las substituciones de residuos industriales, de las cuales el 5,10 y 15% de EAH, CBOF 10 y 15%, y 10% de CM tuvieron resultados iguales o superiores a T1, mientras que CBOF 20 y 30% fueron muy inferiores a éste.

Tomando en cuenta los criterios de la RED DURAR, podemos decir que la mayoría de las substituciones se encuentra en el rango de calidad del concreto alta, ya que presentan valores de VPU entre 3001 y 4000 m/s, a excepción de algunas que se encuentra entre 2001 y 3000 m/s y cuya calidad es normal. Dentro de este último rango se encuentra MK 5 y 30%, PE 15,20 y 30%, y CBOF 20 y 30%.

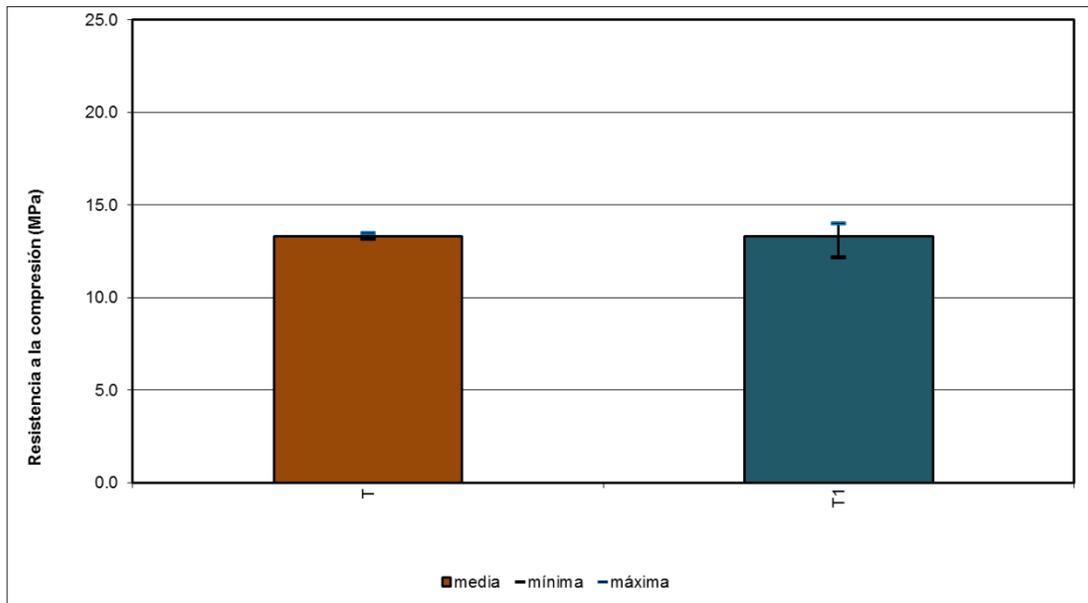
La variabilidad entre resultados fue muy poca, únicamente resultó considerable en el caso de MK 30% y CBC 5%. Sin embargo, la mayoría de resultados pueden considerarse como confiables, ya que esta variación no fue mayor al 10%.

#### **4.5.- Resistencia a la compresión de los morteros a 360 días de su fabricación**

Es importante aclarar que no fue posible determinar la resistencia a la compresión a 1000 días, por lo que los datos presentados abajo corresponden a



360 días, ya que la máquina de prueba se está adaptando para determinar más que sólo propiedades mecánicas y aún no está funcionando.



**Figura 63.- Resistencia a la compresión T vs T1.**

Al igual que en los ensayos de resistividad eléctrica y VPU, los resultados entre ambos testigos son muy similares, siendo ligeramente mayor T1 que T. A continuación se presentan los valores de resistencia a la compresión de los morteros evaluados a 360 días de su fabricación en las figuras 64 a 67. Las gráficas se representan de manera similar a los parámetros antes mencionados.

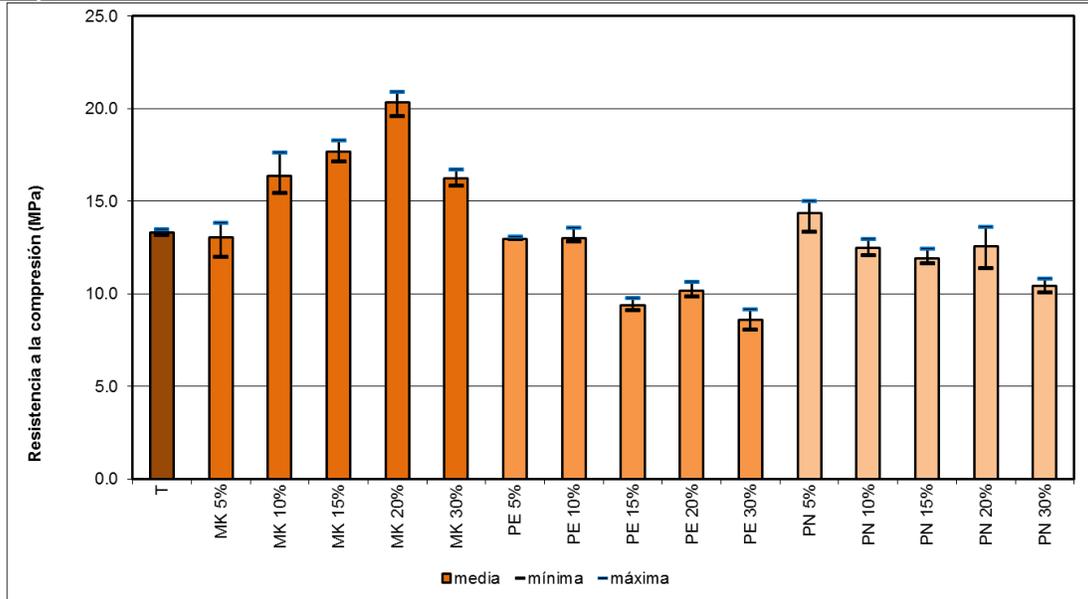


Figura 64.- Resistencia a la compresión en morteros con sustituciones minerales.

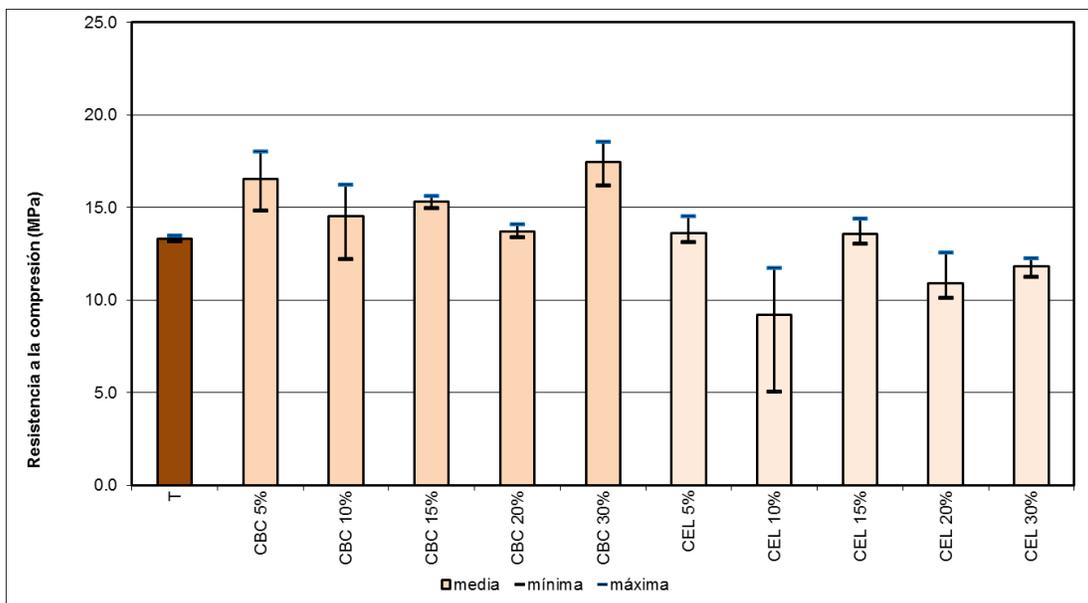


Figura 65.- Resistencia a la compresión en morteros con sustituciones orgánicas.

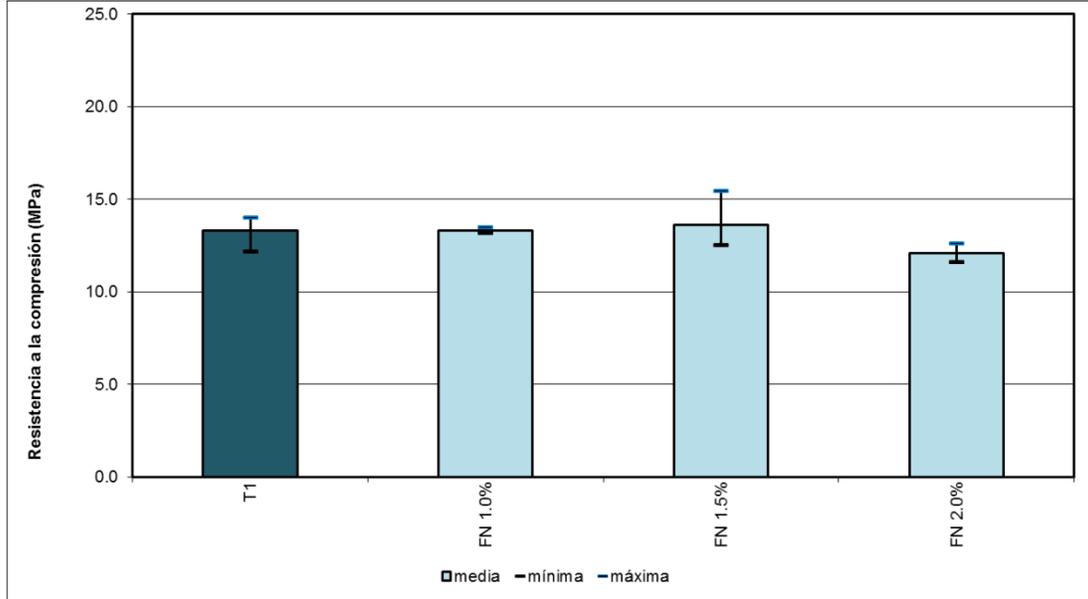


Figura 66.- Resistencia a la compresión de fibra de nopal.

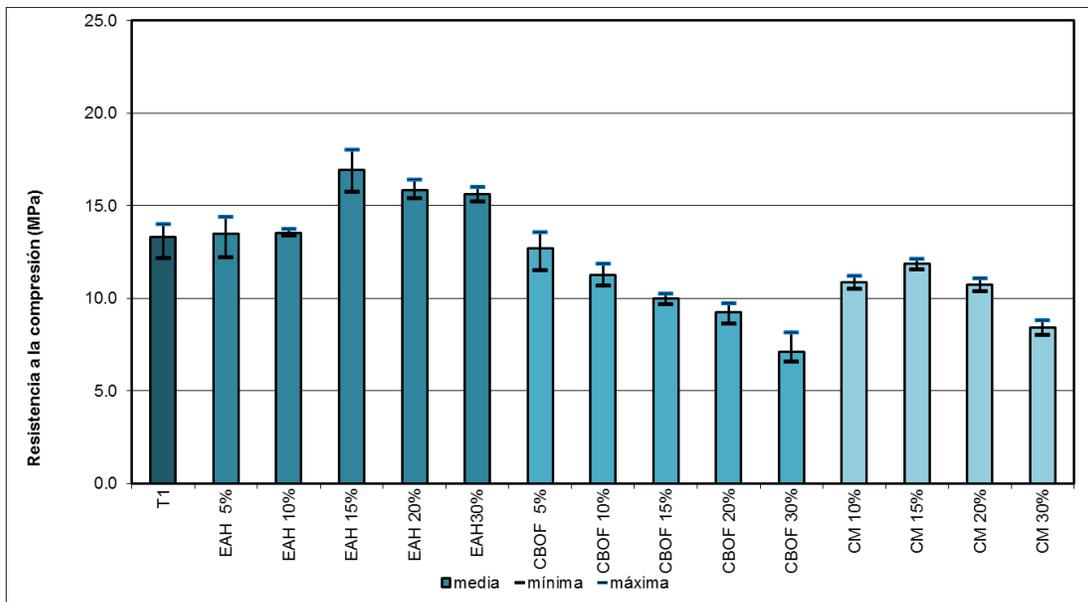


Figura 67.- Resistencia a la compresión en morteros con sustituciones de residuos industriales.



En el caso de la resistencia a la compresión, las substituciones minerales que fueron superiores a T fueron PN 5%, MK 10, 15,20 y 30%; mientras los valores de PE 15,20 y 30% fueron muy bajos, lo cual puede apreciarse en la Fig. 56. El segundo grupo se muestra en la Fig. 57 y muestra que todas las substituciones de CBC y las de 5 y 15% CEL fueron superiores a T, mientras que las substituciones de CEL restantes fueron inferiores al testigo. La substitución de FN 1.5% resultó ligeramente superior a T1; mientras que FN 1.0% resultó prácticamente similar y FN 2.0% fue ligeramente menor. Todas las substituciones de EAH fueron las únicas que dieron mejores resultados que T1 en su grupo, el valor más bajo lo arrojó CBOF 30%.

La variabilidad entre muestras fue pequeña, únicamente hubo mucha variación en los especímenes de CEL 10%.

#### **4.6.- Comportamiento físico-mecánico a través del tiempo**

Todos los resultados mostrados a continuación corresponden al promedio de 3 muestras. Además se incluye el valor de la desviación estándar para corroborar su validez estadística. En todos los casos se presenta la información recabada de los ensayos de resistividad eléctrica, VPU y resistencia a la compresión a diferentes edades de curado y cuyos resultados fueron recabados de investigaciones precursoras a ésta, así como también los resultados obtenidos en la presente investigación. Los resultados hasta edades de 45 días fueron recopilados de las tesis de Licenciatura de Cipriano Bernabé Reyes (CEL y MK), José Luis Rodríguez Bucio (CBC), Miguel Ángel Villicaña Cupa (PE y PN), Luis Cruz Jiménez (CM y EAH) y José Antonio Núñez Hurtado (CBOF y FN). Los datos de todos los materiales a edades de 180 y 360 días fueron recopilados de las Tesis de Maestría de Sandra del Carmen Arguello Hernández y Mauricio Arreola Sánchez respectivamente. Algunas pruebas a 500 días no pudieron ser realizadas, debido a fallas en los equipos. Finalmente, los datos a 1000 días son el resultado de la presente investigación. Es importante aclarar que la prueba de



resistencia a la compresión a 1000 días no pudo realizarse, debido a que la máquina de prueba se está adaptando para obtener más que sólo datos mecánicos y aún no está funcionando. El término ND en las tablas de resultados promedio obtenidos significa No Determinado, y define que no se han obtenido los valores en estas fechas y que posteriormente se obtendrán.

**Tabla 24.- Comportamiento físico-mecánico del mortero sin adiciones (T) a través del tiempo.**

Ensayo	Testigo (T)							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	3.49 ± 0.20	4.33 ± 0.28	3.74 ± 0.16	19.66 ± 20.58	5.95 ± 0.02	7.31 ± 0.71	11.83 ± 0.37	30.88 ± 2.15
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2704 ± 16.54	2971 ± 41.96	2732 ± 13.93	3304 ± 97.17	2719 ± 34.67	2812 ± 29.92	3058 ± 33.23	3235 ± 15.17
Resistencia a la compresión (MPa)	7.98 ± 0.31	9.79 ± 1.25	10.04 ± 0.39	10.98 ± 0.89	11.90 ± 0.63	13.32 ± 0.14	13.92 ± 0.53	ND

En la tabla 24 se presentan los resultados correspondientes al mortero testigo elaborado con arena del Río Huajúbaro (T). Se aprecia que la resistividad eléctrica tuvo un comportamiento errático dentro de los primeros 90 días; sin embargo, a partir de los 180 días su comportamiento presentó un incremento gradual hasta llegar a los 500 días y a partir de aquí su valor prácticamente se triplicó. En lo que respecta a la VPU el comportamiento fue similar al de la resistividad hasta los 500 días; sin embargo, a partir de ahí también presentó un incremento, pero no fue tan significativo como en el caso de la resistividad. Finalmente, la resistencia a la compresión siempre tuvo un comportamiento ascendente; sin embargo, entre 360 días y 500 días su incremento no fue muy grande.

**Tabla 25.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 5% a través del tiempo.**

Ensayo	CBC 5%
--------	--------



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.37 ± 0.04	3.89 ± 0.24	4.71 ± 0.32	7.06 ± 0.25	12.46 ± 0.90	18.95 ± 0.63	24.58 ± 2.58	30.13 ± 10.11
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2669 ± 12.11	2792 ± 42.94	2792 ± 48.48	2710 ± 19.55	2992 ± 41.88	2830 ± 25.39	2983 ± 29.40	3121 ± 300.4
Resistencia a la compresión (MPa)	10 ± 0.15	12 ± 0.48	14 ± 0.51	11 ± 0.53	14 ± 1.11	17 ± 1.32	18 ± 0.32	ND

En la tabla 25 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBC 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica siempre estuvo incrementándose. En lo que respecta a la VPU el comportamiento fue similar al de la resistividad hasta los 45 días; sin embargo, tuvo 2 decrementos, el primero de 45 a 90 días y el segundo de 90 a 180 días y a partir de ahí fue incrementándose hasta los 100 días. Finalmente, la resistencia a la compresión tuvo un comportamiento ascendente hasta los 500 días, a excepción de un decremento que presentó entre los 45 y 90 días. También es importante mencionar que el incremento entre 360 y 500 días fue pequeño.

**Tabla 26.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 10% a través del tiempo.**

Ensayo	CBC 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.48 ± 0.06	4.40 ± 0.04	5.08 ± 0.19	7.77 ± 1.03	14.67 ± 1.79	19.44 ± 1.49	22.92 ± 2.27	27.86 ± 0.25
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2640 ± 28.97	2709 ± 51.39	2742 ± 42.91	2714 ± 4.51	3072 ± 30.21	2849 ± 18.10	2967 ± 47.81	3425 ± 32.06
Resistencia a la compresión (MPa)	9.93 ± 0.10	11.32 ± 0.23	12.89 ± 0.95	11.29 ± 0.57	12.46 ± 0.90	14.53 ± 1.70	12.92 ± 0.46	ND

En la tabla 26 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBC 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica siempre estuvo incrementándose gradualmente. En lo que respecta a la VPU el comportamiento fue similar al de la resistividad hasta los 45 días; sin embargo, tuvo un



decremento entre los 45 y 90 días. También es importante resaltar que el incremento que presentó entre 500 y 1000 días fue considerable. Finalmente, la resistencia a la compresión tuvo un comportamiento errático, ya que el valor subía y bajaba conforme aumentaba la edad de curado. También es importante mencionar que el incremento entre 360 y 500 días fue pequeño.

**Tabla 27.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 15% a través del tiempo.**

Ensayo	CBC 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.56 ± 0.01	5.01 ± 0.04	5.85 ± 0.22	6.76 ± 0.62	13.39 ± 0.75	17.46 ± 7.18	27.79 ± 2.18	40.26 ± 1.84
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2645 ± 20.07	2778 ± 38.29	2761 ± 18.71	2713 ± 57.61	2780 ± 225.3	2866 ± 41.80	2942 ± 11.44	3309 ± 56.50
Resistencia a la compresión (MPa)	9.58 ± 1.17	11.88 ± 1.03	13.48 ± 1.46	11.94 ± 1.45	12.17 ± 0.87	15.33 ± 0.30	15.26 ± 0.54	ND

En la tabla 27 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBC 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica siempre estuvo incrementándose gradualmente. En lo que respecta a la VPU, ésta fue ascendiendo hasta llegar a los 28 días, a partir de ahí y hasta los 90 días presentó un ligero descenso, después siguió incrementándose hasta los 1000 días. Finalmente, la resistencia a la compresión ascendió hasta los 45 días, después tuvo un descenso de aproximadamente el 10% a los 90 días, a partir de ahí siguió incrementándose hasta los 360 días y finalmente tuvo una ligera disminución a los 500 días.

**Tabla 28.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 20% a través del tiempo.**

Ensayo	CBC 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.66 ± 0.07	4.98 ± 0.14	5.24 ± 0.12	7.44 ± 0.36	13.82 ± 1.10	14.95 ± 0.52	ND	88.13 ± 13.43



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2662 ± 28.23	2782 ± 10.82	2748 ± 34.76	2642 ± 24.20	3080 ± 23.70	2318 ± 17.15	ND	3373 ± 23.68
Resistencia a la compresión (MPa)	10.50 ± 1.35	12.95 ± 2.09	14.05 ± 1.01	11.59 ± 0.45	14.48 ± 1.30	13.68 ± 0.27	ND	ND

En la tabla 28 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBC 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose gradualmente hasta los 360 días; a partir de ahí sólo tiene el valor a 1000 días, el cual resulta muy superior a los reportados anteriormente. En lo que respecta a la VPU, los valores oscilaron mucho con el transcurso del tiempo y entre 360 y 1000 días se presenta un aumento de aproximadamente un 45%. Finalmente, la resistencia a la compresión ascendió hasta los 45 días, después tuvo un descenso de aproximadamente el 20% a los 90 días, a partir de ahí se incrementó nuevamente hasta los 180 días y finalmente tuvo una ligera disminución a los 360 días.

**Tabla 29.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBC 30% a través del tiempo.**

Ensayo	CBC 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.92 ± 0.04	3.89 ± 0.18	5.17 ± 0.11	9.37 ± 0.44	10.42 ± 0.21	5.84 ± 0.55	ND	52.20 ± 5.48
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2560 ± 6.44	2616 ± 12.59	2698 ± 13.67	2751 ± 13.08	2882 ± 60.22	2713 ± 40.34	ND	3183 ± 52.44
Resistencia a la compresión (MPa)	6.69 ± 1.78	10.61 ± 0.22	11.62 ± 0.83	12.30 ± 0.28	14.06 ± 0.19	17.45 ± 0.98	ND	ND

En la tabla 29 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBC 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose gradualmente hasta los 180 días; a partir de ahí tuvo un descenso de aproximadamente 45%, después ascendió enormemente a los 1000 días. En lo



que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a los 180 días, a partir de ahí tuvo un decremento hasta los 360 días, luego incrementó hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia a la compresión siempre estuvo en ascenso.

**Tabla 30.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 5% a través del tiempo.**

Ensayo	CEL 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.88 ± 0.09	3.12 ± 0.10	3.74 ± 0.20	3.23 ± 0.26	4.72 ± 0.23	7.55 ± 0.71	ND	16.72 ± 1.81
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2679 ± 22.57	2893 ± 42.37	2906 ± 44.28	2632 ± 11.31	2782 ± 20.06	3093 ± 33.59	ND	3261 ± 69.90
Resistencia a la compresión (MPa)	9.56 ± 0.33	13.26 ± 0.05	14.26 ± 0.99	11.04 ± 0.79	12.32 ± 0.61	13.62 ± 0.61	ND	ND

En la tabla 30 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CEL 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose hasta los 45 días, después presentó una leve disminución hasta llegar a 90 días y a partir de ahí incrementó nuevamente hasta llegar a 1000 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a los 180 días, a partir de ahí tuvo un decremento hasta los 360 días, luego incrementó hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia a la compresión iba en ascenso hasta los 45 días, a partir de ahí estuvo oscilando hasta llegar a 360 días.

**Tabla 31.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 10% a través del tiempo.**

Ensayo	CEL 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.66 ± 0.04	3.30 ± 0.07	3.90 ± 0.07	3.10 ± 0.22	4.92 ± 0.06	6.50 ± 0.06	ND	16.43 ± 1.86
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2643 ± 28.48	2759 ± 61.40	2805 ± 36.25	2568 ± 30.41	2763 ± 21.77	3076 ± 25.09	ND	3212 ± 42.34



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistencia a la compresión (MPa)	8.96 ± 1.21	12.57 ± 0.87	11.63 ± 0.28	8.82 ± 0.25	10.43 ± 0.46	9.20 ± 2.99	ND	ND
-----------------------------------	-------------	--------------	--------------	-------------	--------------	-------------	----	----

En la tabla 31 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CEL 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose en el transcurso del tiempo, únicamente presentó un decremento entre 45 y 90 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 45 días, después descendieron hasta llegar a 90 días, luego incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia a la compresión tuvo un comportamiento errático, puesto que no pudo identificarse alguna tendencia. Además de que el último valor registrado es muy pequeño con respecto a las demás substituciones.

**Tabla 32.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 5% a través del tiempo.**

Ensayo	CEL 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.65 ± 0.03	3.36 ± 0.09	3.84 ± 0.16	2.88 ± 0.17	4.42 ± 0.07	6.83 ± 0.47	ND	18.74 ± 0.89
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2611 ± 27.74	2752 ± 22.27	2819 ± 50.16	2553 ± 7.36	2734 ± 50.10	2938 ± 41.20	ND	3204 ± 9.42
Resistencia a la compresión (MPa)	8.39 ± 0.84	8.55 ± 0.19	10.30 ± 1.11	11.22 ± 0.42	12.23 ± 0.38	13.59 ± 0.56	ND	ND

En la tabla 32 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CEL 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose en el transcurso del tiempo, únicamente presentó un decremento entre 45 y 90 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 45 días, después descendieron hasta llegar a 90 días, luego incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica ascendió gradualmente en el transcurso del tiempo.



**Tabla 33.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 20% a través del tiempo.**

Ensayo	CEL 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.86 ± 0.08	3.62 ± 0.09	4.36 ± 0.11	3.63 ± 0.14	5.94 ± 0.70	7.19 ± 0.22	ND	22.94 ± 2.11
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2587 ± 20.11	2719 ± 37.01	2755 ± 16.30	2626 ± 4.35	2706 ± 36.85	3097 ± 22.23	ND	3242 ± 10.14
Resistencia a la compresión (MPa)	8.05 ± 0.24	9.48 ± 0.46	10.14 ± 0.33	9.80 ± 0.40	10.57 ± 0.37	10.91 ± 1.14	ND	ND

En la tabla 33 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CEL 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose en el transcurso del tiempo, únicamente presentó un decremento entre 45 y 90 días. Es importante resaltar que entre 360 y 1000 días, la resistividad prácticamente se triplicó. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 45 días, después descendieron hasta llegar a 90 días, luego incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica siempre estuvo incrementándose, excepto entre 45 y 90 días que tuvo una leve disminución.

**Tabla 34.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CEL 30% a través del tiempo.**

Ensayo	CEL 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.88 ± 0.02	3.86 ± 0.25	3.96 ± 0.08	3.17 ± 0.09	4.68 ± 0.13	7.09 ± 0.39	ND	17.28 ± 1.74
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2519 ± 30.04	2654 ± 26.32	2680 ± 22.82	2499 ± 12.01	2611 ± 15.17	3042 ± 37.04	ND	3024 ± 23.84
Resistencia a la compresión (MPa)	6.98 ± 0.65	8.39 ± 0.69	9.88 ± 0.88	9.46 ± 0.35	10.38 ± 0.58	11.81 ± 0.44	ND	ND

En la tabla 34 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CEL 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose en el transcurso del tiempo, únicamente presentó un decremento entre 45 y 90 días.



Es importante resaltar que entre 360 y 1000 días, la resistividad prácticamente se duplicó. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 45 días, después descendieron hasta llegar a 90 días, a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 360 días, luego descendieron ligeramente. Finalmente, la resistencia mecánica siempre estuvo incrementándose, excepto entre 45 y 90 días que tuvo una leve disminución.

**Tabla 35.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 5% a través del tiempo.**

Ensayo	MK 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	6.06 ± 0.75	7.16 ± 0.43	6.12 ± 0.69	6.52 ± 0.29	8.15 ± 0.26	9.85 ± 0.79	13.98 ± 1.23	31.50 ± 0.35
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2668 ± 63.83	2871 ± 31.53	2915 ± 23.95	3101 ± 56.01	2752 ± 28.28	2558 ± 0.00	3135 ± 24.14	2985 ± 192.6
Resistencia a la compresión (MPa)	15.81 ± 0.02	16.01 ± 0.50	17.55 ± 0.95	11.62 ± 0.13	12.14 ± 0.06	13.05 ± 0.78	14.33 ± 0.44	ND

En la tabla 35 se presentan los resultados correspondientes al mortero con MK 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose a medida que la edad aumentaba, únicamente presentó una pequeña disminución entre 28 y 45 días. Cabe resaltar que entre 500 y 1000 días la resistividad se duplicó. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar a 360 días, a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 500 días, luego presentaron un descenso. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta llegar a 45 días, después bajó hasta 90 días, luego continuó incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 36.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 10% a través del tiempo.**

Ensayo	MK 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	7.38 ± 0.26	9.63 ± 0.48	8.82 ± 0.65	9.12 ± 0.29	13.35 ± 0.34	15.28 ± 0.23	19.61 ± 0.33	33.86 ± 0.32
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2779 ± 10.63	2848 ± 20.24	2903 ± 48.20	3082 ± 31.17	2807 ± 33.02	2558 ± 0.00	3062 ± 20.68	3166 ± 124.0
Resistencia a la compresión (MPa)	13.90 ± 0.72	13.94 ± 0.97	16.63 ± 1.45	14.76 ± 1.22	16.04 ± 0.68	16.38 ± 0.89	17.01 ± 0.53	ND

En la tabla 36 se presentan los resultados correspondientes al mortero con MK 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose a medida que la edad aumentaba, únicamente presentó una pequeña disminución entre 28 y 45 días. Cabe resaltar que entre 500 y 1000 días la resistividad se incrementó considerablemente. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar a 360 días, a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta llegar a 45 días, después bajó hasta 90 días, luego continuó incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 37.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 15% a través del tiempo.**

Ensayo	MK 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	8.92 ± 0.23	14.03 ± 0.35	11.21 ± 2.92	20.31 ± 0.39	26.93 ± 0.03	25.09 ± 0.73	31.46 ± 2.91	30.60 ± 1.85
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2708 ± 33.42	2844 ± 2.66	2878 ± 9.47	3133 ± 26.34	2777 ± 1.38	2808 ± 11.37	3110 ± 23.84	3254 ± 28.55
Resistencia a la compresión (MPa)	14.54 ± 0.64	14.33 ± 1.08	10.63 ± 6.30	16.86 ± 1.11	17.47 ± 1.10	17.66 ± 0.47	18.89 ± 0.44	ND

En la tabla 37 se presentan los resultados correspondientes al mortero con MK 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose hasta 28 días, después hubo una disminución entre 28 y 45 días, luego aumentó hasta 180 días, y a partir de ahí los valores oscilaron. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar



a 180 días y a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica disminuyó los primeros 45 días y a partir de ahí empezó a incrementarse hasta llegar a 500 días.

**Tabla 38.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 20% a través del tiempo.**

Ensayo	MK 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	8.04 ± 0.42	11.42 ± 0.68	9.61 ± 0.33	47.50 ± 1.20	45.08 ± 3.29	43.05 ± 4.28	47.39 ± 3.06	51.44 ± 8.69
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2214 ± 28.22	2268 ± 39.60	2295 ± 27.46	3082 ± 21.21	2737 ± 42.62	2881 ± 11.88	3104 ± 21.48	3173 ± 36.92
Resistencia a la compresión (MPa)	5.34 ± 0.03	6.34 ± 0.47	6.71 ± 0.28	20.11 ± 0.90	20.25 ± 0.27	20.33 ± 0.57	21.81 ± 0.27	ND

En la tabla 38 se presentan los resultados correspondientes al mortero con MK 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica estuvo incrementándose hasta 28 días, después hubo una disminución entre 28 y 45 días, a partir de ahí el valor se quintuplicó y estuvo oscilando hasta 1000 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar a 180 días y a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica aumentó gradualmente los primeros 45 días, entre 45 y 90 días el valor se triplicó y a partir de ahí se mantuvo prácticamente constante hasta 500 días.

**Tabla 39.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con MK 30% a través del tiempo.**

Ensayo	MK 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	8.39 ± 0.33	6.13 ± 0.04	6.54 ± 2.06	23.01 ± 1.85	31.19 ± 2.86	26.79 ± 0.18	ND	32.11 ± 1.79
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2122 ± 17.40	2215 ± 14.02	2226 ± 13.10	2688 ± 60.34	2557 ± 3.52	2558 ± 0.00	ND	2590 ± 308.9



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistencia a la compresión (MPa)	5.36 ± 0.77	6.61 ± 0.07	5.39 ± 0.13	15.30 ± 0.24	15.98 ± 0.65	16.24 ± 0.37	ND	ND
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	----	----

En la tabla 39 se presentan los resultados correspondientes al mortero con MK 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica tuvo varios incrementos y decrementos; los primeros 28 días bajó, entre 28 y 180 días aumento enormemente, entre 180 y 360 días descendió, después volvió a incrementar hasta 1000 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar a 180 días y a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica aumentó los primeros 28 días, entre 28 y 45 días presentó un descenso y a partir de ahí el valor se triplicó y a partir de ahí se mantuvo prácticamente constante hasta 500 días.

**Tabla 40.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 5% a través del tiempo.**

Ensayo	PE 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.60 ± 0.05	4.62 ± 0.20	4.73 ± 0.05	4.87 ± 0.35	9.63 ± 0.16	12.71 ± 1.08	ND	20.57 ± 0.72
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2544 ± 12.60	2669 ± 15.08	2750 ± 26.44	2871 ± 194.1	2760 ± 160.5	2789 ± 14.41	ND	3239 ± 30.73
Resistencia a la compresión (MPa)	8.17 ± 0.15	9.01 ± 0.03	10.51 ± 0.14	9.05 ± 0.32	10.68 ± 0.22	12.96 ± 0.07	ND	ND

En la tabla 40 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PE 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica siempre estuvo en ascenso, presentando el mayor incremento entre 360 y 1000 días. En lo que respecta a la VPU, los valores aumentaron hasta llegar a 90 días, después descendieron hasta llegar a 180 días y a partir de ahí incrementaron hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica aumentó los primeros 45 días, entre 45 y 90 días presentó un descenso y a partir de ahí siguió incrementándose.



**Tabla 41.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 10% a través del tiempo.**

Ensayo	PE 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.52 ± 0.02	5.21 ± 0.46	4.88 ± 0.19	5.11 ± 0.14	8.93 ± 2.18	19.16 ± 1.05	ND	22.33 ± 1.82
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2376 ± 6.27	2570 ± 15.68	2586 ± 17.83	2597 ± 33.32	2760 ± 34.72	2695 ± 27.58	ND	3125 ± 62.23
Resistencia a la compresión (MPa)	6.27 ± 0.18	7.36 ± 0.47	8.54 ± 0.33	9.88 ± 0.17	9.42 ± 0.80	13.02 ± 0.35	ND	ND

En la tabla 41 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PE 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica normalmente estuvo en ascenso, excepto entre los 28 y 45 días que presentó una leve disminución. En lo que respecta a la VPU, los valores normalmente estuvieron aumentando en el transcurso del tiempo, únicamente presentaron un pequeño descenso entre 180 y 360 días. Finalmente, la resistencia mecánica ha estado incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 42.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 15% a través del tiempo.**

Ensayo	PE 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.59 ± 0.09	5.54 ± 0.07	5.19 ± 0.30	5.14 ± 0.05	13.82 ± 1.07	13.24 ± 0.85	ND	18.24 ± 0.30
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2357 ± 14.36	2495 ± 12.09	2545 ± 9.14	2500 ± 30.21	2716 ± 18.79	2493 ± 11.72	ND	2914 ± 8.65
Resistencia a la compresión (MPa)	6.06 ± 0.46	7.66 ± 0.49	7.75 ± 0.30	7.70 ± 0.23	8.26 ± 0.47	9.37 ± 0.26	ND	ND

En la tabla 42 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PE 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica normalmente estuvo en ascenso, sólo presentó una ligera disminución entre 45 y 90 días. En lo que refiere



a la VPU, los valores normalmente estuvieron aumentando en el transcurso del tiempo y se presentaron sólo 2 descensos, el primero entre 45 y 90 días y el segundo entre 180 y 360 días. Finalmente, la resistencia mecánica prácticamente ha estado incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 43.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 20% a través del tiempo.**

Ensayo	PE 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.63 ± 0.14	5.20 ± 0.27	4.99 ± 0.36	6.40 ± 0.51	14.02 ± 1.88	15.53 ± 0.52	ND	16.66 ± 2.05
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2269 ± 6.36	2435 ± 8.82	2463 ± 1.05	2640 ± 50.91	2675 ± 48.05	2457 ± 18.69	ND	2815 ± 24.91
Resistencia a la compresión (MPa)	5.53 ± 0.17	8.95 ± 0.10	9.05 ± 0.09	8.48 ± 0.88	10.18 ± 1.00	10.16 ± 0.32	ND	ND

En la tabla 43 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PE 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica aumentó gradualmente hasta 90 días, a partir de ahí tuvo un incremento mayor y se mantuvo constante. En lo que refiere a la VPU, los valores normalmente estuvieron aumentando hasta los 180 días, luego hubo un descenso entre 180 y 360 días y a partir de ahí incrementaron nuevamente. Finalmente, la resistencia mecánica prácticamente ha estado incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 44.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PE 30% a través del tiempo.**

Ensayo	PE 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.63 ± 0.02	5.05 ± 0.10	4.86 ± 0.09	9.67 ± 0.73	13.89 ± 1.14	7.10 ± 0.59	ND	8.53 ± 0.19
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2157 ± 21.98	2325 ± 10.04	2340 ± 17.66	2571 ± 48.56	2555 ± 35.65	2420 ± 43.56	ND	2416 ± 20.24
Resistencia a la compresión (MPa)	5.87 ± 0.17	7.63 ± 0.21	3.44 ± 3.40	6.61 ± 0.92	8.92 ± 0.93	8.59 ± 0.45	ND	ND



En la tabla 44 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PE 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica aumentó gradualmente hasta 180 días, a partir de ahí tuvo un decremento hasta llegar a 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron aumentando hasta los 90 días y a partir de ahí fueron descendiendo hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica normalmente estuvo incrementándose, sólo presentó un descenso considerable entre 28 y 45 días.

**Tabla 45.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 5% a través del tiempo.**

Ensayo	PN 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.95 ± 0.04	4.86 ± 0.18	5.41 ± 0.11	8.12 ± 0.54	14.60 ± 0.82	15.16 ± 1.62	ND	22.77 ± 0.25
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2697 ± 8.16	2787 ± 8.82	2874 ± 53.31	2753 ± 28.25	2825 ± 42.83	2794 ± 6.94	ND	3360 ± 8.96
Resistencia a la compresión (MPa)	9.62 ± 0.50	10.42 ± 0.60	12.66 ± 0.60	10.88 ± 0.57	12.19 ± 0.28	14.34 ± 0.74	ND	ND

En la tabla 45 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PN 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica siempre ha estado aumentado en el transcurso del tiempo. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2700 m/s hasta los 360 días, a partir de ahí tuvo un aumento considerable de aproximadamente el 20%. Finalmente, la resistencia mecánica normalmente estuvo incrementándose, sólo presentó un descenso considerable entre 45 y 90 días.

**Tabla 46.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 10% a través del tiempo.**

Ensayo	PN 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.88 ± 0.15	4.63 ± 0.32	5.57 ± 0.73	6.92 ± 0.44	14.92 ± 0.36	16.30 ± 0.85	ND	50.08 ± 2.85
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2608 ± 43.43	2778 ± 31.94	2838 ± 41.43	2771 ± 97.72	2796 ± 26.40	2975 ± 13.49	ND	3363 ± 26.39
Resistencia a la compresión (MPa)	6.84 ± 0.14	12.94 ± 0.15	14.27 ± 0.08	8.24 ± 0.18	9.06 ± 0.31	12.48 ± 0.36	ND	ND

En la tabla 46 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PN 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica presentó un incremento gradual hasta 360 días, pero entre 360 y 500 días tuvo una gran mejoría, su resistividad prácticamente se triplicó. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2800 m/s hasta los 360 días, a partir de ahí tuvo un aumento considerable de aproximadamente el 20%. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta 45 días, entre 45 y 180 días presentó un descenso, después siguió incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 47.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 15% a través del tiempo.**

Ensayo	PN 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.84 ± 0.01	4.65 ± 0.17	5.24 ± 0.25	6.93 ± 0.72	13.66 ± 1.03	17.61 ± 1.96	ND	24.57 ± 1.54
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2640 ± 11.94	2758 ± 22.28	2796 ± 10.41	2745 ± 34.32	2922 ± 39.97	3114 ± 33.09	ND	3293 ± 51.19
Resistencia a la compresión (MPa)	7.78 ± 0.61	8.71 ± 0.85	10.35 ± 0.25	8.86 ± 0.81	9.66 ± 0.17	11.90 ± 0.34	ND	ND

En la tabla 47 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PN 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica presentó un incremento gradualmente hasta los 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron prácticamente en ascenso. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta 45 días, entre 45 y 180 días presentó un descenso, después siguió incrementándose hasta 360 días.



**Tabla 48.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 20% a través del tiempo.**

Ensayo	PN 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	3.28 ± 0.20	4.77 ± 0.12	4.47 ± 0.13	6.93 ± 0.68	18.05 ± 0.83	25.76 ± 2.47	ND	36.49 ± 4.69
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2561 ± 29.33	2665 ± 24.56	2770 ± 96.47	2707 ± 10.80	2939 ± 63.69	2722 ± 3.15	ND	3337 ± 26.87
Resistencia a la compresión (MPa)	6.94 ± 0.47	8.13 ± 0.30	10.21 ± 0.75	9.14 ± 0.27	10.66 ± 0.30	12.55 ± 0.92	ND	ND

En la tabla 48 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PN 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica presentó un incremento gradualmente hasta los 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron prácticamente en ascenso hasta 180 días, después tuvieron un ligero descenso y luego aumentaron 20 % aproximadamente. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta 45 días, entre 45 y 90 días presentó un descenso, después siguió incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 49.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con PN 30% a través del tiempo.**

Ensayo	PN 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	3.18 ± 0.26	5.12 ± 0.06	5.18 ± 0.20	6.22 ± 0.23	16.57 ± 2.39	28.54 ± 0.89	ND	92.15 ± 5.57
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2512 ± 8.53	2623 ± 30.36	2687 ± 36.76	2605 ± 42.34	2833 ± 29.93	3135 ± 18.38	ND	3139 ± 36.00
Resistencia a la compresión (MPa)	6.25 ± 0.40	7.58 ± 0.94	8.60 ± 0.76	6.61 ± 0.17	7.85 ± 0.54	11.33 ± 1.33	ND	ND

En la tabla 49 se presentan los resultados correspondientes al mortero con PN 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta los 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron



prácticamente en ascenso hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta 45 días, entre 45 y 90 días presentó un descenso, después siguió incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 50.- Comportamiento físico-mecánico del mortero sin adiciones (T1) a través del tiempo.**

Ensayo	Testigo (T1)							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	3.53 ± 0.23	4.58 ± 0.23	3.46 ± 0.06	6.75 ± 0.23	10.73 ± 0.21	11.48 ± 0.77	ND	27.69 ± 1.03
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	3253 ± 74.84	3033 ± 14.88	2673 ± 26.10	2669 ± 21.21	2967 ± 25.30	2730 ± 20.34	ND	3262 ± 98.54
Resistencia a la compresión (MPa)	8.69 ± 0.47	10.98 ± 0.54	12.94 ± 0.18	9.96 ± 5.04	11.87 ± 0.58	13.33 ± 0.85	ND	ND

En la tabla 50 se presentan los resultados correspondientes al mortero sin adiciones elaborado con arena del Río Lerma (T1). Se aprecia que la resistividad eléctrica prácticamente estuvo en ascenso hasta los 1000 días, sólo disminuyó considerablemente entre 28 y 45 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron prácticamente en descenso hasta 90 días, a partir de ahí los valores incrementaron hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose hasta 45 días, entre 45 y 90 días presentó un descenso, después siguió incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 51.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 5% a través del tiempo.**

Ensayo	CBOF 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.21 ± 0.10	4.72 ± 0.38	4.62 ± 0.28	6.26 ± 0.63	8.13 ± 0.24	10.49 ± 0.49	ND	38.49 ± 0.96
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2778 ± 32.87	3000 ± 14.29	2827 ± 17.91	2095 ± 56.23	2640 ± 23.16	2737 ± 11.38	ND	3233 ± 35.87
Resistencia a la compresión (MPa)	6.16 ± 0.26	8.02 ± 0.42	9.52 ± 0.09	9.71 ± 0.33	12.13 ± 0.39	12.69 ± 0.89	ND	ND



En la tabla 51 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBOF 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente a lo largo de todas las edades de prueba. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando hasta 90 días, a partir de ahí los valores incrementaron enormemente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica siempre estuvo incrementándose hasta 360 días.

**Tabla 52.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 10% a través del tiempo.**

Ensayo	CBOF 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.65 ± 0.04	2.92 ± 0.22	3.16 ± 0.13	4.71 ± 0.13	5.02 ± 0.10	4.74 ± 0.12	ND	66.39 ± 7.27
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2039 ± 313.5	2283 ± 7.28	2281 ± 45.47	2400 ± 20.75	2498 ± 13.19	2400 ± 20.70	ND	3176 ± 37.32
Resistencia a la compresión (MPa)	3.64 ± 0.20	4.32 ± 0.11	4.73 ± 0.16	5.36 ± 0.23	6.22 ± 0.27	11.25 ± 0.48	ND	ND

En la tabla 52 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBOF 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 360 días y a partir de ahí presentó un incremento grandísimo. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2300 m/s hasta 360 días y a partir de ahí los valores incrementaron un 30% aproximadamente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 53.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 15% a través del tiempo.**

Ensayo	CBOF 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica	3.15 ± 0.26	3.18 ± 0.26	3.28 ± 0.08	6.28 ± 0.21	7.44 ± 0.29	12.65 ± 2.58	ND	39.94 ± 2.80



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



(kΩ-cm)								
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2452 ± 16.50	2508 ± 46.53	2441 ± 43.49	2521 ± 51.22	2608 ± 30.81	3814 ± 41.56	ND	3155 ± 118.8
Resistencia a la compresión (MPa)	6.10 ± 0.14	6.74 ± 0.69	6.41 ± 0.26	8.38 ± 0.67	8.81 ± 0.58	9.98 ± 0.25	ND	ND

En la tabla 53 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBOF 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, entre 180 y 360 días hubo un incremento de 45% aproximadamente, después descendieron nuevamente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica prácticamente estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 54.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 20% a través del tiempo.**

Ensayo	CBOF 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.16 ± 0.09	2.55 ± 0.21	4.77 ± 0.35	5.81 ± 0.24	8.45 ± 0.67	8.82 ± 0.21	ND	43.40 ± 2.19
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2492 ± 25.14	2322 ± 59.46	2409 ± 82.26	2503 ± 13.32	2554 ± 27.78	3815 ± 35.81	ND	2852 ± 76.84
Resistencia a la compresión (MPa)	6.52 ± 0.25	5.00 ± 0.79	6.07 ± 0.68	7.23 ± 0.37	8.00 ± 0.12	9.24 ± 0.46	ND	ND

En la tabla 54 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBOF 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 360 días y a partir de ahí este valor se quintuplicó hasta llegar a 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, entre 180 y 360 días hubo un incremento de 45% aproximadamente, después descendieron nuevamente hasta 1000 días.



Finalmente, la resistencia mecánica prácticamente estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 55.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CBOF 30% a través del tiempo.**

Ensayo	CBOF 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.85 ± 0.09	2.75 ± 0.12	3.29 ± 0.62	5.66 ± 0.62	7.03 ± 0.44	9.65 ± 1.29	ND	48.10 ± 2.63
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2426 ± 23.03	2269 ± 41.27	2275 ± 84.65	2414 ± 24.78	2503 ± 18.15	3615 ± 66.56	ND	2820 ± 89.48
Resistencia a la compresión (MPa)	5.49 ± 0.55	4.63 ± 0.26	4.68 ± 0.32	5.34 ± 0.20	6.19 ± 0.26	7.13 ± 0.71	ND	ND

En la tabla 55 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CBOF 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 360 días y a partir de ahí este valor se quintuplicó hasta llegar a 1000 días. En lo que refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, entre 180 y 360 días hubo un incremento de 45% aproximadamente, después descendieron nuevamente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica prácticamente estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 56.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 5% a través del tiempo.**

Ensayo	CM 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.76 ± 0.07	2.79 ± 0.06	2.86 ± 0.09	7.16 ± 1.54	8.66 ± 0.26	14.29 ± 0.53	ND	¿
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2521 ± 12.26	2892 ± 33.64	2614 ± 32.84	2576 ± 20.65	2694 ± 11.71	3049 ± 56.03	ND	¿
Resistencia a la compresión (MPa)	7.15 ± 0.16	8.15 ± 0.11	9.54 ± 0.46	10.03 ± 0.43	11.20 ± 0.24	11.92 ± 0.50	ND	ND



En la tabla 56 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CM 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 360 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2700 m/s hasta 180 días, entre 180 y a partir de ahí tuvieron un incremento de 30% aproximadamente hasta llegar a 360 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 57.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 10% a través del tiempo.**

Ensayo	CM 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.34 ± 0.05	2.34 ± 0.05	3.54 ± 0.36	4.09 ± 0.16	5.69 ± 0.51	8.98 ± 0.07	ND	52.96 ± 5.49
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2418 ± 34.04	2418 ± 34.04	2274 ± 138.3	2527 ± 18.03	2614 ± 27.72	3372 ± 19.69	ND	3221 ± 40.89
Resistencia a la compresión (MPa)	7.26 ± 0.25	7.26 ± 0.25	8.34 ± 0.48	8.61 ± 0.41	9.84 ± 0.65	10.86 ± 0.28	ND	ND

En la tabla 57 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CM 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 360 días y a partir de ahí su valor prácticamente se quintuplicó. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 90 días, luego aumentaron considerablemente hasta 360 y a partir de ahí tuvieron un ligero descenso hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 58.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 15% a través del tiempo.**

Ensayo	CM 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.93 ± 0.11	2.58 ± 0.11	4.46 ± 0.33	5.42 ± 0.07	7.25 ± 0.31	9.98 ± 0.82	ND	34.11 ± 1.69
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2447 ± 42.12	2484 ± 51.99	2546 ± 18.99	2645 ± 19.91	2734 ± 30.97	2964 ± 27.64	ND	3023 ± 169.5



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistencia a la compresión (MPa)	6.23 ± 0.33	7.40 ± 0.70	8.41 ± 0.16	9.30 ± 0.30	11.23 ± 0.23	11.88 ± 0.24	ND	ND
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	----	----

En la tabla 58 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CM 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 90 días, luego aumentaron considerablemente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 59.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 20% a través del tiempo.**

Ensayo	CM 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.51 ± 0.11	2.04 ± 0.14	4.49 ± 0.80	6.29 ± 0.22	6.66 ± 0.28	10.03 ± 0.32	ND	34.20 ± 1.71
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2282 ± 21.21	2431 ± 10.21	2456 ± 53.68	2535 ± 16.13	2651 ± 8.67	2654 ± 119.1	ND	3218 ± 5.10
Resistencia a la compresión (MPa)	4.32 ± 0.25	6.83 ± 0.33	7.05 ± 0.72	8.06 ± 0.47	8.60 ± 0.26	10.74 ± 0.28	ND	ND

En la tabla 59 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CM 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 360 días, luego aumentaron considerablemente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 60.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con CM 30% a través del tiempo.**

Ensayo	CM 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	1.63 ± 0.10	2.99 ± 0.25	5.17 ± 0.16	5.30 ± 0.52	6.77 ± 0.28	11.46 ± 0.32	ND	36.25 ± 1.76
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2184 ± 20.67	2296 ± 39.34	2381 ± 14.43	2468 ± 17.77	2541 ± 7.31	2635 ± 101.2	ND	2961 ± 133.4
Resistencia a la compresión (MPa)	3.18 ± 0.16	4.25 ± 0.16	5.08 ± 0.21	5.97 ± 0.16	6.89 ± 0.36	8.41 ± 0.33	ND	ND

En la tabla 60 se presentan los resultados correspondientes al mortero con CM 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 360 días, luego aumentaron considerablemente hasta 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 61.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 5% a través del tiempo.**

Ensayo	EAH 5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	4.50 ± 1.34	4.78 ± 0.04	5.76 ± 0.29	7.33 ± 0.26	10.54 ± 0.83	12.56 ± 0.74	ND	28.05 ± 1.74
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2495 ± 12.28	2744 ± 24.94	2879 ± 69.19	2590 ± 6.66	2695 ± 4.36	2763 ± 14.60	ND	3417 ± 5.19
Resistencia a la compresión (MPa)	7.20 ± 0.22	8.68 ± 0.59	10.43 ± 0.46	11.37 ± 0.10	12.38 ± 0.08	13.50 ± 0.96	ND	ND

En la tabla 61 se presentan los resultados correspondientes al mortero con EAH 5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2600 m/s hasta 360 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.



**Tabla 62.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 10% a través del tiempo.**

Ensayo	EAH 10%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.93 ± 0.15	3.90 ± 0.57	8.62 ± 3.69	8.66 ± 1.38	9.33 ± 0.91	14.06 ± 0.41	ND	30.50 ± 1.61
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2670 ± 22.86	2774 ± 40.07	2796 ± 45.44	2626 ± 53.81	2691 ± 14.74	2753 ± 16.49	ND	3383 ± 42.98
Resistencia a la compresión (MPa)	6.94 ± 0.23	8.87 ± 0.38	9.94 ± 0.04	10.96 ± 1.01	13.19 ± 0.35	13.51 ± 0.14	ND	ND

En la tabla 62 se presentan los resultados correspondientes al mortero con EAH 10%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2700 m/s hasta 360 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 63.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 15% a través del tiempo.**

Ensayo	EAH 15%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.24 ± 0.24	3.10 ± 0.41	4.17 ± 0.25	6.71 ± 0.29	10.27 ± 0.14	16.37 ± 0.27	ND	68.99 ± 3.91
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2284 ± 62.63	2499 ± 9.91	2617 ± 13.36	2726 ± 17.58	2847 ± 26.48	3400 ± 126.6	ND	3300 ± 39.15
Resistencia a la compresión (MPa)	6.88 ± 0.28	8.21 ± 0.13	10.48 ± 0.42	12.39 ± 0.50	14.01 ± 0.46	16.92 ± 0.92	ND	ND

En la tabla 63 se presentan los resultados correspondientes al mortero con EAH 15%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente



hasta llegar a 360 días y después disminuyeron levemente. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 64.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 20% a través del tiempo.**

Ensayo	EAH 20%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.11 ± 0.06	2.83 ± 0.22	5.85 ± 0.42	8.61 ± 0.65	11.98 ± 0.76	17.52 ± 1.22	ND	30.54 ± 0.35
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2411 ± 28.77	2469 ± 16.84	2607 ± 35.75	2702 ± 10.49	2827 ± 0.00	3339 ± 284.1	ND	3163 ± 192.6
Resistencia a la compresión (MPa)	5.93 ± 0.18	7.92 ± 0.27	10.08 ± 0.26	10.60 ± 0.65	13.01 ± 0.33	15.84 ± 0.40	ND	ND

En la tabla 64 se presentan los resultados correspondientes al mortero con EAH 20%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 360 días y después disminuyeron levemente. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 65.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con EAH 30% a través del tiempo.**

Ensayo	EAH 30%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.78 ± 0.94	7.99 ± 0.99	8.93 ± 1.09	12.65 ± 0.44	11.98 ± 0.99	18.30 ± 1.02	ND	30.86 ± 0.53
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2203 ± 94.25	2393 ± 34.84	2574 ± 2.96	2667 ± 22.10	2807 ± 27.42	3317 ± 181.7	ND	3204 ± 51.96
Resistencia a la compresión (MPa)	4.91 ± 0.16	7.17 ± 0.37	8.21 ± 0.26	10.61 ± 0.07	13.53 ± 0.69	15.60 ± 0.32	ND	ND

En la tabla 65 se presentan los resultados correspondientes al mortero con EAH 30%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente



hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 360 días y después disminuyeron levemente. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 66.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 0.5% a través del tiempo.**

Ensayo	FN 0.5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.63 ± 0.15	3.50 ± 0.11	4.20 ± 0.25	4.86 ± 0.16	7.18 ± 0.28	13.05 ± 0.83	ND	57.84 ± 4.82
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2599 ± 23.01	2572 ± 39.11	2578 ± 11.44	2585 ± 22.47	2729 ± 34.88	3116 ± 14.90	ND	3345 ± 51.23
Resistencia a la compresión (MPa)	7.54 ± 0.21	8.83 ± 1.02	10.22 ± 1.07	10.72 ± 0.18	12.73 ± 0.39	13.44 ± 0.63	ND	ND

En la tabla 66 se presentan los resultados correspondientes al mortero con FN 0.5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 67.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 1.0% a través del tiempo.**

Ensayo	FN 1.0%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.00 ± 0.10	2.16 ± 0.05	3.11 ± 0.14	4.26 ± 0.22	7.89 ± 0.43	11.09 ± 0.51	ND	24.98 ± 0.86
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2430 ± 217.5	2561 ± 25.50	2569 ± 29.09	2669 ± 11.99	2741 ± 21.98	2967 ± 12.96	ND	3201 ± 27.52
Resistencia a la compresión (MPa)	6.96 ± 1.50	9.08 ± 0.52	10.88 ± 0.43	11.88 ± 1.20	13.75 ± 0.56	13.30 ± 0.12	ND	ND



En la tabla 67 se presentan los resultados correspondientes al mortero con FN 1.0%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 180 días, después disminuyó ligeramente.

**Tabla 68.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 1.5% a través del tiempo.**

Ensayo	FN 1.5%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.14 ± 0.12	2.35 ± 0.03	3.17 ± 0.19	4.30 ± 0.29	9.03 ± 0.32	13.64 ± 0.36	ND	23.96 ± 0.51
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2469 ± 15.56	2512 ± 16.33	2497 ± 95.70	2628 ± 17.65	2732 ± 42.23	3044 ± 54.71	ND	3216 ± 27.64
Resistencia a la compresión (MPa)	7.16 ± 0.97	8.82 ± 0.79	11.05 ± 0.11	11.09 ± 0.30	12.57 ± 1.01	13.63 ± 1.28	ND	ND

En la tabla 68 se presentan los resultados correspondientes al mortero con FN 1.5%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2500 m/s hasta 180 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

**Tabla 69.- Comportamiento físico-mecánico del mortero con FN 2.0% a través del tiempo.**

Ensayo	FN 2.0%							
	14 días	28 días	45 días	90 días	180 días	360 días	500 días	1000 días
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	2.09 ± 0.12	2.52 ± 0.03	4.00 ± 0.61	5.34 ± 0.44	6.03 ± 0.40	12.35 ± 0.80	ND	25.65 ± 1.11
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	2607 ± 37.81	2541 ± 50.21	2694 ± 59.49	2466 ± 30.79	2579 ± 25.35	2658 ± 13.02	ND	3156 ± 49.07



Resistencia a la compresión (MPa)	8.94 ± 0.30	7.56 ± 0.35	8.79 ± 1.01	9.23 ± 0.71	10.96 ± 0.37	12.08 ± 0.42	ND	ND
-----------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	----	----

En la tabla 69 se presentan los resultados correspondientes al mortero con FN 2.0%. Se aprecia que la resistividad eléctrica incrementó gradualmente hasta 1000 días. En lo que se refiere a la VPU, los valores estuvieron oscilando alrededor de 2600 m/s hasta 360 días, luego aumentaron considerablemente hasta llegar a 1000 días. Finalmente, la resistencia mecánica estuvo incrementándose gradualmente hasta 360 días.

#### **4.7.- Clasificación paramétrica de los resultados a 1000 días**

Como último punto se verificará la durabilidad de los morteros tomando en cuenta que éstos deberán tener una baja porosidad efectiva ( $\epsilon\epsilon$ ), una alta resistividad eléctrica ( $\rho$ ) y una alta velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Tomando en cuenta esto se identificaron los valores mínimos y máximos registrados en cada una de estas pruebas a 1000 días y se establecieron parámetros de clasificación para cada prueba, los cuales se identificaron con un color y se muestran en la tabla 70. Posteriormente las substituciones fueron colocadas en una tabla (Ver tabla 71) en orden ascendente para la prueba de porosidad efectiva y descendente para resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, lo cual permite identificar los rangos previamente establecidos y asignarles el color correspondiente. Una vez definida la calificación por prueba se hace la sumatoria y se obtiene la calificación final, la cual es mostrada en la tabla 72.

**Tabla 70.- Parámetros de clasificación**

Calificación	$\rho$ K $\Omega$ -cm	VPU m/s	$\epsilon\epsilon$ %
10	76-93	3200-3400	16-19
8	59-76	3000-3200	19-22
6	42-59	2800-3000	22-25



4	25-42	2600-2800	25-28
2	8-25	2400-2600	28-31

**Tabla 71.-Calificación por prueba.**

$\rho$	VPU	$\epsilon_e$
PN 30%	CBC 10%	MK 30%
CBC 20%	EAH 5%	FN 2.0%
EAH 15%	EAH 10%	CBOF 30%
CBOF 10%	CBC 20%	CEL 15%
CM 10%	PN 10%	PN 30%
CBC 30%	PN 5%	CEL 10%
MK 20%	CBOF 15%	EAH 5%
PN 10%	PN 20%	T1
CBOF 30%	EAH 15%	FN 1.0%
CBOF 20%	CBC 15%	CEL 5%
CBC 15%	PN 15%	CBOF 20%
CBOF 15%	CM 10%	MK 5%
CBOF 5%	T1	CEL 30%
PN 20%	CEL 5%	PN 10%
CM 30%	CBOF 10%	FN 1.5%
CM 20%	MK 15%	PE 30%
CM 15%	CEL 20%	CBOF 15%
MK 10%	PE 5%	MK 15%
MK 30%	T	CEL 20%
MK 5%	CBOF 5%	MK 20%
T	CM 20%	EAH 10%
EAH 30%	FN 1.5%	PE 15%
MK 15%	CEL 10%	CM 30%
EAH 20%	CEL 15%	PN 20%
EAH 10%	EAH 30%	MK 10%
CBC 5%	FN 1.0%	CM 10%
EAH 5%	CBC 30%	CBOF 5%
CBC 10%	MK 20%	CBC 5%
T1	MK 10%	EAH 15%
FN 2.0%	EAH 20%	EAH 20%
FN 1.0%	FN 2.0%	CBC 15%
PN 15%	PN 30%	PN 5%
FN 1.5%	PE 10%	CBOF 10%
CEL 20%	CBC 5%	PE 20%
PN 5%	CEL 30%	PE 5%
PE 10%	CM 15%	EAH 30%
PE 5%	MK 5%	PE 10%



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



CEL 15%	CM 30%	T
PE 15%	PE 15%	CBC 10%
CEL 30%	CBOF 20%	CBC 20%
CEL 5%	CBOF 30%	PN 15%
PE 20%	PE 20%	CM 15%
CEL 10%	MK 30%	CM 20%
PE 30%	PE 30%	CBC 30%

**Tabla 72.-Calificación final**

Material	Calificación
PN 30%	26
PN 10%	24
CBC 20%	22
EAH 15%	22
CBOF 10%	22
CBOF 30%	22
CBOF 15%	22
EAH 5%	22
T1	22
FN 2.0%	22
CM 10%	20
MK 20%	20
CBOF 20%	20
PN 20%	20
MK 15%	20
EAH 10%	20
FN 1.0%	20
FN 1.5%	20
CEL 15%	20
CEL 5%	20
CEL 10%	20
CBC 15%	18
CBOF 5%	18
MK 10%	18
MK 30%	18
MK 5%	18
T	18
EAH 30%	18
CBC 10%	18
CEL 20%	18
CEL 30%	18
CBC 30%	16
CM 30%	16



*Comportamiento físico-mecánico de morteros de CP con substituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días*



CM 20%	16
EAH 20%	16
CBC 5%	16
PN 5%	16
PE 5%	16
CM 15%	14
PN 15%	14
PE 10%	14
PE 15%	14
PE 30%	14
PE 20%	12

De acuerdo con la clasificación paramétrica propuesta, la substitución que presentó mejores características de durabilidad es PN 30%, seguida por PN 10%, CBC 20%, EAH 15%, CBOF 10, 15 y 30%, EAH 5%, T1 y FN 2.0%. Mientras que las substituciones de CM 15%, PN 15%, PE 10, 15,20 y 30% fueron las peores. De manera general, puede decirse que las substituciones de perlita expandida no son adecuadas cuando se busca durabilidad en el concreto.



## **5.- CONCLUSIONES**

La utilización de distintos agregados en la elaboración de los morteros objeto de estudio no ocasionó diferencias significativas, lo cual se corroboró en las pruebas realizadas en ambos testigos, ya que los resultados fueron prácticamente similares en resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión; únicamente hubo variación significativa en el ensayo de absorción capilar, en el cual los morteros testigo elaborados con arena del Río Lerma (T1) presentaron el comportamiento más adecuado.

Las substituciones que resultaron más idóneas de acuerdo con el ensayo de absorción capilar fueron MK 30%, FN 2.0%, CBOF 30% y CEL 15%, lo cual significa que éstas oponen una alta resistencia a la penetración del agua, así como una baja porosidad efectiva, lo cual es deseable para elaborar un concreto durable.

El ensayo de resistividad eléctrica arrojó resultados muy prometedores en las substituciones de PN 30%(92.15kΩ-cm), CBC 20%(88.13 kΩ-cm), EAH 15%(68.99kΩ-cm) y CBOF 10%(66.39kΩ-cm), las cuales presentaron una notable mejoría con respecto a sus testigos y de acuerdo con lo reportado en la literatura concretos con valores superiores a 50-70kΩ-cm ofrecen resistencia a la corrosión. Mientras que todas las substituciones de PE (8.53–22.33KΩ-cm) y 5,10,15 y 30% de CEL(16.43-22.94kΩ-cm) fueron muy inferiores al testigo.

En la prueba de VPU la mayoría de las substituciones arrojaron resultados muy similares a su correspondiente testigo; únicamente las substituciones de MK 30%, PE 15,20 y 30%, CEL 30%,CBOF 20 y 30% , CM 20 y 30% fueron significativamente inferiores al testigo. Sin embargo, la mayoría de las substituciones evaluadas presentan una calidad del concreto alta de acuerdo con los criterios de evaluación de la Red DURAR, mientras que la minoría presenta una calidad normal.



El comportamiento de las diferentes substituciones a través del tiempo fue muy similar. En las pruebas de VPU y resistencia a la compresión el incremento fue gradual a lo largo del tiempo. La resistividad eléctrica presentó un incremento gradual los primeros 360 días, pero entre 360 días y 1000 días hubo un incremento notable (en algunas substituciones su valor se triplicó, tal es el caso de EAH 15%, PN 10 y 30%), lo cual puede significar que estos materiales tienen un efecto de micro llenado y disminuyen la conectividad entre poros y con ello la porosidad efectiva.

De acuerdo con la clasificación paramétrica propuesta tomando en cuenta los criterios de durabilidad se concluye que la mejor substitución en términos durabilidad es PN 30%, seguida por PN 10%, CBC 20%, EAH 5 y 15%, CBOF 10,15 y 30%. Mientras que las substituciones que obtuvieron los resultados menos prometedores en términos de durabilidad son PE 10,15,20 y 30%.



## **Bibliografía**

- Águila, I., & Soso, M. (2008). Evaluación físico química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 51-62.
- Aguirre, A.R. & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*, 7-38.
- Amoroch Cortés, E. ; Oliveros Villamizar, G. . (2000). Apuntes sobre Energía y Recursos Energéticos. Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Arguello Hernández, S.del C. (2012). Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con substituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus. *Tesis de Licenciatura*. Morelia, México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- Arreola Sánchez, M. (2013). Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento), para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto. *Tesis de Maestría*. Morelia, México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- ASTM C 150-04. (2004). Standard Specification for Portland Cement. United States: ASTM International.
- ASTM C 597-09. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International.
- ASTM C 618-03. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United States: ASTM International.



- ASTM C109/C 109M-02. (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). United States: ASTM International.
- ASTM C270-14. (2014). Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. ASTM International.
- ASTM C-778-02, A. (2002). Standard Specification for Standard Sand. ASTM International.
- ASTM G57-12. (2012). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. ASTM International.
- Bektas, L., Turanli, L., & Monteiro, P. (2005). Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35, 2014-2017.
- Bellmann, F., & Stark, J. (2009). Activation of blast furnace slag by a new method. *Cement and Concrete Research*, 40, 644-650.
- Bernabé Reyes, C. . (2012). Adiciones minerales de alta temperatura a morteros de cemento como modificadores del comportamiento físico-mecánico. *Tesis de Licenciatura*. Morelia, México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- Bernabé Reyes, C. (Febrero de 2015). Evaluación de morteros de cemento sustituidos con cenizas puzolánicas para mitigar el fenómeno de corrosión en estructuras de concreto en rehabilitación. Tesis de Maestría. Morelia, Michoacán, México: U.M.S.N.H.
- Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P. & Polder, R. (2004). Corrosion of Steel in Concrete. *Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.*
- Brown, E. G. (1996). *Análisis e Historia del Cemento*. Keswick, Ontario: Gordon E. Brown Associates.
- CANACEM. (2015). *Producción y Consumo*. México.



- Cárdenas, A.; Arguelles, W.M. and Goycoolea F.M. (2002). On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings. Hermosillo, Sonora, México.
- Catells, X. E. (2012). Valoración de residuos procedentes de grandes industrias. En X. Catells, *Reciclaje de residuos industriales* (págs. 558-570). Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- CMIC. (2006). *Escorias*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2015, de Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción: <http://www.cmic.org/mnsectores/Agua/Semarnat/canacero/ESCORIAS2006.pdf>
- Constructor Civil. (2015). *Constructor Civil. Tips para la Construcción de Edificaciones, Casas, Materiales y Equipos de Construcción*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2015, de Constructor Civil. Tips para la Construcción de Edificaciones, Casas, Materiales y Equipos de Construcción: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>
- Cordeiro, C., Toledo, R., Tavares, L., & Fairbairn, E. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland Cement and lime mortars. *ELSEVIER*, 410.
- Cordeiro, G., Toledo, F. D., & Fairbairn, E. (2009). Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. *Quim. Nova*, 82-86.
- Cruz Jiménez, L. (2012). Comportamiento mecánico del carbón mineral y de la escoria de alto horno en morteros como sustituto parcial del cemento. *Tesis de Licenciatura*. México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.



De Silva, P. &. (1993). *Phase relations in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration.*

Demirbog~a R, Gu~l R. (2003). Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy Build*, 1155-1159.

Demirbog~a R, Gu~l R. (2004). Durability of mineral admixture lightweight aggregate concrete. *Indian J Eng Mater Sci*, 201-206.

DURAR.CYTED, R. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.*

Erdem, T., Meral, C., Tokyay, M., & Erdogan, T. (2007). Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 29, 13-21.

Espinoza Pérez, L., & Escalante García, J. (2011). Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno; activación mecanoquímica del vidrio en soluciones alcalinas. *Nexo*, 24(2), 92-103.

Espinoza, L., & Escalante, I. (2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland Ordinario. *NEXO*, 21(1), 11-18.

FICEM. (2013). *Informe estadístico*. Bogotá.

Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, R. y. (2014). *Panorama de la caña de azúcar*. México.

Gómez, A. (15 de Abril de 2009). Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos de cementos. Aplicación en viviendas de bajo coste. Valencia, España. Recuperado el 12 de Septiembre de 2015, de <http://www.upv.es/upl/U0566483.pdf>



Göran, F. (1986). On the capillarity of Concrete. *Nordic Concret Research*(1).

Gunning, D. (1994). *Perlite Market Study, report prepared for the Government of Canada and British Columbia*. Mc Neal & Associates Consultants.

Guy, A. (1980). Deterioro de los materiales. En A. Guy, *Fundamento de la Ciencia de los Materiales* (pág. 421). México: Mc Graw Hill.

Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L., & Darimont, A. (2011). Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25, 1018-1025.

Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección*. Sao Paulo, Brasil: ISBN 85-903707-1-2.

Huertos, E. (1974). *El caolín en España, características, identificación y ensayos cerámicos*. Sociedad Española de cerámica y vidrio.

INEGI. (2014). *La industria siderúrgica en México 2013. Series estadísticas sectoriales*.

*Instituto de Energías Renovables UNAM*. (s.f.). Recuperado el 03 de Octubre de 2015, de [http://xml.cie.unam.mx/xml/ms/Doctos/FUNDAMENTOS\\_FRX.pdf](http://xml.cie.unam.mx/xml/ms/Doctos/FUNDAMENTOS_FRX.pdf),

Instituto Mundial del Carbón. (2005). *El carbón como recurso. Una visión general del carbón*. Reino Unido: Instituto Mundial del Carbón.

Kakali, G., Perrak, T., Tsivilis, S., & Badogiannis, E. (2001). Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the puzzolanic activity. *Applied Clay Science*, 73-80.

Kostmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Chicago: Portland Cement Association.



- Kumarán, G. B., & González, S. M. (2008). Evolución reciente de la industria del cemento: un estudio comparativo entre México y la India. *Portes*, 165-202.
- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. U.S.A.: CRC Press.
- Manjón Miguel, J., & Martínez Martínez, J. (2007). Evolución de la composición de los morteros en los puentes de fábrica. *Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 623-630.
- Mejía, R. &. (1999). Durabilidad y corrosión en Materiales Cementicios. *CYTED*.
- Mendoza, D., & Brito Benítez, E. y. (2004). *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología*.
- Ming-Sheng, K., Ying-Liang, C., & Jih-Hua, J. (2015). Accelerated carbonation of basic oxygen furnace slag and the effects on its mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 98, 286-293.
- Moya, J. (1998). Últimos avances sobre el Tratamiento Térmico del Caolín: Formación o no de Puzolanas Artificiales.
- N-CMT-2-01-004/02. (2002). *CMT. Características de los materiales. Materiales para estructuras. Materiales para mamposterías. Morteros*. SCT.
- Neville, A. M., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology* (Second ed.). England: Pearson Education Limited.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced concrete technology* (First ed.). ENGLAND: Elsevier.
- Núñez Hurtado, J.A. (2013). Comportamiento físico - mecánico de morteros de cemento con sustitución de ceniza y material orgánico en diferentes porcentajes. *Tesis de licenciatura*. Morelia, México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.



- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., J., V., Gulikers, J., & Weidert, R. (2000). RILEM TC 154 EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials and Structures*, 603-611.
- Rivera Flores, E. (s.f.). *Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja*. Facultad de Ingeniería Civil.
- Rodríguez Bucio, J. (2012). Ceniza de origen orgánico: su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento. *Tesis de Licenciatura*. Morelia, México: Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- Ruiz, R., Martínez, W., Alonso, E., Chávez, H., C.Lara, Bedolla, J., y otros. (2015). Study on effective porosity in mortars added with sugar cane bagasse ash. *XXIV International Materials Research Congress*. Cancún.
- Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Composites*, 441-454.
- Shi, C. (2002). Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cement and Concrete Research*, 32, 459-462.
- Taylor, H. (1997). *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford.
- Taylor, R., Richardson, I., & Brydson, R. (2010). Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. *Cement and Concrete Research*, 40, 971-983.
- TERMOLITA . (2015). *TERMOLITA*. Recuperado el 25 de Octubre de 2015, de <http://www.termolita.com/portal/index.php/nosotros/perlita-mineral>
- Topcu I.B.; Isikdag B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *J. Mater Process Technol* , 34-38.



- Torre M.L. ; García Ruiz P.A. (2009). Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, 114-119.
- Torres Acosta, A., Celis Martínez, C., Martínez Molina, W., & Lomelí González, M. (2010). Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas. Sanfandila, Qro.: IMT.
- Torres Acosta, A., Martínez Molina, W., Lomelí González, M., & Pérez Gallardo, A. (2010). Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto. *Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte*.
- Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. (2015). *Estadísticas de la Industria de la Caña de Azúcar 2005-2014*.
- Yilmazer S., O. M. (2005). The effect of moisture content on sound adsorption of expanded perlite plates. *Build Environ*, 301-342.