



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

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

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS APLICADAS A
MORTEROS CON SUSTITUCIONES MINERALES DE
ALTA TEMPERATURA, CENIZAS ORGÁNICAS E
INÓRGANICAS, RESIDUOS INDUSTRIALES Y FIBRAS
DE CACTUS.”

PRESENTA:

SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

COASESOR DE TESIS:

DR. JOSÉ IVAN ESCALANTE GARCÍA

MORELIA, MICHOACÁN, DICIEMBRE DE 2012



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

OBJETIVO

Objetivo general:

El objetivo de esta investigación es diseñar, elaborar y evaluar en una mezcla de mortero la incorporación de materiales puzolánicos como un sustituto parcial del cemento portland, sus propiedades físico-mecánicas, correlacionando los resultados de las pruebas destructivas con las no destructivas por medio de un modelo matemático para predecir la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura del mortero estudiado, a partir de los datos de las pruebas no destructivas aplicadas en este trabajo.

La finalidad es construir obras durables, reducir el consumo del cemento portland y por ende la contaminación causada por la producción del mismo.

Objetivos específicos:

- Estudiar las propiedades de materiales puzolánicos tales como minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y de fibras de cactus.
- Determinar qué tipo de material presenta un mejor comportamiento como sustituto parcial del cemento y el porcentaje más idóneo del mismo con respecto al peso del cemento.
- Determinar si es factible o no, el uso de dichos materiales puzolánicos en la elaboración de morteros, con el fin de incrementar su durabilidad.
- Elaborar una caracterización física y mecánica comparativa de pruebas destructivas y no destructivas para expresarla en un modelo matemático.

JUSTIFICACIÓN

El concreto es el material más utilizado en la construcción. La Cámara Nacional del Cemento (CANACEM), pronostica que para el 2050, se estará consumiendo 5 billones de toneladas mundiales anuales, es decir el doble de la producción actual; ningún material de construcción ha sido usado en tales cantidades y en un futuro no parece existir otro material de construcción que pueda competir con el concreto en magnitud de volumen (Aïtcin, 2008).

En nuestro país en gran medida los avances tanto científicos como tecnológicos están encaminados a la generación de nuevos productos, conjuntamente con el establecimiento de nuevos procesos que garanticen un desarrollo sustentable, los cuales involucran sin dejar duda a todas las áreas del conocimiento (Marquez-Montero, y otros, ALCOMPAT 2010).

En general, es notable el incremento de la producción de cemento que han experimentado los países del tercer mundo en las últimas décadas. La producción global para el año 2005 se sitúa en 2272 millones de toneladas esto denota un elevado y sostenido crecimiento que se acompaña con un incremento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente por las emisiones de CO₂ (Águila, y otros, 2008). Significa que se podrían producir de 8000 a 10000 millones de metros cúbicos, que equivalen a 1.5 metros cúbicos de concreto por persona.

Producción mundial de cemento (miles de toneladas)				
País	2005	2006	2007	2008
China	1 040 000	1 200 000	1 300 000	1 388 400
India	145 000	155 000	160 000	177 000
USA	101 000	99 700	96 400	87 600
Japón	69 600	69 900	70 000	62 800
Rusia	48 700	54 700	59 000	53 600
Rep. Corea	51 400	55 000	55 000	53 900
España	50 300	54 000	50 000	42 100
Italia	46 400	43 200	44 000	43 000
México	36 000	40 600	41 000	47 600
Brasil	36 700	39 500	40 000	51 900
Total	2 310 000	2 550 000	2 600 000	2 840 000

Tabla 1. Producción mundial de cemento. Fuente: (Kantiranis, 2004).

En las ilustraciones 1 y 2 se especifica la producción y consumo de cemento nacional, México ocupa el lugar número 9 a nivel mundial, en 2009 fue de 321kg/habitante, con una producción para ese mismo año de 35.1 millones de toneladas y un consumo de 34.1 millones de toneladas (CANACEM, 2010).

Producción de cemento nacional 2000-2009 (Millones de ton.)

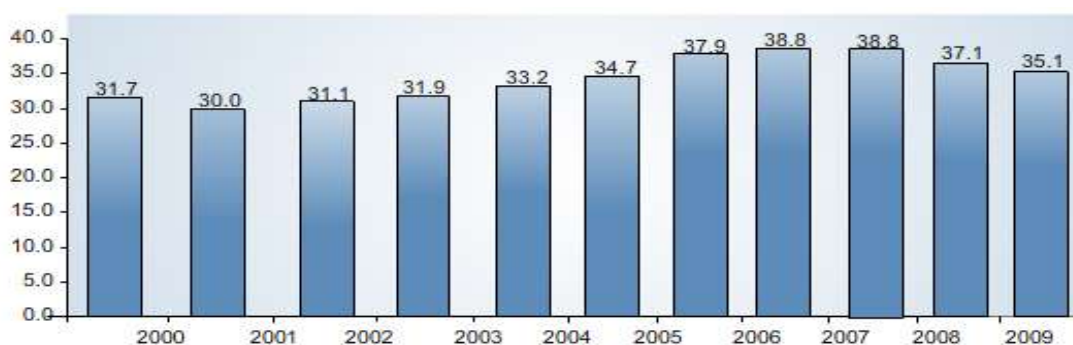


Ilustración 1. Producción nacional de cemento. Fuente: (CANACEM, 2010).

Consumo de cemento nacional 2000-2009 (Millones de ton.)

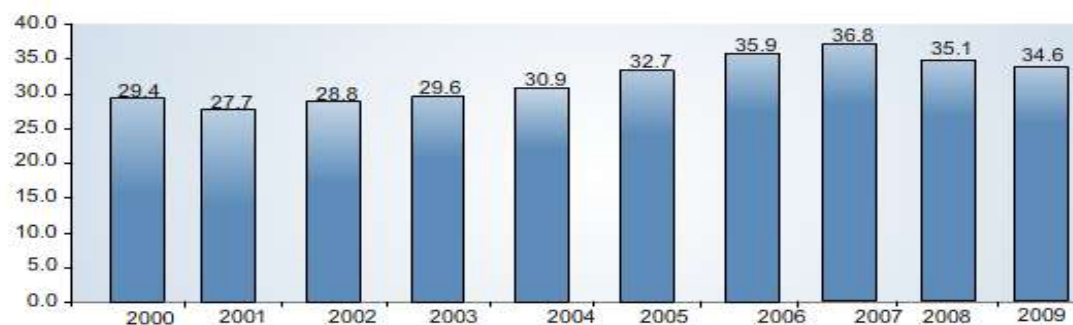


Ilustración 2. Consumo nacional de cemento. Fuente: (CANACEM, 2010).

El proceso de manufactura del cemento depende de una gran cantidad de quemado de carbón a una temperatura que sobrepasa los 1,500°C y de la descomposición de roca sedimentaria consistente en carbonato de calcio (CaCO_3), (Cal) usada como piedra en la construcción y en la manufactura del cemento, un cambio químico que libera DIOXIDO DE CARBONO como un sub producto. China produce más de la mitad del cemento que se consume en el mundo (Tabla 1). El año pasado la manufactura del cemento solamente en China produjo 540,000 toneladas de dióxido de carbono superando a los Estados Unidos y creando más polución que el Reino Unido (Inglaterra).

Las emisiones de CO_2 dependen del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de Clínter que tiene el cemento, ya que la aportación principal de CO_2 se produce en la fabricación del

Clínker. Para los cementos tipo I la emisión de CO₂ se sitúa en 800 gramos de CO₂ por kg de cemento (Ilustración 3), disminuyendo para los otros tipos de cementos en los que disminuye el contenido del Clínker (Cardim de Carvalho Filho, 2001).

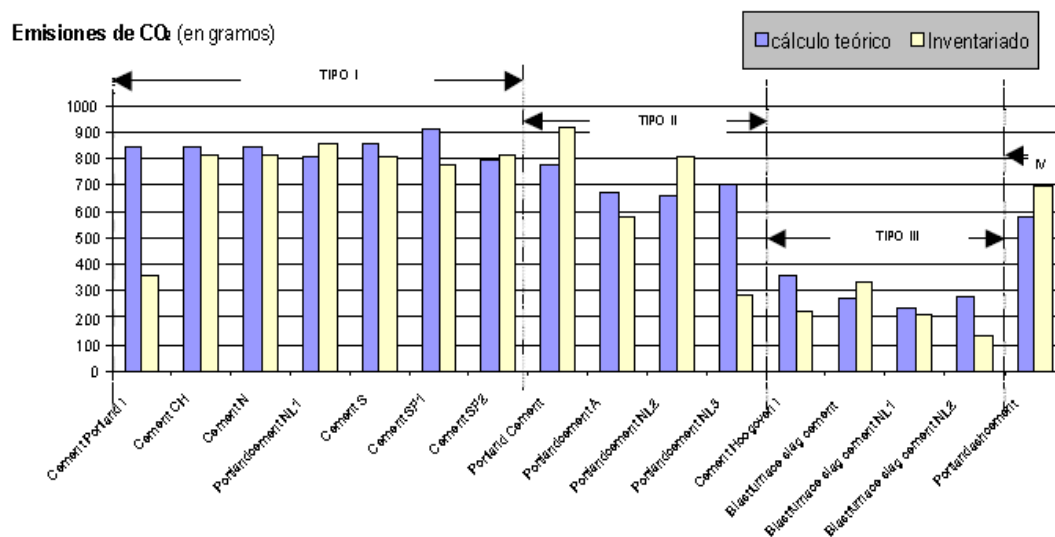


Ilustración 3. Emisiones de CO₂ en la fabricación del cemento (Cardim de Carvalho Filho, 2001).

México ha firmado y ratificado el protocolo de Kioto (Ilustración 4). El **Protocolo de Kioto sobre el cambio climático** es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012 en comparación a las emisiones al año 1990 (wikipedia, 2010).



Ilustración 4. Posición de los diversos países en 2009 respecto del Protocolo de Kioto (wikipedia, 2010)

Surge la necesidad de disminuir los efectos negativos que produce el uso del cemento y el interés en adquirir tecnologías de construcción sustentable, debido a que un sorprendente 5% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo son producidas por esta industria.

Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto (Águila, y otros, 2008).

Una medida viable para contribuir al mejoramiento del medio ambiente es la utilización de nuevos materiales que funcionen como puzolanas naturales o artificiales, y que pueden emplearse como sustituto parcial del cemento que es el objeto de nuestro estudio. Aunado al hecho, los resultados de algunas de estas pruebas pueden ser obtenidos sin necesidad de la elaboración de especímenes hechos ex profeso para someterse a la prueba de calidad deseada, es decir, existen pruebas no destructivas y que como su nombre lo indica, son pruebas o ensayos de carácter NO destructivo, que se realizan a los materiales, ya sean éstos: metales, plásticos (polímeros), cerámicos o compuestos, entonces, con estas pruebas no destructivas se tiene la posibilidad de repetir un sinnúmero de veces la prueba, y por tanto, de reducir el número de las pruebas, pero además posibilitan para realizar un análisis estadístico confiable; los reglamentos vigentes hablan de 30 especímenes. Este tipo de pruebas, generalmente se emplean para determinar cierta característica física, mecánicas o química del material en cuestión y no alteran de forma permanente sus propiedades. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o casi nulo en la muestra examinada.

RESUMEN

Las sustituciones a morteros base cemento Portland (CP), de minerales de alta temperatura: Metacaolín (MK), Perlita Natural (PN), Perlita Expandida (PE) y Ceniza de Carbón Mineral (CM); de cenizas orgánicas: Bagazo de Caña (CBC) y Carbón Vegetal (CCV); de cenizas inorgánicas: Elaboración de Ladrillo (CEL); de residuos industriales: Escoria de Alto Horno (EAH) y Horno de BOF (CBOF); y de fibras de cactus (FN); se realizaron para mejorar mediante una dosificación, sus propiedades físico-mecánicas. Los morteros se sometieron a pruebas destructivas: compresión, tensión, flexión y adherencia; así como no destructivas: velocidad de pulso, resistividad eléctrica, densidad y gravedad específica. Las edades de prueba fueron 14, 28, 45, 90 y 180 días (MK, PN, PE, CBC, CCV y CEL) y hasta 90 días (CM, EAH, CBOF Y FN). Primero se comparó los resultados de las sustituciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso de la masa de CP con respecto a un mortero testigo (cemento-arena-agua). Se elaboró un estudio comparativo del empleo de pruebas destructivas y no destructivas para obtener una caracterización física y mecánica del mortero.

Se observó que en las sustituciones de MK y CBC se incrementa las propiedades mecánicas; la prueba de resistividad eléctrica nos indica de manera indirecta la porosidad del material. Con la sustitución parcial del cemento y al realizar pruebas no destructivas; se reduce sensiblemente el problema, y en consecuencia se propicia un ahorro energético y una menor afectación al ambiente.

DEDICATORIAS

A Dios

Por darme la fuerza necesaria en los momentos en que más lo necesité y bendecirme con la posibilidad de caminar a su lado durante toda mi vida.

A mis padres

José y Antonieta: Por sus consejos y la educación brindada, permitiéndome un desarrollo integral en todos los ámbitos de mi vida.

A mis hermanos:

José Alfredo: Por su ayuda económica, consejos y apoyo incondicional.

María Mercedes y María Concepción. Por su apoyo moral, y paciencia.

Y mis abuelitos, en general a todos los miembros de mi familia por su crítica constructiva, que me permitió vencer todos los obstáculos de este caminar.

A mi novio:

Marcos, por su paciencia, consejos e ideas, que han enriquecido mi concepto de la vida y me han permitido verla desde otro enfoque.

A mi asesora de tesis: Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán y al Jefe del Laboratorio “Ing. Luis Silva Rúelas”: M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina; por el apoyo moral y económico brindado durante mi estancia en el laboratorio. Fue un placer formar parte de su equipo de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”, Sección de Resistencia de Materiales.

A mi asesor de tesis: Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su apoyo incondicional en la realización del presente trabajo, su paciencia, esmero y dedicación; su tiempo, constancia, esfuerzo y sugerencias en la dirección de la elaboración del mismo. Le agradezco infinitamente...

Al M. A. Ing. Wilfrido Martínez Molina. Por el apoyo académico, técnico y metodológico y inversión económica en el presente proyecto.

Al Dr. Hugo Luis Chávez García y a la M. I. Cindy Lara Gómez. Por sus consejos y apoyo durante la estancia en el laboratorio y la realización de la presente tesis.

A Mauricio Arreola Sánchez, por permitirme integrarme en el presente trabajo de investigación. A si mismo a los compañeros del equipo de trabajo: Cipriano Bernabé Reyes, Miguel Ángel Villicaña Cupa, José Luis Rodríguez Bucio, Luis Cruz Jiménez y José Antonio Núñez Hurtado; por su paciencia y colaboración. De igual forma agradezco a los jóvenes de las estancias de verano 2011 y 2012: Sharim, Humberto, Julio César, José Luis, Adán Misael, Ramón Eduardo, Alberto Ezequiel, Jesús Armando, Ismael de la Cruz y Maribel; y a todos los jóvenes de servicio social y/o comunitario por mencionar algunos: Soledad, Juan Carlos, Judith, Raquel, Luis Antonio, etc., por toda la ayuda brindada en el desarrollo de la investigación.

A don José Jesús Zauno Zamudio. Por el apoyo y comprensión durante el desarrollo de la investigación. A don Rubén Hernández Guzmán y a los compañeros de trabajo del Laboratorio de Materiales: Marco Antonio, Noel, Rosalía, Arturo, Eduardo.

Al CONACYT: Por el valioso apoyo económico para la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

Contenido

OBJETIVO	i
JUSTIFICACIÓN	ii
RESUMEN	vi
DEDICATORIAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xviii
ÍNDICE DE TABLAS	xxi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Antecedentes	2
2.1.1. Al uso del cemento y los materiales puzolánicos	2
2.1.2. De las pruebas no destructivas	6
2.2. Concreto	9
2.3. Mortero.....	10
2.3.1. Cemento (aglutinante)	12
2.3.1.1. Proceso de fabricación.....	13
2.3.1.2 Clasificación	15
2.3.1.3. Propiedades del Cemento	16
2.3.1.3.1. Propiedades Químicas	16
2.3.1.3.2. Propiedades Físicas	19
2.3.1.3.3. Propiedades Mecánicas	20
2.3.1.4. Especificaciones	21
2.3.1.5. Cemento utilizado en la investigación.....	22

2.3.2. Agua (líquido de amasado).....	24
2.3.2.1. Especificaciones	25
2.3.2.2. Agua utilizada en la Investigación	26
2.3.3. Agregados (material inerte).....	26
2.3.3.1. Origen de los agregados	27
2.3.3.2. Propiedades de los agregados	28
2.3.3.2.1. Químicas.....	28
2.3.3.2.2. Físicas.....	28
2.3.3.2.3. Mecánicas	29
2.3.3.3. Agregados utilizados en la Investigación	30
2.3.4. Aditivos	31
2.3.4.1. Usos de los Aditivos.....	32
2.3.4.2. Influencia de los Aditivos en el diseño de mezclas	33
2.3.4.3. Aditivo utilizado en la investigación.....	34
2.4. Parámetros de diseño en mezclas de concreto y/o mortero.....	34
2.5. Puzolanas.....	37
2.6. Materiales en estudio como sustituto parcial del cemento.....	39
2.6.1. Minerales de alta temperatura	40
2.6.1.1. Metacaolín	40
2.6.1.1.1. Obtención y Composición	40
2.6.1.2. Perlita Natural.....	41
2.6.1.3. Perlita Expandida.....	41
2.6.1.4. Ceniza de Carbón Mineral.....	42
2.6.1.4.1. Definición y origen.....	43
2.6.1.4.2. Producción.....	43
2.6.1.4.3. Material a utilizar	44
2.6.2. Cenizas orgánicas	44

2.6.2.1. Bagazo de Caña	45
2.6.2.1.1. Producción	45
2.6.2.1.2. Obtención de la ceniza en estudio	46
2.6.2.2. Carbón Vegetal	50
2.6.2.2.1. Producción	50
2.6.2.2.2. Obtención de la ceniza en estudio	50
2.6.3. Ceniza inorgánica	52
2.6.3.1. Elaboración de ladrillo	52
2.6.3.1.1. Obtención y composición	53
2.6.4. Residuos industriales	54
2.6.4.1. Escoria de Alto Horno	54
2.6.4.1.1. Material a utilizar	56
2.6.4.2. Horno de BOF	57
2.6.4.2.1. Características del Horno BOF.....	57
2.6.4.2.2. Material refractario obtenido en el horno BOF.	57
2.6.5. Fibras de Cactus de nopal deshidratado	59
2.6.5.1. Fibra de Nopal (FN)	59
2.6.5.1.1. Antecedentes del nopal.....	60
2.6.5.1.2. Características del nopal.....	60
2.6.5.1.3. Uso del Nopal	61
2.6.5.1.4. Cactus Opuntia utilizado en la investigación.	63
2.7. No Destructivas	63
2.7.1.1 Teoría de propagación de onda.....	65
2.7.1.2 Instrumento de prueba de velocidad de pulso.	67
2.7.1.3 El método de velocidad de pulso.....	68
2.7.1.4 Factores que afectan la velocidad de pulso.	72
2.7.2 Prueba de resistividad eléctrica	72

2.7.2.1 Ley de ohm	73
2.7.2.2 Resistividad eléctrica.....	75
2.7.3. Densidad	75
2.7.4. Gravedad específica.....	75
2.8. Correlación de Pruebas No destructivas y destructivas.	75
2.9. Técnicas de Caracterización:.....	78
2.9.1. La cristalografía de rayos X	78
2.9.2. Prueba de Fluorescencia de Rayos X	81
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	82
3.1. Caracterización del cemento	82
3.1.1. Propiedades físicas realizadas a los cementos.....	82
3.1.1.1. Ensayos de Consistencia y Trabajabilidad.	82
3.1.1.2. Tiempos de fraguado:	82
3.2. Caracterización de los materiales en estudio	83
3.3. Calidad del agua.....	84
3.4. Caracterización de los agregados	84
3.4.1. Arena Río Huajúbaro.....	85
3.4.1.1. Humedad actual.....	85
3.4.1.2. Humedad de absorción	86
3.4.2. Arena rio Lerma	91
3.4.2.1. Humedad actual	91
3.4.2.2. Humedad de absorción.....	93
3.4.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).....	94
3.4.2.4. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)	95
3.4.2.5. Colorimetría.....	96
3.4.2.6. Sedimentación	97
3.4.2.7. Prueba de terrones de arcilla en arena	97

3.4.2.8. Equivalente de arena.....	98
3.5. Diseño de Mezcla de mortero y losas de adherencia y elaboración de especímenes	99
3.5.1. Determinación de la Fluidéz y proporcionamiento de la mezcla	99
3.5.2. Elaboración de losas de concreto para pruebas de adherencia	102
3.5.2.1. Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia	103
3.5.3.1. Elaboración de Cubos	105
3.5.3.2. Elaboración de Prismas	108
3.5.3.3. Elaboración de Briquetas.....	108
3.5.3.4. Elaboración de Cilindros	110
3.5.4. Curado del Concreto.....	111
3.6. Pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido.....	112
3.6.1. Pruebas no destructivas	112
3.6.1.1. Resistividad Eléctrica	112
3.6.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico.	114
3.6.1.3. Masa superficialmente seca.....	117
3.6.1.4. Densidad	118
3.6.1.5. Gravedad específica.....	119
3.6.2. Pruebas Destructivas.	120
3.6.2.1. Compresión en Cubos (5x5cm).....	120
3.6.2.2. Resistencia a Flexión.....	121
3.6.2.3. Tensión en Briquetas	123
4. RESULTADOS	131
4.1. Morteros fabricados con agregado del Río Huajúmbaro.	131
4.1.1. Metacaolín (MK).....	131
4.1.1.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	131
4.1.1.1.1. Pruebas No destructivas	131
4.1.1.1.2. Pruebas Destructivas	133

4.1.1.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	134
4.1.1.2.1. Pruebas No destructivas	134
4.1.1.2.2. Pruebas Destructivas	135
4.1.1.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	136
4.1.1.4. Resultados en las losas de adherencia	136
4.1.2. Perlita Natural (PN).....	137
4.1.2.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	137
4.1.2.1.1. Pruebas No destructivas	137
4.1.2.1.2. Pruebas Destructivas	139
4.1.2.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	140
4.1.2.2.1. Pruebas No destructivas	140
4.1.2.2.2. Pruebas Destructivas	141
4.1.2.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	142
4.1.2.4. Resultados en las losas de adherencia	142
4.1.3. Perlita Expandida (PE)	143
4.1.3.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	143
4.1.3.1.1. Pruebas No destructivas	143
4.1.3.1.2. Pruebas Destructivas	145
4.1.3.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	146
4.1.3.2.1. Pruebas No destructivas	146
4.1.3.2.2. Pruebas Destructivas	147
4.1.3.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	148
4.1.3.4. Resultados en las losas de adherencia	148
4.1.4. Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).....	149
4.1.4.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	149
4.1.4.1.1. Pruebas No destructivas	149
4.1.4.1.2. Pruebas Destructivas	151

4.1.4.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	152
4.1.4.2.1. Pruebas No destructivas	152
4.1.4.2.2. Pruebas Destructivas	153
4.1.4.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	154
4.1.4.4. Resultados en las losas de adherencia	154
4.1.5. Ceniza de Carbón Vegetal (CCV)	155
4.1.5.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	155
4.1.5.1.1. Pruebas No destructivas	155
4.1.5.1.2. Pruebas Destructivas	157
4.1.5.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	158
4.1.5.2.1. Pruebas No destructivas	158
4.1.5.2.2. Pruebas Destructivas	159
4.1.5.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	160
4.1.5.4. Resultados en las losas de adherencia	160
4.1.6. Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL)	161
4.1.6.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	161
4.1.6.1.1. Pruebas No destructivas	161
4.1.6.1.2. Pruebas Destructivas	163
4.1.6.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	164
4.1.6.2.1. Pruebas No destructivas	164
4.1.6.2.2. Pruebas Destructivas	165
4.1.6.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	166
4.1.6.4. Resultados en las losas de adherencia	166
4.2. Morteros fabricados con agregado del Río Lerma	167
4.2.1. Carbón Mineral (CM)	167
4.2.1.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	167
4.2.1.1.1. Pruebas No destructivas	167

4.2.1.1.2. Pruebas Destructivas	169
4.2.1.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	170
4.2.1.2.1. Pruebas No destructivas	170
4.2.1.2.2. Pruebas Destructivas	171
4.2.1.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	172
4.2.1.4. Resultados en las losas de adherencia	172
4.2.2. Escoria de Alto Horno (EAH)	173
4.2.2.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	173
4.2.2.1.1. Pruebas No destructivas	173
4.2.2.1.2. Pruebas Destructivas	175
4.2.2.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	176
4.2.2.2.1. Pruebas No destructivas	176
4.2.2.2.2. Pruebas Destructivas	177
4.2.2.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	178
4.2.2.4. Resultados en las losas de adherencia	178
4.2.3. Ceniza del Horno de BOF (CBOF)	179
4.2.3.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	179
4.2.3.1.1. Pruebas No destructivas	179
4.2.3.1.2. Pruebas Destructivas	181
4.2.3.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	182
4.2.3.2.1. Pruebas No destructivas	182
4.2.3.2.2. Pruebas Destructivas	183
4.2.3.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	184
4.2.3.4. Resultados en las losas de adherencia	184
4.2.4. Fibra de Nopal (FN)	185
4.2.4.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.	185
4.2.4.1.1. Pruebas No destructivas	185

4.2.4.1.2. Pruebas Destructivas	187
4.2.4.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.	188
4.2.4.2.1. Pruebas No destructivas	188
4.2.4.2.2. Pruebas Destructivas	189
4.2.4.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas	190
4.2.4.4. Resultados en las losas de adherencia	190
5. ANÁLISIS COMPARATIVO	191
6. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	192
7. BIBLIOGRAFÍA	195

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. PRODUCCIÓN NACIONAL DE CEMENTO. FUENTE: (CANACEM, 2010).	III
ILUSTRACIÓN 2. CONSUMO NACIONAL DE CEMENTO. FUENTE: (CANACEM, 2010).	III
ILUSTRACIÓN 3. EMISIONES DE CO2 EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO (CARDIM DE CARVALHO FILHO, 2001).	IV
ILUSTRACIÓN 4. POSICIÓN DE LOS DIVERSOS PAÍSES EN 2009 RESPECTO DEL PROTOCOLO DE KIOTO (WIKIPEDIA, 2010)	IV
ILUSTRACIÓN 2.3. COMPOSICIÓN DE UN MORTERO	12
ILUSTRACIÓN 2.3.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL CEMENTO	14
ILUSTRACIÓN 2.3.2. IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS EN LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO.	15
ILUSTRACIÓN 2.3.3. CALOR DE HIDRATACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).	18
ILUSTRACIÓN 2.3.4. RESISTENCIA DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO PÓRTLAND (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).	18
ILUSTRACIÓN 2.3.5. EL CICLO GEOLÓGICO DE LAS ROCAS.	27
ILUSTRACIÓN 2.3.6. RIO HUAJÚMBARO, POBLADO EL CUERVO, MUNICIPIO DE ZINÁPECUARIO, MICHOACÁN. ..	31
ILUSTRACIÓN 2.3.4.1. FLUIDIFICANTE SIKACEM.	34
ILUSTRACIÓN 2.6.1.1. SIDERÚRGICA DE LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN.	42
ILUSTRACIÓN 2.6.1.2. LOCALIZACIÓN DE LÁZARO CÁRDENAS, DENTRO DEL ESTADO DE MICHOACÁN. TOMADA DE GOOGLE EARTH.	43
ILUSTRACIÓN 2.6.1.3. CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN MINERAL Y SUS USOS. (INSTITUTO MUNDIAL DEL CARBÓN, 2005)	43
ILUSTRACIÓN 2.6.1.4 A) CARBÓN MINERAL EN FORMA GRANULAR; B) MOLIENDA DEL CARBÓN MINERAL.	44
ILUSTRACIÓN 2.6.2.1. CONSUMO DE AZÚCAR EN MÉXICO (PERIODO 1998-2007) (FOLICTH, 2007) (AGUILAR-RIVERA, Y OTROS, 2009).	45
ILUSTRACIÓN 2.6.2.2. LOCALIZACIÓN MUNICIPIO DE TARETAN.	46
ILUSTRACIÓN 2.6.2.3. LLEGADA DE LA CAÑA	46
ILUSTRACIÓN 2.6.2.4. MOLINOS	48
ILUSTRACIÓN 2.6.2.5. TRANSPORTE DEL BAGAZO DE CAÑA HACIA LAS CALDERAS.	49
ILUSTRACIÓN 2.6.2.6. PATIOS DE TIRADERO DE CBC.	50
ILUSTRACIÓN 2.6.2.7. UBICACIÓN SATELITAL CUTO DE LA ESPERANZA.	51
ILUSTRACIÓN 2.6.2.8. CHIMENEA PARA CARBONEO.	52
ILUSTRACIÓN 2.6.2.9. PRODUCCIÓN DE CARBÓN: LAS CHIMENEAS CON LA LEÑA DEBAJO DE RAMAS Y MATERIA ORGÁNICA.	52
ILUSTRACIÓN 2.6.2.10 OBTENCIÓN DE CCV.	52
ILUSTRACIÓN 2.6.3.1. LOCALIZACIÓN DEL LUGAR DE PROCEDENCIA DE LAS TABIQUERÍAS DONDE SE EXTRAJO LA CENIZA UTILIZADA. TENENCIA MORELOS, MICH.	53
ILUSTRACIÓN 2.6.3.2. HORNO DE DONDE SE EXTRAJO LA CENIZA UTILIZADA PARA LAS SUSTITUCIONES.	53
ILUSTRACIÓN 2.6.3.3. RESIDUOS DE CENIZA Y TROZOS DE LADRILLO PRODUCTO DE SU COCCIÓN.	54

ILUSTRACIÓN 2.6.3.4. EXTRACCIÓN DE LA CENIZA DEL HORNO DE COCCIÓN DEL LADRILLO, UTILIZANDO PALAS.	54
ILUSTRACIÓN 2.6.4.2. A) EAH GRANULAR SIN MOLER; B) MOLIENDA DE LA EAH.....	56
ILUSTRACIÓN 2.6.4.1. HORNO BOF Y SUS PARTES IMPORTANTES.....	57
FIGURA 9. MATERIAL REFRACTARIO DEL HORNO BOF, DONADO POR LA SIDERÚRGICA DE LÁZARO CÁRDENAS DEL ESTADO DE MICHOACÁN.....	59
ILUSTRACIÓN 2.6.5.1.1. CACTUS PUNTIA EN ESTADO NATURAL. (PLANTAS-MEDICINALES).....	61
ILUSTRACIÓN 2.7.1. TIPOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA DE MECÁNICAS (MALHOTRA AND CARINO, 2004).....	66
ILUSTRACIÓN 2.7.2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO (MALHOTRA AND CARINO, 2004).	68
ILUSTRACIÓN 2.7.3. CONFIGURACIONES PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE PULSO, A) MÉTODO DIRECTO, B) MÉTODO SEMIDIRECTO, C) MÉTODO INDIRECTO O DE SUPERFICIE (MALHOTRA AND CARINO, 2004).	71
ILUSTRACIÓN 2.7.4. EMPLEO DEL MÉTODO DE SUPERFICIE PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD DE DETERIORO (MALHOTRA AND CARINO, 2004).	72
ILUSTRACIÓN 2.9.1. LEY DE BRAGG. HTTP://PERSONALES.UPV.ES/.../CURSO/UNIDAD3/FIG3-39.JPG CONSULTADO 12 DE MARZO DE 2010.....	79
ILUSTRACIÓN 3.2.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DE ALGUNO DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO, SIN IDENTIFICACIÓN DE FASES.....	84
ILUSTRACIÓN 3.4.1.1. SECADO DEL ARENA EN PARRILLA.	86
ILUSTRACIÓN 3.4.1.2. PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL SECADO SUPERFICIAL NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004.	87
ILUSTRACIÓN 3.4.1.3. EQUIPO PARA REALIZAR LA PRUEBA DE MVSS.	88
ILUSTRACIÓN 3.4.1.4. VARILLADO DE LA ARENA EN LA PRUEBA DE MVSV.....	89
ILUSTRACIÓN 3.4.1.5. ANÁLISIS COLORIMÉTRICO.	90
ILUSTRACIÓN 3.4.1.6. ANÁLISIS DE CONTENIDO DE FINOS.	90
ILUSTRACIÓN. 3.4.2.1. SECADO DEL MATERIAL, PARA LA OBTENCIÓN DE LA HUMEDAD ACTUAL.	92
ILUSTRACIÓN 3.4.2.2. DETERMINACIÓN DEL PESO SUPERFICIALMENTE SECO.....	93
ILUSTRACIÓN 3.4.2.3. DETERMINACIÓN DEL MVSS.....	94
ILUSTRACIÓN 3.4.2.4. DETERMINACIÓN DEL MVSV.....	95
ILUSTRACIÓN 3.4.2.5. DETERMINACIÓN DE LA COLORIMETRÍA	96
3.4.2.6. DETERMINACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ARENA.....	97
ILUSTRACIÓN 3.4.2.7. PRUEBA DE TERRONES DE ARCILLA EN ARENA.....	98
3.4.2.8. OBTENCIÓN DE LA EQUIVALENCIA DE ARENA.	99
ILUSTRACIÓN 3.5.1. PRUEBA DE FLUIDEZ. MESA Y PISÓN DE PRUEBA.	100
ILUSTRACIÓN 3.5.2. DETERMINACIÓN DE LA FLUIDEZ DE LA MEZCLA.	100
ILUSTRACIÓN 3.5.3 Y 3.5.4. MÉTODO DE MEZCLADO DE ÁRIDOS MEDIANTE ASPAS DE ACERO IMPULSADAS POR EL TALADRO.....	101
ILUSTRACIÓN 3.5.2.1. ELABORACIÓN DE LOSAS, LLENADO DE LA PRIMERA CAPA DE CONCRETO.	104
ILUSTRACIÓN 3.5.2.2. LOSAS DE CONCRETO, LLENADO DE LA SEGUNDA CAPA DE CONCRETO UNA VEZ COLOCADA LA MALLA ELECTRO SOLDADA.....	104

ILUSTRACIÓN 3.5.2.3. AGREGADO DE LA MEZCLA DE MORTERO CON SUS DIFERENTES SUSTITUCIONES, ALAS LOSAS DE CONCRETO PARA POSTERIORMENTE REALIZARLE LA PRUEBA DE ADHERENCIA.	104
ILUSTRACIÓN 3.5.3.1 Y 3.5.3.2. ETAPAS DE LLENADO DEL CUBO DE 5CM X 5CM X5CM.....	105
ILUSTRACIÓN 3.5.3.3. LOTE DE MOLDES PARA CUBOS DE 5X5X5CM. ILUSTRACIÓN 3.5.3.4. PREPARACIÓN DE LOS MOLDES PARA ELABORACIÓN DE CUBOS DE MORTERO Y CUBOS.....	106
ILUSTRACIÓN 3.5.3.5. PROCEDIMIENTO DE LLENADO DE CUBOS. SE OBSERVA EL SANGRADO DE LA MEZCLA.	107
ILUSTRACIÓN 3.5.3.6. LLENADO DE ESPECÍMENES PRISMÁTICOS DE 4CM X 4CM X 16CM	108
ILUSTRACIÓN 3.5.3.7. ELABORACIÓN DE BRIQUETAS, UTILIZANDO MOLDE Y CRISTAL PREVIAMENTE ENGRASADO.....	109
ILUSTRACIÓN 3.5.3.8. SANGRADO EN BRIQUETAS DESPUÉS DE UN MOMENTO DE ELABORADAS.....	110
ILUSTRACIÓN 3.5.4.1.PILA DE CURADO Y CONTENEDOR ALTERNATIVO PARA EL CURADO DE LOS ESPECÍMENES.	112
ILUSTRACIÓN 3.6.1.1.1. EQUIPO UTILIZADO PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	113
ILUSTRACIÓN 3.6.1.1.2. ESPÉCIMEN PRISMÁTICO COLOCADO ENTRE LAS DOS PLACAS DE COBRE LISTA PARA TOMAR LA RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	114
ILUSTRACIÓN3.6.1.2.1. MEDICIÓN DE LOS ESPECÍMENES UTILIZANDO VERNIER.....	115
ILUSTRACIÓN 3.6.1.2.2. MEDICIÓN DE LA MASA UTILIZANDO INSTRUMENTOS ELECTRÓNICOS.....	115
ILUSTRACIÓN 3.6.1.2.3. EQUIPO PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y ESPÉCIMEN PRISMÁTICO COLOCADO PARA REALIZARLE LA PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.	116
ILUSTRACIÓN 3.6.1.4.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE ESPECÍMENES CÚBICOS.	118
ILUSTRACIÓN 3.6.1.5.1. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.	119
ILUSTRACIÓN 3.6.2.1.1. PRUEBA DE RESISTENCIA EN CUBOS UTILIZANDO LA MÁQUINA UNIVERSAL TINIUS OLSEN.....	120
ILUSTRACIÓN 3.6.2.2.1. REPRESENTACIÓN DE LA PRUEBA DE FLEXIÓN ESTÁTICA EN VIGAS, MEDIANTE UN SOLO PUNTO DE CARGA.	122
ILUSTRACIÓN 3.6.2.2.2. EJEMPLO DE LA PRUEBA DE FLEXIÓN ESTÁTICA EN LOS PRISMAS.....	122
ILUSTRACIÓN 3.6.2.2.3. RESULTADOS DELA PRUEBA DE FLEXIÓN ESTÁTICA. TIPO DE RUPTURA AL CENTRO..	123
ILUSTRACIÓN 3.6.2.3.1. MÁQUINA MICHAELLIS PARA PRUEBA A TENSIÓN EN BRIQUETAS.....	123
ILUSTRACIÓN 3.6.2.3.2. APLICACIÓN DE LA FUERZA DE TENSIÓN SOBRE LA BRIQUETA.....	124
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.1. PERFORACIÓN DE LAS LOSAS PARA LA PRUEBA DE ADHERENCIA.....	125
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.2. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DEL EPÓXICO.....	126
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.3. PEGADO DE LOS DISCOS DE ACERO EN EL RECUBRIMIENTO DE MORTERO.....	126
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.4. RELACIÓN DE DIMENSIONES DE LAS PERFORACIONES Y DISCOS UTILIZADOS.	126
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.5. EQUIPO PARA PRUEBA PULL OFF MARCA CONTROLS.....	127
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.6. DOLLY CON ADAPTADOR PARA EL APARATO DE PRUEBA PULL OFF	127
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.7. TIPOS DE FALLA QUE PUEDE PRESENTAR LA PRUEBA PULL OFF.....	128
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.8. FALLA ENTRE EPÓXICO Y EL DISCO METÁLICO.....	129
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.9. FALLA ENTRE REVESTIMIENTO Y EL ESTRATO. TIPO (3). MATERIAL MK.....	129
ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.10. FALLA EN EL REVESTIMIENTO. TIPO 4.....	130

ILUSTRACIÓN 3.6.2.4.11. REALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE ADHERENCIA, MEDIANTE EL EQUIPO DE PULL OFF.	130
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CEMENTO. FUENTE: (KANTIRANIS, 2004).	II
TABLA 2.3.1. COMPARATIVA DEL CEMENTO POR SU DESEMPEÑO CON OTRAS NORMAS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	15
TABLA 2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	15
TABLA 2.3.3. ABREVIATURAS DE LOS ÓXIDOS DEL CEMENTO (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).	16
TABLA 2.3.4. COMPONENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO (SHETTY, 2005).	16
TABLA 2.3.5. VALORES TÍPICOS DE LOS COMPUESTOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DEL CEMENTO (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).	17
TABLA 2.3.6. COMPONENTES DE LOS CEMENTOS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	21
TABLA 2.3.7. REQUISITOS DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	21
TABLA 2.3.8. ESPECIFICACIONES FÍSICAS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	22
TABLA 2.3.9. ESPECIFICACIONES QUÍMICAS (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	22
TABLA 2.3.10. ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO CON CARACTERÍSTICAS ESPECIALES (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).	22
TABLA 2.3.11. NORMAS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EMPLEO EN MORTEROS Y CONCRETO.	24
TABLA 2.3.12. VALORES CARACTERÍSTICOS Y LÍMITES MÁXIMOS TOLERABLES DE SALES E IMPUREZAS (NMX-C-122-0NNCCE, 2004).	25
TABLA 2.3.13. EFECTOS NEGATIVOS SOBRE EL CONCRETO SI SE SUPERAN LOS VALORES LÍMITES PERMISIBLES DE SUSTANCIAS EN LAS AGUAS (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997).	26
TABLA 3.1.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA EN PORCENTAJE DEL CEMENTO CPC 30R RS OBTENIDAS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X.	82
TABLA 3.1.2. PARTES POR MILLÓN DEL CEMENTO CPC 30R RS.	82
TABLA 3.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA EN PORCENTAJE DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS SUSTITUCIONES, OBTENIDAS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X, INCLUYENDO EL CEMENTO CPC 30R RS.	83
TABLA 3.2.2. PARTES POR MILLÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS SUSTITUCIONES, INCLUYENDO EL CEMENTO CPC 30R RS.	83
TABLA 3.4.1.1. RESULTADOS DE LA HUMEDAD ACTUAL.	85
TABLA 3.4.1.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD DE ABSORCIÓN.	86
TABLA 3.4.1.3. PROMEDIO DE LA MVSS.	87
TABLA 3.4.1.4. PROMEDIO OBTENIDO DE LA PRUEBA MVSV.	88
TABLA 3.4.1.5. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COLORIMETRÍA.	89
TABLA 3.4.1.6. PORCENTAJE DE MATERIAL FINO QUE CONTIENE LA ARENA.	91
TABLA 3.4.1.7. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE TERRONES QUE CONTIENE LA ARCILLA.	91
TABLA 3.4.2.1. RESULTADOS DE LA HUMEDAD ACTUAL.	92

TABLA 3.4.2.2. PORCENTAJE DE HUMEDAD DE ABSORCIÓN.....	94
TABLA 3.4.2.3. PROMEDIO DE LA MVSS.....	95
TABLA 3.4.2.4. PROMEDIO OBTENIDO DE LA PRUEBA MVSU.....	96
TABLA 3.4.2.5. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COLORIMETRÍA.....	97
TABLA 3.4.2.6. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE TERRONES QUE CONTIENE LA ARCILLA.....	98
TABLA 3.4.2.7. PORCENTAJE DE EQUIVALENTE DE ARENA.....	99
TABLA 3.5.1. PROPORCIÓN DE LA MEZCLA CON QUE SE ELABORÓ EL MORTERO.....	102
TABLA 3.5.2. CANTIDADES DE ESPECÍMENES QUE SE LLENARON CON LA CANTIDAD DE MATERIAL DE TABLA 3.5.1.....	102
4.1.1.1.1.1. RESISTIVIDAD.....	131
4.1.1.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	132
4.1.1.1.1.3. MASA.....	132
4.1.1.1.1.4. DENSIDAD.....	132
4.1.1.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	133
4.1.1.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE.....	133
4.1.1.2.1.1. RESISTIVIDAD.....	134
4.1.1.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	135
4.1.1.2.1.3. MASA.....	135
4.1.1.2.2.1. FLEXIÓN.....	135
4.1.1.3.1. TENSIÓN.....	136
4.1.1.4.1. ADHERENCIA.....	136
4.1.2.1.1.1. RESISTIVIDAD.....	137
4.1.2.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	137
4.1.2.1.1.3. MASA.....	138
4.1.2.1.1.4. DENSIDAD.....	138
4.1.2.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	139
4.1.2.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE.....	139
4.1.2.2.1.1. RESISTIVIDAD.....	140
4.1.2.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	140
4.1.2.2.1.3. MASA.....	141
4.1.2.2.2.1. FLEXIÓN.....	141
4.1.2.3.1. TENSIÓN.....	142
4.1.2.4.1. ADHERENCIA.....	142
4.1.3.1.1.1. RESISTIVIDAD.....	143
4.1.3.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....	143
4.1.3.1.1.3. MASA.....	144
4.1.3.1.1.4. DENSIDAD.....	144
4.1.3.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	145
4.1.3.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE.....	145
4.1.3.2.1.1. RESISTIVIDAD.....	146

4.1.3.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	146
4.1.3.2.1.3. MASA.....	147
4.1.3.2.2.1. FLEXIÓN	147
4.1.3.3.1. TENSIÓN	148
4.1.3.4.1. ADHERENCIA	148
4.1.4.1.1.1. RESISTIVIDAD	149
4.1.4.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	149
4.1.4.1.1.3. MASA.....	150
4.1.4.1.1.4. DENSIDAD.....	150
4.1.4.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	151
4.1.4.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	151
4.1.4.2.1.1. RESISTIVIDAD	152
4.1.4.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	152
4.1.4.2.1.3. MASA.....	153
4.1.4.2.2.1. FLEXIÓN	153
4.1.4.3.1. TENSIÓN	154
4.1.4.4.1. ADHERENCIA	154
4.1.5.1.1.1. RESISTIVIDAD	155
4.1.5.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	155
4.1.5.1.1.3. MASA.....	156
4.1.5.1.1.4. DENSIDAD.....	156
4.1.5.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	157
4.1.5.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	157
4.1.5.2.1.1. RESISTIVIDAD	158
4.1.5.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	158
4.1.5.2.1.3. MASA.....	159
4.1.5.2.2.1. FLEXIÓN	159
4.1.5.3.1. TENSIÓN	160
4.1.4.5.1. ADHERENCIA	160
4.1.6.1.1.1. RESISTIVIDAD	161
4.1.6.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	161
4.1.6.1.1.3. MASA.....	162
4.1.6.1.1.4. DENSIDAD.....	162
4.1.6.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	163
4.1.6.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	163
4.1.6.2.1.1. RESISTIVIDAD	164
4.1.6.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	164
4.1.6.2.1.3. MASA.....	165
4.1.6.2.2.1. FLEXIÓN	165
4.1.6.3.1. TENSIÓN	166

4.1.6.4.1. ADHERENCIA	166
4.2.1.1.1.1. RESISTIVIDAD	167
4.2.1.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	167
4.2.1.1.1.3. MASA.....	168
4.2.1.1.1.4. DENSIDAD.....	168
4.2.1.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	169
4.2.1.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	169
4.2.1.2.1.1. RESISTIVIDAD	170
4.2.1.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	170
4.2.1.2.1.3. MASA.....	171
4.2.1.2.2.1. FLEXIÓN	171
4.2.1.3.1. TENSIÓN	172
4.2.1.4.1. ADHERENCIA	172
4.2.2.1.1.1. RESISTIVIDAD	173
4.2.2.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	173
4.2.2.1.1.3. MASA.....	174
4.2.2.1.1.4. DENSIDAD.....	174
4.2.2.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	175
4.2.2.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	175
4.2.2.2.1.1. RESISTIVIDAD	176
4.2.2.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	176
4.2.2.2.1.3. MASA.....	177
4.2.2.2.2.1. FLEXIÓN	177
4.2.2.3.1. TENSIÓN	178
4.2.2.4.1. ADHERENCIA	178
4.2.3.1.1.1. RESISTIVIDAD	179
4.2.3.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	179
4.2.3.1.1.3. MASA.....	180
4.2.3.1.1.4. DENSIDAD.....	180
4.2.3.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	181
4.2.3.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	181
4.2.3.2.1.1. RESISTIVIDAD	182
4.2.3.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	182
4.2.3.2.1.3. MASA.....	183
4.2.3.2.2.1. FLEXIÓN	183
4.2.3.3.1. TENSIÓN	184
4.2.3.4.1. ADHERENCIA	184
4.2.4.1.1.1. RESISTIVIDAD	185
4.2.4.1.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	186
4.2.4.1.1.3. MASA.....	186

4.2.4.1.1.4. DENSIDAD.....	186
4.2.4.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA	187
4.2.4.1.2.1. COMPRESIÓN SIMPLE	187
4.2.4.2.1.1. RESISTIVIDAD	188
4.2.4.2.1.2. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	188
4.2.4.2.1.3. MASA.....	189
4.2.4.2.2.1. FLEXIÓN	189
4.2.4.3.1. TENSIÓN	190
4.2.4.4.1. ADHERENCIA	190

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la humanidad ha experimentado gran crecimiento demográfico y cambios en los hábitos; como consecuencia, nuestras actividades impactan negativamente al medio ambiente, ya que los hábitos actuales de vida exigen la ocupación de más espacios, y por ende, la destrucción y agotamiento intenso de áreas ecológicas. Aunado a ello la construcción de elementos fabricados a base de cemento Portland (CP) contribuyen a tal deterioro, ya que la producción de una tonelada de CP genera aproximadamente una tonelada de CO₂, lo cual es preocupante por las repercusiones negativas asociadas al efecto invernadero (Escalante, y otros, 2011). Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de la industria y la academia para generar opciones alternativas de materiales y tecnologías de construcción con criterios de sustentabilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementosos alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. Una medida viable para contribuir al cuidado del medio ambiente es la utilización de puzolanas, naturales o sintéticas, como sustitutos minerales del CP en mezclas de mortero.

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

Las ventajas de los ensayos o pruebas no destructivas radican en su relativa simplicidad, rapidez y en la posibilidad de realizar un gran número de determinaciones sobre la estructura sin alterar su resistencia y funcionalidad. De esta manera es factible evaluar la homogeneidad de la misma sin comprometer su integridad o destruir el espécimen, tal como sucede con los ensayos destructivos.

Los ensayos no destructivos juegan un papel que está aumentando en la ingeniería civil, en la actualidad hay varios métodos no destructivos, por ejemplo, los acústicos y los electromagnéticos que abarcan gran área de aplicación y que pueden ser utilizados de manera complementaria. Pero en la mayoría de los casos sólo un método es aplicado para resolver un problema distinto (Kohl, y otros, 2005).

Las pruebas no destructivas en la actualidad se están empleando con mayor frecuencia debido a que dan la posibilidad de repetir la prueba y no dañar al elemento en cuestión. Un ejemplo muy claro de la ventaja más importante que tienen las pruebas no destructivas sobre las destructivas es precisamente que se puede determinar ciertas características de materiales empleados en monumentos de importancia histórica sin dañarlo, o bien llevar el control de calidad de una obra civil relativamente joven.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1. Al uso del cemento y los materiales puzolánicos

En empleos de materiales cementantes se remontan el inicio de la civilización cuando el hombre se vió en la necesidad de construir su habitación utilizando arcilla o una mezcla de cal y arena para unir las piedras y conformar una estructura simple que le sirviera de protección.

En el año 500 A.C los antiguos Griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se le adicionaba arena, para recubrir, unir piedras y ladrillos no cocidos, los Palacios de Cresos y Atalaya fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer concreto de la historia. Probablemente, la civilización Romana copió la idea de la producción de concreto de los griegos. Se han encontrado obras de concreto Romanas fechadas con anterioridad al año 300 A. C.

Como los morteros de cal viva no resistían bien la acción del agua durante periodos largos, se presume que a esta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que las arenas provenientes de ciertas rocas volcánicas tenían mayor resistencia y durabilidad tanto en aguas dulces como saladas (Instituto del Concreto, 1997).

Por ejemplo, los Griegos emplearon una toba volcánica extraída de la Isla de Santorín y los Romanos usaron un material con apariencia de arena rosada que se encuentra en gran cantidad alrededor de la Bahía de Nápoles el cual es una ceniza volcánica que contiene sílice y alúmina que se combina químicamente con la cal dando como resultado lo que

luego se conociera como cemento Puzolánico. Este nombre obedece a que se le encontró por primera vez en la región donde estaba la población de Puzzulí, cerca de Vesubio.

Con la caída del imperio romano declinó el uso del concreto y mucho de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. Durante la Edad Media y el Renacimiento el concreto fue poco empleado. Posiblemente no se usó en gran escala por la mala calidad debido a una cocción incompleta de la cal, descuido en la mano de obra y carencia de tobas volcánicas. Después del siglo XXII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y el uso de algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas anteriormente mencionadas (Instituto del Concreto, 1997).

Posteriormente al 21 de octubre de 1824, Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de 3 partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual la molió y pulverizó consiguiendo la patente para producir el primer cemento Pórtland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Pórtland.

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando logró con éxito, fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clínker, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Únicamente hasta el año 1900 aproximadamente empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaellis, con los cuales se logró producir cemento de calidad uniforme que pudiera ser usado en la industria de la construcción.

En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Pórtland, en cantidades comerciales. A partir de ese momento se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida (Instituto del Concreto, 1997).

Las **puzolanas** son materiales silíceos o aluminio-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Pórtland en el siglo XIX (EUP-ALMADEN, 2010).

La norma ASTM 618-78 define a las puzolanas como aquellos materiales sílico-aluminosos, los cuales por si solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita (hidróxido de calcio) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes.

En este caso se aprovecha el alto contenido de sílice y alúmina, que caracteriza a la composición de estos materiales (Tabla 2.1.1.), para formar compuestos cementantes, al combinarse con la cal que se genera durante el proceso de hidratación del cemento (Águila, y otros, 2008).

Descripción	Cemento	Cenizas		
		Cascarilla de Arroz	Hoja de Maiz	Bagazo de Caña
Propiedades físicas				
Gravedad Específica	3,03	1,80	1,91	1,45
Superficie Específica (cm^2/g)	3.604	9.487	6.328	2.693
Finura (% pasa 325)	82,19	86,74	87,29	77,24
Análisis Químico (%)				
SiO_2	22,44	80,33	47,62	36,52
Al_2O_3	4,43	0,00	0,00	0,00
Fe_2O_3	3,21	0,85	1,58	1,53
CaO	63,41	1,24	5,16	2,69
MgO	0,58	0,43	4,12	4,16
SO_3	2,55	0,31	0,90	3,35
K_2O	0,31	1,87	9,51	22,04
Na_2O	0,26	0,33	0,33	0,27
Humedad		9,21	4,53	10,72
Pérdida al fuego	1,75	11,43	17,67	26,40
TiO_2	0,10	Trazas	Trazas	Trazas
ZnO	Trazas	0,04	0,06	0,03
MnO	Trazas	0,59	0,28	0,26
$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	5	N/A	N/A	N/A

Tabla 2.1.1. Caracterización físico-química de cenizas puzolánicas (Águila, y otros, 2008).

La norma ASTM C618 precisa como valor mínimo un índice resistente igual o superior al 75% a 28 días para considerar un material como puzolana en relación a su resistencia total.

Varios subproductos de la industria y la agricultura han demostrado tener propiedades puzolánicas, entre ellos las Cenizas Volantes de Carbón (PFA) desechadas en plantas generadoras de energía, las cenizas de cascarilla arroz, cenizas de hojas de maíz, etc. (EUP-ALMADEN, 2010).

Hay estudios recientes en México que demuestran que los desechos agrícolas e industriales de la Industria Azucarera, principalmente las Cenizas de Bagazo de Caña (CBC), y las Cenizas de Paja de Caña (CPC) tienen actividad puzolánica, debido al alto contenido de sílice (SiO_2) presente en estos materiales.

Para mejorar las condiciones mecánicas de los concretos fabricados con cemento Pórtland, es necesario implementar la utilización de materiales suplementarios como es el empleo de materiales puzolánicos tanto de origen natural como procesados artificialmente (Marquez-Montero, y otros, ALCOMPAT 2010).

Las puzolanas en general, sobre todo las de origen artificial, constituyen una de las experiencias más alentadoras en la búsqueda de sustitutos más sustentables, ecológica y económicamente, del cemento (Águila, y otros, 2008).

El Metacaolín (MK)¹ cuando se adiciona a morteros y concretos mejora sustancialmente el desempeño mecánico y de durabilidad, debido a que éste se combina químicamente con el hidróxido de calcio, procedente de la reacción de hidratación del cemento, para formar silicatos de calcio, sílico-aluminatos y aluminatos de calcio hidratados (Caldarone, 1994), siendo considerado una puzolana de alta reactividad. Esta reactividad está relacionada con la naturaleza de la materia prima de la cual proviene (composición mineralógica y grado de cristalinidad de los minerales que forman el Caolín), las condiciones del proceso térmico (temperatura y tiempo de deshidroxilación) y sus características propias, tales como el tamaño de partícula, entre otros (Kakali, 2001).

Un estudio realizado en el año 2007 destaca por que, además de estudiar el comportamiento de las reacciones puzolánicas del MK en pruebas mecánicas, también se evaluaron las propiedades de absorción capilar y la permeabilidad de cloruros en morteros adicionados con el 10 y 20% de MK con respecto a la cantidad de cemento. En los resultados que se identificaron los mejores comportamientos se obtuvieron para las mezclas adicionadas con MK derivado del Caolín de mayor pureza, sin embargo la diferencia fue mínima con los porcentajes del 20% de adición. Por tal motivo en dicho

¹ Los proveedores más comunes de MK son los Chinos y Ucrania, los chinos con los costos de hasta 500 dólares por tonelada, ucrania mas barato con precios de 240 dólares con pedidos de 1000 toneladas. Estos no son los únicos proveedores.

trabajo se concluyó que el MK de menor pureza es óptimo para la realización de este tipo de puzolana (Torres Agredo & Mejía de Gutierrez, 2007).

Una publicación actual consta de un estudio en adiciones de puzolanas de MK y HS a concretos, en el que se hace una comparativa entre los resultados obtenidos para pruebas mecánicas y de durabilidad, obteniéndose así los mejores resultados para el Humo de Sílice (HS) y resultados muy satisfactorios para el MK. En éste estudio se puede destacar el uso de aditivos para aumentar la fluidez, dato que causa una cierta incertidumbre ya que no se establece su relación con el mejoramiento o afectación a las propiedades mecánicas. De ahí se estableció que al igual que con otros autores (Wild, y otros, 1996), que han realizado este tipo de estudio, el porcentaje óptimo de adición de MK es del 20% (Torres Agredo & Mejía de Gutierrez, 2011).²

2.1.2. De las pruebas no destructivas

Las pruebas del mortero se realizan en sus dos estados; fresco para conocer sus características y endurecido para determinar sus cualidades y resistencia. El comportamiento de un mortero y/o concreto frente a los distintos esfuerzos es variable y complejo. Estas pruebas se dividen de acuerdo a su clasificación:

➤ **Según su finalidad:**

- **Ensayos previos:** determinan la dosificación del material de acuerdo con las condiciones de ejecución. Se realizan antes de comenzar las obras.
- **Ensayos característicos:** comprueban que la resistencia y dispersión del concreto en obra se encuentran dentro de los límites del proyecto.
- **Ensayos de control:** con probetas moldeadas en obra para comprobar que la resistencia del concreto se mantiene igual o mayor que la exigida.
- **Ensayos de información:** pretenden conocer la resistencia del concreto correspondiente a una parte de la obra y a una edad determinada.

➤ **Según su naturaleza:**

- **Destructivos:** determinan la resistencia mediante la rotura de probetas o piezas de concreto.
- **No destructivos:** Determinan la calidad del concreto sin destruir la estructura y se realizan directamente sobre el elemento que se evalúa.

² Con porcentajes mayores habrá un sobrante de puzolana de MK que no reaccionara quedando como relleno sin formar enlaces que aumenten su resistencia.

Las técnicas no destructivas abren la posibilidad de responder a preguntas prácticas sobre equipos específicos y/o procedimientos, tales como su precisión cuando son utilizados para medir espesores, la localización de imperfecciones, es decir, sus alcances y limitaciones. (Beutel, y otros, 2007).

Una definición general de prueba no destructiva es una revisión, prueba, o evaluación realizada en algún tipo de objeto sin cambiar o alterar dicho objeto en alguna forma, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto. Las pruebas no destructivas también pueden realizarse para medir otras características de prueba del objeto como tamaño, dimensión, configuración, estructura, incluyendo contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc. (Charles, 2001).

Los ensayos no-destructivos se basan en la medición de las propiedades de los materiales, y en el caso de los métodos ultrasónicos lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Las propiedades que se miden son de diferente índole y van desde la ecogenicidad (capacidad de producir ecos) para formar imágenes hasta la determinación de constantes elásticas, a veces mediante el estudio de modos de propagación complejos. Las técnicas de inspección no destructiva tienen las siguientes limitaciones: (Gaete, y otros, 2001):

En algunos casos se requiere una inversión inicial bastante alta, aunque se puede justificar si se analiza correctamente la relación costo-beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas.

La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación. Esto se puede evitar si se preparan patrones de referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección.

Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente o no se cuente con patrones de calibración adecuados.

Aunque las pruebas son fáciles de realizar, se requiere que el personal encargado de ello esté debidamente capacitado y calificado. Además deberá contar con la experiencia

necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados, evitando el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo.

Sin embargo, para el estudio de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, en las técnicas no destructivas se han tratado de introducir dos o más parámetros para mejorar la estimación de la resistencia del concreto, algunos incluso sugieren la predicción de la resistencia del concreto en base a datos de peso y de velocidad de pulso de los especímenes, mediante regresión múltiple y redes neuronales artificiales (Kewalramani Manish, y otros, 2005). Existe una relación entre la velocidad ultrasónica en el material y la resistencia del mismo, se han realizado estudios para determinar la resistencia del concreto mediante una técnica no destructiva llamada velocidad de pulso ultrasónico, en combinación con otra técnica no destructiva llamada relación de la amplitud relativa, obteniendo que las mediciones de velocidad de pulso tienen una buena correlación con la resistencia a la compresión del concreto con humo de sílice de donde obtienen resultados que indican que para concretos con resistencias grandes la sensibilidad de las mediciones para la velocidad de pulso decrece (Hamid, y otros, 2009).

De igual forma en otros trabajos se ha investigado sobre la predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y a la calidad de los materiales, en dicha investigación el objetivo del estudio fue identificar variables adicionales a la velocidad que expliquen la varianza independiente en la resistencia (Solis, y otros, 2003).

Los ensayos no destructivos se han practicado por muchas décadas. Se tiene registro desde 1868, cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Uno de los métodos más utilizados fue la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Las piezas eran sumergidas en aceite, y después se limpiaban y se esparcía con un polvo que revelará el aceite que había penetrado en las grietas. Cuando una grieta estaba presente, el aceite que se había filtrado en la discontinuidad, mojaba el polvo que se había esparcido, indicando que el componente estaba dañado. Esto condujo a formular nuevos aceites que serían utilizados específicamente para realizar éstas y otras inspecciones, y esta técnica de inspección ahora se llama prueba por líquidos penetrantes (Charles, 2001).

Sin embargo con el desarrollo de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir así la vida

mecánica de un componente. Estas necesidades, condujeron a la aparición de la Evaluación No Destructiva como nueva disciplina. A raíz de esta revolución tecnológica se suscitarían en el campo de las técnicas no destructivas una serie de acontecimientos que establecerían su condición actual (Charles, 2001).

En el año de 1941 se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNDT por sus siglas en inglés), la cual es la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Esta sociedad es promotora del intercambio de información técnica sobre las técnicas no destructivas, así como de materiales educativos y programas. Es también creadora de estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema estadounidense (Charles, 2001).

La entidad que reúne a todas las instituciones debidamente constituidas es el Comité Internacional de Ensayos No Destructivos (ICNDT, por sus siglas en inglés) con sede en Viena. La globalización en los mercados mundiales ha marcado el desarrollo de los ensayos no destructivos, los cuales tienen ya un alcance en cada rincón del planeta, y actualmente existen sociedades de ensayos no destructivos en la mayoría de los países como por ejemplo, La Sociedad Argentina de Ensayos No Destructivos (AAENDE), El Instituto Australiano para Ensayos No Destructivos (AINDT), La Sociedad Austriaca de Ensayos No Destructivos (OGFZP), La Asociación Belga de Ensayos No Destructivos (BANT), La Sociedad Brasileña de Ensayos No Destructivos (ABENDE), La Sociedad Canadiense de Ensayos No destructivos (CSNDT), La Sociedad China para Ensayos No Destructivos (ChSNDT), El Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos A.C. (IMENDE A.C.) (Charles, 2001).

2.2. Concreto

Según diversas fuentes el concreto se puede definir de la siguiente forma:

Es una mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Pórtland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse forman un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Instituto del Concreto, 1997).

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesto de cemento Pórtland y agua une a los agregados (arena y grava o piedra

triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua (Kosmatha, y otros, 1992).

El concreto es una roca artificial hecha por el hombre. Está elaborado por cemento, agregados pétreos grueso y fino, agua y en ocasiones aditivos (Martínez, 2007).

Según la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999. El Concreto hidráulico. Es una mezcla de agregados, naturales, procesados o artificiales, cementante y agua, a la que además se le pueden agregar algunos aditivos; debe ser dosificada en masa o en volumen. Es el material pétreo artificial obtenido de la mezcla en proporciones determinadas de cemento, agregados, agua y, en su caso aditivos y/o cementantes.

El Concreto hidráulico para uso estructural. Es el concreto hidráulico empleado para formar una parte integral de una estructura o edificación (NMX-C-414-ONNCCE, 2004).

Concluyendo el concreto es una roca artificial hecha por el hombre que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión y está elaborado con cemento, agregados gruesos y finos, agua y en ocasiones aditivos. En el apartado 2.3. se abarca ampliamente los componentes del concreto.

2.3. Mortero

En construcción, se llama mortero a la combinación de aglomerantes y aglomerados, para de esta manera obtener un conglomerante.

Los aglomerantes son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.

Se denomina conglomerante al material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos. Los conglomerantes son utilizados como medio de ligazón, formando pastas llamadas morteros o argamasas mediante procesos químicos.

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición (Mendoza, y otros, 2004).

Mortero físico. El paso del estado pastoso o semilíquido l 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 contamos 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.

Los morteros más comunes son los de cemento y están compuestos de:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL INERTE + LIQUIDO DE AMASADO

Mortero= (cemento) + (arena) + (agua)

Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, etc. 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 pequeñas ranuras 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.

En los morteros consume más cemento por unidad de volumen de lo que se puede consumir en muchos concretos de uso común, ya que por el simple hecho de emplearse exclusivamente arena como agregado, es necesario consumir altos volúmenes de pasta (cemento + agua) para rodear las partículas, esto debido a la gran superficie específica que ofrecen las arenas.

Los principios básicos de comportamiento de los morteros se derivan de la estructura que presenta este material, todo mortero está formado por un volumen de pasta, un volumen de sólidos (arena), y un volumen de aire. La Ilustración 2.4.1 muestra dicha composición (INGTEKCH):

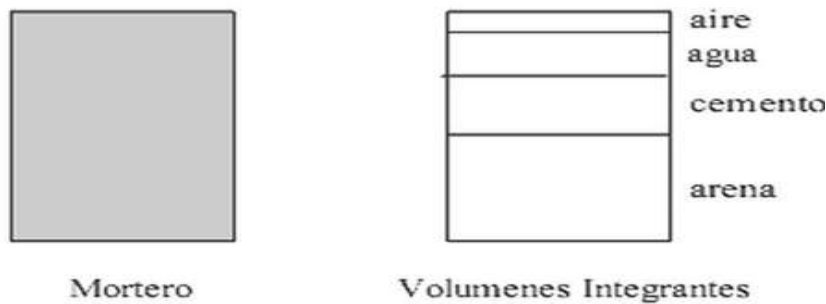


Ilustración 2.3. Composición de un Mortero

2.3.1. Cemento (aglutinante)

Los aglutinantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica. Las cuales pueden ser cal, cemento, yeso, arcilla entre otros, sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir, etc. De acuerdo con sus características proporcionan al mortero resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía diferentes. Como los aglutinantes puros (aparte del yeso de etuco) presentan cambios volumétricos, se agrietan durante el endurecimiento, por lo consiguiente habrá que mezclarlos con arena a porcentajes determinados (Rivera Flores).

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permite la unión de fragmentos minerales y entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina cemento Pórtland, debido a que es el más común. El cemento Pórtland es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.1.1. Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, pero en general en todas se realizan las siguientes seis etapas.

1. **Explotación de materias primas:** procedimiento que se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre del material es suficiente. Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de una pulgada. Los materiales que no requiere trituración se llevan a un lugar de almacenamiento (Instituto del Concreto, 1997).
2. **Dosificación, molienda y homogenización de materias primas:** las materias primas seleccionadas se trituran, muelen o dosifican de tal manera que la mezcla resultante tengan la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la moliendo y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada (Kosmatha, y otros, 1992). Actualmente el proceso es por vía seca, el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el Clínker requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas.
3. **Clínkerización:** Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para la calcinar es inyectado; donde las temperaturas de 1420 °C a 1650 °C transforma químicamente a la materia prima en Clínker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro (Kosmatha, y otros, 1992).
4. **Enfriamiento:** El material transformado en Clínker debe ser enfriado rápidamente a 70 °C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presenta cambios de volumen.
5. **Molienda de Clínker, adiciones de yeso:** En este proceso se transforma el Clínker en polvo y se agregan las adiciones (Puzolanas, generalmente escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar

la malla No. 200 y así se obtiene el cemento Pórtland propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.

6. **Empaque y distribución:** el cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaqueta en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel (Instituto del Concreto, 1997).

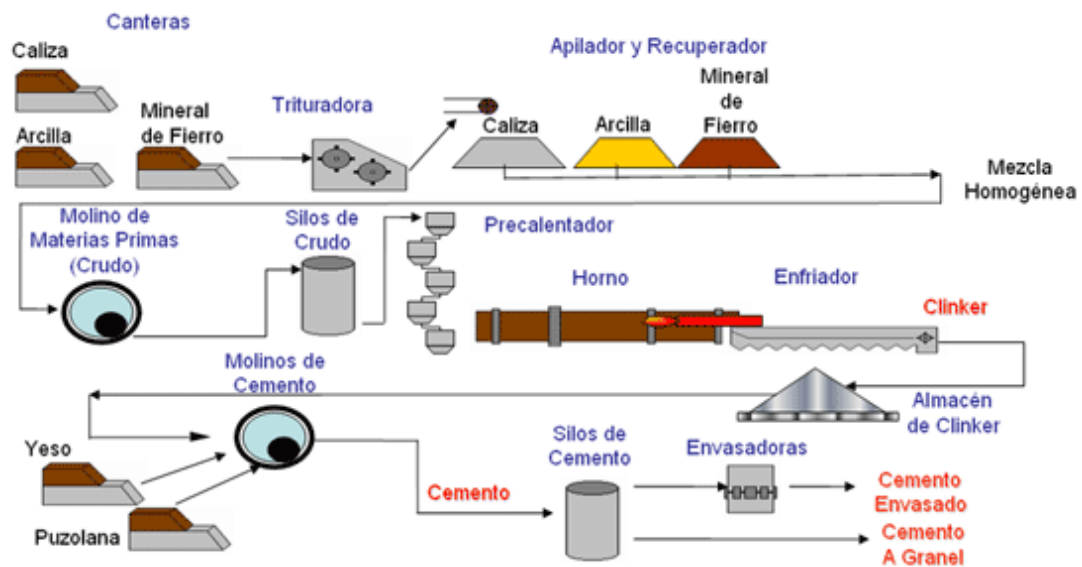


Ilustración 2.3.1. Proceso de elaboración del Cemento

Los impactos ambientales negativos de las operaciones de cemento ocurren en las siguientes áreas del proceso: manejo y almacenamiento de los materiales (partículas), molienda (partículas), y emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria (partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen monóxido y dióxido de carbono, hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de sulfuro y nitrógeno). Los contaminantes hídricos se encuentran en los derrames del material de alimentación del horno (alto pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, principalmente potasio y sulfato), y el agua de enfriamiento del proceso (calor residual), (ilustración 2.3.2.). El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los desechos puede ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas.



Ilustración 2.3.2. Impactos ambientales negativos en la producción del cemento.

2.3.1.2 Clasificación

Anteriormente los cementos estaban clasificados de acuerdo a las Normas Mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002, y NMX-C-175 como se muestra en la tabla 2.3.1, pero ahora la normativa vigente es la que se indica en la tabla 2.3.2, utilizable únicamente para México, esta clasificación es por nombres; a nivel mundial la nomenclatura sigue conservando los números romanos.

NMX-C-414-ONNCCE (Vigente)	NMX-C-001 (Cancelada) NORMA ASTM C-150
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 Y CPC 30R	Tipo I (Pórtland normal)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS	Tipo II (Pórtland moderada resistencia a los sulfatos)
CPO 40, CPO 40R Y CPC 40R	Tipo III (Pórtland fraguado rápido, alta resistencia inicial)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH	Tipo IV (Pórtland bajo calor de hidratación)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial RS	Tipo V (Pórtland alta resistencia a los sulfatos)
CPO ó CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali; todos los tipos

Tabla 2.3.1. Comparativa del cemento por su desempeño con otras normas (NMX-C-414-ONNCCE, 2004).

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA (Baja Reactividad Álcali Agregado)
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B (Blanco)
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

Tabla 2.3.2. Clasificación de los cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2004)

2.3.1.3. Propiedades del Cemento

El estudio de las propiedades del cemento, permite conocer algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico; dependen del estado en el cual se encuentren.

2.3.1.3.1. Propiedades Químicas

El proceso de Clinkerización del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 2.3.3. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 2.3.4.

Fórmula	Nombre	Abreviatura
CaO	Óxido de Calcio "Cal"	C
SiO ₂	Dióxido de Sílice "Silicato"	S
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio "Aluminato"	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro "Hierro"	F

Tabla 2.3.3. Abreviaturas de los Óxidos del Cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrito Tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabla 2.3.4. Componentes principales del cemento (Shetty, 2005).

De esta forma se habla de las fases:

- **Halita, con alto contenido de C₃S:** es la fase principal de la mayoría de los clíners Pórtland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial (Instituto del Concreto, 1997).
- **Belita, a base de C₂S:** es usualmente la segunda fase en importancia del Clínker. Su componente principal (C₂S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete

días. La fase belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suma aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que de manera aproximada, el C_3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras 4 semanas) y el C_2S a mediano y largo plazo.

- **Aluminato, rico en C_3A :** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997).
- **Ferrito C_4AF , solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de Calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del Clínker (Neville, 1998).

Las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuesto varían considerablemente de un cemento a otro y realmente es posible obtener distintas clases de él, agregando en forma proporcional los materiales correspondientes.

En la tabla 2.3.5. se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento. En la ilustración 2.3.3. se muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, en calor de hidratación y en la ilustración 2.3.4. la resistencia a compresión (Instituto del Concreto, 1997).

Cemento	Composición Química en %			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

Tabla 2.3.5. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Calor de Hidratación

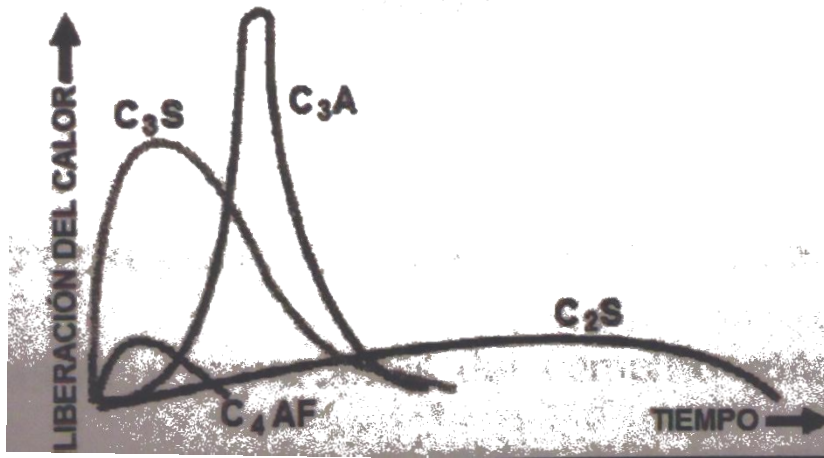


Ilustración 2.3.3. Calor de Hidratación de los componentes principales del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

Resistencia Compresión

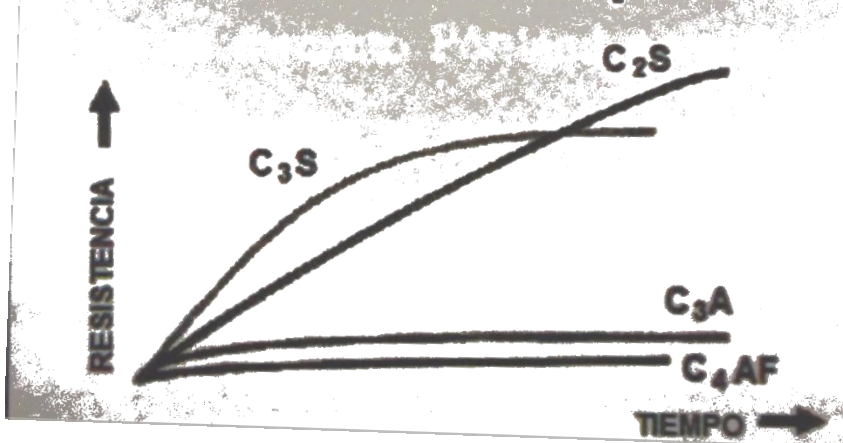


Ilustración 2.3.4. Resistencia de los componentes principales del cemento Pórtland (Instituto del Concreto, 1997).

Todos y cada uno de los componentes del cemento contribuyen de una u otra forma a la resistencia, pues es claro que todos los productos de hidratación llenan espacios, reduciendo con ellos la porosidad en el cemento (Neville, 1998).

Hidratación del cemento: la reacción mediante la cual el cemento Pórtland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

Calor de hidratación: durante el proceso de hidratación, se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir reacciones que liberan calor, haciendo que el concreto al fraguar y endurecer aumente de temperatura. Este incremento es importante en estructuras de concreto, ya que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras. El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de los calores de hidratación de los componentes individuales. El C_3A y el C_3S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo del calor (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.1.3.2. Propiedades Físicas

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión; mientras que las mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

- **Densidad:** es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de una masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Pórtland normal, suele estar muy cercano a 3.15 gr/cm^3 . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de Clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 gr/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico. NMX-C-152-1997-ONNCCE. ASTM-C-188-95
- **Finura:** el proceso de molienda de Clínker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.
- **Consistencia normal:** es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con la que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997). Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico. NMX-C-057-1997-ONNCCE. ASTM-C-187-98

➤ **Tiempos de fraguado:**

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.
- **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionarle agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.

Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por la aguja de Vicat. NMX-C-059-ONNCCE-2006. ASTM-C-191-01a

- **Expansión en autoclave:** Para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Las normas NMX-C-062 y ASTM-C-151, limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave. Este consiste en medir el cambio de longitud de barras de 2.5cm X 2.5cm X 25.4 cm hechas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión.

2.3.1.3.3. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas son: resistencia a la compresión, tensión y flexión.

- **Resistencia a la compresión:** este ensayo se realiza de acuerdo a las normas NMX-C-061 y ASTM-C-109 sobre cubos de mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) de 5.08 cm de arista. La resistencia a la tensión equivale del 8 al 12% del esfuerzo obtenido a compresión.

- **Resistencia a la flexión:** se realiza de acuerdo a la norma ASTM-C-348 en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero en prismas de 4 X 4 X 16 cm (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.1.4. Especificaciones

Los componentes de los cementos deben cumplir con los límites en la tabla 2.3.6.

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					
		Principales					Minoritarios ⁽¹⁾
		Clínker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos ⁽²⁾	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto ⁽³⁾	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

(1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales representados en la tabla.
 (2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.
 (3) El Cemento Portland Compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con Clínker + yeso.

Tabla 2.3.6. Componentes de los cementos (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

Los requisitos que deben cumplir los componentes principales del cemento están mostrados en la tabla 2.3.7.

Componente principal	Índice de actividad con cemento CPO 30 a 28 días (% mínimo)	Carbonatos totales (% mínimo)
Escoria Granulada de Alto Horno	75	-
Puzolana	75	-
Humo de Sílice	100	-
Caliza	-	75

Tabla 2.3.7. Requisitos de los componentes principales (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

Las especificaciones físicas de la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días, resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R y 40 R, tiempo de fraguado y expansión/contracción del cemento, están indicadas en la tabla 2.3.8.

Clase Resistente	Resistencia a compresión MPa	Tiempo de fraguado (min)	Estabilidad de volumen en autoclave (%)
------------------	------------------------------	--------------------------	---

	3 días mínimo	28 días mínimo	Máximo	Inicial mínimo	Final máximo	Expansión máximo	Contracción máximo
20	-	20	40	45	600	0.8	0.2
30	-	30	50	45	600	0.8	0.2
30 R	20	30	50	45	600	0.8	0.2
40	-	40	-	45	600	0.8	0.2
40 R	30	40	-	45	600	0.8	0.2

Tabla 2.3.8. Especificaciones físicas (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

Para los siguientes tipos de cemento y todas las clases resistentes se deben cumplir con las especificaciones químicas de la tabla 2.3.9.

Propiedades	Tipos de cemento	Especificación (% en masa)
Pérdida por ignición	CPO, CEG	Max 5.0 %
Residuo insoluble	CPO, CEG	Max 5.0 %
Sulfato (SO ₃)	Todos	Max 4.0 %

Tabla 2.3.9. Especificaciones químicas (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

Cuando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.3.2., este debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 2.3.10.

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por reacción álcali agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) KJ/Kg (Kcal/Kg)		Blancura (min. %)
		1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistente a los Sulfatos	0.1	-	-	-	-	-
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	-	0.02	0.06	-	-	-
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70

Tabla 2.3.10. Especificaciones del cemento con características especiales (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

2.3.1.5. Cemento utilizado en la investigación

El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C₃A) la norma inglesa para este cemento, BS 4027:1980, estipula un contenido de C₃A, del 3.5%. La finura mínima es 250 m²/kg. Los demás aspectos, al

cemento resistente a los sulfatos debe cumplir con la norma BS 12: 1978 para cemento portland normal.

En los Estados Unidos, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C150: 78^a (Tabla 2.3.1.). Esta especificación limita el contenido de C_3A al 5% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetrácalcico (C_4AF), a más del doble del contenido de C_3A al 20%. El contenido de óxido de magnesio está limitado aún 6%.

Desde el punto de vista químico, se debería esperar que el C_4AF formara sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto que produjera expansión. Sin embargo la acción del sulfato de calcio en el cemento hidratado disminuye al reducirse la relación $Al_2O_3: Fe_2O_3$.

La baja proporción de C_3A y el contenido comparativamente bajo de C_4AF del cemento resistente a los sulfatos significa que este tiene un alto contenido de silicatos que le proporcione una alta resistencia, pero como el silicato dicálcico (C_2S) representa una alta proporción de silicatos, la resistencia a edades tempranas es baja.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. El cemento CPC 30R RS, genera moderado calor de hidratación ya que el C_3S y el C_3A , que son los que producen alto de hidratación, disminuyen notablemente.

El ataque de los sulfatos ocurre porque el Aluminato tricálcico (C_3A), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Es por ello que el cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, se evite que la sustancia que se forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997)

2.3.2. Agua (líquido de amasado)

El agua (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El término agua, generalmente, se refiere a la sustancia en su estado líquido, pero la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en forma gaseosa denominada vapor. El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre (Wikipedia, 2011).

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de mortero y/o concreto debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad física y química. En la tabla 2.3.11. Se presenta las normas que tratan específicamente de la calidad del agua para el empleo en morteros y concretos.

País	Norma	Nombre de la norma
Argentina	IRAM 1601	Agua para morteros y hormigones de cemento Pórtland
Chile	NCh 1498.Of1982	Hormigón-Agua de amasado-Requisitos
Colombia	NTC 3459	Concretos. Agua para la elaboración del concreto
Ecuador	1 855-1:01	Hormigón premezclado: requisitos
	1 855-2:02	Hormigón preparado en obra: requisitos
EE.UU.	ASTM C 94	Standard specification for ready mixed concrete
Perú	NSTP 339.088-1982	Hormigón (concreto). Agua para morteros y hormigones de cementos Pórtland. Requisitos
México	NMX-C-122-82	Agua para concreto
Venezuela	CONVENIN 2385:2000	Concreto y mortero. Agua de mezcla. Requisitos

Tabla 2.3.11. Normas de la calidad del agua para empleo en morteros y concreto.

2.3.2.1. Especificaciones

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 2.3.12. 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 2.3.12., 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.

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfuresistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO ₄ = (a)	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	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	No menor de 6	No menor de 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 acusen 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 CaCl₂ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.</p>		

Tabla 2.3.12. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

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

El sólo hecho de que los agregados ocupan del 70 al 80% del volumen del concreto, su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que uno aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados (Shetty, 2005).

La fuente de materiales debe ser localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura (Instituto del Concreto, 1997). Las rocas son “Materiales sólidos compuestos por un agregado cohesionado de proporciones no definidas de uno o varios minerales”.

2.3.3.1. Origen de los agregados

Las rocas de acuerdo a su formación se dividen en ígneas (magmáticas), sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se dan a su vez porque las rocas están sometidas a continuos cambios por las acciones de los agentes geológicos que se llevan a cabo en el interior y exterior de la estructura de la tierra por lo que son llamados los ciclos geológicos (Ilustración 2.3.5).



Ilustración 2.3.5. El ciclo geológico de las rocas.

Primero se originan las rocas ígneas, las cuales son formadas en el interior de la corteza terrestre con una alta presión y gases disueltos, los cuales generan una expulsión a través de las grietas hasta la superficie terrestre en forma de erupción volcánica, donde el magma y los materiales expulsados se enfrían y se cristalizan cuando hacen contacto con el agua y el anhídrido carbónico. Con el paso del tiempo estos materiales, sufren un proceso de

meteorización, es decir se desintegran y descomponen; y por la acción del agua, viento, la raíces de las plantas y del hielo; son transportados y depositados en el fondo de los ríos y lagos donde con los años, se van acumulando fragmentos de material formando gruesas capas de sedimentos. Las capas más profundas, al ser aplastadas por el peso de la arena o arcilla que tienen se enciman, se sedimentan y cristalizan formando las rocas sedimentarias.

Después que las rocas ígneas y sedimentarias quedan sometidas a una alteración, se modifican en su estructura sólida por temperaturas y presiones elevadas, o bien al estar en contacto con una masa magmática, dan lugar a la formación de las rocas metamórficas.

Por desintegración mecánica y descomposición química las rocas llegan a formarse en gravas, arenas, limos o arcillas. Los suelos deben, pues, su origen a tal variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada. El resultado de ese concurso de causas, es una inmensa diversidad de tipos de suelos resultantes. También debe notarse que su formación ha ocurrido a través de las Eras Geológicas, tal como sigue ocurriendo hoy (Juárez Badillo, y otros, 2006).

2.3.3.2. Propiedades de los agregados

2.3.3.2.1. Químicas.

Las exigencias químicas que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa.

- **Epitaxia:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.3.2.2. Físicas.

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

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. La malla No. 4 separa las gravas de las arenas.
- **Porosidad y absorción.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.
- **Masa unitaria.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa (Instituto del Concreto, 1997).
- **Forma.** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles instrucciones en la roca y su estado de meteorización. La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.
- **Textura.** Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar.

2.3.3.2.3. *Mecánicas*

- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.
- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto.** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas (Instituto del Concreto, 1997).

2.3.3.3. Agregados utilizados en la Investigación

La arena al mezclarse con los aglomerantes constituye el soporte para el mortero y evita el resquebrajamiento que se produciría si se empleara el aglomerante solo, aparte de que su uso reduce a menos de un tercio el aglomerante.

Las arenas estarán libres de sustancias que impidan la adherencia o influyan desfavorablemente en el proceso de endurecimiento como ácidos, grasas, restos vegetales y cantidades perjudiciales de arcilla y sales minerales. En morteros de cal y cemento sólo se

podrá usar arena lavada. Las proporciones de mezcla están dadas para cada caso en particular, según el uso que se vaya a dar al mortero, y la clase de arena empleada en su preparación (ARQHYS, 2012).

El material inerte utilizado para la elaboración de morteros es 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 funcionan bien.

La arena utilizada para la elaboración del mortero con sustituciones parciales de MK, PN, PE, CCV, CVC y CEL fue del río Huajúmbaro proveniente del poblado del Cuervo perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán. Ilustración 2.3.6.



Ilustración 2.3.6. Río Huajúmbaro, poblado el cuervo, municipio de Zinápecuaro, Michoacán.

En las sustituciones parciales con CM, EAH, CBOF y FN; se utilizó arena del río Lerma. En ambas arenas se usa solo el material que pasa la malla N°16 y se retiene en la malla N°30. y presentan características similares a las que se especifica en la norma ASTM C 91, 1995, arena de Ottawa, que nos indica que debe de tener alto contenido de sílice.

Las arenas de grano redondeado proporcionan un mortero más fácil de trabajar que las arenas trituradas (Rivera Flores). Tanto la arena del río Lerma como la del río Huajúmbaro son de grano redondeado.

2.3.4. Aditivos

Actualmente una parte muy importante para la fabricación del concreto es el empleo de los aditivos, debido a que los componentes básicos del concreto hidráulico, cemento, agua y agregados, cualquier otro ingrediente que se incluya en su elaboración puede ser considerado, literalmente hablando, como un aditivo.

Actualmente la norma ASTM C 125-02 define al Aditivo de la siguiente manera: “Es un material diferente al agua, agregados, cemento hidráulico y fibras de refuerzo que se utiliza como un ingrediente del concreto o mortero y que se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado”.

Sin embargo, en la práctica del concreto hidráulico convencional, no se consideran como aditivos a las puzolanas o a las escorias cuando forman parte de un cemento portland-puzolana. Portland-escoria, ni tampoco las fibras de refuerzo.

Con estas salvedades, resulta válida la definición propuesta por el Comité ACI 116(26), según la cual un aditivo es un material distinto del agua, los agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utiliza como ingrediente del mortero o del concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o durante el mezclado.

La interpretación que puede darse a esta definición es que un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

Para complementar la definición anterior, tal vez cabría añadir que los aditivos para concreto y/o mortero se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

2.3.4.1. Usos de los Aditivos

El comportamiento y las propiedades del concreto hidráulico, en sus estados fresco y endurecido, suelen ser influidos y modificados por diversos factores intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos se relacionan esencialmente con las características, los componentes y las cantidades en que éstos se proporcionan para elaborar el concreto. En cuanto a los extrínsecos, pueden citarse principalmente las condiciones ambientales que prevalecen durante la elaboración y colocación del concreto, las prácticas constructivas que se emplean en todo el proceso desde su elaboración hasta el curado, y las condiciones de exposición y servicio a que permanece sujeta la estructura durante su vida útil.

Algunos de estos factores pueden ser objeto de maniobra por parte del usuario del concreto, pero otros no. Por ejemplo, los aspectos relativos a la composición del concreto ya las prácticas constructivas son factores susceptibles de ajuste y adaptación, en tanto los que corresponden al medio ambiente ya las condiciones de exposición y servicio, por lo general son factores fuera del control del usuario.

De acuerdo con este planteamiento, para influir en el comportamiento y las propiedades del concreto, a fin de adaptarlos a las condiciones externas, se dispone principalmente de dos recursos:

1. La selección y uso de componentes idóneos en el concreto, combinados en proporciones convenientes.
2. El empleo de equipos, procedimientos, y prácticas constructivas en general, de eficacia comprobada y acordes con la obra que se construye.

El uso de aditivos queda comprendido dentro del primer recurso y normalmente representa una medida opcional, para cuando las otras medidas no alcanzan a producir los efectos requeridos, en función de las condiciones externas actuales o futuras. Es decir, la práctica recomendable para el uso de los aditivos en el concreto, consiste en considerarlos como un medio complementario y no como un sustituto de otras medidas primordiales, tales como el uso de un cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada, o prácticas constructivas satisfactorias.

Según los informes del Comité ACI 212(76), (77), (78), los aditivos suelen emplearse en la elaboración de concretos, morteros o mezclas de inyección, no sólo para modificar sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sino también por economía, para ahorrar energía y porque hay casos en que el uso de un aditivo puede ser el único medio factible para obtener el resultado requerido, citando como ejemplos la defensa contra la congelación y el deshielo, el retardo o la aceleración en el tiempo de fraguado y la obtención de muy alta resistencia. Asimismo, señalan que los principales efectos que se persiguen con el uso de los aditivos, son los que a continuación se mencionan para ambos estados del concreto (Fundación ICA, 22 de marzo del 2000).

2.3.4.2. Influencia de los Aditivos en el diseño de mezclas

El proporcionamiento de un concreto frecuentemente involucra la selección de los materiales y su combinación (Abrams, 1919). El conocimiento de las propiedades del

concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad primordial determinar el diseño de la mezcla (Instituto del Concreto, 1997).

El diseño de mezclas puede ser definido como el proceso de selección de los ingredientes adecuados para concreto (cemento, agregados, agua y ocasionalmente aditivos) y la determinación de sus proporciones relativas con el objeto de producir un concreto de cierta resistencia, consistencia y durabilidad de la forma más económica posible (Shetty, 2005).

2.3.4.3. Aditivo utilizado en la investigación

Cuando la relación A/C 1.01, no cumple con la fluidez de 110 ± 5 fue necesario agregar un aditivo fluidificante. El cual cumple con las siguientes características: el nombre comercial es SikaCem Fluidificante, Figura 2.3.4.1, aditivo fluidificante de concretos o morteros que incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aprox. El fabricante recomienda la siguiente dosificación: Una bolsa de 200g de producto (SikaCem Fluidificante) por cada saco de 50 kg, es decir 4g x Kilo de cemento.



Ilustración 2.3.4.1. Fluidificante SikaCem.

2.4. Parámetros de diseño en mezclas de concreto y/o mortero

Teniendo los materiales para la realización del mortero y/o concreto, los tres factores variantes que tienen que ser considerados son:

- **Relación a/c acorde con la durabilidad y resistencia requerida:** esta relación es sencillamente la masa del agua, dividido entre la masa del cemento. La relación a/c que se elija para el diseño de la mezcla, debe ser el menor valor requerido para cubrir las consideraciones de exposición de diseño en este caso se eligió una relación de 1.01, debido a que al agregar los materiales sustitutos del cemento, en su mayoría

presentaban una alta absorción. Cuando la durabilidad no sea el factor que rija en el diseño, la relación a/c deberá elegirse con base en la resistencia a compresión del concreto (Kosmatha, y otros, 1992).

- **Graduación de los Agregados:** esta graduación está controlada sólo por la variación del contenido de agregado fino y grueso (Shetty, 2005). En este el caso de morteros se utiliza 2.75g de arena por cada gramo de cemento tal y como se especifica en las normas NMX-C-061 y ASTM-C-109.
- **Consistencia:** la consistencia es la facultad del mortero en estado fresco para fluir, la prueba de fluidez es una medida de la consistencia de la pasta. NMX-C-057-1997-ONNCCE. ASTM-C-187-98.

En general, estos factores no pueden ser elegidos o manipulados arbitrariamente. Por lo general, dos o tres factores se especifican, y los otros se ajustan para dar trabajabilidad a la mezcla.

Al diseñar una mezcla de concreto y/o mortero se tienen principalmente dos objetivos:

El **primer objetivo** consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto y/o mortero bien proporcionado debe poseer las propiedades siguientes (Kosmatha, y otros, 1992):

1. *En el concreto y/o mortero fresco:* trabajabilidad aceptable, que engloba cinco características:

- Homogeneidad y uniformidad,
- Consistencia (cohesión y viscosidad),
- Estabilidad (oposición a la segregación y sangrado),
- Aptitud para la compactación (compactibilidad)
- Disposición para el acabado (condiciones de textura superficial).

De tales características, sólo es factible especificar aquellas que pueden evaluarse de manera cuantitativa, como es el caso de la consistencia y el sangrado, para cuya medición existen procedimientos normalizados (Neville, 1998). El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La

plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida, (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear.

No se pueden considerar plásticas a las mezclas muy secas o muy desmoronables ni a las muy aguadas o fluidas. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos – cemento, arena y piedra- dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad. Un sangrado excesivo aumenta la relación agua/cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. La segregación es la separación de los distintos componentes de una mezcla de concreto o mortero fresco durante su transporte o colocación (Kosmatha, y otros, 1992).

2. *En el concreto y/o mortero endurecido: durabilidad, resistencia y presentación uniforme.*

La resistencia a la compresión se define como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (Kgf/cm²) a una edad de 28 días y se le asigna con el símbolo $f'c$ (Kosmatha, y otros, 1992).

Por lo común las propiedades del concreto fresco se rigen por el tipo de estructura a construir (vigas, muros, zapatas, etc.) y por las técnicas de colocación y transporte (bomba, banda transportadora, carretilla, etc.); así mismo, las propiedades del concreto en estado endurecido quedan especificadas por el ingeniero calculista ya que él proporciona datos tales como la resistencia a los esfuerzos, durabilidad y otros, para que respondan a las condiciones de los proyectos o de los reglamentos (Instituto del Concreto, 1997). En el caso de los morteros en estado fresco se les determina su fluidez NMX-C-144-0NNCCE esta debe estar el 110 ± 5 cm.

El **segundo objetivo** es hacer el concreto de la manera más económica, es decir, todos los concretos dependen principalmente de dos factores (Shetty, 2005):

1. *Costo de la elaboración de una mezcla de concreto:* este costo está constituido básicamente por la variación en el costo de los materiales. Esta variación se debe a que el precio del cemento, por kilo, es varias veces mayor que el de los agregados, es decir, el cemento constituye alrededor del 10% del volumen absoluto total del concreto pero puede llegar a representar más del 70% del costo del mismo (Neville, 1998). Es por ello que el proporcionamiento debe minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar la resistencia, durabilidad y demás propiedades del concreto. La diferencia en costo entre los agregados generalmente es secundaria; sin embargo, en algunas localidades o con algún tipo de agregado especial, puede ser suficiente para que influya en la selección y dosificación. El costo del agua usualmente no tiene ninguna influencia, mientras que el de los aditivos puede ser importante por su efecto potencial en la dosificación del cemento y los agregados (Instituto del Concreto, 1997).
2. *Costo de la mano de obra:* este costo depende de la trabajabilidad de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación. Una mezcla poco trabajable con un equipo de compactación deficiente aumenta los costos de mano de obra y aún, con un equipo de colocación eficiente, el costo de la colocación de mezclas muy secas es alto (Instituto del Concreto, 1997). La comprensión de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Solamente con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla así como con un proporcionamiento adecuado se pueden obtener las propiedades anteriores al producir un concreto (Kosmatha, y otros, 1992). Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características con base en el uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros y a las propiedades físicas del concreto (tales como la resistencia), que se requieran para la estructura. Una vez que estas características se han elegido, la mezcla se puede proporcionar a partir de datos de campo o de laboratorio (Kosmatha, y otros, 1992).

2.5. Puzolanas

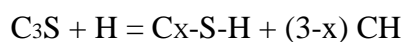
Hoy en día, existen múltiples usos que pueden darse a la Puzolana, si bien de entre todo ellos destaca la fabricación de Cemento Portland Puzolánico. En México la producción de Cemento Portland Puzolánico se encuentra bajo la normativa NMX-C-414-ONNCCE. Las ventajas que ofrece el cemento Puzolánico sobre el resto se detallan a continuación:

- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.

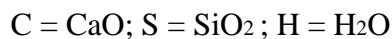
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducción del calor de Hidratación.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad de agua.

La base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto Puzolánico” en el cemento. Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento Portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción se rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

La reacción química del fraguado del cemento es como sigue:



Dónde:



Siendo el Gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. El tercer producto, abreviado CH en la fórmula, que no es sino el $Ca(OH)_2$, con poco valor cementante, y que es responsable de la reacción con los sulfatos que degradan la calidad del mismo.

Para hacer frente a este problema, es por lo que se añade la Puzolana. Ésta se compone de Aluminosilicatos que reaccionan con el componente CH de la forma siguiente:



Dónde:

S = Aluminosilicatos de la Puzolana (Composición tipo SiO_2 (75%) + Al_2O_3 (10%) y otros). CH = $Ca(OH)_2$; H = H_2O

2.6. Materiales en estudio como sustituto parcial del cemento

El alto consumo de recursos naturales y energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de cemento como material de construcción. En la actualidad, la importancia del sector de la construcción en todos los países, desde el punto de vista económico y social, junto con la menor disponibilidad de los recursos naturales y artificiales necesarios, y su desarrollo sostenible, han provocado que desde hace varias décadas a esta parte, se haya tenido que aumentar, en cantidad y tipos, la incorporación de materiales puzolánicos como un sustituto parcial del cemento. Las interacciones que se generan entre dichas adiciones minerales tan diversas y el cemento Portland, sumadas al resto de variables químico-físicas que intervienen en cada caso, tanto en el momento de su fabricación y primeras edades, como en sus prestaciones futuras sobre todo, es decir, su durabilidad, constituye una materia de investigación muy extensa.

La finalidad es conseguir dos objetivos fundamentales: el primero, que queda circunscrito a la industria del cemento, y que es el de reducir los costos de producción mediante la sustitución parcial del cemento Portland por dichas adiciones, obteniendo así un ahorro de energía, y el segundo, de carácter medioambiental y de efecto doble, por el que se consiguen fabricar las cantidades de cemento necesarias disminuyendo la fabricación de Clínter Portland. Este proceso lleva asociado por tanto, la valorización material de diferentes materiales que funcionen como puzolanas tales como minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y de fibras de cactus.

La actividad puzolánica se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción.

Puzolana + Cal + Agua ----- Silicatos y Aluminatos de Calcio hidratados.

La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases actuales presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del Cemento Portland: Silicatos Cálcicos Hidratados (CSH), Aluminatos Cálcicos Hidratados (CAH) y Sílico - Aluminatos Cálcicos Hidratados (CSAH). (Salazar, 2002) (Ecoingeniería).

2.6.1. Minerales de alta temperatura

Existen otros materiales que tienen actividad puzolánica en mayor o menor medida. Entre ellas se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsíllica o humo de sílice que se genera como producto secundario en la fundición de aleaciones de ferrosilicatos, metacaolines procedentes del tratamiento térmico del caolín, y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en plantas térmicas. No obstante, estos sustitutos de la puzolana no presentan la misma superficie de reacción que las de origen natural, debido a que la puzolana de origen volcánico presenta una mayor cantidad de poros originados por los gases de la erupción, no presentando hoy por hoy unas propiedades igual de óptimas.

En el presente estudio La Perlita Natural (PN) así como Perlita Expandida (PE), fueron donadas por la empresa TERMOLITA S.A. DE C.V.

2.6.1.1. Metacaolín

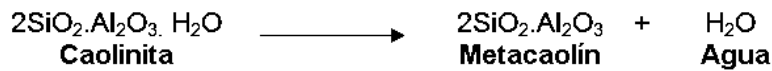
2.6.1.1.1. Obtención y Composición

Los Caolines son rocas formadas fundamentalmente por minerales del grupo del Caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. Para su utilización en algunas de sus aplicaciones, deben ser refinados y procesados, para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes.

El Metacaolín (MK) es un producto de síntesis, manufacturado mediante la calcinación del caolín, de gran finura (hasta 1-2 μm) y con elevada actividad puzolánica. Se ha demostrado en un gran número de estudios que el MK proporciona mejoras significativas en la resistencia (De Silva, y otros, 1993). Un sustituto de CP con alta actividad puzolánica es aquel obtenido de la calcinación de las arcillas caoliníticas de purezas variables, el Metacaolín (MK) (Escalante, y otros, 2011), (Caldarone, 1994); es un silicoaluminato que es parte del presente estudio.

De acuerdo con Moya (Moya, 1998), el tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la obtención de Metacaolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) o Mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

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



De estos productos, el Metacaolín (MK), es un aluminosilicato de carácter amorfo y alta reactividad, que mezclado con cal o cemento actúa como puzolana y les concede a los morteros y concretos excelentes propiedades cuando se adiciona al cemento, tal como una resistencia a la compresión superior y excelentes propiedades de durabilidad. Así mismo, su color blanco lo hace muy interesante para aplicaciones arquitectónicas (Caldarone, y otros, 1994).

2.6.1.2. Perlita Natural

Perlita es el término petrográfico para una roca silícea definida como “cristal volcánica”. Se distingue de otros cristales debido a que cuando se calienta a ciertas temperaturas, se puede expandir de 4 a 20 veces de su volumen original. Esta expansión se debe a que en su estructura molecular tiene en forma combinada del 2 al 6% de agua en su estado natural, la cual pierde por evaporación en el proceso de calentamiento. Cuando se calienta a una temperatura que puede variar de 650 a 750 °C, esta roca se infla como las palomitas de maíz creando incontables pequeños globos o celdillas en las partículas calentadas. Estas celdillas cerradas de cristal constituyen este material asombrosamente ligero que resulta un aislante térmico por excelencia; al mismo tiempo y durante el proceso del inflado, la roca perlita adquiere una de las características que más la distingue; su color blanco (DICALITE DE MÉXICO S.D.).

2.6.1.3. Perlita Expandida

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 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/m³. En la práctica la roca se tritura a un tamaño graduado cuidadosamente y después se le somete a un calentamiento rápido en un horno especialmente diseñado que permite tener un control cuidadoso de la temperatura y del tiempo de horneado. Este calentamiento produce cambios físicos y químicos que originan la formación de oquedades minúsculas, que, a su vez, crean la expansión y la

estructura celular, dando así la ligereza y el gran poder de aislamiento del agregado (Perlite Institute, 1950).

A pesar de que desde 1836 se sabía que la perlita se expandía cuando se calentaba bajo ciertas condiciones, no fue sino hasta 1946 cuando se usó por primera vez como agregado.

El material crudo se obtenía originalmente de Arizona, EE.UU., aunque en el Mediterráneo, Cerdeña es también una fuente importante de este material. Más recientemente se han procesado depósitos en Antrim, al Norte de Irlanda, y de este producto Irlandés se ha podido surtir el mercado Británico durante algunos años. En Inglaterra todavía no se le usa como agregado del concreto, pero ha encontrado aceptación como agregado para enlucidos de muros. En América, sin embargo, se ha usado como agregado del concreto para bloques, tableros de muro y como protección del acero contra el fuego.

2.6.1.4. Ceniza de Carbón Mineral

CM, EAH y CBOF (Referenciadas en el inciso 2.6.4. las ultimas dos enlistadas). Estas cenizas son provenientes de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, (Ilustración 2.6.1.1.), Se localiza al sur del Estado, en las coordenadas 17°57' de latitud norte y 102°12' de longitud oeste, a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Arteaga, al este con el Estado de Guerrero, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Aquila. Su distancia a la capital del Estado es de 401 km. Su superficie es de 1,160.24 km² y representa un 1.97 % por ciento del total del Estado (Figura 2.6.1.2).



Ilustración 2.6.1.1. Siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

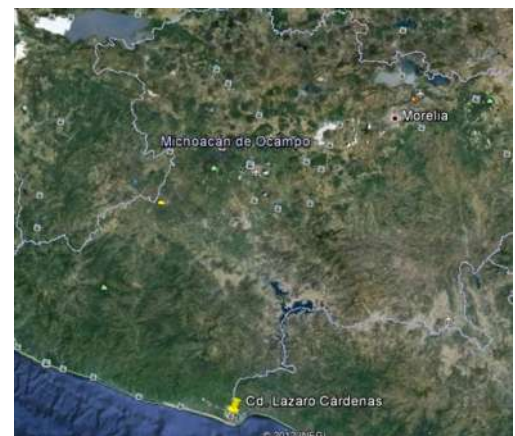


Ilustración 2.6.1.2. Localización de Lázaro Cárdenas, dentro del estado de Michoacán. Tomada de Google Earth.

2.6.1.4.1. Definición y origen

El carbón mineral es un material vegetal de origen fósil que se desarrolla durante el periodo carbonífero y queda sepultado bajo agua y yacimientos térreos 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, y otros, 2000). En la Ilustración 2.6.1.3. Se muestra una clasificación del carbón mineral (Instituto Mundial del Carbón, 2005).

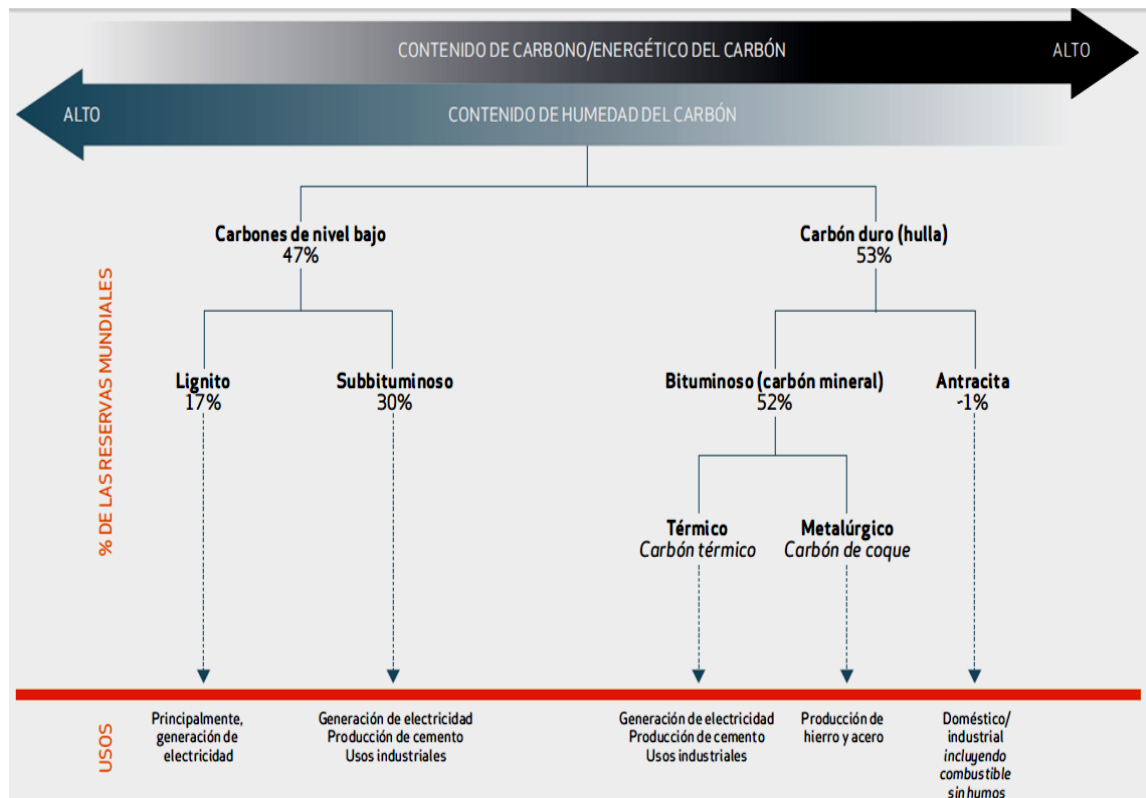


Ilustración 2.6.1.3. Clasificación del carbón mineral y sus usos. (Instituto Mundial del Carbón, 2005)

2.6.1.4.2. Producción

El carbón se utiliza 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 (Instituto Mundial del Carbón, 2005).

2.6.1.4.3. Material a utilizar

Para este caso, el carbón mineral que se utiliza en esta experimentación no es en si la ceniza resultado de una combustión sino que es un mineral el cual es el desecho del carbón mineral, llamado coque, seleccionado para la creación del acero. Este carbón mineral viene en forma granular (Ilustración 2.6.1.4.a), que posteriormente se muele hasta quedar una forma fina (Ilustración 2.6.1.4.b.), que pase la malla N°200, en que se pueda sustituir por el cemento.



Ilustración 2.6.1.4 a) Carbón mineral en forma granular; b) Molienda del carbón mineral.

2.6.2. Cenizas orgánicas

La utilización de residuos de origen orgánico (cenizas de bagazo de caña, cascarilla de arroz, carbón vegetal, aserrín, etc.), en la producción de las mezclas de concreto trae beneficios para el medio ambiente, ya que contribuye a reducir un volumen importante de emisiones de CO₂,

el uso de estos subproductos agroindustriales permitirá reducir sustancialmente una parte importante de la producción de cemento (Marquez-Montero, y otros, ALCOMPAT 2010).

2.6.2.1. Bagazo de Caña

El bagazo de la caña de azúcar ha sido investigado, tanto como materia prima o como material Puzolánico, para su uso en la manufactura de cementos comerciales y otros compuestos (Kantiranis, 2004). La utilización como puzolana de los desechos de la agricultura requiere calcinación previa, pero la actividad puzolánica varía sustancialmente como resultado de las condiciones de calcinación y la naturaleza de los materiales de origen. Es así, que existen resultados contradictorios acerca de la efectividad puzolánica de la ceniza del bagazo de caña de azúcar (Sugar Cane Bagasse Ash, SCBA) que se atribuyen al empleo de diferentes temperaturas de calcinación (Martirena, y otros, 1998).

2.6.2.1.1. Producción

México es quinto lugar en producción de caña, en el periodo 2008-2009 se incendiaron en la industria mexicana 10 millones de toneladas de bagazo de caña (Hernández-Toledo, y otros, 2010).

Según la SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) en México se produce anualmente un promedio de **43'535,664.77 toneladas** de caña, y se consumen, para la producción de los diversos productos azucareros y en otras actividades no especificadas, **91.88 Petajoules** de energía (Sagar - Sagarpa, 1980-2009). En la ilustración 2.6.2.1. Se muestra el consumo de azúcar en México.

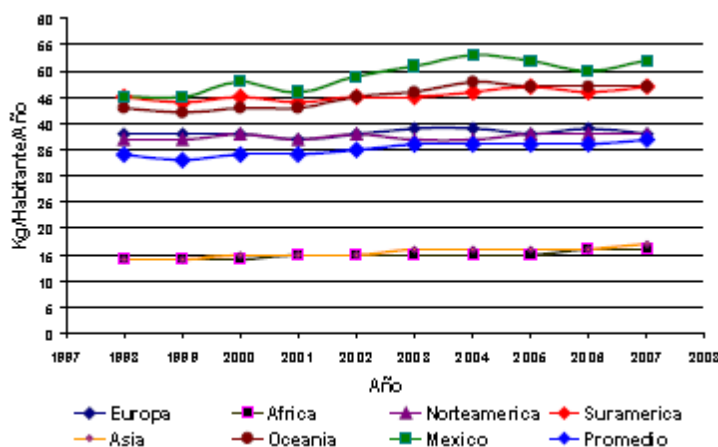


Ilustración 2.6.2.1. Consumo de azúcar en México (Periodo 1998-2007) (FOLICTH, 2007) (Aguilar-Rivera, y otros, 2009).

Se tienen localizados cuatro ingenios azucareros en el estado de Michoacán, uno está en el municipio de Tacámbaro, otro en el municipio de Tocuambo, el tercero en el municipio de Taretan y en el municipio de Los Reyes.

2.6.2.1.2. Obtención de la ceniza en estudio

El material de Ceniza de Bagazo de Caña se logró obtener gracias al apoyo del Ingenio de Azúcar “Lázaro Cárdenas” ubicado en el Municipio de Taretan del estado de Michoacán de Ocampos, su ubicación geográfica se puede observar en la ilustración 2.6.2.2.



Ilustración 2.6.2.2. Localización Municipio de Taretan.

La caña se pesa a granel en una báscula de plataforma junto con el vehículo de transporte en el que se le recibe en el ingenio, tal como se observa en la Ilustración 2.6.2.3., posteriormente se destara el camión para tener la caña neta.



Ilustración 2.6.2.3. Llegada de la caña

Lo mejor es que toda la caña que entra se muele inmediatamente, es decir: del camión a la mesa alimentadora, "cero batey" con la finalidad de abatir las pérdidas de sacarosa en la

caña que se estiba en el batey. Los equipos de descarga de caña en el ingenio son las grúas radiales auto-estables que descargan la caña de los camiones y la depositan en las mesas alimentadoras. Las mesas alimentadoras son unas rampas de hierro estructural con una cubierta con inclinación de 8° de lámina de fierro, provista con carriles guía donde circulan unas cadenas dotadas de aditamentos para impulsar la caña que se mueve por unas ruedas dentadas (sprockets) los cuales van montados en un eje motriz y otro conducido, accionados por un moto-reductor, llevan la caña hacia el conductor general de alimentación al molino.

Se tiene también colocado un nivelador de caña en la punta de las mesas alimentadoras con el objeto de nivelar mejor el colchón de caña y evitar sobrecargas en la desfibradora, consistiendo en juegos de aspas de acero montados en una flecha con espaciamiento regular, que giran, mediante un moto-reductor a una velocidad de entre 60 a 100 rpm.

El transporte de la caña hacia los molinos, consiste en un conductor de tablillas de acero, instaladas en dos cadenas de rodillos con aditamentos, movidas por rueda dentadas (sprockets), montados en dos flechas: conductora y conducida, se tiene dos conductores de caña: uno horizontal y otro inclinado. El cual tiene la finalidad de elevar la caña para lograr una correcta alimentación hacia los molinos. La longitud de los conductores se diseña para recibir la caña e instalar sobre el conductor un gallego nivelador y el equipo de preparación de caña que es la desfibradora.

La caña se corta en la desfibradora, en trozos de un tamaño tal que permita una buena alimentación a los molinos, una mejoría en la extracción de jugo al romper la corteza de la caña y un mayor tonelaje de molienda por día.

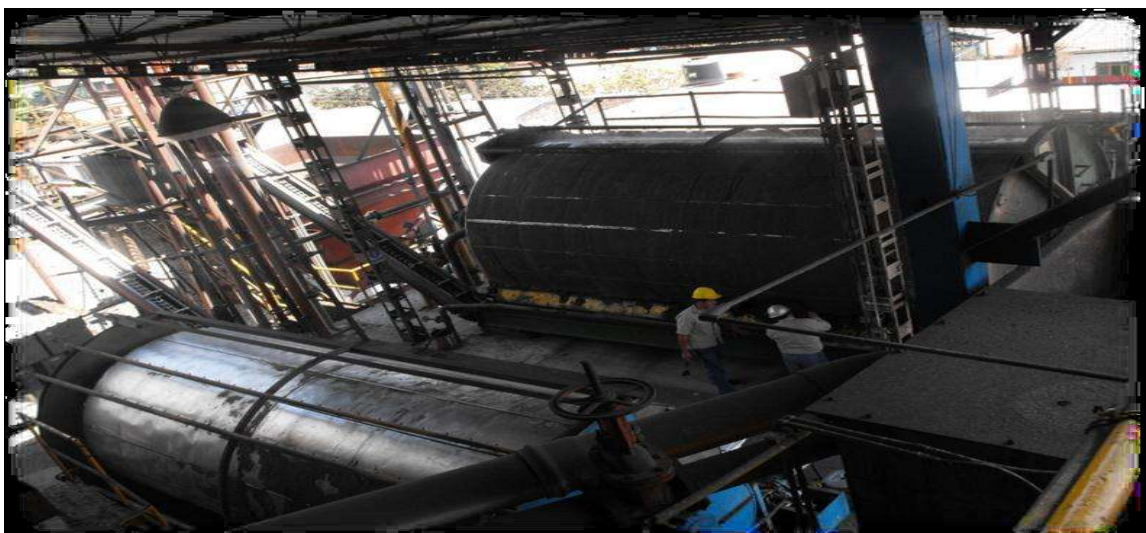


Ilustración 2.6.2.4. Molinos

Extracción o molienda

La caña después de pasar por la desfibradora es conducida hacia los equipos de extracción, que son los molinos, estos son equipos en serie que funcionan en tándem de 5 unidades, ilustración 2.6.2.4, están montados en bancazas de hierro, niveladas sobre bases de concreto, consta, para cada unidad, de 2 "vírgenes" o soportes de forma triangular donde se asientan cuatro "mazas", para eficientizar la extracción.

El mecanismo que mueve los molinos son conjuntos de engranes rectos y reductores de velocidad movidos por turbina de vapor y transmisiones hidráulicas, el sistema está diseñado para mover una unidad (molino), el molino 1 es accionado por turbina de vapor de 700 hp, y los molinos 2,3,4 y 5 movidos por transmisión hidráulica cada uno.

Para mejorar la extracción de jugo se le agrega agua a los últimos molinos pero, para no incluir demasiada agua al proceso, el jugo que se extrae de los últimos molinos (y que tiene menor contenido de sacarosa), se bombea hacia los primeros molinos para "imbibir" la caña a la salida de ellos (a partir del 1er molino) y diluir la sacarosa contenida en la caña que sale de dichos molinos, a este proceso se le llama "imbibición" o "maceración".

El jugo de los primeros molinos (normalmente del 1º y 2º es el que se envía hacia la elaboración, previamente, se pasa por un rotofiltro para separar el bagacillo que también se arrastra con el jugo en la extracción, para que entren la menor cantidad de impurezas al proceso, entre más limpia este la caña, menor cantidad de impurezas se tendrán en fabrica.

El jugo mezclado es el jugo que se bombea a la fábrica para iniciar la elaboración y que es, en esencia, jugo de caña más agua de dilución.

El bagazo es el residuo fibroso que sale del último molino del tándem, esta compuesto de la fibra o materia leñosa de la caña y de humedad que no ha sido eliminada por la presión de las mazas de los molinos, la cual debe ir a formar parte del jugo mezclado y que queda como remanente en el bagazo y sólidos solubles.

El bagazo que sale del último molino es enviado por conductores de cadenas con tablillas de madera o de acero hacia las calderas, Ilustración 2.6.2.5, y ahí se descarga y dosifica a los hornos donde se quema (se utiliza como combustible) para generar el calor necesario para producir el vapor que se requiere en las turbinas que mueven a los molinos y al

turbogenerador ; el vapor que sale de estas turbinas, es utilizado para el cocimiento del jugo mezclado en el área de elaboración, el excedente de bagazo, se envía a un patio de almacenamiento para ser utilizado como combustible de reserva.



Ilustración 2.6.2.5. Transporte del bagazo de caña hacia las calderas.

Las calderas son equipos mediante los cuales se efectúa la combustión de bagazo, para producir la generación de vapor necesaria para mover los equipos del ingenio. Como residuo de la combustión se genera la ceniza, la cual es enviada a una tolva al realizar la limpieza de los hornos de calderas.

Las chimeneas de las calderas, No. 1 y No. 3 cuentan con un sistema de deshollinador para capturar la ceniza de los gases de combustión. Manejándose por vía húmeda, enviando el hollín precipitado a una tolva.

Toda la ceniza que se produce producto de la quema del bagazo es enviada a patios exteriores del ingenio, Ilustración 2.6.2.6, donde, donde personas ajenas al ingenio se encargan de recogerlas y distribuirlas a los agricultores como material de abono.



Ilustración 2.6.2.6. Patios de tiradero de CBC.

Los equipos movidos por vapor comprenden en primer lugar todos los primotores: Turbo-generadores que deben ser los productores de toda la energía eléctrica que se necesita en un ingenio, y la turbina que opera un molino, además de algunas otras turbinas de vapor que se utilicen para algún movimiento específico (bombas de agua, etc.)

2.6.2.2. Carbón Vegetal

2.6.2.2.1. Producción

Según datos de la SAGARPA, la producción de carbón vegetal en nuestro país es en promedio de **262,320 M t /año**. Al igual que el caso de la caña existe un consumo de energía proveniente de estos productos.

Para la obtención de la ceniza de carbón vegetal y leña se tiene identificado un productor en el poblado de “La Soledad”, ubicado en el lado oeste de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán.

2.6.2.2.2. Obtención de la ceniza en estudio

La Ceniza de Carbón Vegetal para este trabajo de investigación se obtuvo del poblado de Cuto de la Esperanza, el cual se encuentra localizado en el Municipio de Morelia del Estado de Michoacán de Ocampo como se muestra en la Figura 2.6.2.7.



Ilustración 2.6.2.7. Ubicación satelital Cuto de la Esperanza.

Se encuentra a 2160 metros de altitud. La localidad tiene 1129 habitantes de cuales 511 son masculinos y 618 femeninas.

La población económicamente activa en la localidad de Cuto de la Esperanza es de 337 (27.97% de la población total) personas, las que están ocupadas se reparten sectores de la siguiente forma (Foro-Mexico.com):

- Sector Primario: 129 (38.97%) (Municipio: 3.59%, Estado: 24.34%) Agricultura, Explotación forestal, Ganadería, Minería, Pesca ...
- Sector Secundario: 65 (19.64%) (Municipio:24.01%, Estado:25.52%) Construcción, Electricidad, gas y agua, Industria Manufacturera ...
- Sector Terciario: 137 (41.39%) (Municipio: 72.39% Estado: 50.13%) Comercio, Servicios, Transportes...

Lo primero es talar la madera y transportarla hasta la zona donde se produce el carboneo (este es el nombre que recibe la acción de producir el carbón). La leña se deposita en chimeneas, (una especie de agujero en la tierra donde se deposita la madera de encino Figura 2.6.2.8.). Posteriormente se prende fuego a la madera depositada, es importante que la madera se encuentre seca, una vez que se ha cerciorado que la madera está ardiendo se colocan ramas y materia orgánica encima de la leña, ilustración 2.6.2.9. Se deja por varios días la leña bajo el calor de las llamas produciendo la deshidratación y posteriormente la leña adquiere la forma y color del carbón que se vende.



Ilustración 2.6.2.8. Chimenea para carboneo.

Ilustración 2.6.2.9. Producción de carbón: las chimeneas con la leña debajo de ramas y materia orgánica.

El proceso de fabricación de carbón como cualquier quema de un producto, provoca la producción de ceniza del material que se consume. Es de esta manera como se produce la Ceniza de Carbón Vegetal (CCV). Para lo obtención de CVV basta con excavar en las chimeneas quitando el sobrante de la producción de carbón. Ahora mediante el uso de una pala se extrae la ceniza de las chimeneas. Para facilidad del traslado la ceniza se deposita en costales y se traslada al laboratorio como se muestra en la Ilustración 2.6.2.10.



Ilustración 2.6.2.10 Obtención de CCV.

2.6.3. Ceniza inorgánica

2.6.3.1. Elaboración de ladrillo

Una puzolana con propiedades promisorias es la Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL), la cual es un silicoaluminato del que no se han encontrado antecedentes en la literatura,

aunque por sus características se espera un buen comportamiento como sustituto del cemento Portland.

2.6.3.1.1. Obtención y composición

La obtención de la ceniza producto de la quema de leña para la cocción del ladrillo (CEL), se obtuvo en las tabiquerías que se encuentran en comunidades aledañas a la ciudad de Morelia. La ubicación de 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 (ilustración 2.6.3.1.).



Ilustración 2.6.3.1. Localización del lugar de procedencia de las tabiquerías donde se extrajo la ceniza utilizada. Tenencia Morelos, Mich.

Esta ceniza es un producto industrial que prácticamente se desecha, exceptuando el uso que le dan los propios tabiquereros, que la pueden utilizar como desmoldante, durante la elaboración de los ladrillos.



Ilustración 2.6.3.2. Horno de donde se extrajo la ceniza utilizada para las sustituciones.



Ilustración 2.6.3.3. Residuos de ceniza y trozos de ladrillo producto de su cocción.



Ilustración 2.6.3.4. Extracción de la ceniza del horno de cocción del ladrillo, utilizando palas.

2.6.4. Residuos industriales

2.6.4.1. Escoria de Alto Horno

Son un producto formado por la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flota en el baño de la fundición del metal y se separa del mismo para su posterior enfriamiento. Los compuestos en la escoria son: principalmente Óxidos, silicatos, hierro, caliza, magnesio y manganeso. Además de remanentes de otros elementos químicos que son agregados al horno durante el proceso de fusión y refinación del acero.

Los componentes además del hierro en el arrabio de un alto horno empiezan a formar la escoria junto con el contenido de ceniza en la caliza y subproducto de coque, estos son separados del arrabio y recuperados.

La composición química de la escoria de alto horno, expresada en óxidos, tiene como principales constituyentes los óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio que comprenden el 95% del total (ArcelorMittal).

Los componentes primarios de la escoria son la cal (CaO) y sílice (SiO₂). Estos componentes también están contenidos en la corteza de la tierra en general o en rocas ordinarias y minerales. El CaO, el componente primario de la escoria, es soluble en el agua y expone una alcalinidad así como el cemento u hormigón. Y cuando es removido a temperaturas altas de 1,200°C o mayor, no contiene ninguna materia orgánica. (ArcelorMittal)

La escoria tradicionalmente ha sido utilizada en componentes del cemento y agregados en la construcción, normados en México por la NMX-C-414-ONNCE-2004 que nos indica los cementos que contienen escorias de alto horno. Otros usos innovadores de la escoria de acería son introducidos: grandes bloques de escoria carbonatados, llamados Bloques Marítimos, producidos inyectando dióxido de carbono en escoria compacta, y fertilizante de silicato de potasio producido añadiendo una fuente de potasio a escoria de acería.

La composición química, física y mineralógica de las escorias depende también del proceso el cual son producidas y del procesamiento que requiera según el uso o disposición final.

Las escorias de alto horno; y más concretamente las granuladas o peletizadas, tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer. Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación (F. Puertas, 1993).

La escoria de acería para ser reciclada en el cemento presenta algunos materiales que ocasionan problemas de durabilidad debido a su contenido de óxido de calcio (libre) reactivo (f-CaO) u óxido de magnesio (MgO). Cuando f-CaO entra en contacto con el agua esta comienza a hidratar y una cantidad grande del calor es liberada. El calor puede hacer que la pasta de cemento se agriete y reduzca así la fuerza del hormigón. El MgO se disminuye la durabilidad a largo plazo del hormigón, ya que la formación de brucita causa una extensión, y grietas subsecuentes en la pasta de cemento. Otros materiales han mostrado una reactividad baja con el cemento, causando que la fuerza y la durabilidad disminuyan. (ArcelorMittal).

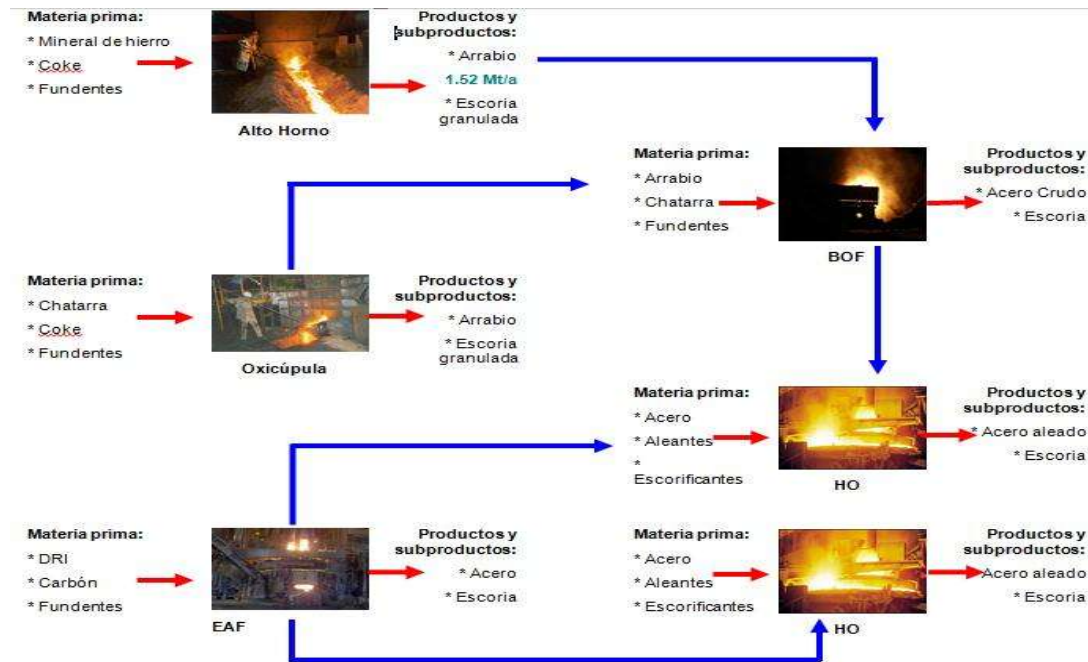


Ilustración 2.6.4.1. Producción del acero (ArcelorMittal).

2.6.4.1.1. Material a utilizar

La EAH que se utiliza en la experimentación es la ceniza resultante de la producción del acero (Ilustración 2.6.4.1.) de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. La cual tiene una forma granular como se muestra en la ilustración 2.6.4.2.a y b.



Ilustración 2.6.4.2. a) EAH granular sin moler; b) Molienda de la EAH.

Esta ceniza granular posteriormente fue molida hasta una finura que pasa la malla N°200. En los componentes de la escoria de alto horno se puede observar que tiene un alto contenido de sílice y alúmina, por lo que la tendrá una buena reacción de hidratación para formar el mortero.

2.6.4.2. Horno de BOF

Es un horno muy parecido al Bessemer con la gran diferencia que a este horno en lugar de inyectar aire a presión se le inyecta oxígeno a presión, con lo que se eleva mucho más la temperatura que en el Bessemer y en un tiempo muy reducido (Ilustración 2.6.4.2.1.).

2.6.4.2.1. Características del Horno BOF

El nombre del horno se debe a que tiene un recubrimiento de refractario de la línea básica a la inyección del oxígeno. La carga del horno está constituida por 75% de arrabio procedente del alto horno y el resto es chatarra y cal. La temperatura de operación del horno es superior a los 1650°C y es considerado como el sistema más eficiente para la producción de acero de alta calidad.

Este horno fue inventado por Sir Henry Bessemer a mediados de 1800, sólo que como en esa época la producción del oxígeno era muy costosa, se inició con la inyección de aire, con lo que surgió el convertidor Bessemer, el que ya fue descrito (<http://www.aprendizaje.com.mx>, 2012).

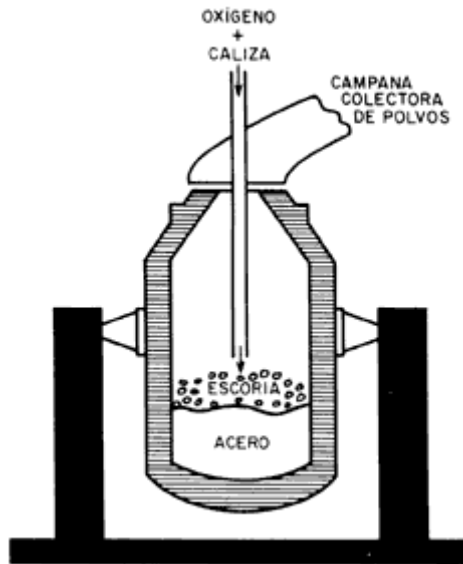


Ilustración 2.6.4.1. Horno BOF y sus partes importantes.

2.6.4.2.2. Material refractario obtenido en el horno BOF.

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Éstos, se utilizan para hacer crisoles y recubrimientos de hornos e incineradoras. No hay una frontera clara entre los materiales refractarios y los que

no lo son, pero una de las características habituales que se pide a un material para considerarlo como tal es que pueda soportar temperaturas de más de 1100 ° C sin ablandarse.

Los materiales refractarios deben mantener su resistencia y estructura a altas temperaturas, resistir los choques térmicos, ser químicamente inerte, presentar una baja conductividad térmica y un bajo coeficiente de dilatación.

Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y magnesio (óxido de magnesio) son los materiales refractarios más importantes. Otro óxido que se encuentran generalmente en materiales refractarios es el óxido de calcio (cal). Las arcillas refractarias también se utilizan ampliamente en la fabricación de materiales refractarios, como puedes ser la chamota.

El dióxido de circonio (circonita) se utiliza cuando hay que soportar temperaturas extremadamente elevadas. El carburo de silicio y el carbono son materiales refractarios de gran resistencia a altas temperaturas pero arden en presencia de oxígeno si desaparece su protección de dióxido de silicio.

Compuestos binarios, tales como el carburo de wolframio o el nitruro de boro puede ser muy refractario. El carburo hafnio es el compuesto binario más refractario conocido, con un punto de fusión de 3890 ° C. El compuesto ternario carburo de tántalo hafnio tiene uno de los más altas puntos de fusión conocidos (4215 ° C).

Los materiales se deben elegir en función de las condiciones de utilización, por ejemplo, el carbono no puede ser utilizado si debe estar en contacto con el oxígeno porque ardería. Los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produce corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son ácidos, la Dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros. (http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario, 2012).

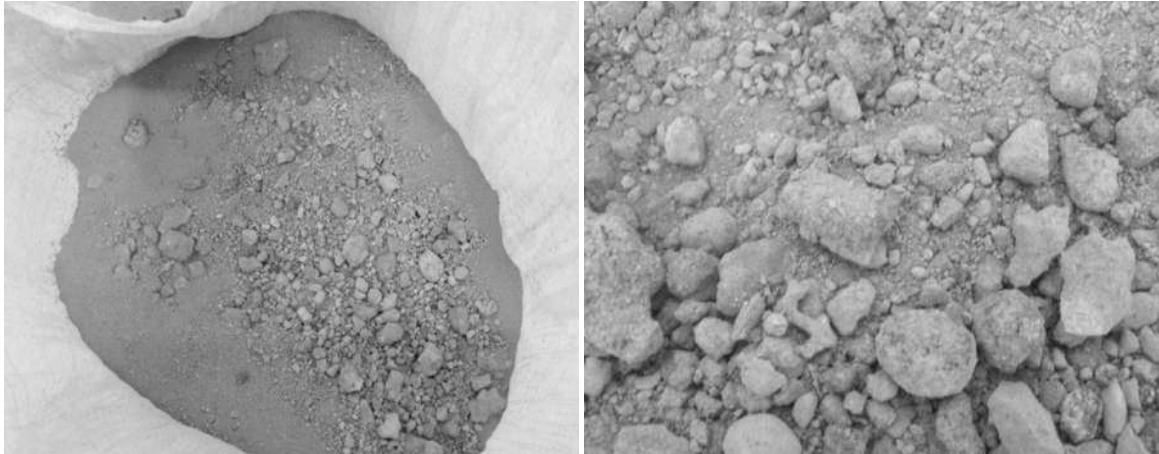


Figura 9. Material refractario del horno BOF, donado por la siderúrgica de Lázaro cárdenas del estado de Michoacán.

2.6.5. Fibras de Cactus de nopal deshidratado

Las cactáceas han sido motivo de atención en nuestro país desde tiempos remotos. La historia y el folclore registran la importancia que adquirieron los tribus prehispánicas, según se deduce a sus tradiciones, teogonías y códices. (Bravo, 2002) (Morales Garibay, 2009)

En la vida social, económica y religiosa de los nahuas, estas plantas desempeñaron un papel muy importante, a tal grado que el emblema de la gran Tenochtitlan ostentaba orgullosamente un nopal, símbolo que conserva el escudo del México actual. Las cactáceas intervinieron en sus prácticas religiosas y algunas fueron elevadas a categoría de dioses. Fueron empleados como remedios en la curación de enfermedades. (Morales Garibay, 2009) (Bravo, 2002).

En México las cactáceas destacan por su amplia representatividad a nivel genérico y específico, alcanzando mayor significancia en regiones áridas y semiáridas, las cuales están ampliamente representadas dentro del territorio nacional, llegando a ser junto con los agaves, las plantas más características del paisaje mexicano. (Morales Garibay, 2009) (Bravo, 2002).

2.6.5.1. Fibra de Nopal (FN)

Actualmente, los científicos relatan que el nopal es una planta llena de secretos y de beneficios que a lo largo de la vida los vamos descubriendo. Uno de estos acontecimientos más actuales es el uso del nopal como aditivo en el concreto, esto que para aumentar su resistencia, manejabilidad y disminuir su costo, aunque aún no se obtienen resultados confiables, motivo por el cual se hace esta investigación.

2.6.5.1.1. Antecedentes del nopal

Esta planta es originaria de México, donde es conocida desde tiempos prehispánicos. (Andres y Celis, 2010). Así pues, el nopal ha venido formando parte de nuestra historia, y lo sigue haciendo al formar parte de nuestra alimentación.

En nuestro territorio el nopal que más se cultiva es el de tuna blanca o tuna piedra. En la región de los otomíes, para preparar una huerta de nopales, primero se acondiciona el suelo y al terminar de limpiar la tierra se hacen hoyos para meter las plantas. Éstas deben ir dentro de depresiones más grandes que se llenan de agua cuando llueve. No requieren ser sembradas profundamente, porque de hacerlo, no producen vástagos y se pudren. Las hojas o pencas que sirven de semillas son podadas de otra planta muchos días antes y las dejan enjuntarse. Si siembran una hoja recién cortada se pudre. Las hojas se extienden al sol por tres meses para secarlas bien. Los campesinos comienzan a sembrar y colocan las plantas el día de luna llena. Otros comienzan en la luna nueva, cada quien tiene sus creencias. Los que siembran en luna llena, dicen que el nopal dará tunas rápidamente. Los que lo hacen en luna nueva, creen que no dará fruto, que sólo producirá nuevas hojas. (Moralez Garibay, 2009).

Antes de sembrar hay que observar como caen los rayos de luz a la tierra. Si caen verticalmente los plantadores colocan la planta recta en el hoyo. Se siembra de esta manera porque si no llueve inmediatamente, toda la fuerza del sol no le pegará a las hojas. Si el sol brilla intensamente sobre una nueva planta de nopal, ésta muere antes de echar raíces. El calor intenso del sol y la tierra seca, la marchitan y se muere. Al llegar las lluvias estas plantas echan raíces y entonces pueden resistir el sol sin ayuda. (Moralez Garibay, 2009) (Diaz Gonzales, 2011).

2.6.5.1.2. Características del nopal

El nopal pertenece al género *Opuntia*, del grupo cacti, que contiene cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas) un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio. (Torres, 2010).

Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin ó con espinas ilustración 2.6.5.1.1. En sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas.

Los nopales llegan a medir hasta 4m de altura y a tener un tronco leñoso, segregan una sustancia viscosa llamada mucílago o comúnmente “baba de nopal”, cuya función es cicatrizar las heridas de la propia planta. El contenido nutricional de esta planta comprende minerales como calcio, hierro, aluminio, magnesio, sulfatos, fosfato, potasio, sílice, sodio, carbohidratos, componentes nitrogenados, además de vitaminas A, B1, B2 y C. Las semillas de la tuna tienen un alto contenido de sustancias grasas y proteicas. Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado. (Moralez Garibay, 2009) (Diaz Gonzales, 2011).



Ilustración 2.6.5.1.1. Cactus puntia en estado natural. (plantas-medicinales)

2.6.5.1.3. Uso del Nopal

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación de los nopales, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre. A continuación se mencionan algunos de estos (Andres y Celis, 2010):

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopalitos).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).

- Industria cosmética (cremas, shampoo, lociones de cladodios).
- Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios).
- Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta).
- Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios).
- Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas).
- Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos).
- Sector turismo (artesanías con base en cladodios lignificados).

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. Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo. A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante, el cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos. El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. (Andres y Celis, 2010).

El comportamiento del mucílago del nopal en materiales base cemento es aún desconocido. Pocas son las investigaciones que estudian ambos elementos juntos, por ejemplo la publicación técnica # 326 del IMT, trata sobre la mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de cactus; y la pregunta por contestar sobre el papel de las adiciones del nopal en pastas de cemento, mortero y concreto todavía existe. Se ha sugerido que el mucílago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros. Por ejemplo en pastas de cemento disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión. (Torres, 2010).

De acuerdo a la publicación técnica #328 de la SCT y del IMT, resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado. Pero el papel de cómo tales adiciones incrementan la durabilidad del concreto no está todavía bien comprendido. Una posibilidad es que el mucílago actúa como un tapón de poros, disminuyendo la penetración de cloruros y del agua funcionando como una red en el concreto, gracias a la acción

química entre las pectinas y las moléculas de cloruro o de agua. La otra podría ser que el mucílago actúe como inhibidor de la corrosión del acero en concretos contaminados con cloruros.

Es posible también que funcione de forma semejante como lo observado en estudios anteriores en donde el mucílago del nopal actuaba como inhibidor de la corrosión de aluminio o acero en soluciones ácidas. (Torres, 2010).

2.6.5.1.4. *Cactus Opuntia utilizado en la investigación.*

Cabe mencionar que para esta investigación se hizo uso del 0.5%, 1%, 1.5%, 2% y 4% de cactus opuntia en estado deshidratado, esto para continuar con las investigaciones de tan importante fibra como sustitución en morteros de cemento, el producto usado es de una empresa de productos comerciales, la marca de este producto es: CU-CU figura 2.6.5.1.2.



Ilustración 2.6.5.1.2. Nopal deshidratado en polvo, producto CU-CU.

El producto usado fue en polvo y deshidratado, así como embolsado por empresas CU-CU tiene un color amarillento.

2.7. No Destructivas

Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, es decir se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

En muchos países y por muchos años, se han realizado estudios de correlación con la intención de obtener modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto con base en la velocidad ultrasónica (Sturup, et al, 1984; Anderson and Seals,

1981; Hisham, 2000; Qindan et al, 2011). Como resultado de esto, se han obtenido múltiples modelos diferentes, debido principalmente al carácter compuesto del material y a la falta de controles rígidos en los procesos constructivos.

El método de velocidad de pulso ultrasónico ha sido usado exitosamente para evaluar la calidad del concreto por más de 60 años. Este método puede ser usado para evaluar grietas internas y otros defectos como por ejemplo cambios en el concreto por deterioro debido a agresiones químicas del medio ambiente, así como por congelación y deshielo. Mediante el uso del método de la velocidad ultrasónica, también puede ser posible estimar la resistencia de especímenes de concreto y de concreto en obra. Este método utiliza ondas mecánicas que no ocasionan ningún daño al elemento de prueba. El espécimen de prueba puede ser probado varias veces en la misma localización, lo cual es útil para el monitoreo de concreto sometido a cambios estructurales internos por un largo periodo de tiempo (Malhotra and Carino, 2004).

Los tecnólogos del concreto se han interesado en determinar las propiedades del concreto mediante pruebas no destructivas por décadas. A principios de 1930 algunos métodos de prueba se propusieron para probar especímenes de laboratorio usando métodos de vibración. Los investigadores Powers, Obert, Hornibrook y Thompson fueron los primeros en llevar a cabo una amplia investigación usando técnicas de vibración tales como el método de frecuencia de resonancia (Powers, 1938; Obert, 1939; Hornibrook, 1939; Thomson, 1940).

La segunda guerra mundial aceleró las investigaciones con respecto a las pruebas no destructivas usando métodos de propagación de onda de estrés. El desarrollo del método de velocidad de pulso comenzó en Canadá e Inglaterra alrededor del mismo tiempo. En Canadá los investigadores Leslie y Cheesman desarrollaron un instrumento llamado soniscope (Leslie and Cheesman, 1949). En Inglaterra, otro investigador desarrolló un instrumento llamado probador ultrasónico (Jones, 1948). En un principio, ambos, el soniscope y el probador ultrasónico, fueron bastante similares, con pequeñas diferencias en detalle. Desde 1960, los métodos de velocidad de pulso han sido llevados fuera de los laboratorios, a las construcciones u obras civiles (Whitehurst, 1966). El investigador Malhotra cuenta con una lista extensa de artículos publicados sobre este tema (Malhotra, 1976). Algunas naciones han adoptado procedimientos estandarizados para medir la velocidad de pulso en el concreto.

2.7.1.1 Teoría de propagación de onda.

Cuando un medio sólido es alterado por una carga dinámica o vibratoria, se producen tres tipos de propagación de ondas mecánicas, ilustración 2.7.1, (también llamadas ondas de esfuerzo): 1) ondas de compresión (también llamadas longitudinales u ondas P), 2) ondas cortantes (también llamadas transversales u ondas S), y ondas superficiales (también llamadas ondas Rayleigh). Las ondas de compresión se propagan a través del medio sólido de manera análoga a las ondas sonoras que se propagan a través del aire. Cada tipo de onda se propaga con una velocidad característica. Para un sólido dado, las ondas de compresión tienen la mayor velocidad mientras que las ondas de superficie tienen la menor. En el concreto, las velocidades de las ondas de cortante y de superficie son típicamente 60 y 55%, respectivamente, de la velocidad de las ondas de compresión (ACI Committee 228, 1998). La velocidad particular de una onda depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio. Para un medio sólido homogéneo elástico la velocidad de la onda de compresión está dada por la ecuación 1:

$$V = \sqrt{\frac{(1-\mu)/((1+\mu)(1-2\mu))E}{\rho}} \quad (1)$$

Dónde:

V = Velocidad de la onda de compresión

$K = (1-\mu)/((1+\mu)(1-2\mu))$

E = Módulo de elasticidad dinámico

ρ = Densidad

μ = Relación dinámica de Poisson

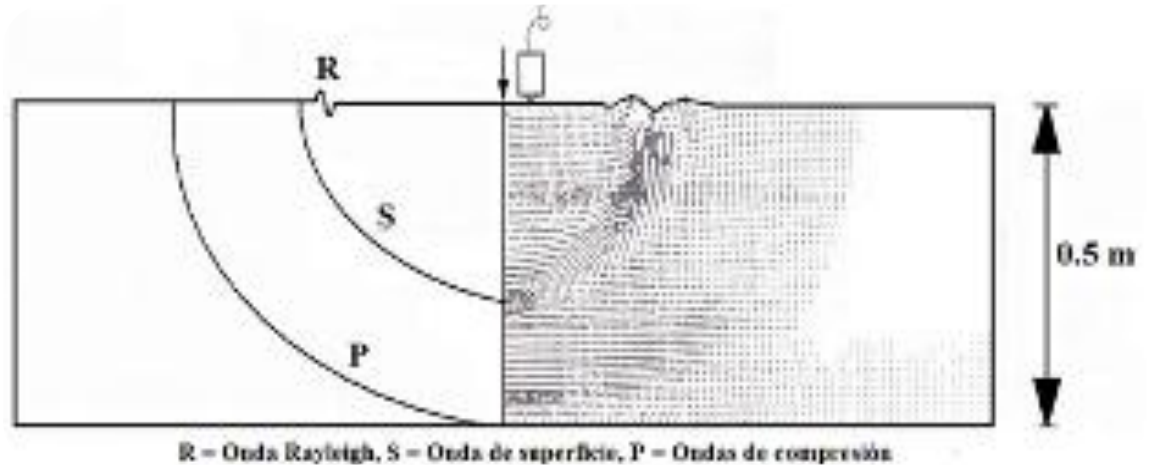


Ilustración 2.7.1. Tipos de propagación de onda de mecánicas (Malhotra and Carino, 2004)

El valor de K varía en un rango muy estrecho. Por ejemplo, cuando μ incrementa de 0.15 a 0.25 (67% de incremento) el valor asociado de K aumenta de 1.06 a 1.20 (12% de incremento). Por lo tanto variaciones en E y en ρ tienen un efecto más significativo sobre V que las variaciones en μ . Para el concreto, los rangos típicos de V van de 3000 a 5000 m/s.

La frecuencia f y la longitud de onda λ del movimiento de propagación de onda están relacionados por la velocidad de propagación: $V = f\lambda$. La frecuencia es reportada en unidades de hertz (o ciclos por segundo) y la longitud de onda en unidades de distancia (por ejemplo mm). En un medio dado, un incremento en la frecuencia de onda dicta un decremento en la longitud de onda, y viceversa. Cuando un pulso de propagación de onda incide en una interfase con un medio que tiene distintas propiedades de material, una porción de la energía de onda se dispersa fuera de la trayectoria de la onda original. Por ejemplo, vacíos, grietas y partículas de agregados en el concreto actúan dispersando parte de la energía inicial del pulso de la onda de compresión fuera de la trayectoria de onda original. La magnitud de la dispersión es especialmente intensa si la longitud de onda de propagación es del mismo tamaño o menor que el tamaño del dispersor, resultando en una atenuación de onda rápida (Jones, 1962). Para el concreto, el límite superior de frecuencias que se usan es de alrededor de 500khz el cual es asociado a una longitud de onda de aproximadamente 10mm, lo cual está en un rango de tamaño de las partículas secundarias de agregado. Como resultado, la longitud del camino puede ser efectivamente recorrida en este límite superior de frecuencia antes de que el pulso de onda se disperse completamente

en tan sólo unos centímetros. Se pueden recorrer mayores longitudes de camino usando menores frecuencias (por lo tanto mayores longitudes de onda): una frecuencia de 20khz puede generalmente recorrer hasta 10m de concreto (Jones, 1962).

En el método de velocidad de pulso ultrasónico, un pulso de onda ultrasónica a través del concreto es creado en un punto sobre la superficie del objeto de prueba, y el tiempo que éste tarda en viajar de ese punto a otro es medido. Conociendo la distancia entre los dos puntos, la velocidad del pulso de onda puede ser determinada. Un equipo portátil de velocidad de pulso está disponible hoy en día en el mercado para realizar pruebas en concreto y determinar el tiempo de llegada del primer frente de onda. Para la mayoría de las configuraciones de prueba, esta resulta ser la onda de compresión directa, ya que es la más rápida.

2.7.1.2 Instrumento de prueba de velocidad de pulso.

El instrumento de prueba consiste de un medio para producir un pulso de onda en el concreto (generador y transmisor de pulso) y un medio de sensibilidad de llegada de pulso (receptor) y medir con precisión el tiempo tomado por el pulso que viaja a través del concreto. El equipo puede ser conectado a un osciloscopio o a otro dispositivo de pantalla, para observar la naturaleza del pulso recibido. En la ilustración 2.7.2. Se muestra un diagrama esquemático. Se tiene una descripción del método en la norma ASTM C597, (2003). Se tienen equipos portátiles de prueba de velocidad de pulso ultrasónico, los cuales son simples de operar, además pueden incluir baterías recargables o una unidad de carga. Típicamente, los tiempos de pulso son de hasta 6500 μ s y pueden ser medidos con una resolución de 0.1 μ s. La medición del tiempo de viaje es promediada. El instrumento cuenta con 2 transductores, uno para recibir y uno para transmitir el pulso ultrasónico. Estos transductores tienen frecuencias de 25 a 100khz y son los usados para realizar pruebas en el concreto. Se tienen también transductores con diferentes frecuencias de resonancia para aplicaciones especiales: transductores de alta frecuencia (arriba de 100kHz) son usados para muestras pequeñas, trayectorias relativamente cortas, o concreto de alta resistencia, mientras que los transductores de bajas frecuencias (por debajo de 25kHz) son usados para especímenes grandes y trayectorias relativamente grandes, concreto con tamaño de agregado grande. Estos transductores principalmente generan ondas de compresión en una frecuencia predominante, con la mayor parte de la energía de onda dirigida a lo largo del eje normal a la cara del transductor.

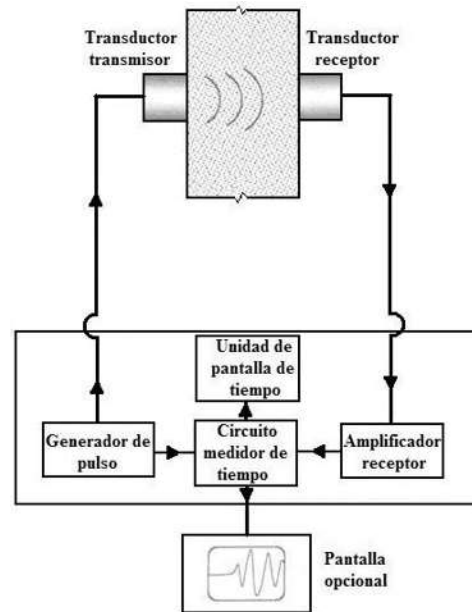


Ilustración 2.7.2. Diagrama esquemático del circuito de prueba de velocidad de pulso (Malhotra and Carino, 2004).

2.7.1.3 El método de velocidad de pulso.

La velocidad de pulso ultrasónico es una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto, la cual se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio (Malhotra and Carino, 2004).

Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material (Rose, 1999).

La idea básica del método de velocidad de pulso 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.

El transductor transmisor del instrumento de velocidad de pulso transmite una onda en el concreto y el transductor receptor, a una distancia L , recibe el pulso que pasa por el

concreto en otro punto. La pantalla del instrumento de velocidad de pulso indica el tiempo de tránsito, Δt , que toma el pulso de la onda de compresión en viajar a través del concreto. La velocidad del pulso de la onda de compresión V ecuación 2, por lo tanto, es:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

El pulso de compresión transmitido a través del concreto se somete a dispersión en los límites de los agregados. Para cuando el pulso llega al transductor receptor, este se transforma en una onda compleja, que contiene múltiples ondas de compresión y de cortante reflejadas. Desde luego, las ondas de compresión viajan más rápido y llegan primero al receptor.

Para transmitir o recibir el pulso, los transductores deben estar en completo contacto con el objeto de prueba; de otro modo el aire entre el objeto de prueba y el transductor puede introducir un error en el tiempo de tránsito indicado. Este error es introducido por que sólo una insignificante cantidad de energía de onda puede ser transmitida a través del aire. Se pueden usar muchos acopladores del mercado para eliminar el aire y asegurar un buen contacto entre la muestra y los transductores. Jalea a base de petróleo nos da uno de los mejores acoplamientos. Tenemos también, otros acopladores como grasas, jabón, pasta de caolín-glicerol. Las capas del acoplador deben de ser tan delgadas como sea posible. Aplicando una presión constante en los transductores, se podrán tomar lecturas repetidas en una ubicación hasta obtener un mínimo valor de tiempo de tránsito. Si la superficie del concreto está muy rugosa, se debe usar grasa espesa como acoplador. En algunos casos, que se tenga que suavizar la superficie rugosa o establecer una superficie lisa se puede hacer con el uso de yeso de París, o con una pasta de cemento de fraguado rápido o con un mortero epóxico de fraguado rápido. La nivelación de la pasta debe realizarse antes de la prueba de velocidad de pulso. En superficies muy rugosas, también puede emplearse un receptor exponencial con un diámetro de punta de sólo 6mm, como por ejemplo, superficies de mortero dañadas por fuego o por la acción de la intemperie. Sin embargo, hay que destacar que esta prueba es buena sólo para recibir la señal. Se requiere una superficie lisa para el transductor transmisor (Malhotra and Carino, 2004).

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 μ s. Es obvio que el instrumento debe ser muy exacto para mediciones con pequeños tiempos de

tránsito. La trayectoria debe ser medida también con cuidado. Debido a que el método de velocidad de pulso es una técnica de propagación de onda, debe ser eliminada cualquier fuente (como por ejemplo martillos neumáticos) del menor movimiento de onda durante la prueba.

Existen tres configuraciones en las cuales se pueden arreglar o acomodar los transductores, como se muestra en las ilustraciones 2.7.3a, 2.7.3b y 2.7.3c. Tenemos entonces, a) transmisión directa; b) transmisión semidirecta; y c) transmisión indirecta o método de superficie. El método de transmisión directa, ilustración 2.7.3a, es el más deseable y el arreglo más satisfactorio, debido a que con este arreglo, se transmite y recibe el máximo de la energía del pulso. El método de transmisión semidirecta, ilustración 2.7.3b, puede ser usado satisfactoriamente también. Sin embargo, se debe tener cuidado de que los transductores no estén muy alejados; de otro modo la transmisión del pulso podría disminuir y por tanto la señal podría no detectarse. Este método es usado donde se tienen concentraciones de refuerzos. El método de transmisión indirecta o método de superficie, ilustración 2.7.3c, es el menos satisfactorio por que la amplitud de la señal que se recibe es significativamente menor que la señal que se recibe por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores y se requiere un procedimiento especial para determinar la velocidad de pulso (Qixian and Bungey, 1996).

El procedimiento para el método indirecto consiste en: Primero, la localización del transductor transmisor se fija y la localización del receptor se cambia en incrementos fijos a lo largo de una línea, y se toma una serie de lecturas de tiempo. La distancia directa entre los dos transductores se traza en el eje de las “x” y el correspondiente tiempo de tránsito del pulso se traza en el eje “y” como se muestra en la ilustración 2.7.4. La inversa de la pendiente de este gráfico es la velocidad de pulso a lo largo de la línea.

Cuando se usa este método de superficie, el pulso se propaga en la capa de concreto cercana a la superficie. La proximidad de la superficie del concreto en ocasiones está compuesta ligeramente diferente al concreto en las capas inferiores. Por ejemplo, el concreto cercano a la superficie de una losa tiene mayores cantidades de material fino que el concreto de las porciones interiores de la losa. Entonces, las mediciones de velocidades por el método de superficie son típicamente menores que las transmisiones tomadas con el método de transmisión directa. Este comportamiento, sin embargo, puede convertirse en un medio para detectar y estimar el espesor de una capa de calidad diferente del material. Una

capa de concreto de menor calidad puede darse debido a prácticas inapropiadas de construcción (como por ejemplo una vibración y terminado pobre, un curado pobre, juntas frías debido a retrasos en la construcción, una colocación incorrecta), daños debidos a la acción del desgaste (por ejemplo congelación y deshielo, ataque de sulfatos, y corrosión del acero de refuerzo) y el daño por el fuego. Los espesores de las capas pueden ser determinados mediante el procedimiento indirecto o de superficie. Cuando los dos transductores están cercanos, el camino más rápido es viajar por la capa superior del concreto, y como los transductores se apartan más, el camino de viaje más rápido es la ruta combinada a través de ambas capas. La velocidad de pulso a través de la capa superior (V_1) y la de la capa inferior (V_2) será indicada en la gráfica por las diferentes pendientes de las dos líneas rectas ajustadas a los datos.

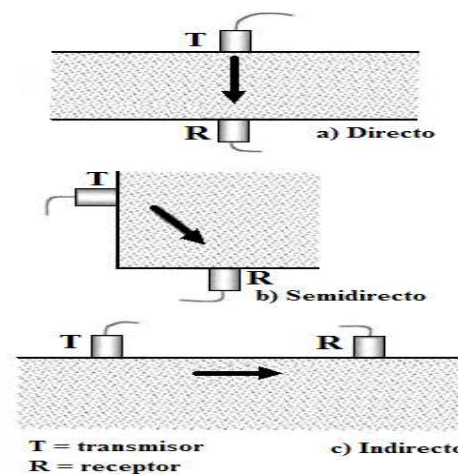


Ilustración 2.7.3. Configuraciones para medición de velocidad de pulso, a) Método directo, b) Método semidirecto, c) Método indirecto o de superficie (Malhotra and Carino, 2004).

La distancia X en la ilustración 2.7.4, muestra cuando se da el cambio de pendiente es medida y el espesor de la capa superior, t , es estimado a partir de la siguiente ecuación 3:

$$t = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (3)$$

Este método es solamente adecuado cuando la capa superior, (la capa de baja calidad) es distinta, es razonablemente del mismo espesor, y $V_2 > V_1$.

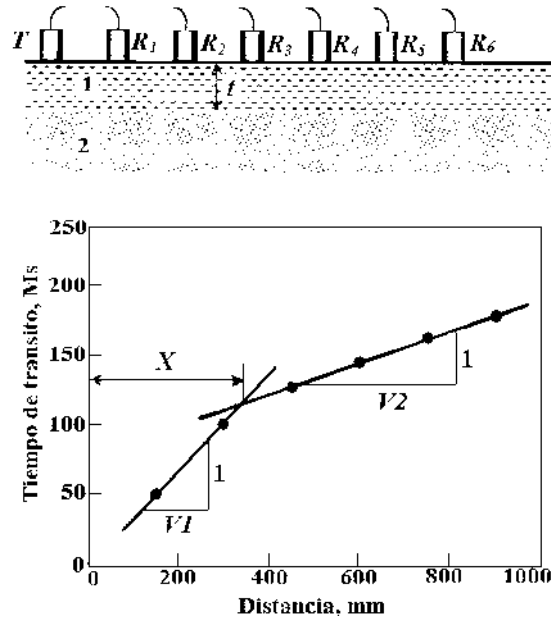


Ilustración 2.7.4. Empleo del método de superficie para determinar la profundidad de deterioro (Malhotra and Carino, 2004).

2.7.1.4 Factores que afectan la velocidad de pulso.

Aún que es relativamente fácil realizar la prueba de velocidad de pulso, es importante que la prueba a ser realizada sea tal que las lecturas de velocidad de pulso sean reproducibles y que estas sean afectadas solamente por las propiedades del concreto que se está probando y no por otros factores. Los factores que afectan la velocidad de pulso pueden ser divididos en dos categorías: 1) Factores que resultan directamente de las propiedades del concreto; y 2) otros factores.

2.7.2 Prueba de resistividad eléctrica

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos datan desde Robert W. Fox en 1830, quien observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre en Cornish, resultado de las reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos (Ward, 1980).

A principio de 1882, Carl Barus condujo experimentos en Comstock Lode, Nevada, que lo convencieron de que este método podía ser usado para la búsqueda de sulfato de oro oculto (Ward, 1980).

Fred H. Brown en la era de 1883 a 1891, Alfred Williams y Leo Daft en 1897, hicieron el primer intento en determinar la diferencia en la resistividad de la Tierra asociada con los depósitos de oro, le fueron otorgadas patentes por esos métodos. La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos, donde la tierra es estimulada por una fuente controlada

y son medidos los potenciales artificiales que resultan fue hecha por Schlumberger en 1912. En esa época él introdujo los métodos de líneas equipotenciales de corriente directa (Ward, 1980).

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger).

2.7.2.1 Ley de ohm

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Culombio (Q). Un culombio corresponde a 6.24 trillones de electrones (6.24×10^{18}). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (densidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones (corriente eléctrica).

$$A = \frac{Q}{s} \quad (4)$$

Dónde:

$$A = \text{Amperio, } 1 \text{ Amperio} = 1 \text{ Culombio/segundo}$$

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se mueve de un punto al otro (Ávila, 2003). A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama voltio (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una

diferencia de potencial de 1 voltio cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada culombio de electricidad que transita de un punto al otro, por tanto:

$$V = J / C \quad (5)$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en voltios y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en julios por los culombios de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada. La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila, 2003). El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm expresada como:

$$V = RI \quad (6)$$

Dónde R es la resistencia o habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia. Un ohmio se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él.

$$\Omega = V / A \quad (7)$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con esta. La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

1. El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
2. Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
3. Se tiene un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

1. El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
2. Las distancias son grandes para el flujo de corriente
3. El área transversal es pequeña para el flujo de corriente

2.7.2.2 Resistividad eléctrica

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 ohm-cm u ohm-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, et al, 2010).

2.7.3. Densidad

Una de las propiedades de los sólidos, así como de los líquidos e incluso la de los gases es la medida del grado de compactación de un material: su densidad.

La densidad es una medida de cuanto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es decir la cantidad de masa por unidad de volumen.

La densidad del mortero varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad.

2.7.4. Gravedad específica

La definición de gravedad específica o peso específico es la relación entre la densidad de una sustancia y la de la otra, para sólidos y líquidos la relación se hace con base al agua. El peso específico estará relacionado con la gravedad y el campo electromagnético en las distancias atómicas.

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad de un elemento y dependerá de la concentración de masa por unidad de volumen de cada elemento. Dicha concentración de masa estará efectuada por la estructura tridimensional molecular y número másico de los átomos. (Molina, 2008, pág. 52).

2.8. Correlación de Pruebas No destructivas y destructivas.

Existen tres técnicas comúnmente usadas para predecir la resistencia a la compresión del concreto hidráulico basadas en algunas pruebas no destructivas, como por ejemplo

ultrasonido y esclerometría: modelado por computadora, inteligencia artificial, modelos paramétricos de regresión multi-variable. El modelado por computadora generalmente no es práctico debido al tiempo consumido en el cálculo numérico y a la complejidad del modelo; la inteligencia artificial solo proporciona el mejor ajuste entre las predicciones y las observaciones, no proporciona significado físico entre los datos de entrada y de salida; los modelos paramétricos de regresión multi-variable pueden ser implementados más fácilmente y además la estadística del modelo puede proveer información de cómo cada variable en el modelo influye en la predicción (Qindan et al, 2011).

Debido a que los modelos de regresión pueden ser aplicados a concreto con las mismas características que se calibro estos modelos no son lo suficientemente validos por el rango limitado de datos de calibración. Por lo tanto se requiere de modelos de regresión robustos basados un rango mayor de propiedades de concreto para tener una aplicación más general (Qindan et al, 2011).

Con la abundancia de posibles predictores en los modelos de regresión, que la acumulación de información actual permite, se hace necesario un método automático de selección de variables en vistas al establecimiento de un modelo sencillo, que logre la predicción o explicación de la variable de respuesta, junto a una estimación eficiente de los coeficientes. El llamado Principio de Parsimonia, nos lleva a que un modelo, cuanto más simple, mejor. Mejor desde el punto de vista de la comprensión del fenómeno en estudio, y mejor también, porque predictores redundantes afectan a la precisión de las estimaciones de los coeficientes. Este último aspecto es verdaderamente importante en el caso de variables correlacionadas (Bradley et al, 2003).

Cabe afirmar que tres son los principales métodos de selección de variables en un modelo, a saber: el método manual, el automático y una combinación de ambos. El método manual es el realizado por el experto, tanto en el ámbito de la estadística como en el de la propia especialidad. El automático se ha plasmado en los tres métodos básicos siguientes: All subsets regressions; Backward elimination y Forward selection. El objetivo en los tres métodos es el mismo: el establecimiento de un modelo que sobre la base de un mismo conjunto de datos sea parsimonioso y, a la vez, eficiente en la estimación de los coeficientes y en la predicción ajustada de la variable respuesta. Cada uno de estos procedimientos realiza su función por etapas, utilizando un determinado criterio para decidir sobre la inclusión o exclusión de una determinada variable, así como para

determinar el momento de finalizar el proceso. La crítica generalizada a los procedimientos no manuales, se centra en su automatismo y en el hecho de buscar el modelo óptimo sobre la base de criterios exclusivamente estadísticos, que pueden hacer olvidar la finalidad del modelo (Bradley et al, 2003).

Recientemente se han desarrollado otros procedimientos, que bajo las siglas LARS engloba los algoritmos siguientes:

- Lasso: Least absolute shrinkage and selection operator,
- Stagewise: Forward Stagewise linear regression, y
- LAR: Least angle regression.

El nombre LARS es consecuencia del hecho de que el algoritmo en LAR, debidamente modificado, se transforma en el Lasso y en el Stagewise, y esta relación se resalta con la S añadida a LAR. LARS es entonces un nuevo procedimiento que se encuadra en el enfoque forward antes mencionado, pero con la particularidad de que se procede por etapas mínimas, y no por saltos, como en el tradicional. Otra peculiaridad de LARS es la de su mínimo coste, en términos computativos (Bradley et al, 2003).

LARS describe Lasso como un procedimiento Stagewise por etapas. Comenzando en cero coeficientes, Lasso actualiza las estimaciones hasta terminar con el ajuste de mínimos cuadrados de todos los coeficientes, siendo lineal, por segmentos, en las sucesivas etapas. La actualización se realiza en la dirección equiangular, como se describe en Bradley et al. (2003).

LARS es un nuevo algoritmo para la selección de variables, menos agresivo que el tradicional forward selection. Además, presenta las siguientes ventajas (Bradley et al, 2003):

1. Con una simple modificación, se obtiene el algoritmo Lasso, una versión atractiva de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), basada en la suma de los valores absolutos de los coeficientes. Esta modificación de LARS calcula todos los Lasso posibles en un tiempo inferior al de los anteriores métodos;
2. Una modificación diferente de LARS implementa el procedimiento Forward Stagewise;

3. Obtiene una aproximación a los grados de libertad, a partir de los cuales se obtiene el estadístico C_p , una estimación del error cuadrático medio de la predicción, que permite seleccionar modelos;
4. Es computacionalmente eficiente, pues requiere el mismo esfuerzo que se exige para estimar un modelo por mínimos cuadrados;
5. Por último, el algoritmo es de dominio público, y se encuentra implementado en los programas estadísticos R y S-PLUS.

2.9. Técnicas de Caracterización:

2.9.1. La cristalografía de rayos X

Es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio, y por difracción, dá lugar a un patrón de intensidades, que se interpreta aplicando la ley de Bragg. No es aplicable a sistemas biológicos o vivos, a disoluciones o a sistemas amorfos ni gases. Es posible trabajar con monocristales o con polvo microcristalino. Para la resolución de los parámetros de la celda unidad (la porción más simple de la estructura cristalina que al repetirse mediante traslación reproduce todo el cristal); puede ser suficiente la difracción de rayos X en polvo. Mientras que para una dilucidación precisa de las posiciones atómicas es conveniente la difracción de rayos X en monocristales.

2.9.1.1. Difracción de rayos X

Se utiliza para obtener información sobre la estructura cristalina de un material. Cuando un haz monocromático (de una sola longitud de onda) del mismo orden de magnitud que el espaciamento atómico del material lo golpea, los rayos X se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersa por átomo, anula la dispersada por otros. Sin embargo, los rayos X que inciden sobre ciertos planos cristalográficos en ángulos específicos se ven reforzados en vez de eliminados. Éste fenómeno se conoce como difracción. Los rayos X han sido difractados o el haz ha sido reforzado, cuando las condiciones satisfacen la **ley de Bragg**,

$$\text{Sen } \theta = \lambda / 2d_{hkl}$$



Ilustración 2.9.1. Ley de Bragg. <http://personales.upv.es/.../curso/unidad3/Fig3-39.jpg> Consultado 12 de marzo de 2010.

Donde el ángulo θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección original del haz, λ es la longitud de los rayos X y d_{hkl} es la distancia interplanar entre los planos que causan el refuerzo constructivo del haz (Askeland, 1985). La fórmula de Bragg permite calcular la longitud de onda de los rayos X a partir de la constante reticular d , o inversamente, esta última, si se conoce la longitud de onda, y de aquí su doble aplicación al estudio de los rayos X y de la estructura de los cristales.

La difracción de rayos X en una muestra policristalina permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Los estudios de polimorfismo, transiciones de fase y soluciones sólidas, medidas del tamaño de las partículas, determinación de diagramas de fases, etc., se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

La selección del tipo de radiación depende de la composición de la muestra y el objetivo del estudio. Para el análisis de difracción por rayos X normalmente se utilizan radiaciones de Cu, Co, Fe y Cr, cada uno de ellos tiene diferente poder de difracción al poseer longitudes de ondas características, donde las de Cu son las más utilizadas en análisis de arcillas (Brindley y Brown, 1980). Los minerales de arcillas generalmente tienen una forma plana y pueden ser fácilmente orientadas. El método de difracción de Rietveld es el más utilizado en estructuras cristalinas de los materiales.

2.9.1.2. Métodos de difracción de rayos X.

a). Método de Rietveld

Este método se emplea en el refinamiento de estructuras cristalinas de patrones de difracción de neutrones y difracción de rayos X. Para realizar el análisis se utiliza una muestra de polvo homogénea y el tamaño de los cristales pequeños debe estar entre $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ además previamente se deben identificar las fases cristalinas presentes en la muestra, y de cada una de ellas conocer; el grupo espacial, posición de los átomos, tipo

estructura cristalina, parámetros de red, etc. También se debe contar con un programa (Software) para realizar el refinamiento y con una función instrumental del Difractómetro de rayos X.

La base de método de Rietveld consiste en utilizar los datos del perfil de intensidad de cada reflexión, en vez de su área integrada, en el proceso de refinamiento, lo que permite extraer la máxima cantidad de información contenida en el diagrama de polvo (Rietveld, 1967). Determina con mayor precisión parámetros de red, posiciones atómicas, tamaño de cristal, microdeformaciones, cuantifica las fases cristalinas de la muestra aunque los picos de difracción estén superpuestos, etc. Algunos de los “softwares” que emplea son: DBWS, Fullprof, Rietan, etc.

b). Método de Laue

Consiste en hacer coincidir en un cristal un espectro continuo de rayos X, de tal manera que para cada longitud de onda, existirá un determinado ángulo. El método de transmisión de Laue consiste en colocar una película detrás de un cristal, la cual posee un agujero que deja pasar los haces de rayos X.

c). Método de rotación de cristal

Se hace incidir un haz de rayos X monocromático sobre un cristal. Para detectar los haces difractados, la película es envuelta de forma cilíndrica de tal manera que rodea al cristal. El cristal se hace girar sobre el eje perpendicular al haz incidente, el cual coincide con el eje de cilindro. Para encontrar el ángulo el cual se cumple la ley de Bragg, el giro del cristal se hace sucesivamente de 0 a 90°, hasta encontrar el patrón de difracción.

d). Método Powder

El cristal a analizar es reducido a polvo de tal manera que forme un conjunto de pequeños cristales. Si se tuviese un cristal y en él se hiciera incidir un haz monocromático el haz se difractaría a un ángulo en particular. Al hacer girar este cristal de 0 a 360°, el haz formará un cono cuyo eje coincide con el del haz incidente.

2.9.1.3. Celda unidad

Es la porción más simple de la estructura cristalina que al repetirse mediante traslación reproduce todo el cristal. Todos los materiales cristalinos adoptan una distribución regular

de átomos en el espacio. Este arreglo espacial de átomos, se caracterizan por 3 vectores, que definen las tres direcciones independientes del sistema de coordenadas de la celda. Esto se traduce en 6 parámetros de red, que son los módulos a , b y c , de los 3 vectores, y los ángulos α , β y γ que forman entre sí. Estos 3 vectores forman una base del espacio tridimensional, de tal manera que las coordenadas de cada uno de los puntos de la red se puedan obtener a partir de ellos por combinación lineal con los coeficientes enteros. La simetría traslacional de una estructura cristalina se caracteriza mediante la red de Bravais. Dentro de las 14 redes cristalinas existentes se encuentran todas las estructuras cristalinas de los minerales que existen.

Las redes de Bravais son una disposición infinita de puntos discretos cuya estructura es invariante bajo cierto grupo de traslaciones. Los puntos de una red de Bravais son equivalentes.

2.9.2. Prueba de Fluorescencia de Rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica ampliamente utilizada para la determinación de una amplia gama de elementos de las aleaciones. La técnica proporciona un análisis rápido, exacto y preciso de múltiples elementos que facilita el control eficiente del proceso de fundido. También se usa ampliamente para la certificación y análisis de verificación de productos (ASTM-E-2465).

Los espectros de rayos X característicos se excitan cuando se irradia una muestra con un haz de radiación X de longitud de onda suficientemente corta. Las intensidades de los rayos X fluorescentes resultantes son casi 1000 veces más bajas que la de un haz de rayos X obtenido por excitación directa con electrones. El método de fluorescencia requiere de tubos de rayos X de alta intensidad, de unos detectores muy sensibles y se sistemas ópticos de rayos X adecuados.

Cuando se irradia con un haz de rayos X una muestra de composición desconocida, esta emitirá las radiaciones características de los elementos que la componen. Si podemos identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, podremos conocer los elementos que componen la muestra, y si podemos medir sus intensidades, podremos conocer sus respectivas concentraciones.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterización del cemento

El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-0NNCCE, 2004).

El cemento se caracterizó por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química. Los resultados de FRX se presentan en la tabla 3.1.1. Y en la tabla 3.1.2. Se presentan las partes por millón (ppm).

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	TOTAL	SO ₃
30 R RS	27.932	0.201	6.437	2.217	0.083	1.301	49.773	0.669	1.255	0.118	5.12	95.106	3.37

Tabla 3.1.1. Composición química en porcentaje del cemento CPC 30R RS obtenidas por fluorescencia de rayos X.

ppm	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
30 R RS	30	326	81	6	59	3	75	46	4	19	62	326	<3	38

Tabla 3.1.2. Partes por millón del cemento CPC 30R RS.

3.1.1. Propiedades físicas realizadas a los cementos

3.1.1.1. Ensayos de Consistencia y Trabajabilidad.

La consistencia y trabajabilidad en el concreto es una medida de que tan fácil resulta manejar, colocar y compactar la pasta de cemento. La consistencia es la capacidad que tiene el concreto para fluir, sin que se presente segregación en la mezcla ni sangrado excesivo. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico. NMX-C-057-1997-0NNCCE. ASTM-C-187-98.

3.1.1.2. Tiempos de fraguado:

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.

3.2. Caracterización de los materiales en estudio

Las materias primas se caracterizaron por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química. Los resultados de FRX se presentan en la tabla 3.2.1. Y en la tabla 3.2.2. Se presenta las partes por millón (ppm). Los resultados de DRX muestran la curva típica, o campana de Gauss, de los materiales criptocristalinos como las puzolanas, aún sin detección de especies específicas (Ilustración 3.2.1.).

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	TOTAL	SO ₃
MK	49.754	1.528	44.708	0.509	0.013	0.159	0.044	0.23	0.141	0.033	0.77	97.889	
PN	72.197	0.115	13.58	1.011	0.073	0.538	1.052	3.216	4.285	0.025	3.99	100.082	
PE	73.591	0.13	13.426	1.166	0.045	0.197	1.333	2.918	5.013	0.02	1.18	99.019	
CBC	60.044	0.428	6.829	3.145	0.13	1.825	1.64	0.446	1.856	0.786	23.6	100.14	
CCV	32.517	0.758	13.55	5.371	0.112	2.108	18.759	0.67	1.027	0.541	22.21	97.623	
CEL	19.095	0.319	8.766	2.008	0.538	4.243	27.874	0.545	6.051	1.763	27.27	98.472	0.8
EAH	36.383	0.556	10.631	0.335	0.417	10.107	37.551	0.298	0.424	0.053	-0.72	96.035	3.37
CBOF	14.584	0.827	4.287	26.773	2.423	5.995	37.456	0.032	0.024	0.814	4.79	98.005	0.8
30 R RS	27.932	0.201	6.437	2.217	0.083	1.301	49.773	0.669	1.255	0.118	5.12	95.106	3.37

Tabla 3.2.1. Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X, incluyendo el cemento CPC 30R RS.

ppm	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
MK	8	27	49	6	105	15	143	146	6	41	128	36	29	29
PN	144	62	573	27	13	12	16	22	2	5	86	28	24	26
PE	160	41	726	26	87	2	<2	4	2	5	86	28	24	26
CBC	38	75	272	7	59	<1	62	127	16	30	152	104	<3	10
CCV	27	1025	379	13	175	5	75	60	17	25	95	63	<3	13
CEL	86	999	958	13	141	3	58	62	7	16	138	192	8	8
EAH	8	326	265	11	125	1	48	6	1	5	45	<2	4	8
CBOF	4	139	55	2	89	40	2146	546	36	9	87	45	<3	19
30 R RS	30	326	81	6	59	3	75	46	4	19	62	326	<3	38

Tabla 3.2.2. Partes por millón de los materiales utilizados en las sustituciones, incluyendo el cemento CPC 30R RS.

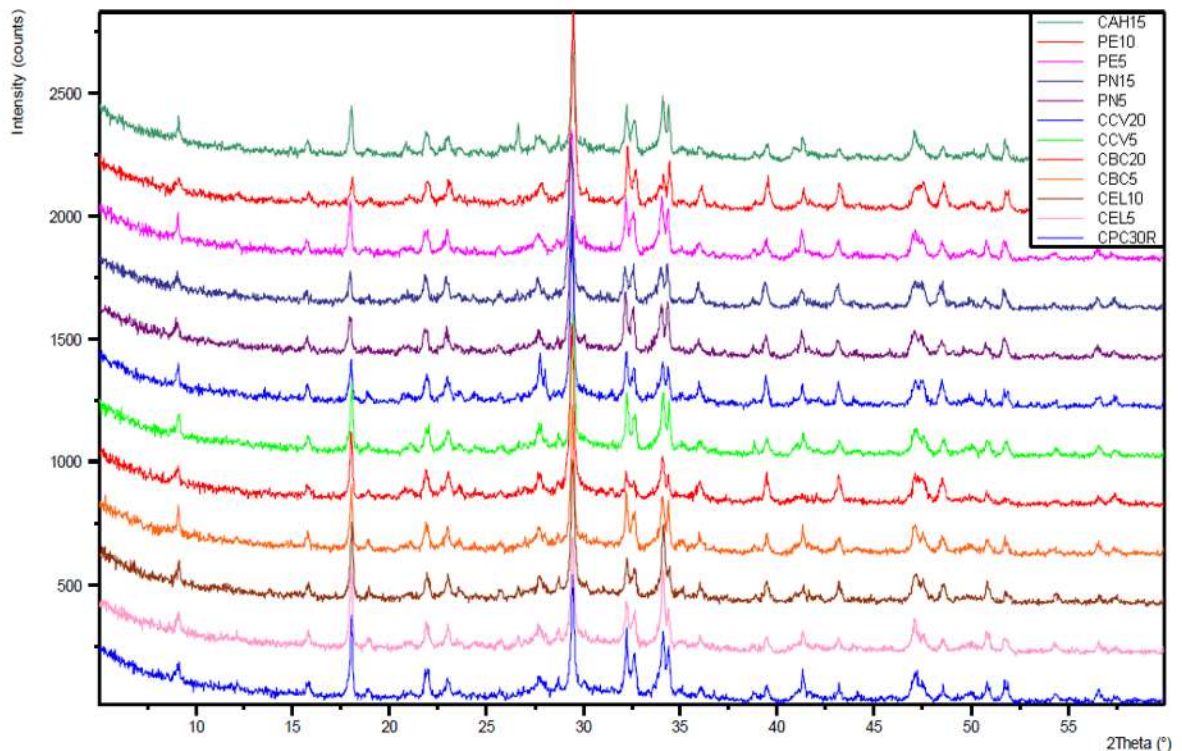


Ilustración 3.2.1. Difracción de rayos X, de alguno de los materiales en estudio, sin identificación de fases.

3.3. Calidad del agua

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, en condiciones reales. Generalmente se utiliza es el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).

Una vez que el mortero y/o concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, a lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento (Instituto del Concreto, 1997).

3.4. Caracterización de los agregados

La arena utilizada para la elaboración del mortero con sustituciones parciales de MK, PN, PE, CCV, CVC y CEL fue del río Huajúbaro proveniente del poblado del Cuervo perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán. En las sustituciones parciales con CM, EAH, CBOF y FN; se utilizó arena del río Lerma. En ambas arenas se

usa solo el material que pasa la malla N°16 y se retiene en la malla N°30. Es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un proporcionamiento de mezcla.

3.4.1. Arena Río Huajúmbaro

3.4.1.1. Humedad actual.

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 – ONNCCE – 2006. Se utilizó la fórmula:

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Se realizaron 3 pruebas:

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. actual
300	297.7	0.773
300	298.2	0.604
300	297.4	0.874
Promedio		0.750

Tabla 0.4.1.1. Resultados de la Humedad actual.



Ilustración 0.4.1.1. Secado del arena en parrilla.

3.4.1.2. Humedad de absorción

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004, mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio.

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. absorción
301.8	290.8	3.78
300.5	290.0	3.62
304.2	293.1	3.78
Promedio		3.73

Tabla 0.4.1.2. Porcentaje de Humedad de Absorción.



Ilustración 3.4.1.2. Procedimiento para obtener el secado superficial NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004.

3.4.1.3. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).

La prueba se realizó según la norma NMX–C–073–ONNCCE–2004.
Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio.

M (gr)	V (cm3)	MVSS(gr/cm3)
3455	2783	1.241
3405	2783	1.223
3375	2783	1.213
Promedio		1.226

Tabla 0.4.1.3. Promedio de la MVSS.



Ilustración 0.4.1.3. Equipo para realizar la prueba de MVSS.

3.4.1.4. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).

Se realizó en base a la norma NMX – C – 073 – ONNCCE – 2004.

Se realizaron 3 pruebas:

M (gr)	V (cm³)	MVSV (gr/cm³)
3655	2783	1.313
3755	2783	1.349
3705	2783	1.331
	Promedio	1.331

Tabla 0.4.1.4. Promedio obtenido de la prueba MVSV



Ilustración 0.4.1.4. Varillado de la arena en la prueba de MVSV

3.4.1.5. Colorimetría.

Esta prueba nos permitió determinar el contenido de materia orgánica en el agregado.

Se realizaron 3 pruebas:

No Prueba	Colorimetría
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

Tabla 0.4.1.5. Resultados de la prueba de colorimetría

El material se encuentra en el color límite de presencia de materia orgánica.



Ilustración 0.4.1.5. Análisis colorimétrico.

3.4.1.6. Sedimentación.

Se realizaron 3 pruebas:

En las 3 pruebas el resultado fue **“Contenido de finos aceptable”**.



Ilustración 0.4.1.6. Análisis de contenido de finos.

3.4.1.7. Material que pasa por la malla n° 200 en arena

Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200.

Mi (gr)	Mf (gr)	% A
582.3	569.1	2.32
546.9	536.8	1.88
565.9	556.2	1,74
Promedio		1.98

Tabla 0.4.1.6. Porcentaje de material fino que contiene la arena.

3.4.1.8. Prueba de terrones de arcilla.

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando e encuentran en abundancia formando parte de la arena.

Mi (gr)	Mf (gr)	% terrones
106.6	104.1	2.35
101.2	99.5	1.68
106.9	103.4	3.27
Promedio		2.43

Tabla 0.4.1.7. Determinación del porcentaje de terrones que contiene la arcilla

3.4.2. Arena rio Lerma

3.4.2.1. Humedad actual

Esta prueba nos permite determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad (figura 3.4.2.1.).



Ilustración. 3.4.2.1. Secado del material, para la obtención de la Humedad actual.

La humedad actual se determina según la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006. En la cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh = peso de la muestra en gramos.

Ms = peso seco del material en gramos.

Mh-Ms = peso del agua que contenía el material.

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. Actual
300	297.4	0.874
300	298.4	0.536
300	297.2	0.942
Promedio		0.784

Tabla 0.4.2.1. Resultados de la Humedad actual.

3.4.2.2. *Humedad de absorción.*

Esta prueba nos permite determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje (Ilustración 3.4.2.2.). Entendiendo como absorción el incremento en la masa de un agregado seco cuando es sumergido en agua durante 24 h, a temperatura ambiente. Este aumento de masa tiene lugar debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca, y es el índice de la porosidad del material.



Ilustración 3.4.2.2. Determinación del peso superficialmente seco.

La humedad de absorción se determina de acuerdo a la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004. Para la obtención de la absorción se emplea la siguiente formula:

$$\% \text{ de humedad de absorcion} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} * 100$$

Dónde:

M_{ss} = peso saturado y superficialmente seco en gramos.

M_s = peso seco del material en gramos.

M _{ss} (gr)	M _s (gr)	% de H. Absorción
300	289.4	3.66

300	291.2	3.02
300	284.5	5.44
Promedio		4.04

Tabla 0.4.2.2. Porcentaje de Humedad de Absorción.

3.4.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).

En esta prueba se determina el peso por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural (Ilustración 3.4.2.3. a y b).



Ilustración 3.4.2.3. Determinación del MVSS.

Esta prueba se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCC-2004, donde se indica la siguiente formula:

$$P.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.S.= peso volumétrico seco y suelta en gramos.

M= peso de la arena en gramos.

V= volumen del recipiente en cm³

M (gr)	V (cm ³)	MVSS (gr/cm ³)
3800	2759	1.01
3700	2759	0.97
3700	2759	0.97
Promedio		0.98

Tabla 0.4.2.3. Promedio de la MVSS.

3.4.2.4. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Tiene por objetivo obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación. Ilustración 3.4.2.4.



Ilustración 3.4.2.4. Determinación del MVSV.

Esta prueba se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004, en la cual se presenta la fórmula siguiente para las operaciones:

$$M.V.S.V = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M.V.S.V. = Peso volumétrico seco y varillado en gramos.

M = peso del material en gramos.

V = volumen del recipiente en cm³

M(gr)	V (cm ³)	MVSV (gr/cm ³)
4000	2759	1.45
3900	2759	1.41
4050	2759	1.47
Promedio		1.44

Tabla 0.4.2.4. Promedio obtenido de la prueba MVSV

3.4.2.5. Colorimetría

Con esta prueba se determinara el contenido de material orgánico en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal. Ilustración 3.4.2.5.



Ilustración 3.4.2.5. Determinación de la colorimetría

Esta prueba se realiza debido a que la presencia de materia orgánica e impurezas en una arena puede modificar las reacciones químicas del cemento con el agua, alterando el correcto fraguado y endurecimiento.

N° Prueba	Colorimetría.
1	Escala 3
2	Escala 3

3 Escala 3

Tabla 0.4.2.5. Resultados de la prueba de colorimetría

La arena está dentro de los límites permisibles del contenido de materiales orgánicos, no es necesario hacer un lavado.

3.4.2.6. Sedimentación

Esta prueba determina si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para definir si se acepta o no. Figura 3.4.2.6.



3.4.2.6. Determinación de sedimentos en la arena.

Como el material fino no rebasa el límite de la marca de 444, se considera un material aceptable para el contenido de finos, por lo que se podría utilizar para la elaboración de una mezcla.

3.4.2.7. Prueba de terrones de arcilla en arena

Conoceremos la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan la mezcla, cuando se encuentra en forma abundante formando parte de la arena. Ilustración. 3.4.2.7.



Ilustración 3.4.2.7. Prueba de terrones de arcilla en arena

Para el resulta de esta prueba se usa la siguiente formula:

$$\% \text{ de terrones} = \frac{M_i - M_f}{M_i}$$

Dónde:

M_i = 100 gramos.

M_f = Masa seca sin terrones.

M_i (gr)	M_f (gr)	% de terrones
100	90.7	9.3
100	95.5	4.5
100	91.3	8.7
Promedio		7.5

Tabla 0.4.2.6. Determinación del porcentaje de terrones que contiene la arcilla

3.4.2.8. Equivalente de arena.

En esta prueba determinamos las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos.

Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto. Ilustración 3.4.2.8.



3.4.2.8. Obtención de la equivalencia de arena.

El cálculo se lleva a cabo con la siguiente formula:

$$E. de arena = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

L. arena	L. arcilla	%E. arena
10.0	11.55	86.58
9.90	11.4	86.84
9.8	11.2	87.5
Promedio		86.97

Tabla 0.4.2.7. Porcentaje de equivalente de arena

3.5. Diseño de Mezcla de mortero y losas de adherencia y elaboración de especímenes

3.5.1. Determinación de la Fluidéz y proporcionamiento de la mezcla

Previo a la elaboración de los especímenes se realizaron las pruebas para determinar la cantidad de agua necesaria para que nuestro mortero tuviese una fluidez de 110% ± 5% en la mesa de fluidez en donde se realiza dicha prueba (ASTM C 109M I. , 2002), (NMX-C-061, 2010). La prueba consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, es

decir sobre la mesa de fluidez, el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, como se observa en la ilustración 3.5.1. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 25 golpes con el pisón, posteriormente se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos. La medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente. El diámetro final se mide con un vernier apropiado para realizar dicha operación ilustración 3.5.2.



Ilustración 3.5.1. Prueba de fluidez. Mesa y Pisón de prueba.



Ilustración 3.5.2. Determinación de la fluidez de la mezcla.

La mezcla para determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla se realizó dentro de una cubeta con capacidad de 18 litros aproximadamente (ilustración 3.5.3.), esto debido a que las cantidades de materiales excedían de 1 kg de cementante y 4 kg de arena, así que sería bastante difícil mezclar dichos materiales en un recipiente de porcelana como se acostumbra usualmente.



Ilustración 3.5.3 y 3.5.4. Método de mezclado de áridos mediante aspas de acero impulsadas por el taladro.

Para el mezclado de dichos materiales se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, adicionado de unas Aspas Mezcladoras (ilustración 3.5.4.).

Cabe destacar que determinada la cantidad de agua necesaria para elaborar nuestra mezcla, esta se establecería para elaborar todas las mezclas con las diferentes sustituciones de minerales que se le agregarían al mortero para elaborar los diferentes especímenes para realizarles después las pruebas correspondientes.

Las cantidades de cementante, así como de arena y agua se determinaron de un estudio previo, debido a que también se había realizado ya una mezcla para cuantificar el agua necesaria para cumplir con la fluidez especificada.

Se fijo usar la cantidad de 1481gr de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes que se elaborarían, ya que después de varios tanteos y observaciones se determinó que el rendimiento de cementante era de 0.47gr/cm³, ya que si se utilizaba lo que indica la norma correspondiente (ASTM C 109M I. , 2002) para llenar de mezcla 6 cubos de dimensiones 5cm x 5cm x 5cm, se desperdiciaría demasiado material al elaborar nuestros especímenes.

Se elaboraron dos mezclas por cada sustitución, con cantidades iguales de material. En la primer mezcla que se elaboró con la cual se obtuvo la fluidez deseada, se utilizaron las cantidades de material y se registraron las características de la mezcla indicadas en la tabla 3.5.1.

Agregado o característica	cantidad
Cemento	1481 gr
Arena	4072gr
Agua	1495 ml
Relación agua/cemento(A/C)	1.01
Fluidez	108%

Tabla 3.5.1. Proporción de la mezcla con que se elaboró el mortero.

Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de Prueba para las 8 edades: 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días.

Espécimen	Prueba a realizar	No. de especímenes
Cubos de 5 x 5 x 5 cm	Compresión axial	15
Cilindros de 10 x 20 cm	Módulo de elasticidad	7
Prismas de 4 x4 x16 cm	Flexión	7
Briquetas	Tensión	15

Tabla 3.5.2. Cantidades de especímenes que se llenaron con la cantidad de material de tabla 3.5.1.

3.5.2. Elaboración de losas de concreto para pruebas de adherencia

Mientras se elaboraban los diferentes especímenes mencionados anteriormente, también se elaboraron unas pequeñas losas de concreto de 1m² por 7 cm de espesor aproximadamente, estas fueron hechas con el fin de ponerles una capa de las mezclas de mortero con sus diferentes sustituciones para realizar sobre estas pruebas de adherencia.

Para elaborar las losas primero se preparó la cimbra, la cual fue hecha de madera para posteriormente colar las losas de concreto, cabe mencionar que las losas se llenaron en dos

capas, la primera fue a una altura de 3.5cm aproximadamente ilustración 3.5.2.1., después de la primera capa, se le puso malla electro soldada en la superficie de la mitad del espesor de la losa, esto para aumentar la rigidez de las losa y evitar posibles accidentes cuando se descimbraran o se movieran de lugar, luego de ponerles la malla, se lleno la siguiente capa de concreto hasta alcanzar una altura de aproximadamente 7cm ilustración 3.5.2.2. A la superficie de la losa no se le dio ningún tipo de acabado (ASTM C 1583, 2004), es decir solo se tuvo el cuidado de que el espesor de la losa fuera uniforme de 7cm aproximadamente.

El concreto para la elaboración de las losas fue de una resistencia aproximada de 200 kg/cm², esto mediante la dosificación de materiales por medio de una tabla que viene integrada en el cemento utilizado (CPC 30R RS) para la fabricación de las mismas, el concreto se elaboró en una revolvedora para concreto de capacidad de 1 bulto de cemento.

Al día siguiente de haber colado las losas se procedió a curar el concreto de estas, el procedimiento fue agregar agua en la superficie de las losas, esto durante 28 días aproximadamente, hasta que las losas se descimbraron y se movieron de lugar hasta donde se colocaron, para posteriormente agregarles un revestimiento o capa de mortero de la sustitución correspondiente.

3.5.2.1. Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia

Para la realización de las pruebas de adherencia (ASTM C 1583, 2004), se elaboraron mezclas de mortero para las diferentes sustituciones y materiales, un poco más pequeñas que las mezclas descritas en párrafos anteriores, es decir se elaboraron mezclas con cantidades de material menor pero con iguales proporciones, de manera que estas mezclas resultaran con las mismas características (fluidez y A/C) que las mezclas elaboradas para fabricar los diferentes especímenes para cada prueba.

Anterior a la realización de dichas mezclas, las losas de concreto sobre las cuales se pondría el revestimiento se dividieron en 6 partes de aproximadamente 50cm x 33cm, en las cuales una vez que se elaboraron las diferentes mezclas, se colocaron sobre pequeñas superficies, lo cual se ilustra en la ilustración 3.5.2.3, de manera que cada losa de 1m² obtuvo 6 mezclas con diferentes sustituciones y una mezcla de mortero sin sustitución para ambos testigos, para después realizarle la prueba de adherencia correspondiente a la edad especificada.



Ilustración 3.5.2.1. Elaboración de losas, llenado de la primera capa de concreto.



Ilustración 3.5.2.2. Losas de concreto, llenado de la segunda capa de concreto una vez colocada la malla electro soldada



Ilustración 3.5.2.3. Agregado de la mezcla de mortero con sus diferentes sustituciones, alas losas de concreto para posteriormente realizarle la prueba de adherencia.

3.5.3.1. Elaboración de Cubos

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para la fabricación de cubos.

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes un desmoldante, esto con la finalidad de que al día siguiente cuando se desmoldaran, el mortero no se adhiriera a las paredes del molde y fuera sencillo el retirarlos del mismo sin que se desmoronaran, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diesel en una parte más pequeña que el aceite para la mezcla no fuera tan líquida pero tampoco muy viscosa.

Una vez que los moldes para elaborar los cubos estaban engrasados y que estaba preparada la mezcla para la elaboración de los mismos, es decir una vez que a la mezcla se le había determinado la fluidez y verificado que estuviese dentro del rango, se procedió al llenado de los mismos ilustración 3.5.3.1, el llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109M I. , 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, lo cual se ilustra en la ilustración 3.5.3.2, el pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm, después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula o similar (ilustraciones 3.5.3.3 y 4).

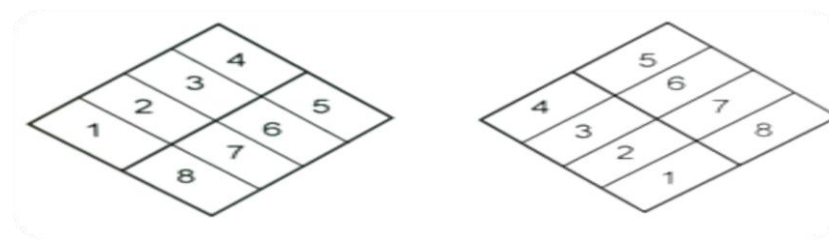


Ilustración 3.5.3.1 y 3.5.3.2. Etapas de llenado del cubo de 5cm x 5cm x 5cm



Ilustración 3.5.3.3. Lote de moldes para cubos de 5x5x5cm. Ilustración 3.5.3.4. Preparación de los moldes para elaboración de cubos de mortero y cubos.

Una vez fabricados el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejaban fraguar en sus moldes, cabe mencionar que en algunas sustituciones de los diferentes materiales se presentó un sangrado excesivo (ilustración 3.5.3.5.). al transcurso de 24 hrs aproximadamente, los cubos se desmoldaban, en la superficie de cada cubo se les puso con ayuda de un marcador indeleble su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue la misma), en dicha nomenclatura llevaba la fecha de elaboración del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución, una vez realizado lo anterior, se procedió a curar los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dió a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 511, 2003).

Después de hacer lo anterior se limpiaron cada uno de los moldes para la fabricación de cubos, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes cúbicos requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente.



Ilustración 3.5.3.5. Procedimiento de llenado de cubos. Se observa el sangrado de la mezcla.

Cabe destacar que para la realización de algunas sustituciones por ejemplo: 15%, 20% y 30% de MK, fue necesario agregarle a dicha mezcla un fluidificante, debido a que con la cantidad de agua fijada en un principio para que se cumpliera la relación agua/cemento, no se obtenía la fluidez establecida por la norma correspondiente, la cantidad de fluidificante que se le agregó a las mezclas mencionadas fue diferente y se le agregó fluidificante tanto como fuera necesario para obtener la fluidez establecida en la norma correspondiente a la elaboración de cubos. El fluidificante utilizado en la elaboración de dichas mezclas fue: SikaCem Fluidificante. La cantidad de fluidificante agregada a la mezcla fue diferente en el caso del MK, con el 20% de sustitución fue de 2gr de fluidificante por cada kg de cementante aproximadamente y para la mezcla con el 30% de sustitución fue de 8gr de fluidificante por cada kg de cementante aproximadamente, dichas mezclas también fueron empleadas para elaborar cilindros, prismas, briquetas y mezclas para la realización de las pruebas de adherencia.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se elaboraron cubos de mortero sin sustituciones minerales, pero si con diferentes sustituciones de fluidificante, se elaboraron mezclas con 0gr, 2gr, 4gr, 6gr y 8gr de fluidificante por cada kg de cemento, con estas mezclas se elaboraron 3 especímenes para probarse a las edades de 7, 14, 28, 60 y 90 días de edad del mortero, esto para comprobar que el fluidificante no agregara ningún porcentaje de resistencia a la compresión de nuestro mortero.

3.5.3.2. Elaboración de Prismas

Para la fabricación de los prismas con dimensiones 4cm x 4cm x 16cm con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para su fabricación.

Para la fabricación de los prismas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

El llenado de los prismas se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente lo cual se ilustra en la ilustración 3.5.3.6, es decir a la mitad de la altura del prisma, en cada capa se le dieron 12 golpes con un pisón, el cual es el mismo que se utiliza para la elaboración de especímenes cúbicos, los golpes se dieron en diferente sentido, a cada capa, como se describió en el llenado de cubos.

Después de la elaboración del número de los especímenes prismáticos correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes sustituciones, se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente, después se descimbraron y al igual que en los cubos se les puso la misma nomenclatura, después se procedió a curar los prismas de mortero, la manera de curar los especímenes fue la misma que se describió en el curado de los cubos.

Después de sumergir en agua los especímenes, se limpiaron cada uno de los moldes, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes, requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente.



Ilustración 3.5.3.6. Llenado de especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm

3.5.3.3. Elaboración de Briquetas

Para la fabricación de las briquetas (especímenes en forma de cacahuete) con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de bronce.

Para la fabricación de las briquetas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

Puesto que no hay ninguna norma para el llenado de las briquetas, estas se llenaron siguiendo el procedimiento descrito el Manual de Análisis de Materiales tercera edición. El llenado de las briquetas consiste en llenar los moldes de las mismas comprimiendo la mezcla con el dedo índice y enrazando con la ayuda de una espátula ilustración (3.5.3.7.), puesto que los moldes no tienen una base en la cual quedará la mezcla, el molde se puso sobre una superficie de cristal, engrasado previamente para evitar que la mezcla se adhiera a éste.

Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas, se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente (ilustración 3.5.3.8.), después se les puso la misma nomenclatura descrita anteriormente y se sumergieron en agua para su curado hasta la fecha de prueba.



Ilustración 3.5.3.7. Elaboración de briquetas, utilizando molde y cristal previamente engrasado.



Ilustración 3.5.3.8. Sangrado en Briquetas después de un momento de elaboradas.

3.5.3.4. Elaboración de Cilindros

Para elaborar los cilindros de mortero de dimensiones 10cm de altura, por 5cm de diámetro en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas para su fabricación.

Para la fabricación de los cilindros, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

El llenado de los moldes cilíndricos se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente, es decir a la mitad de la altura del cilindro (ilustración 3.5.3.9), en cada capa se le dieron 25 golpes con una varilla punta de bala de 1/4” de diámetro, después de la segunda capa se enrazaron con ayuda de la varilla punta de bala³.

Después de la elaboración del número de cilindros correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes sustituciones, se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente, después de esto se descimbraron y al igual que en los cubos se les puso la misma nomenclatura, después se procedió a curar los cilindros de mortero, al igual que los cubos y demás especímenes elaborados, el curado que se dio a las muestras fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba.

Después de sumergir en agua los especímenes cilíndricos, se limpiaron cada uno de los moldes, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la

³ El procedimiento de elaboración se basa en los requerimientos que marca la norma NMX-C-083-ONNCCE, en el que se establece la relación de esbeltez 2:1, para poder realizar la prueba a compresión.

correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes cilíndricos, requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente.



Ilustración 3.5.3.9. Fabricación de especímenes cilíndricos de 10cm de altura por 5cm de diámetro.

3.5.4. Curado del Concreto

De acuerdo la norma NMX-C-148-2010; ASTM-C-511-2003, el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco.

La remoción de los moldes debe efectuarse a 24 ± 8 horas luego de elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser 23 ± 2 °C desde el momento del desmolde hasta el día de falla (ilustración 3.5.4.1.).

A excepción de las mezclas elaboradas para las losas de concreto en que se efectuaron las pruebas de adherencia⁴, todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua, a la cual se le monitoreo la temperatura y poder cumplir con la normatividad (NMX-C-148, 2010).

⁴ A las losas se les efectuó un curado superficial para evita su agrietamiento.



Ilustración 3.5.4.1. Pila de curado y contenedor alternativo para el curado de los especímenes.

3.6. Pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido.

Las pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido se pueden clasificar en destructivas y no destructivas. Las sustituciones con MK, PN, PE, CBC, CCV y CEL se probaron a 14, 28, 45, 90 y 180 días; tanto para pruebas no destructivas como para destructivas. En las sustituciones con CM, EAH, CBOF y FN, se probó 14, 28, 45 y 90 días. Para los 52% (5 sustituciones por material más 2 testigos), se elaboró especímenes para 8 edades de prueba.

3.6.1. Pruebas no destructivas

Terminadas las lecturas con los equipos de pruebas no destructivas se reservaron los especímenes programados para las pruebas destructivas.

Las pruebas destructivas se realizaron poco después de terminar con las pruebas no destructivas, siempre se tuvo la precaución de mantener las muestras húmedas y/o sumergidas en agua.

3.6.1.1. Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson figura 3.6.1.1.1



Ilustración 3.6.1.1.1. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:

Cubos: lado 1, lado2 y espesor.

Cilindros: diámetro y longitud.

Prismas: base (lado1), espesor (lado2) y longitud.

2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.

3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.

4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas figura 3.6.1.1.2.

5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente).

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (3)$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en $K\Omega\text{-cm}$ (ohm-m)

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en $K\Omega$

A = Área transversal del espécimen en cm^2

L = Longitud del espécimen en cm



Ilustración 3.6.1.1.2. Especimen prismático colocado entre las dos placas de cobre lista para tomar la resistencia eléctrica.

3.6.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Para poder comenzar con las pruebas los especímenes fueron ensayados, pesados y medidos para establecer un orden en las mediciones y obtener los datos necesarios o requeridos en las pruebas, tal como se muestra en las *figuras 3.6.1.2.1 y 3.6.1.2.2.*



Ilustración 3.6.1.2.1. Medición de los especímenes utilizando vernier.



Ilustración 3.6.1.2.2. Medición de la masa utilizando instrumentos electrónicos.

Los especímenes empleados para determinar lecturas de resistividad eléctrica eran pasados en seguida a una mesa contigua en donde se la determinaba el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico.

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, figura 3.6.1.2.3.; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con

una selección de 1 a 10 por segundo; precisión $1\mu s$; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel antibacterial, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, fue entonces que se decidió el empleo del gel antibacterial para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones planeadas tomar, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.

El grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.

Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.



Ilustración 3.6.1.2.3. Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico y espécimen prismático colocado para realizarle la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

3.6.1.3. Masa superficialmente seca

Es un parámetro a tomar porque en teoría esta debe aumentar con la edad, hasta llegar a un peso constante, a la vez nos servirá para determinar el modulo de elasticidad. Es importante que se realice rápidamente al sacarla muestra del proceso de curado, únicamente se ocupa limpiar superficialmente con una franela.

Es posible determinar el Módulo de Elasticidad de un material si la velocidad de pulso ultrasónico es medida y los valores de la relación de Poisson así como la densidad son conocidas.

Este enfoque tiene una ventaja sobre las demás técnicas estandarizadas, la cual es que hace uso de frecuencias de vibración, en la cual la prueba no esta restringida a una forma especial de especímenes de laboratorio. Muchos autores reportaron la estimación del Módulo de Elasticidad Dinámico (de bajo esfuerzo) a partir de mediciones de velocidad de pulso en concreto (Leslie and Cheesman, 1949; Whitehurst, 1966). Usualmente el Módulo de Elasticidad Dinámico estimado a partir de mediciones de velocidad de pulso es mayor que el obtenido de mediciones de vibración, aún cuando se conoce el valor de la relación de Poisson (Malhotra, y otros, 2004).

La relación entre estas constantes elásticas y la velocidad de un pulso ultrasónico que viajan en un medio isotrópico elástico de infinitas dimensiones están dadas por la ecuación 4.

Si se conoce el valor de la relación de Poisson y de la densidad, entonces se puede usar la ecuación 4 para determinar el valor del Módulo de Elasticidad Dinámico de muestras de concreto para un rango amplio de formas y tamaños. Esto debido a que la velocidad de pulso no es afectada significativamente por las dimensiones del espécimen de prueba, excepto cuando una o más de las dimensiones laterales son relativamente más pequeñas que la longitud de onda del pulso. Similarmente, la relación de Poisson puede ser determinada si se conocen los valores de la densidad y del Módulo de Elasticidad Dinámico (Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, 2002).

3.6.1.4. Densidad

La prueba de densidad se le aplica a los especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje, el procedimiento que se sigue es el que se indica en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, Tercera edición. El procedimiento es como se describe:

- Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela y registrando su masa como masa de la muestra (M).
- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada esperando a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) del espécimen (ilustración 3.6.1.4.1.)

Los cálculos para obtener la densidad de los especímenes cúbicos se hace con la siguiente formula:

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

Dónde:

D=densidad en g/cm²

M=masa del espécimen en g.

V=volumen del espécimen en cm³.



Ilustración 3.6.1.4.1. Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.

3.6.1.5. Gravedad específica

La prueba de gravedad específica se le realiza a los especímenes cúbicos, esta prueba se lleva con forme se indica en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, tercera edición.

El procedimiento es el que se describe a continuación:

1. Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficial seca (M_{ss} =Masa superficialmente seca).
2. Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.
3. Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla (ilustración 3.6.1.5.1).
4. Se determina la masa sumergida del espécimen (M_a =Masa sumergida).
5. Se secan las muestras en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
6. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza (M_s =Masa seca).

Los cálculos para la obtención de la gravedad específica se hace con la siguiente formula:

$$G.E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a}$$



Ilustración 3.6.1.5.1. Determinación de la gravedad específica.

3.6.2. Pruebas Destructivas.

Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, es decir se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

3.6.2.1. Compresión en Cubos (5x5cm)

Como ya se mencionó, en la prueba de resistividad se tomaron las dimensiones de cada espécimen cúbico, la prueba de compresión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se comenzó a aplicar carga lo cual se puede observar en la figura 3.6.2.1.1, a una velocidad constante en el rango de 50000kg, el cual tiene una aproximación a 0.5kg, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109M I. , 2002).

Se probaron 3 cubos a compresión (ilustración 3.6.2.1.1) a las edades de 14, 28, 45, 90, y 180 días para obtener un promedio de los tres, el cual se tomaría como la resistencia a compresión de dicha mezcla, cabe destacar que los primeros especímenes cúbicos a los cuales se les realizó la prueba fueron los cubos testigo, es decir que no tenían ninguna sustitución de los minerales.



Ilustración 3.6.2.1.1. Prueba de Resistencia en cubos utilizando la máquina universal Tinius Olsen.

En los cálculos para determinar la resistencia a compresión se usó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo a compresión, kg/cm².

P = Carga, kg.

A = Área transversal del cilindro, cm².

3.6.2.2. Resistencia a Flexión

Esta prueba se realiza a los especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm. Se probaron tres muestras en cada fecha, el procedimiento seguido se describe a continuación:

Se marcó el prisma a 1” de sus extremos, también se marca con una línea al centro del claro del prisma, la cual deberá ser donde se aplique la carga (ilustración 3.6.2.2.1.).

Se montó en los soportes adecuados para esta prueba y se aplica carga sin impacto y a una velocidad constante (ASTM C 293, 2002) (ilustración 3.6.2.2.2.)

Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Los cálculos se realizaron con el empleo de la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{3WL}{2BD^2} \quad (5)$$

Dónde:

MR=Módulo de ruptura, kg/cm²

W=Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kg

L = Longitud entre apoyos de la muestra, cm

B = Ancho promedio de la muestra, cm

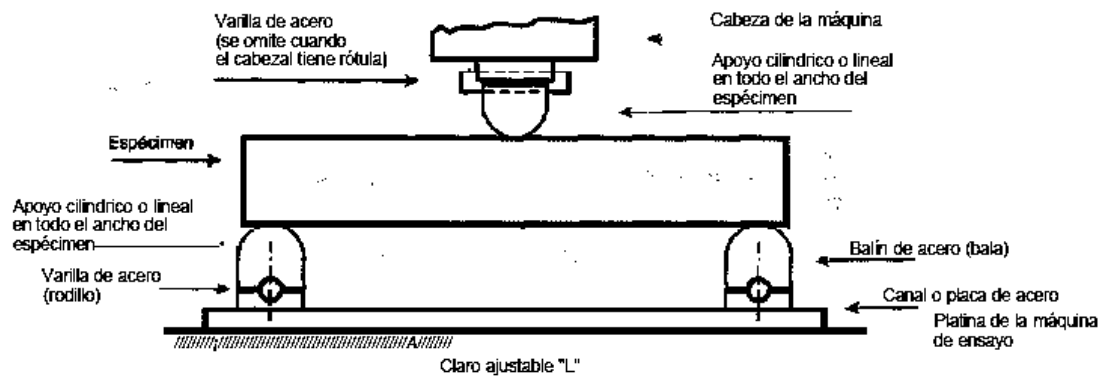
D = Espesor promedio de la muestra, cm

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en no más que 5% de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{3Wa}{BD^2} \text{ Ecuación (6)}$$

Dónde:

a = Distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la viga, cm.



La presente figura es ilustrativa

Ilustración 3.6.2.2.1. Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en más de un 5% de la longitud del tramo, se deberán desechar los resultados de la prueba (ilustración 3.6.2.2.3.).



Ilustración 3.6.2.2.2. Ejemplo de la prueba de flexión estática en los prismas.



Ilustración 3.6.2.2.3. Resultados de la prueba de flexión estática. Tipo de ruptura al centro.

3.6.2.3. Tensión en Briquetas

La determinación de la resistencia a tensión realizada en briquetas, se efectuó en la máquina de prueba para tensión en morteros tipo Michaelis (ilustración 3.6.2.3.1.)



Ilustración 3.6.2.3.1. Máquina Michaelis para prueba a tensión en briquetas.

El procedimiento seguido se describe a continuación:

- Se sacaron de la pila de curado las muestras a probar a la edad correspondiente.
- Se tomaron las medidas de la sección media (S_m) de la briqueta.
- Se colocó la briqueta en la máquina la cual debe quedar perfectamente nivelada.

- Se aplicó la carga lenta y constantemente por medio de las municiones hasta la falla de la muestra (ilustración 3.6.2.3.2.).

Después de la falla de la muestra se retiraron las municiones pesándolas al decimo de gramo, el peso de las municiones (P_m) fue considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta.

En los cálculos para determinar la resistencia a tensión se usó la siguiente ecuación:

$$R = P_m \frac{x50}{s_m} \text{ Ecuación (7)}$$

Donde:

R = resistencia a la tensión en kg/cm^2

P_m = peso de las municiones o carga de ruptura en kg.

s_m = sección media de la briqueta en cm^2 .

50 = constante de la máquina.



Ilustración 3.6.2.3.2. Aplicación de la fuerza de tensión sobre la briqueta.

3.6.2.4. Adherencia

El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla.

Se han hecho numerosas investigaciones sobre la unión en sistemas cementicios y muchas de ellas se han preocupado por el desarrollo de una prueba adecuada.

La prueba Pull Off se ha ido incrementando favorablemente y se ha convertido en una prueba in situ para el control de calidad [Simon Austin et al, 1995].

Una vez que obtuvo la edad correspondiente para realizar las pruebas de adherencia, se comenzó por hacer una perforación en la superficie del revestimiento lo cual se observa en la figura 3.6.2.4.1. Esta se hizo mediante la ayuda de un esmeril angular portátil marca Black & Decker con una potencia de 750w y 11000rpm adicionada de una broca circular con punta de diamante de 50mm de espesor, la perforación se hizo a un cm por debajo del sustrato de concreto (ilustración 3.6.2.4.4).



Ilustración 3.6.2.4.1. Perforación de las losas para la prueba de adherencia.

Una vez que se realizaron las perforaciones a las mezclas correspondientes se procedió a pegar los discos de acero inoxidable, esto se ilustra en la figura 3.6.2.4.3, los cuales sirvieron para realizar dicha prueba, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico, (ilustración 3.6.2.4.2.), el epóxico utilizado es marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. Después de la aplicación se dejó secar el epóxico aproximadamente 3 o 4 horas.



Ilustración 3.6.2.4.2. Elaboración de la mezcla del epóxico.



Ilustración 3.6.2.4.3. Pegado de los discos de acero en el recubrimiento de mortero.



Ilustración 3.6.2.4.4. Relación de dimensiones de las perforaciones y discos utilizados.

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, esto se observa en la figura 3.6.2.4.11, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica en el disco de metal pegado a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición Pull Off (fig. 3.6.2.4.5) de carga en el perno con cabeza de pelota (figura 3.6.2.4.6) para después apretar ligeramente hasta sentir una ligera tensión, se comenzó a aplicarle carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004), es decir hasta que hubo desprendimiento del revestimiento o sustrato de concreto.



Ilustración 3.6.2.4.5. Equipo para prueba Pull Off marca CONTROLS.



Ilustración 3.6.2.4.6. Dolly con adaptador para el aparato de Prueba Pull Off

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

A continuación en la figura 3.6.2.4.7 se observa el tipo de falla que puede ocurrir o presentarse al momento de realizar la prueba con el equipo Pull Off.

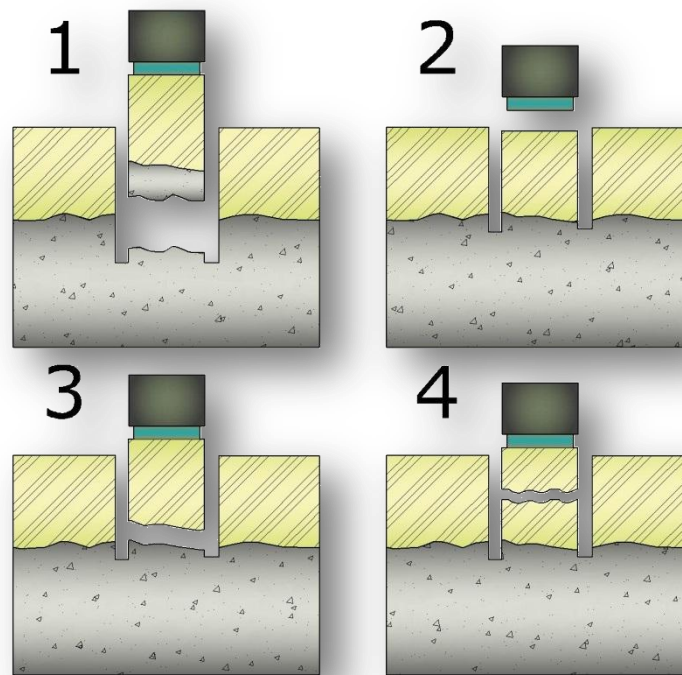


Ilustración 3.6.2.4.7. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.

Posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento y se registró como carga de ruptura, también se observó y registró el tipo de falla, el cual podrían ser:

Falla 1. En el sustrato.

Falla 2. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.

Falla 3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.

Falla 4. En el material de reparación o revestimiento.

Cuando se presentó la falla entre el disco de acero y el epóxico como se muestra en la figura 3.6.2.4.8, la prueba se tuvo que repetir (ASTM C 1583, 2004)



Ilustración 3.6.2.4.8. Falla entre epóxico y el disco metálico.



Ilustración 3.6.2.4.9. Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material MK.



Ilustración 3.6.2.4.10. Falla en el revestimiento. Tipo 4.

Según el resultado obtenido se le llama fuerza de adherencia, cuando se produce el fallo en la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento, y resistencia a la tensión cuando el fallo se produce en el sustrato o el material de reparación o revestimiento.

La fuerza de adherencia o resistencia a la tensión la calcula automáticamente el Equipo Pull Off mediante la división de la carga de tensión de falla y el área del espécimen de prueba.



Ilustración 3.6.2.4.11. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off.

4. RESULTADOS

Para cada prueba se hizo una comparación con los morteros testigo para determinar la eficiencia de las formulaciones con sustitución del CP.

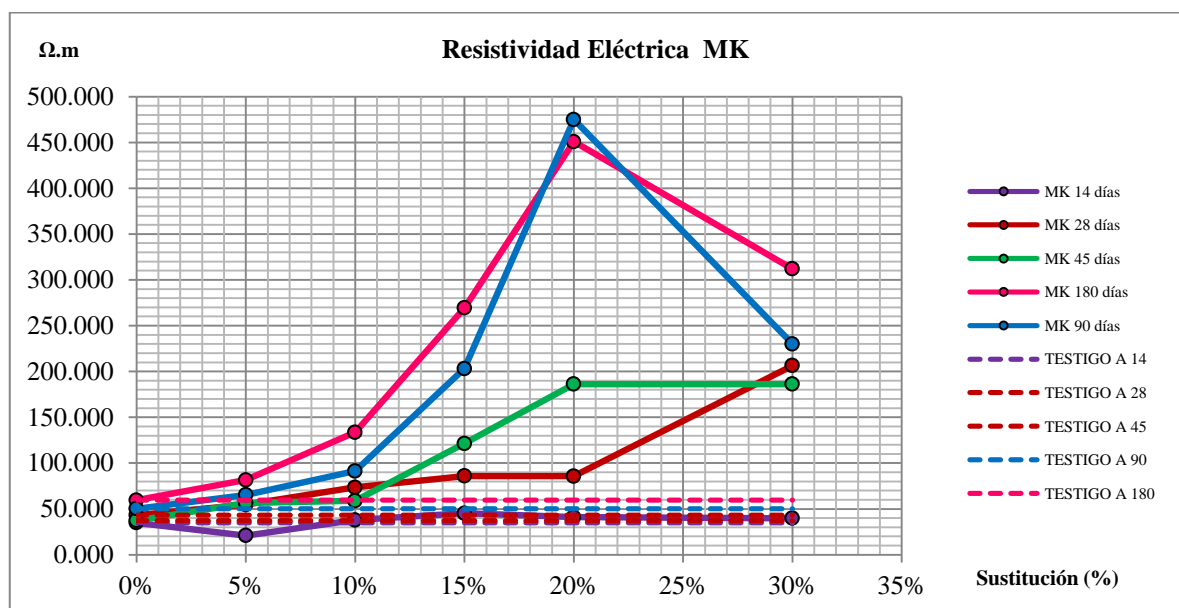
4.1. Morteros fabricados con agregado del Río Huajúbaro.

4.1.1. Metacaolín (MK)

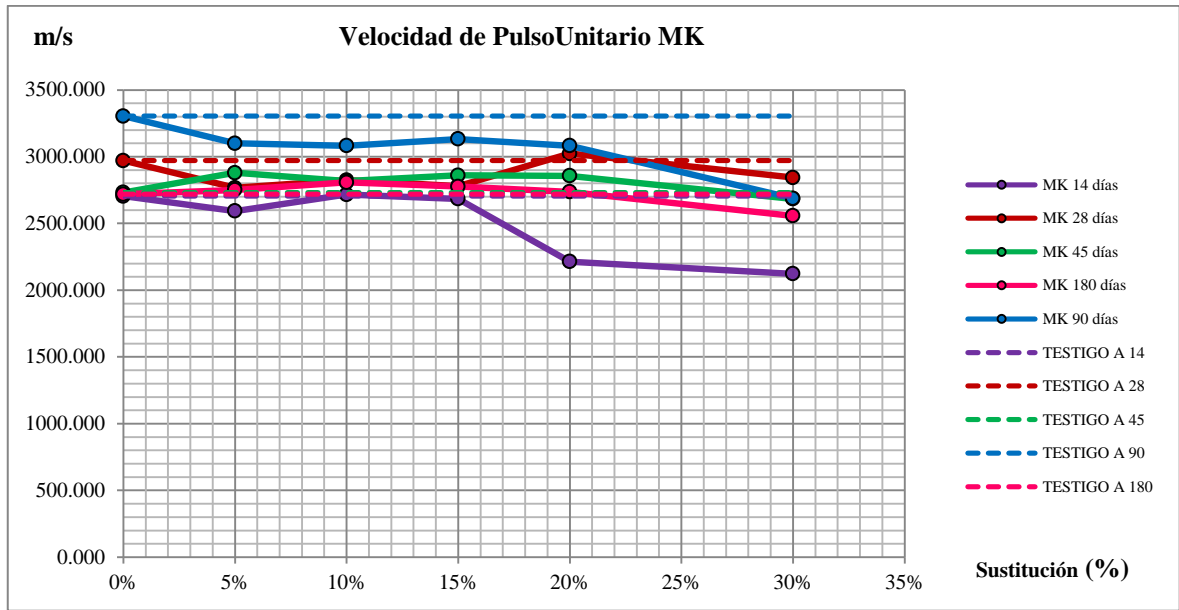
4.1.1.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.1.1.1. Pruebas No destructivas

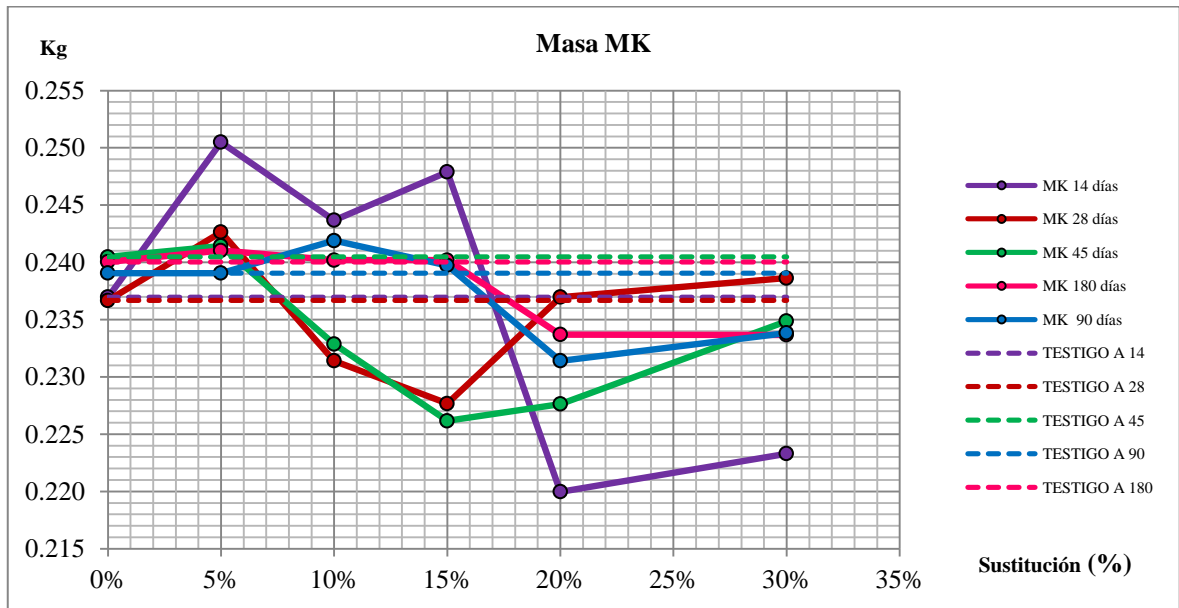
4.1.1.1.1.1. Resistividad



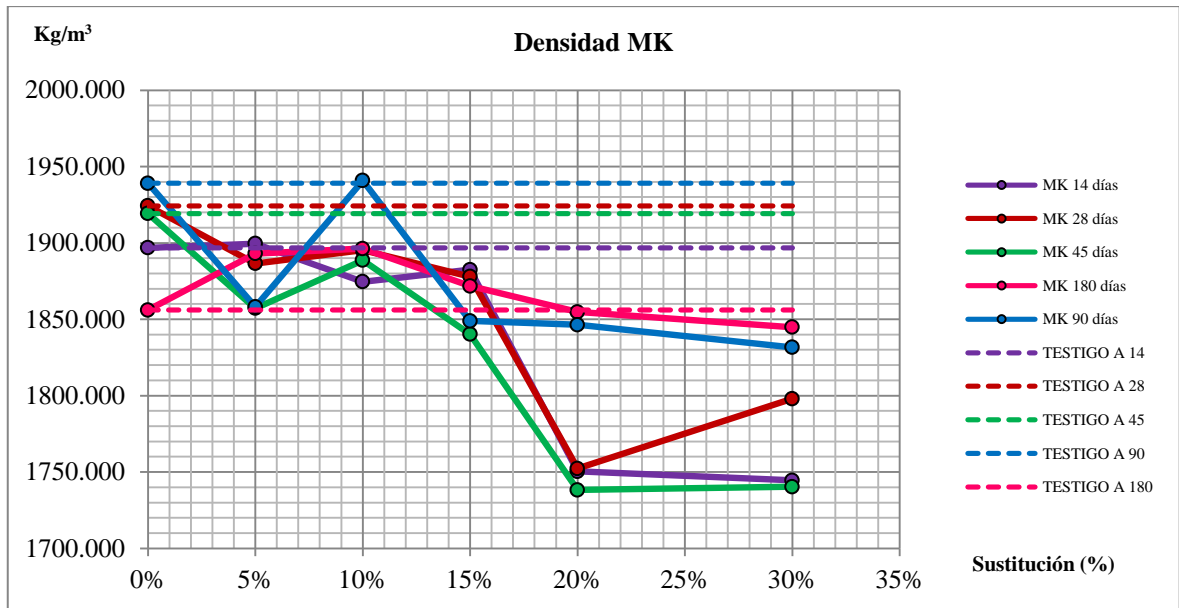
4.1.1.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



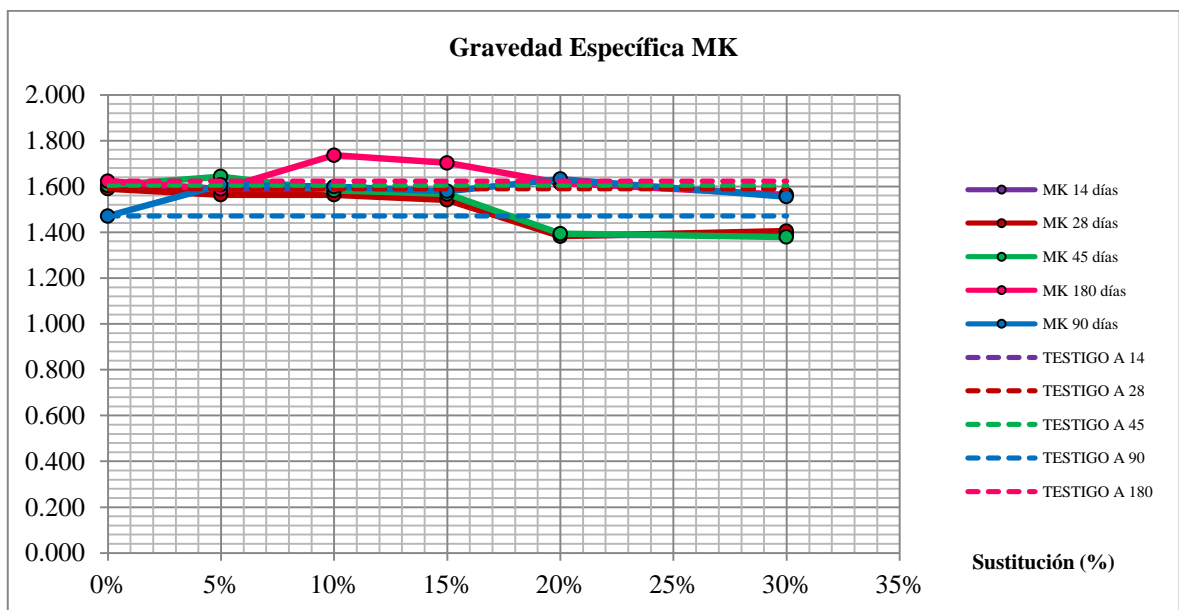
4.1.1.1.1.3. Masa



4.1.1.1.1.4. Densidad

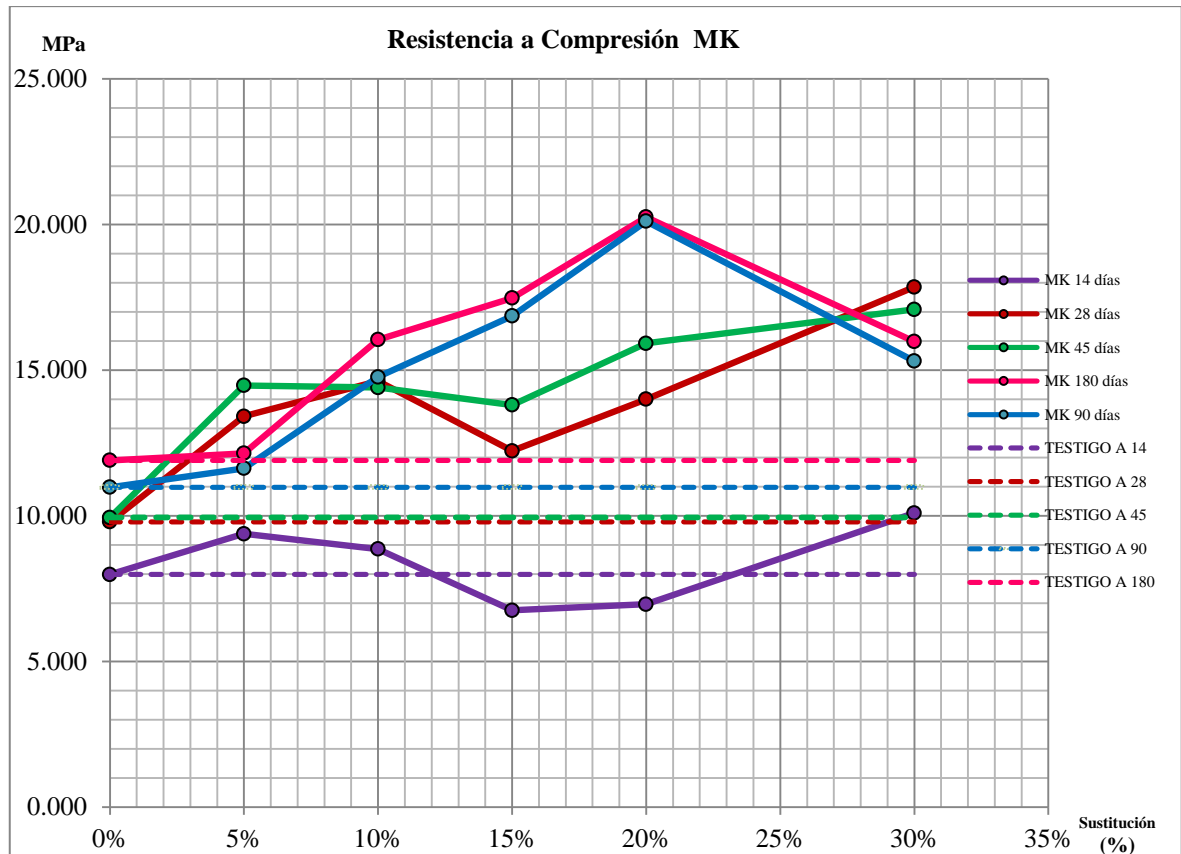


4.1.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.1.1.2. Pruebas Destructivas

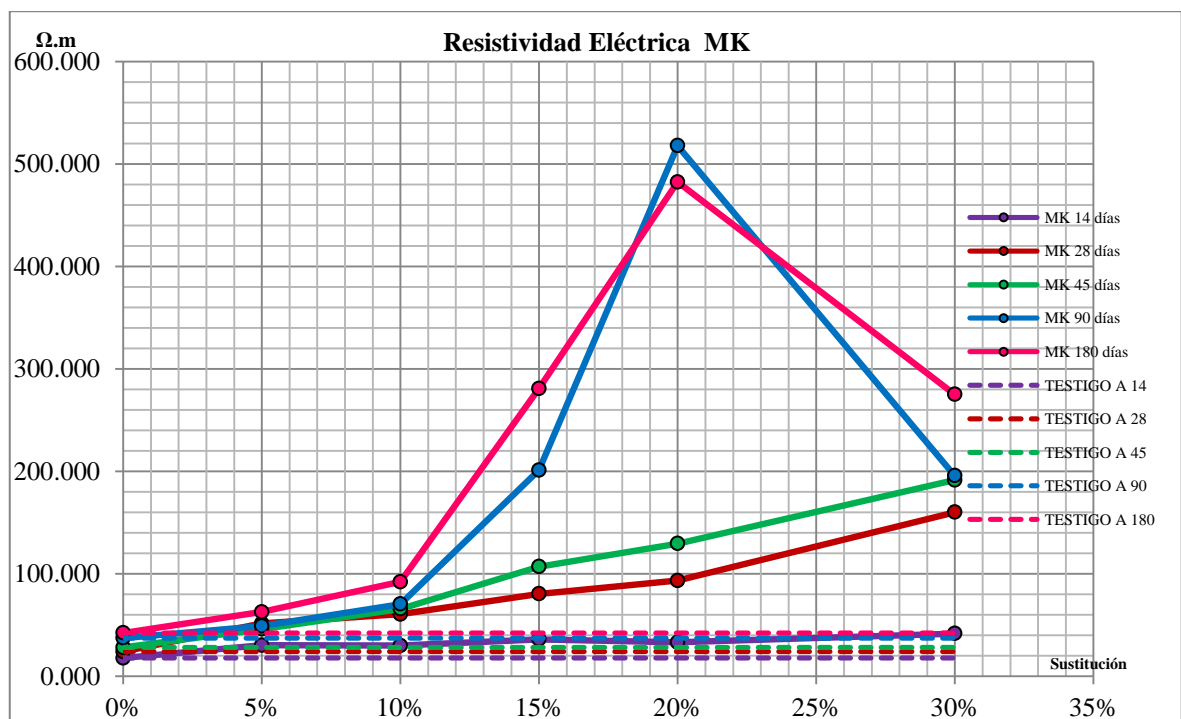
4.1.1.1.2.1. Compresión Simple



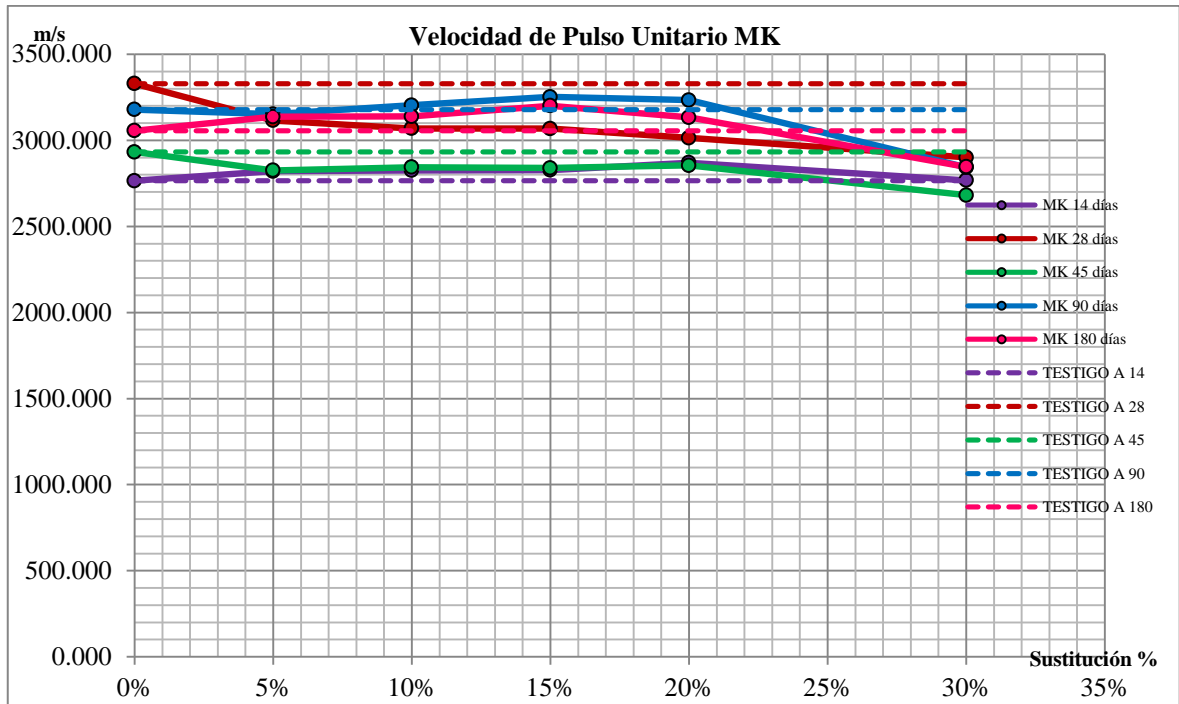
4.1.1.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.1.2.1. Pruebas No destructivas

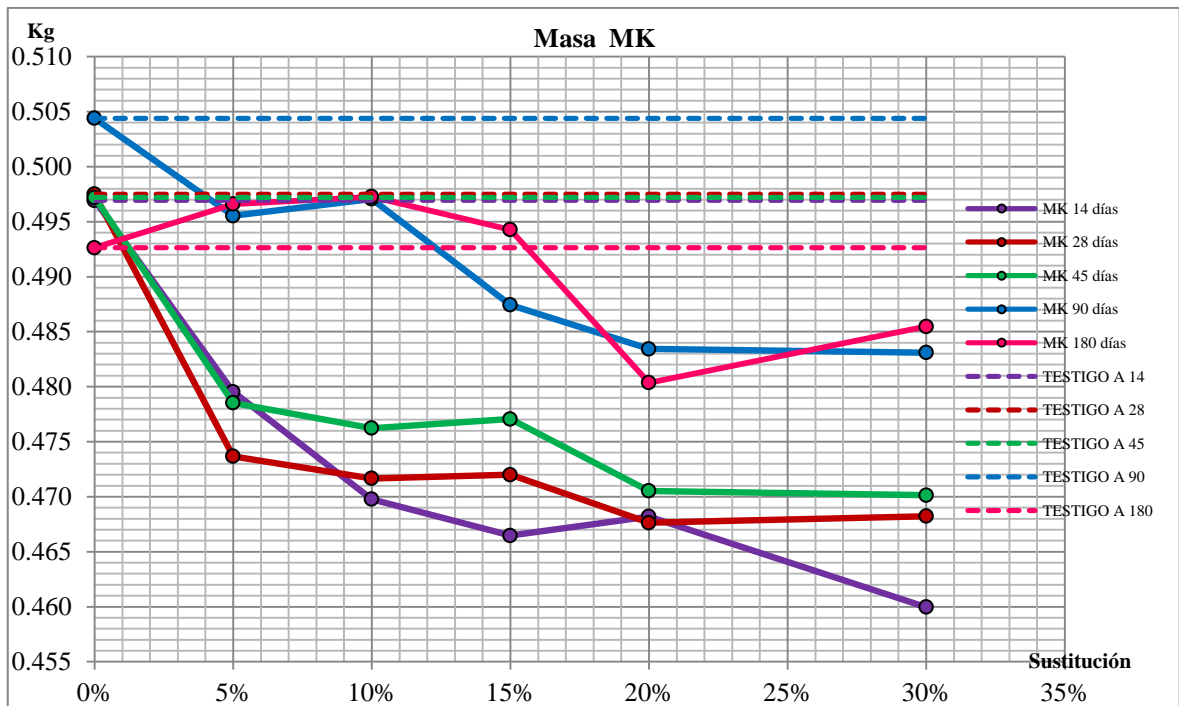
4.1.1.2.1.1. Resistividad



4.1.1.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

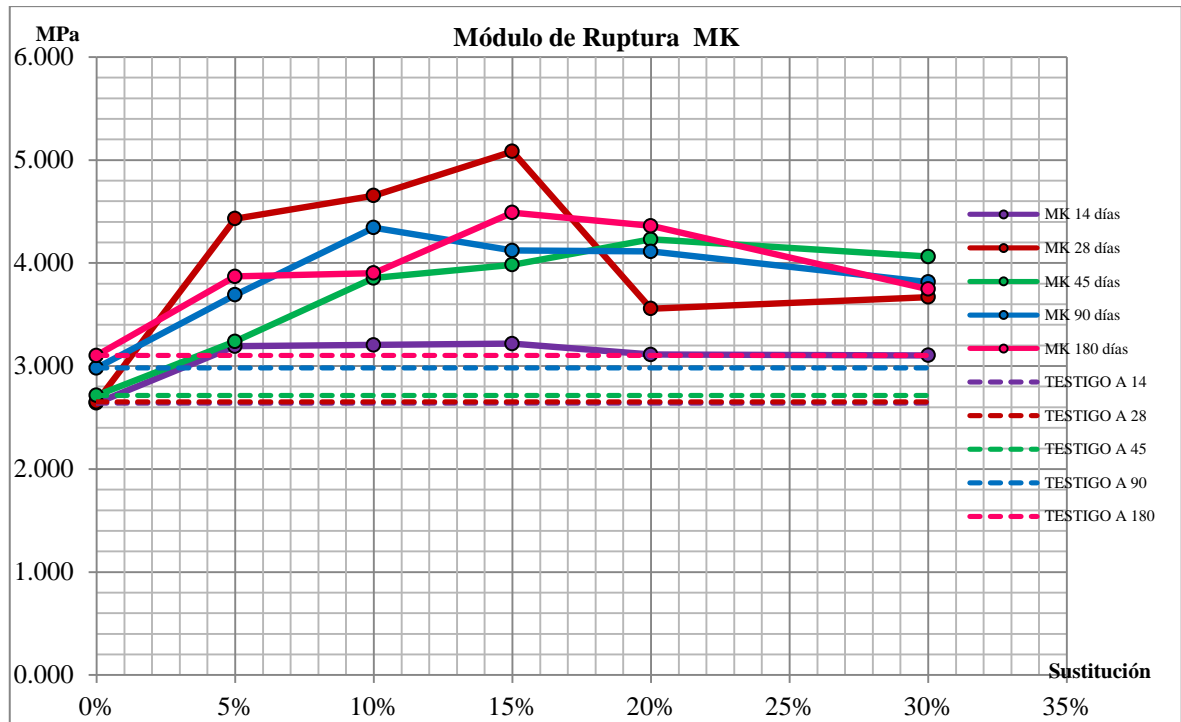


4.1.1.2.1.3. Masa



4.1.1.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.1.2.2.1. Flexión



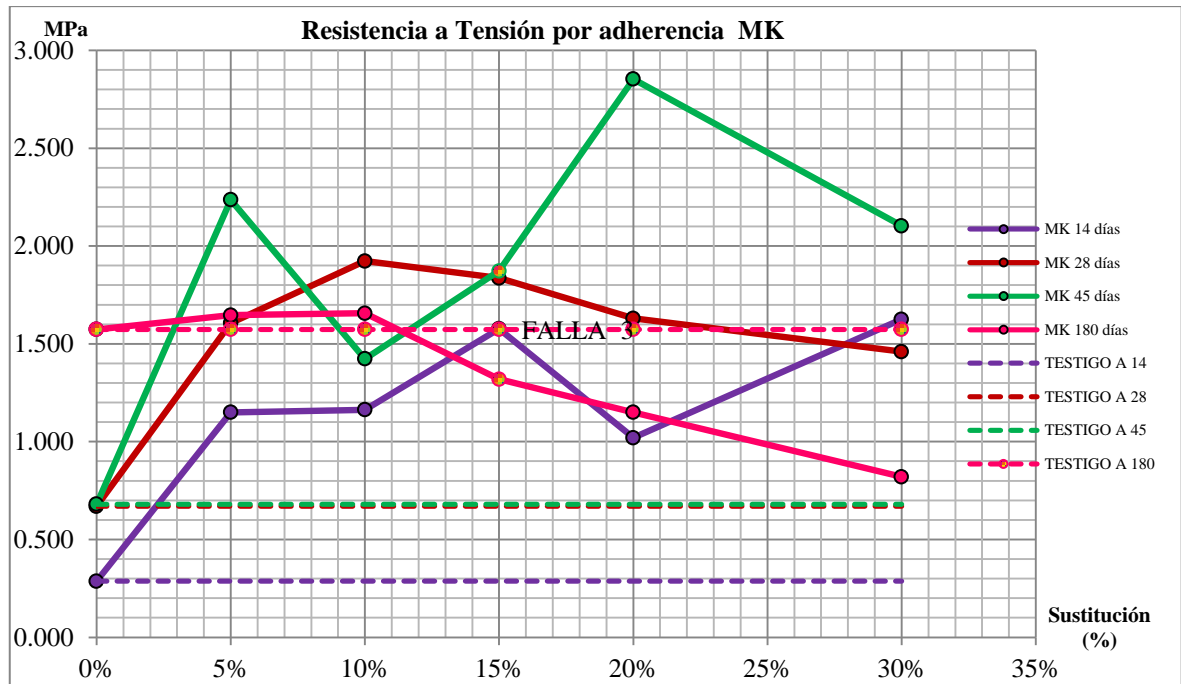
4.1.1.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.1.3.1. Tensión



4.1.1.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.1.4.1. Adherencia

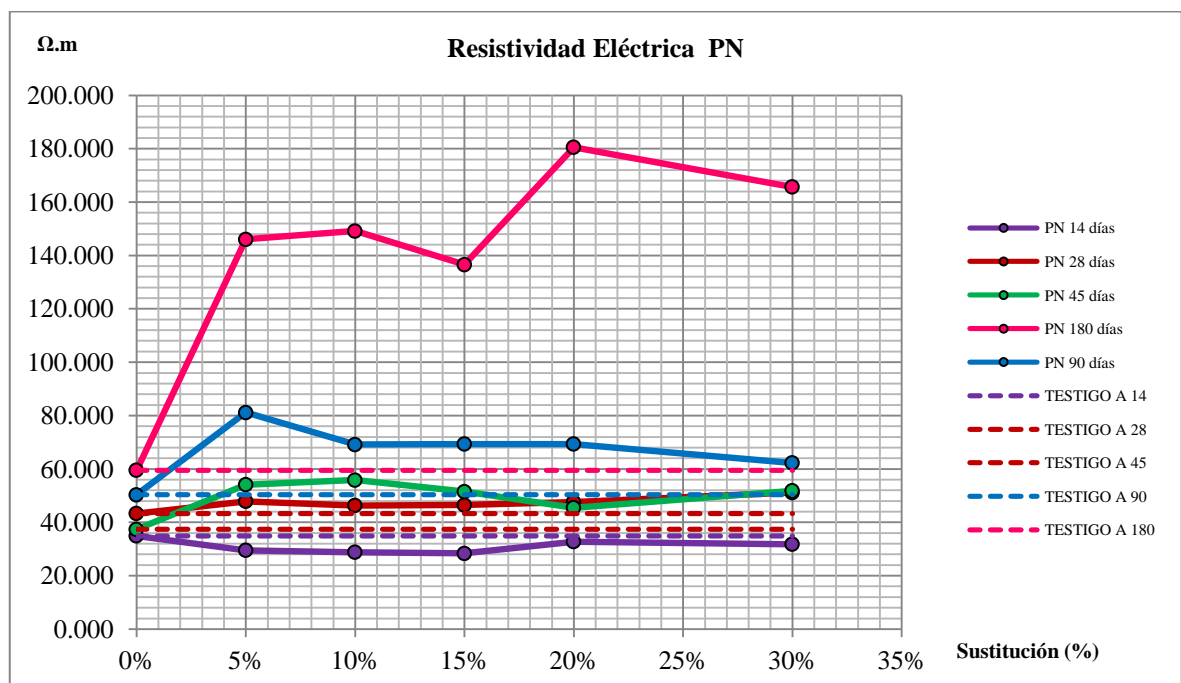


4.1.2. Perlita Natural (PN)

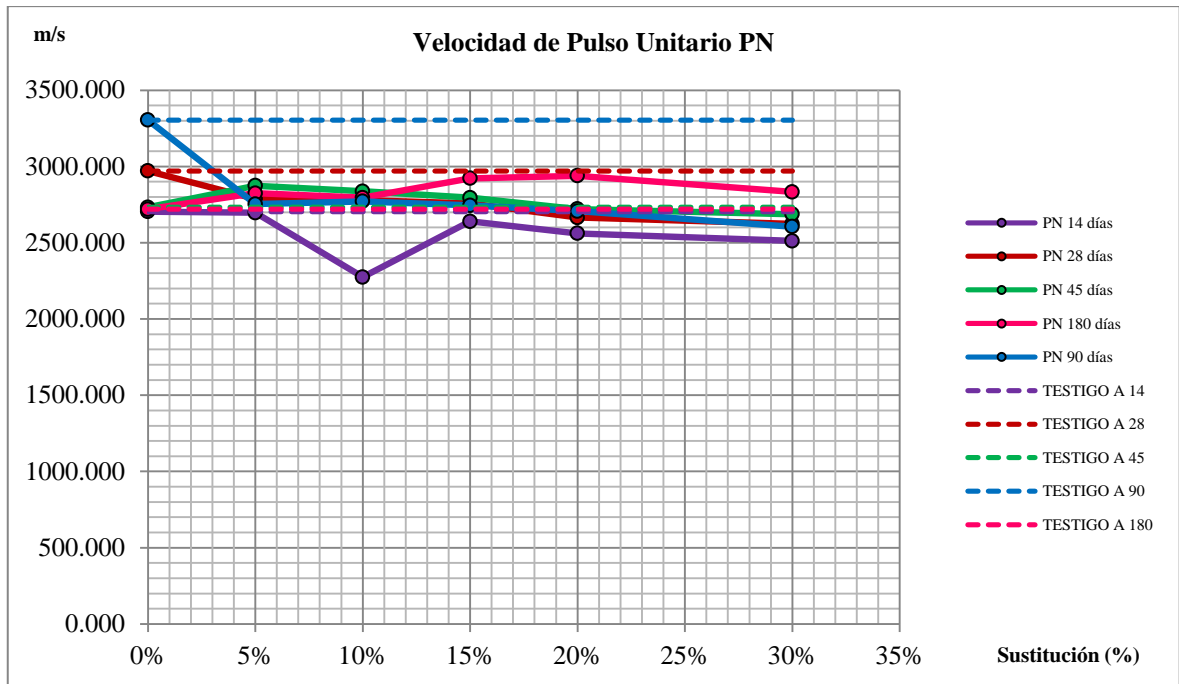
4.1.2.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.2.1.1. Pruebas No destructivas

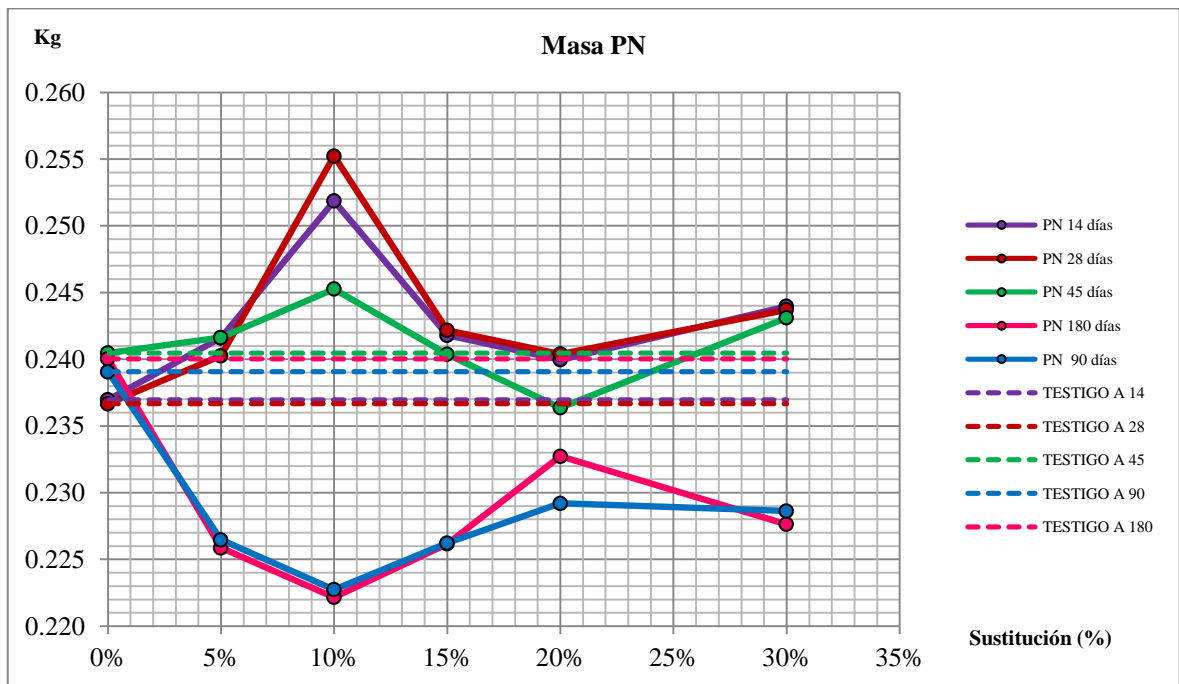
4.1.2.1.1.1. Resistividad



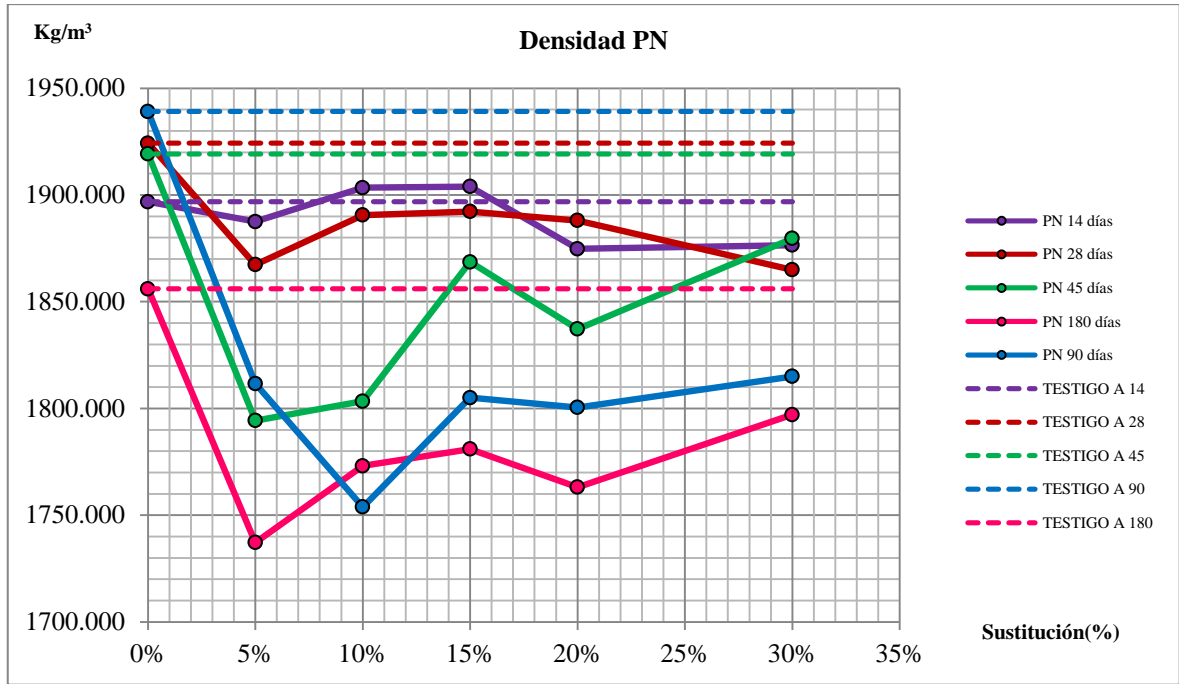
4.1.2.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



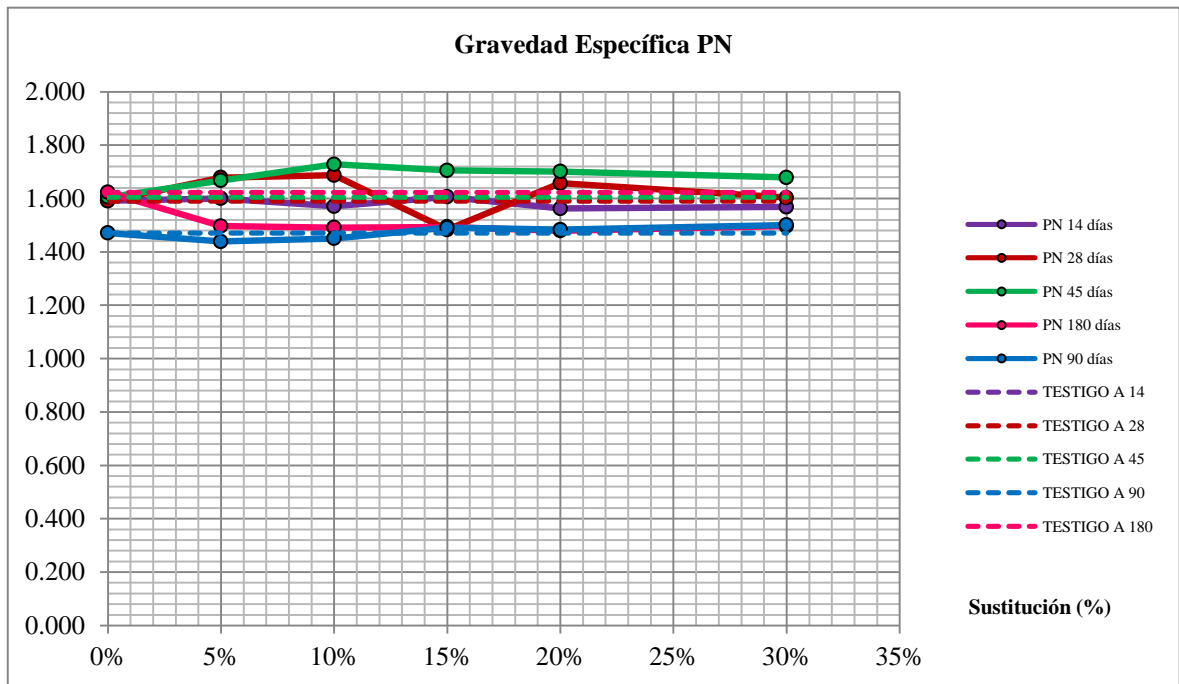
4.1.2.1.1.3. Masa



4.1.2.1.1.4. Densidad

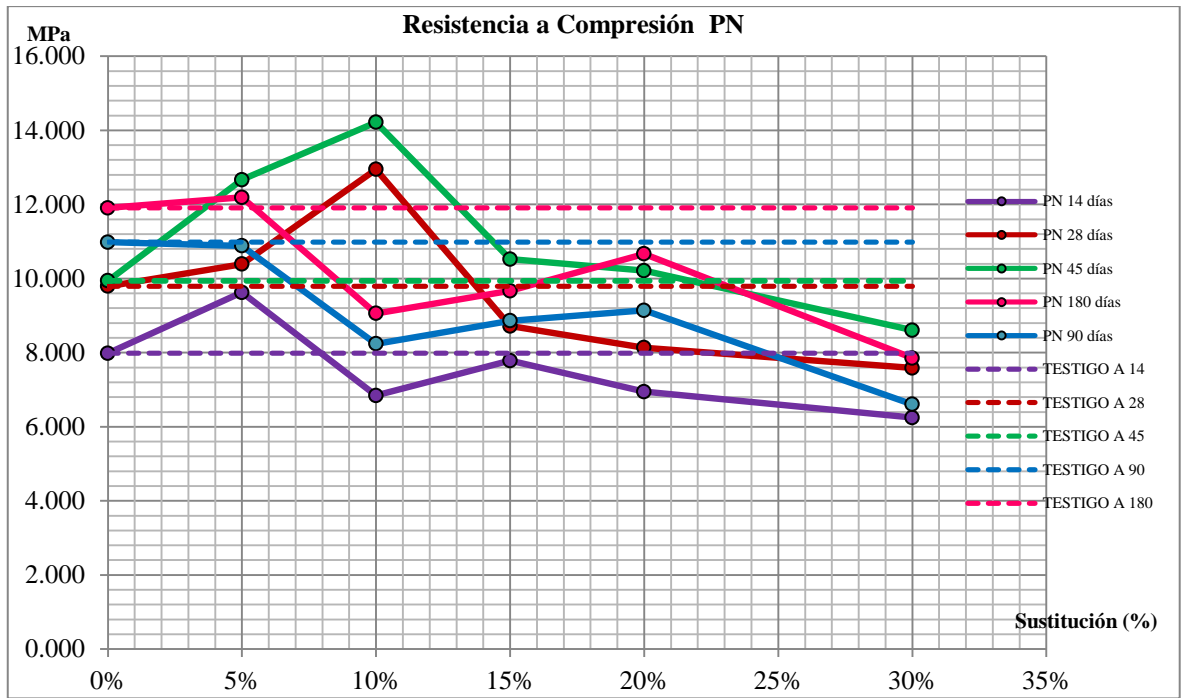


4.1.2.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.2.1.2. Pruebas Destructivas

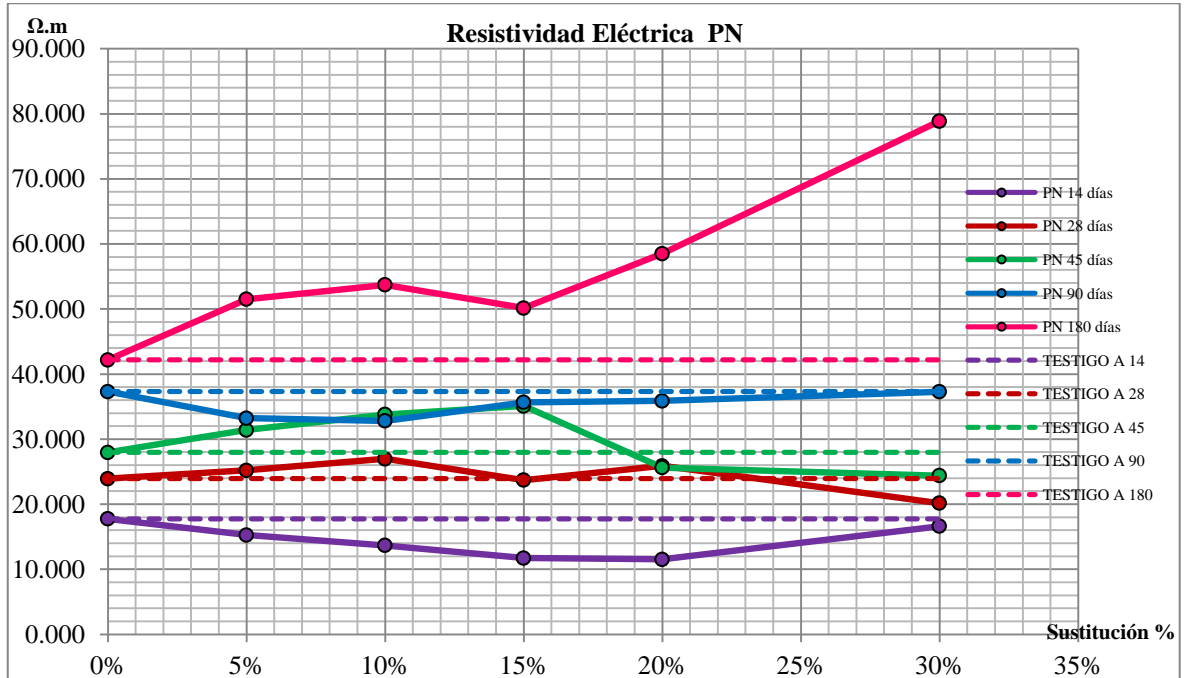
4.1.2.1.2.1. Compresión Simple



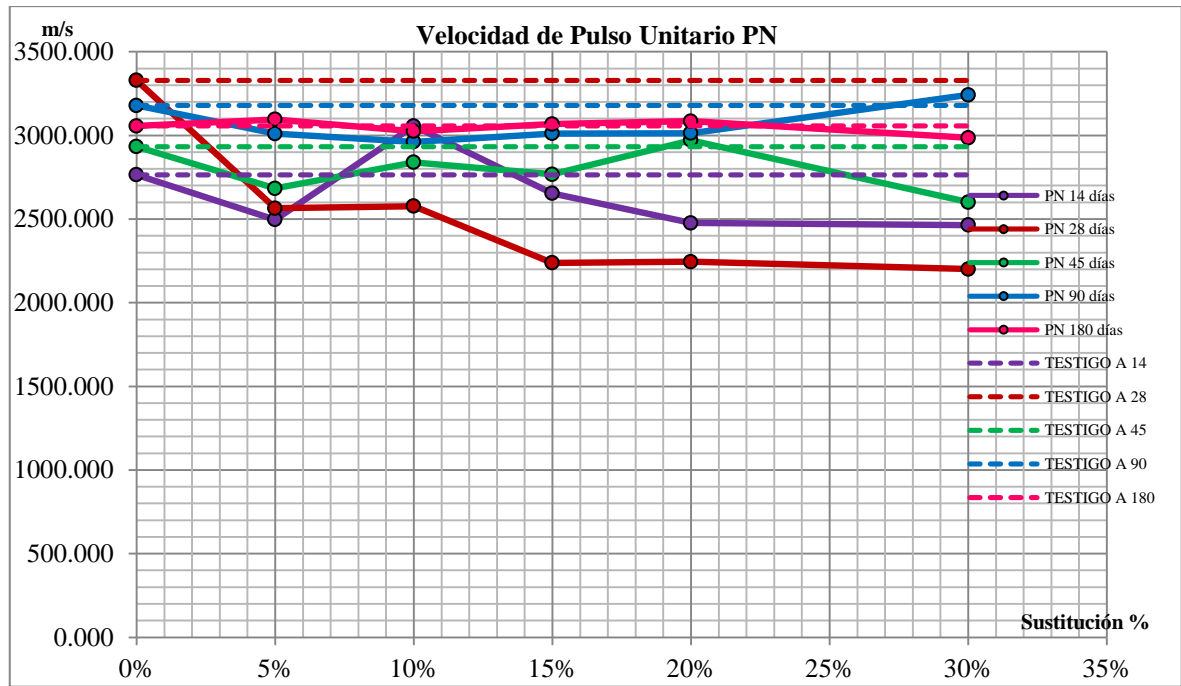
4.1.2.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.2.2.1. Pruebas No destructivas

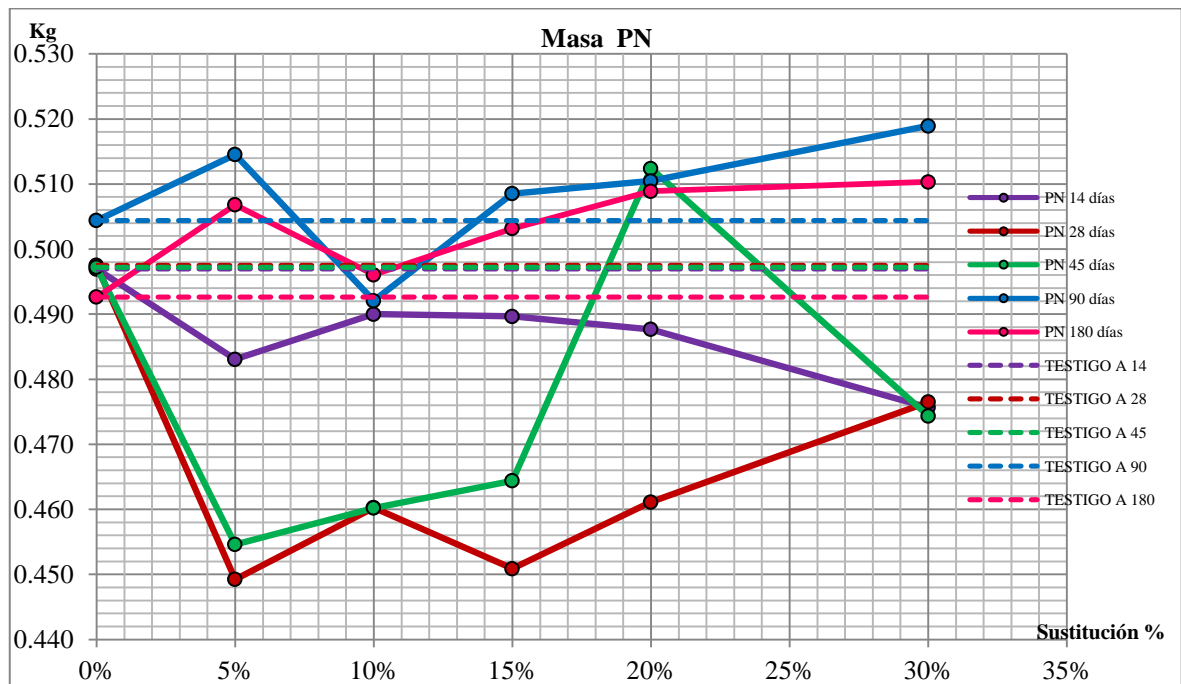
4.1.2.2.1.1. Resistividad



4.1.2.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

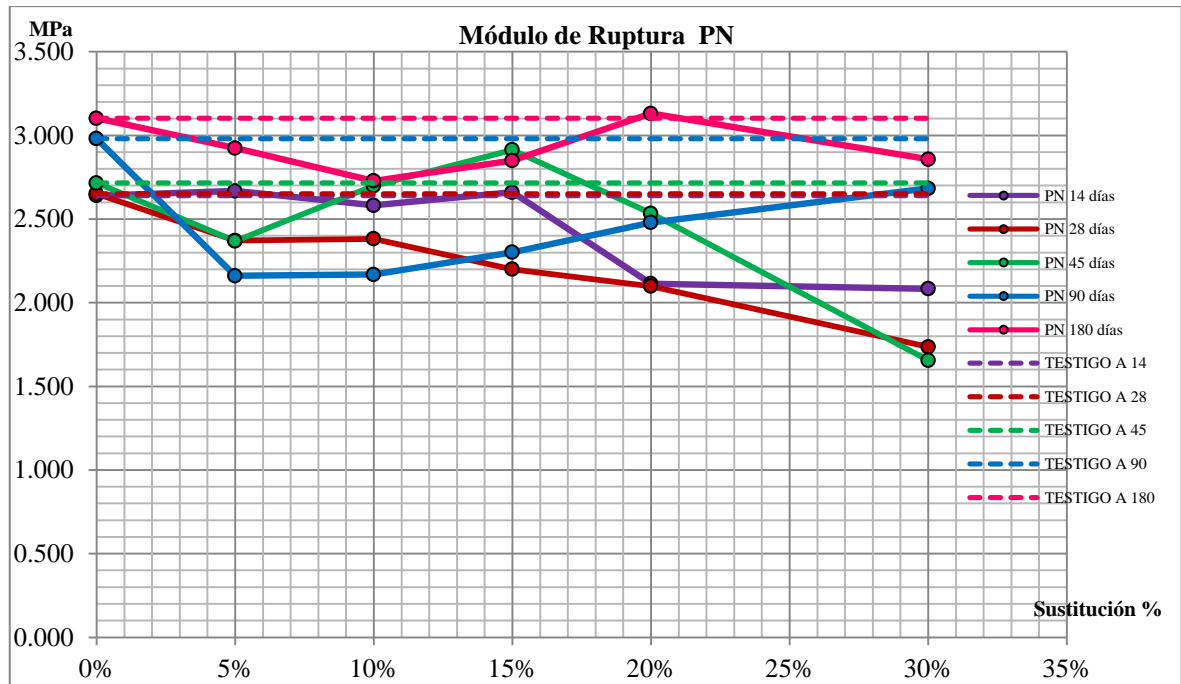


4.1.2.2.1.3. Masa



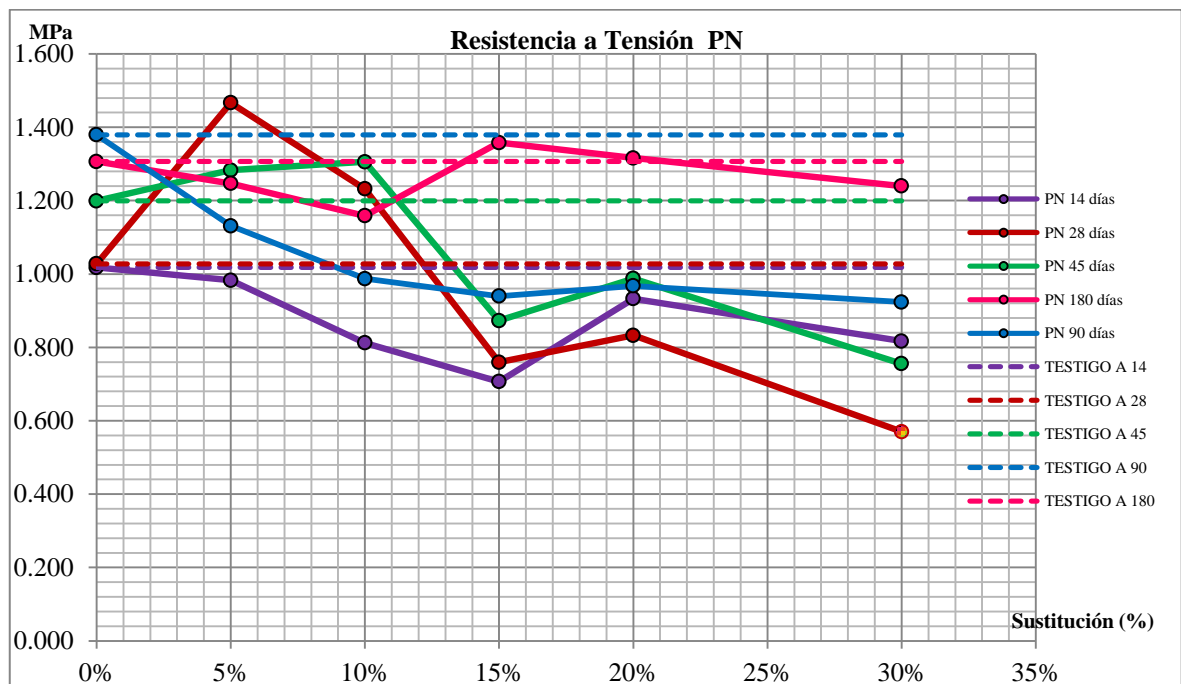
4.1.2.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.2.2.2.1. Flexión



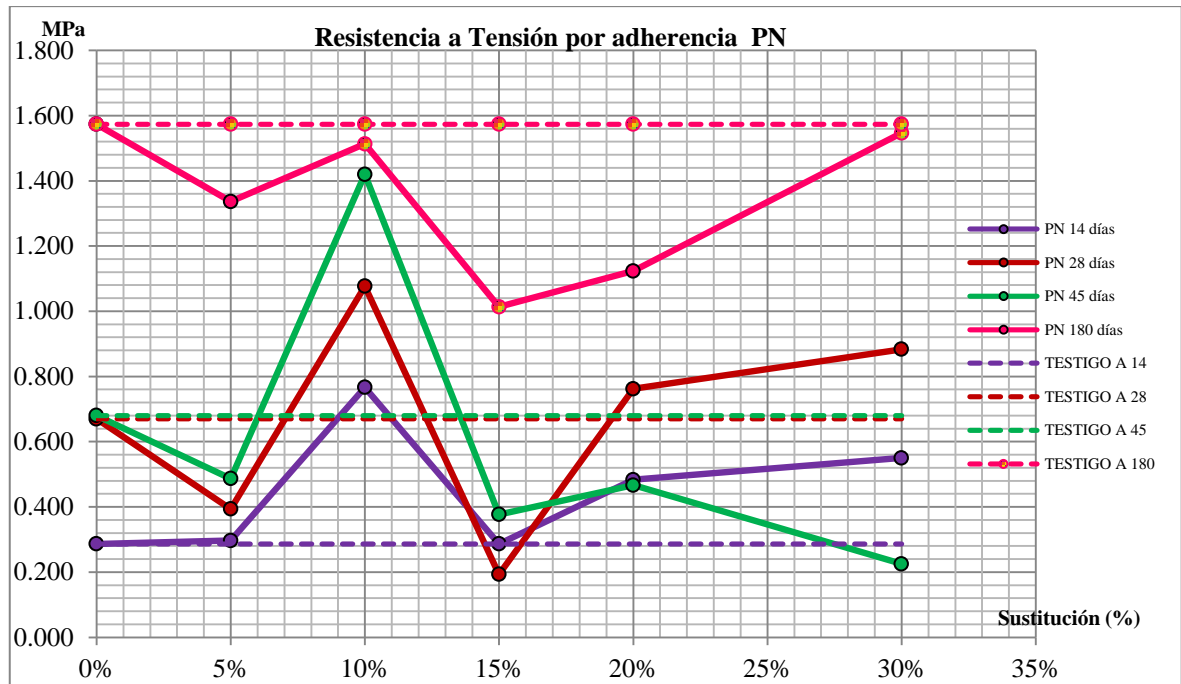
4.1.2.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.2.3.1. Tensión



4.1.2.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.2.4.1. Adherencia

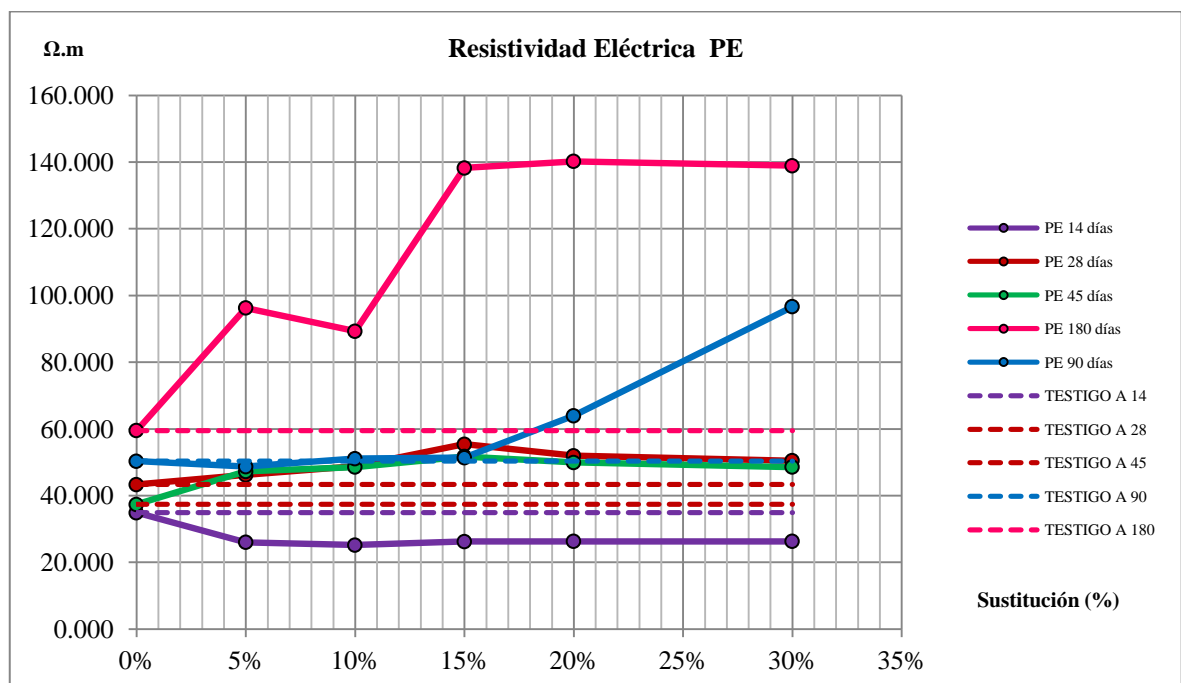


4.1.3. Perlita Expandida (PE)

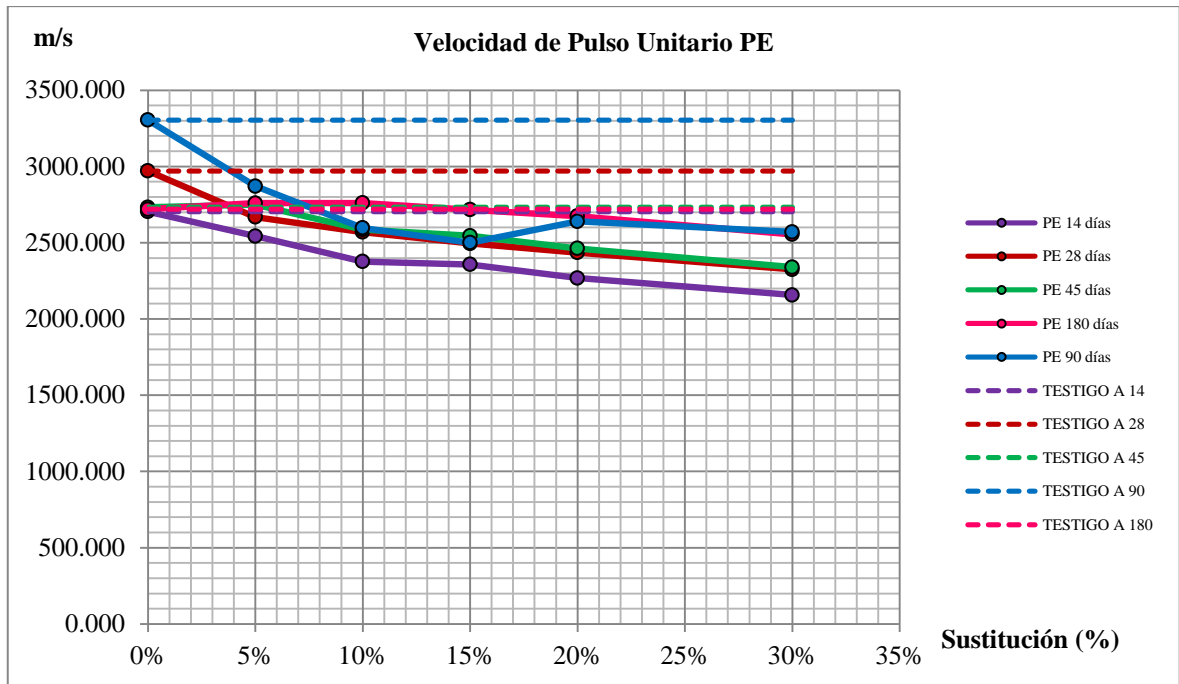
4.1.3.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.3.1.1. Pruebas No destructivas

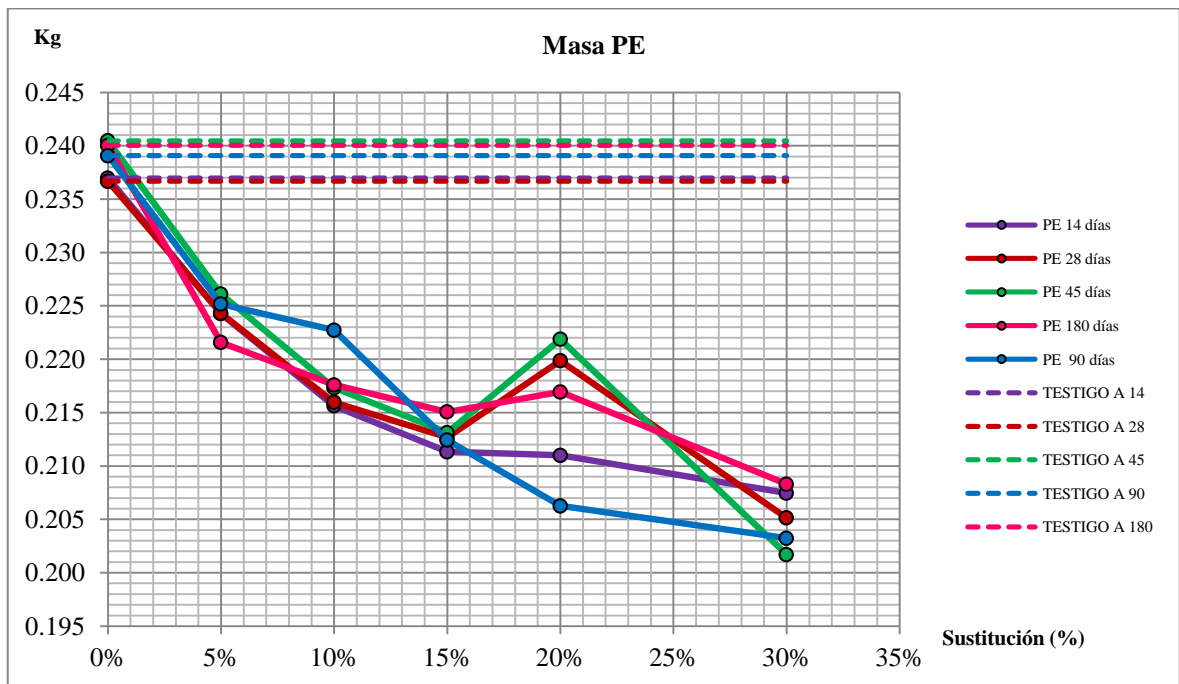
4.1.3.1.1.1. Resistividad



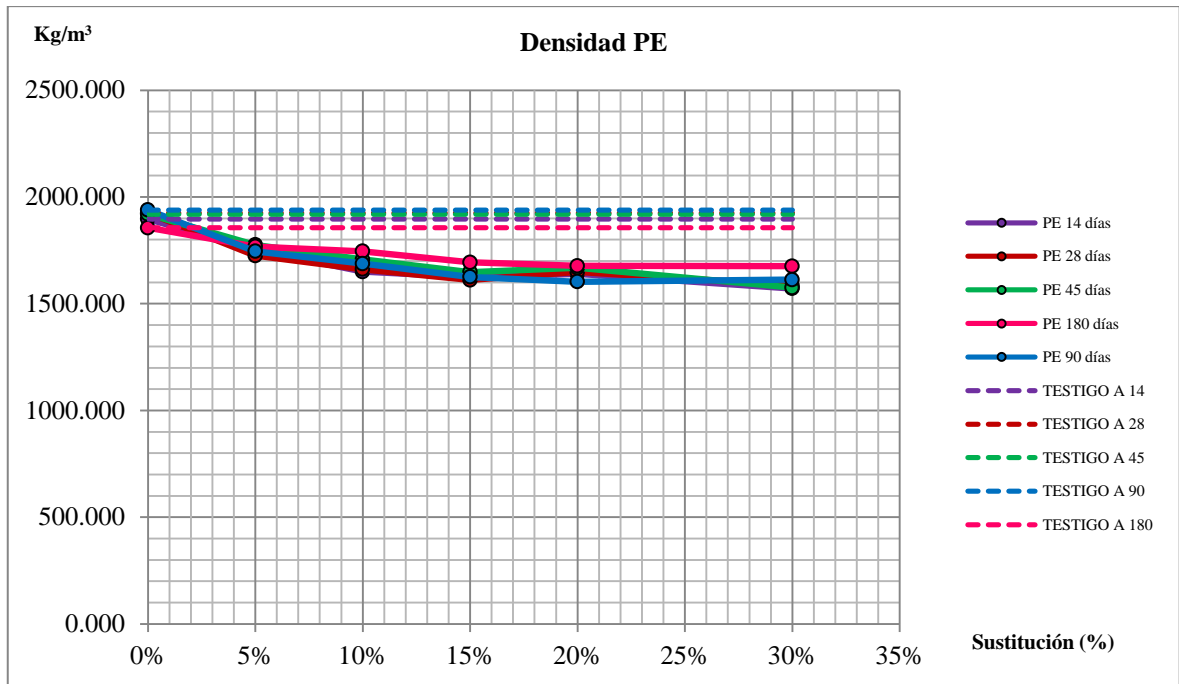
4.1.3.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



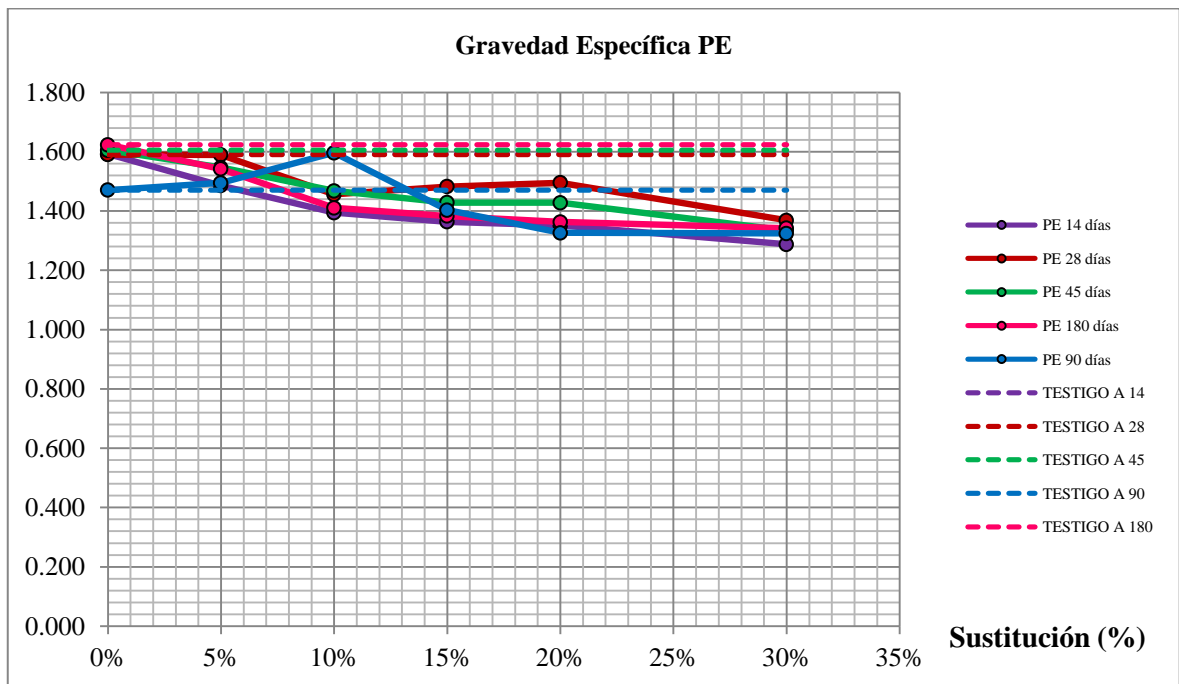
4.1.3.1.1.3. Masa



4.1.3.1.1.4. Densidad

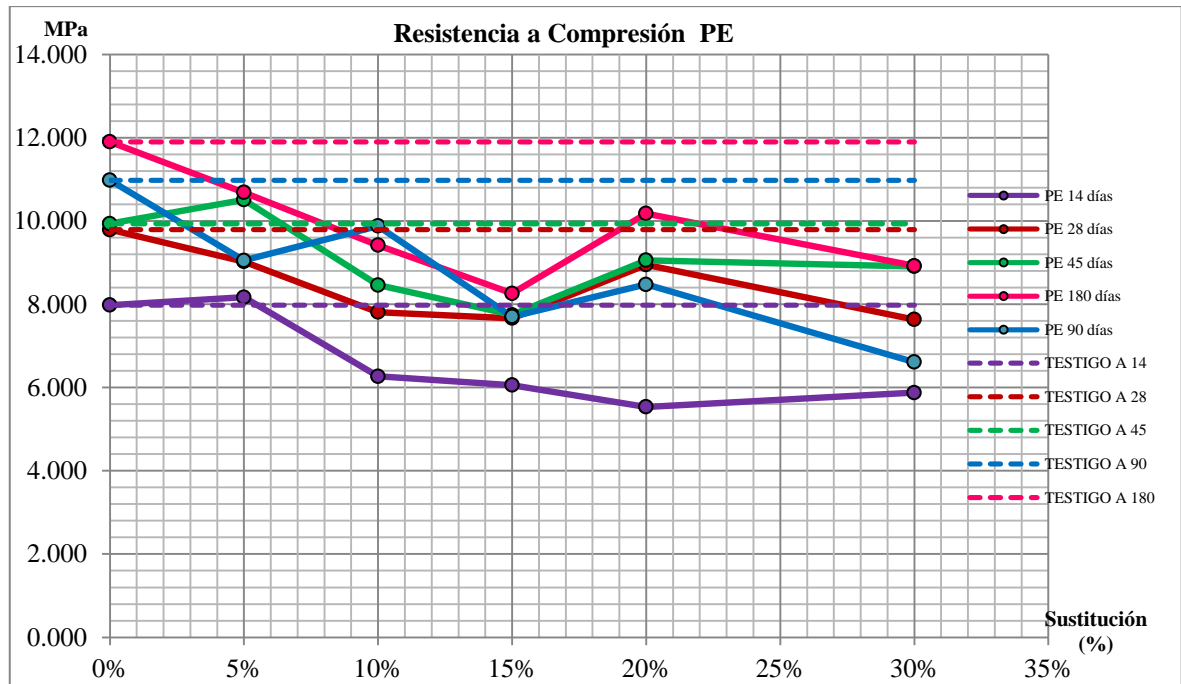


4.1.3.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.3.1.2. Pruebas Destructivas

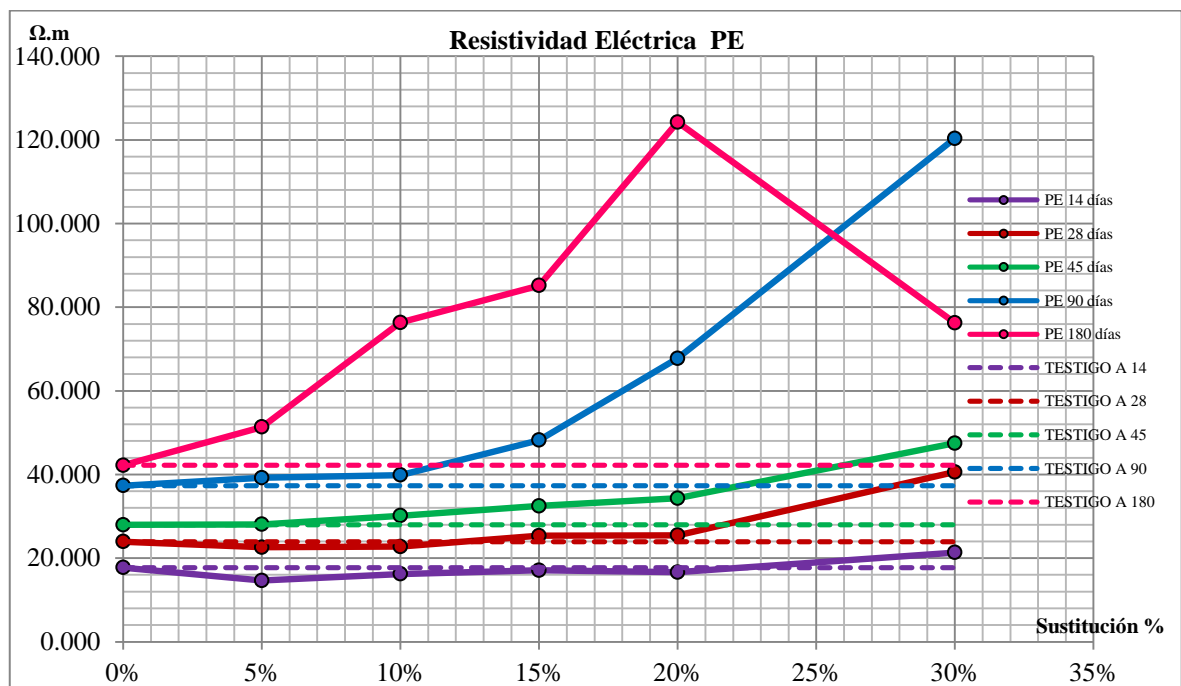
4.1.3.1.2.1. Compresión Simple



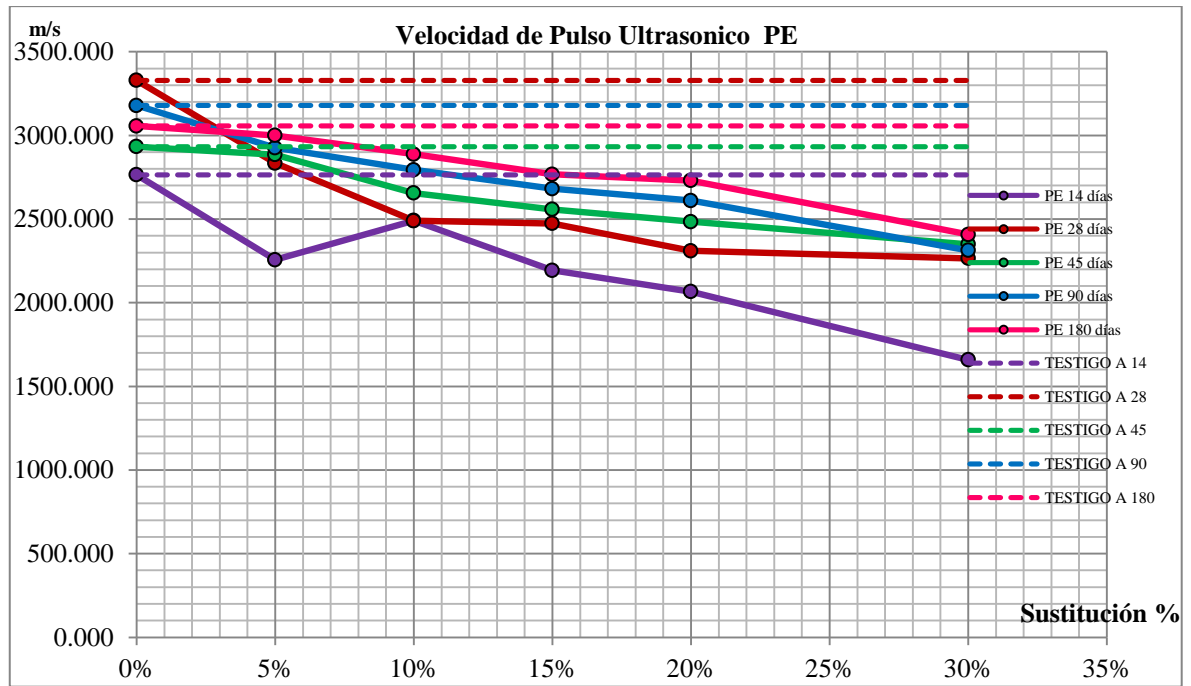
4.1.3.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.3.2.1. Pruebas No destructivas

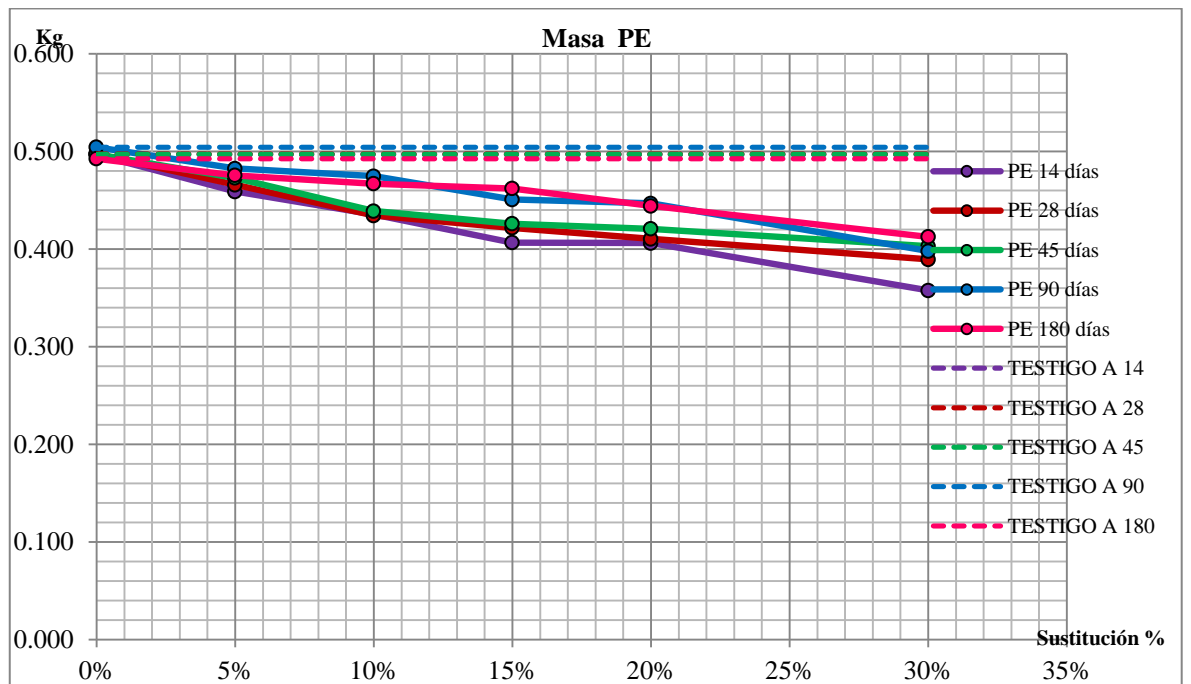
4.1.3.2.1.1. Resistividad



4.1.3.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

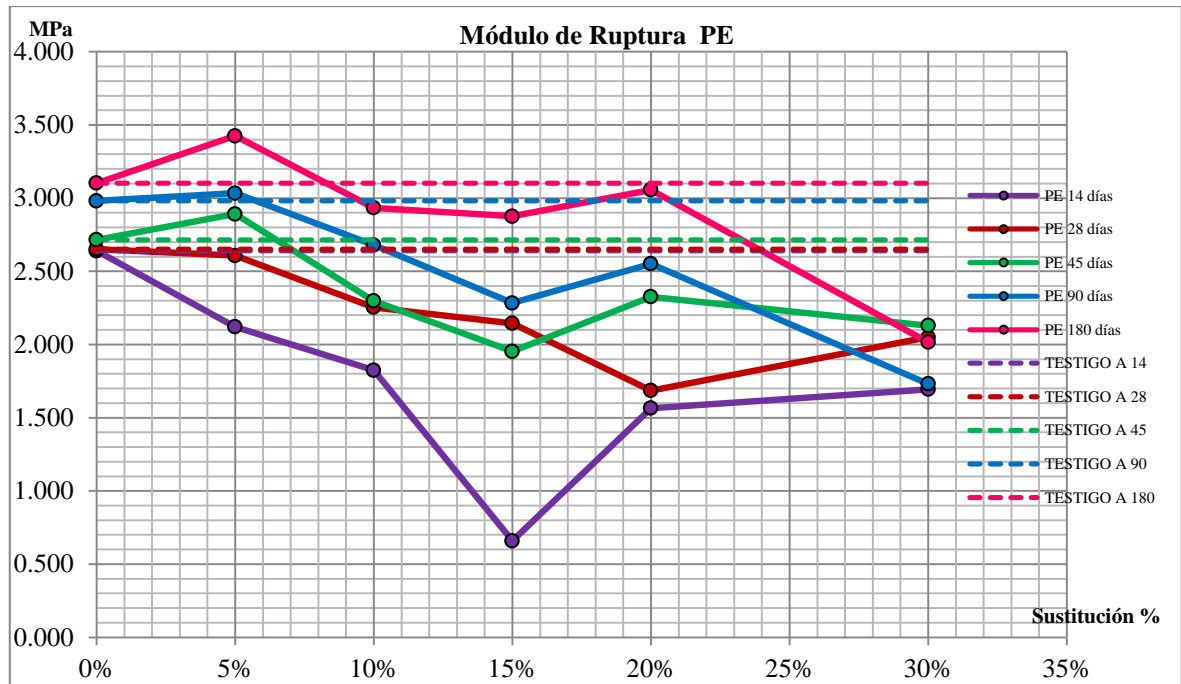


4.1.3.2.1.3. Masa



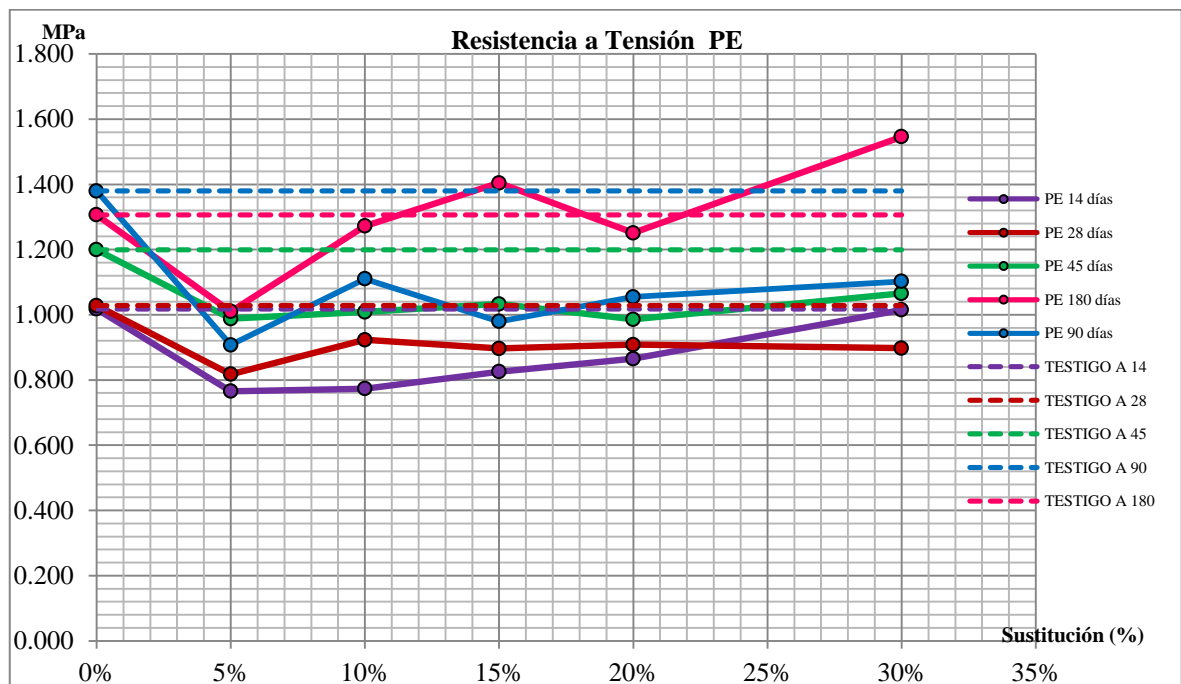
4.1.3.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.3.2.2.1. Flexión



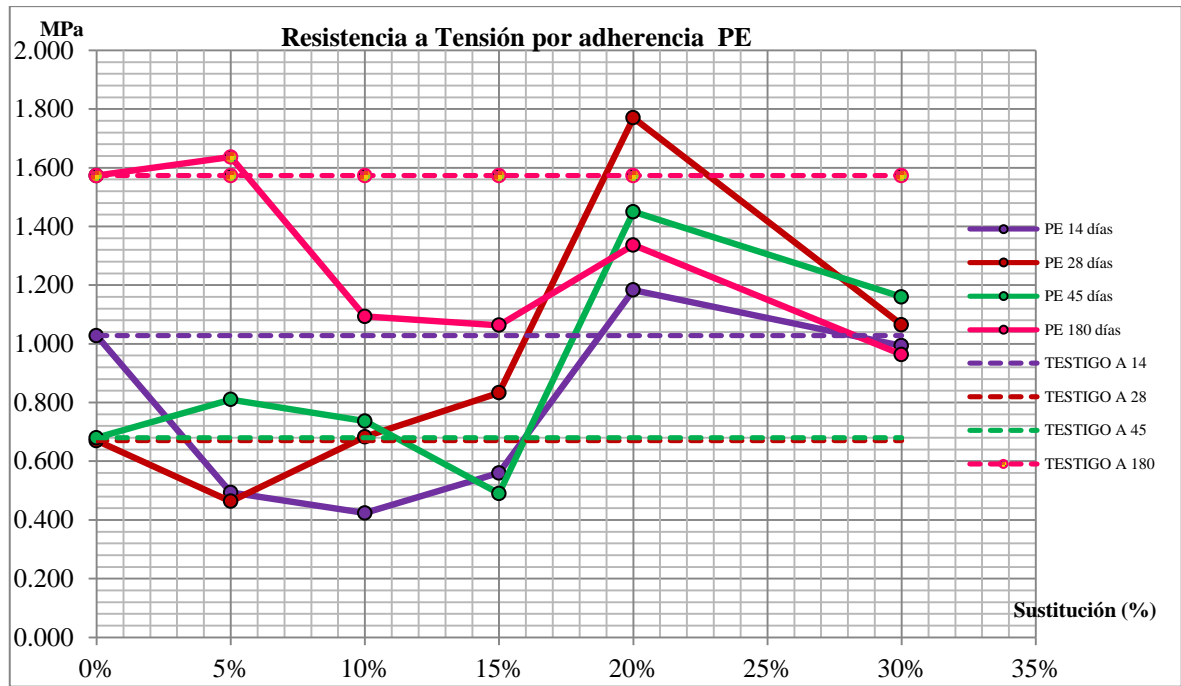
4.1.3.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.3.3.1. Tensión



4.1.3.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.3.4.1. Adherencia

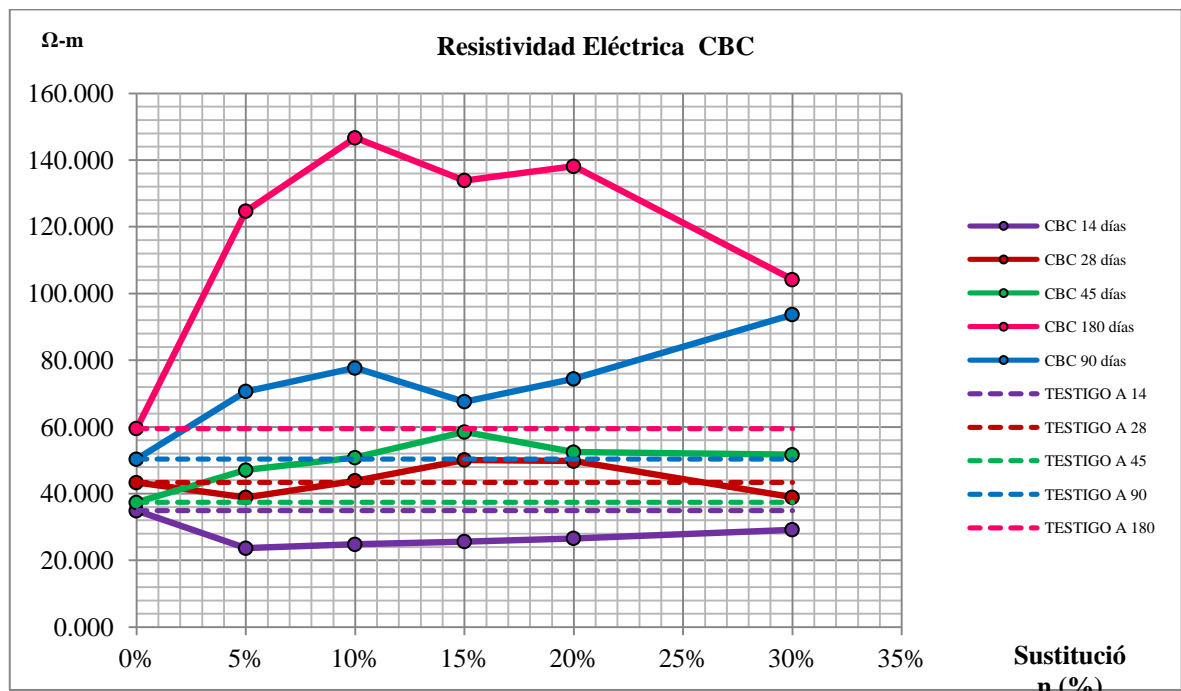


4.1.4. Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)

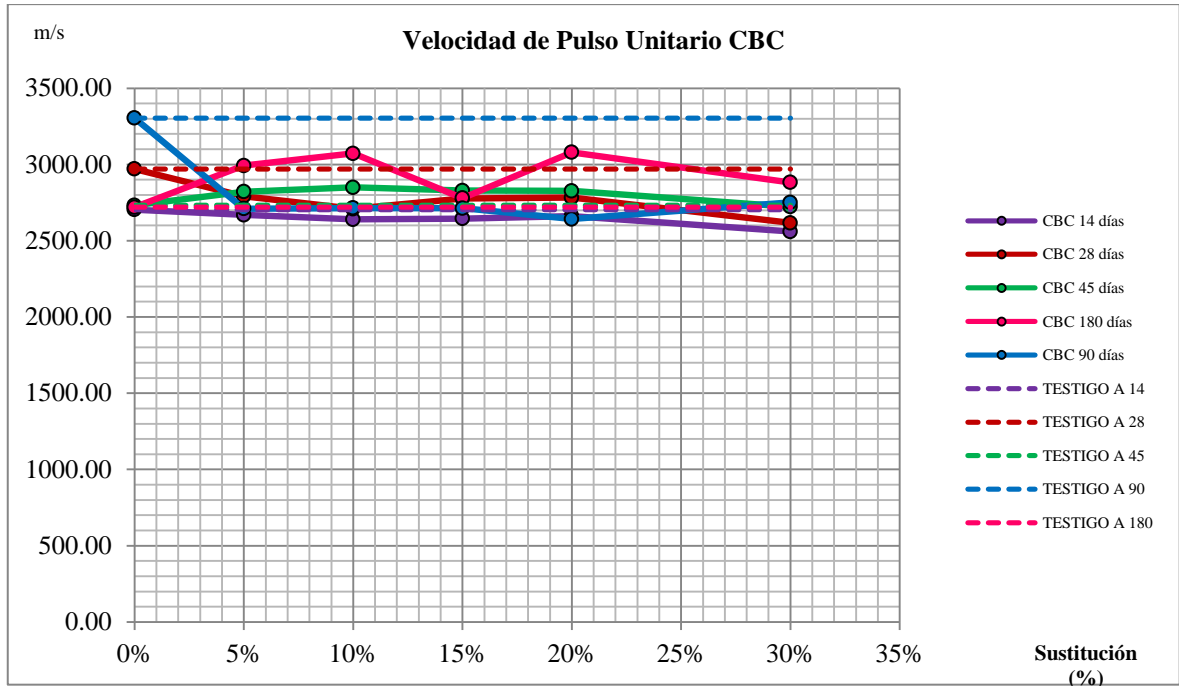
4.1.4.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.4.1.1. Pruebas No destructivas

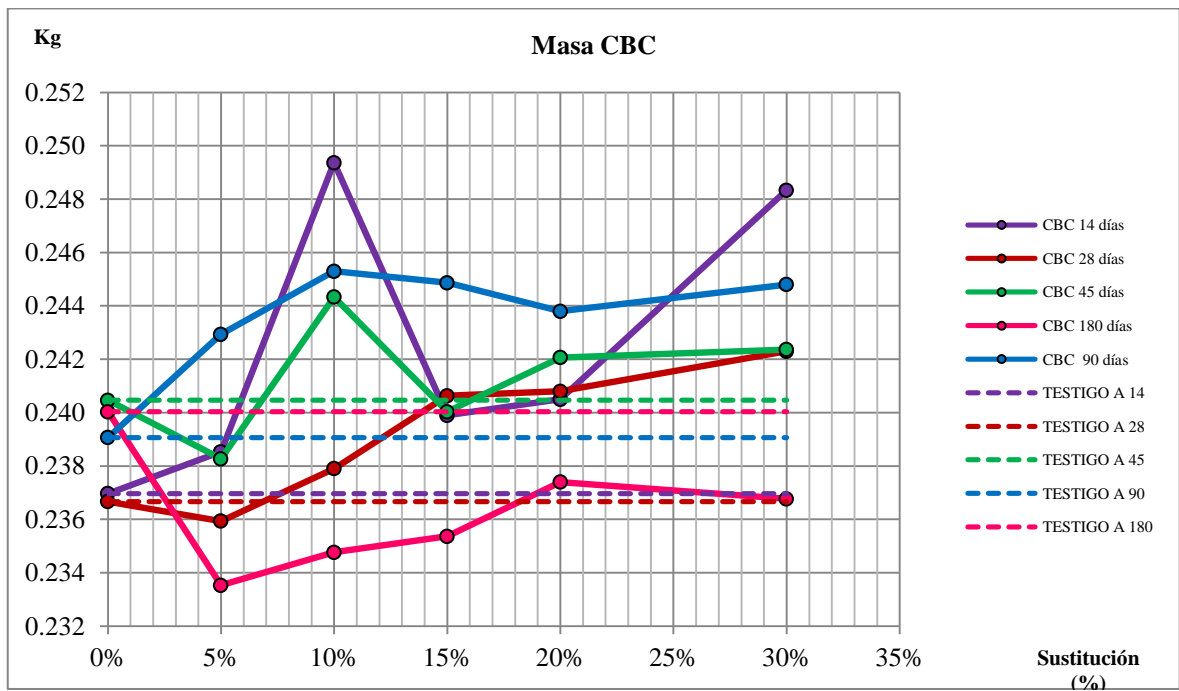
4.1.4.1.1.1. Resistividad



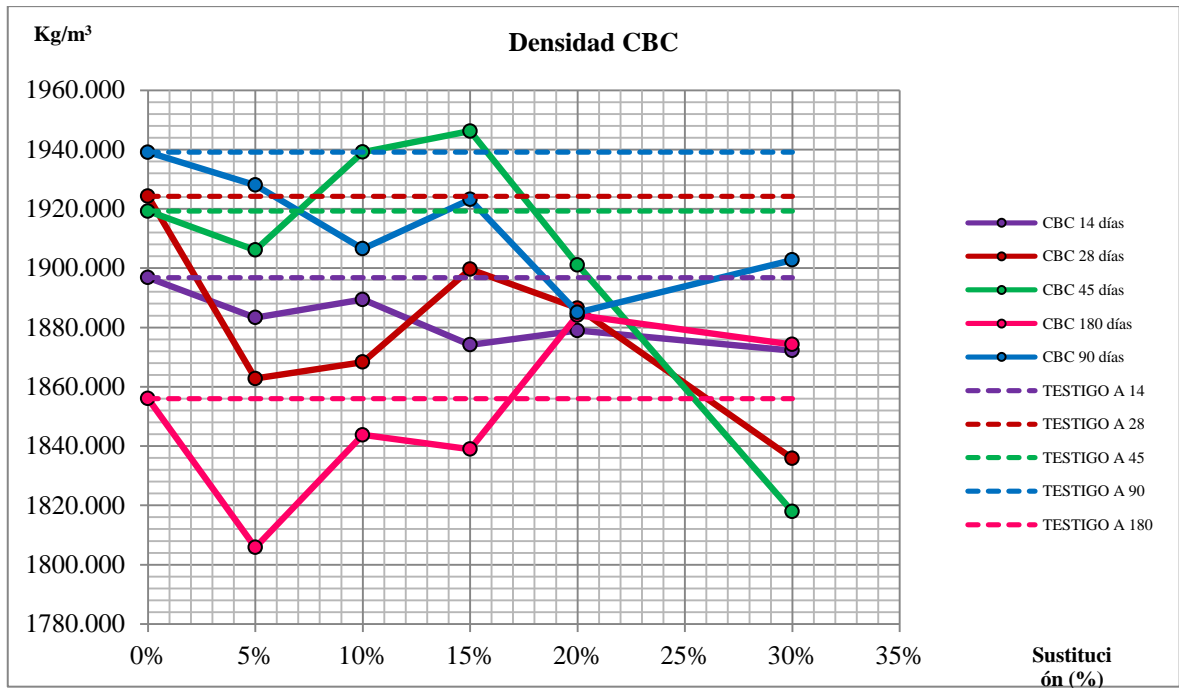
4.1.4.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



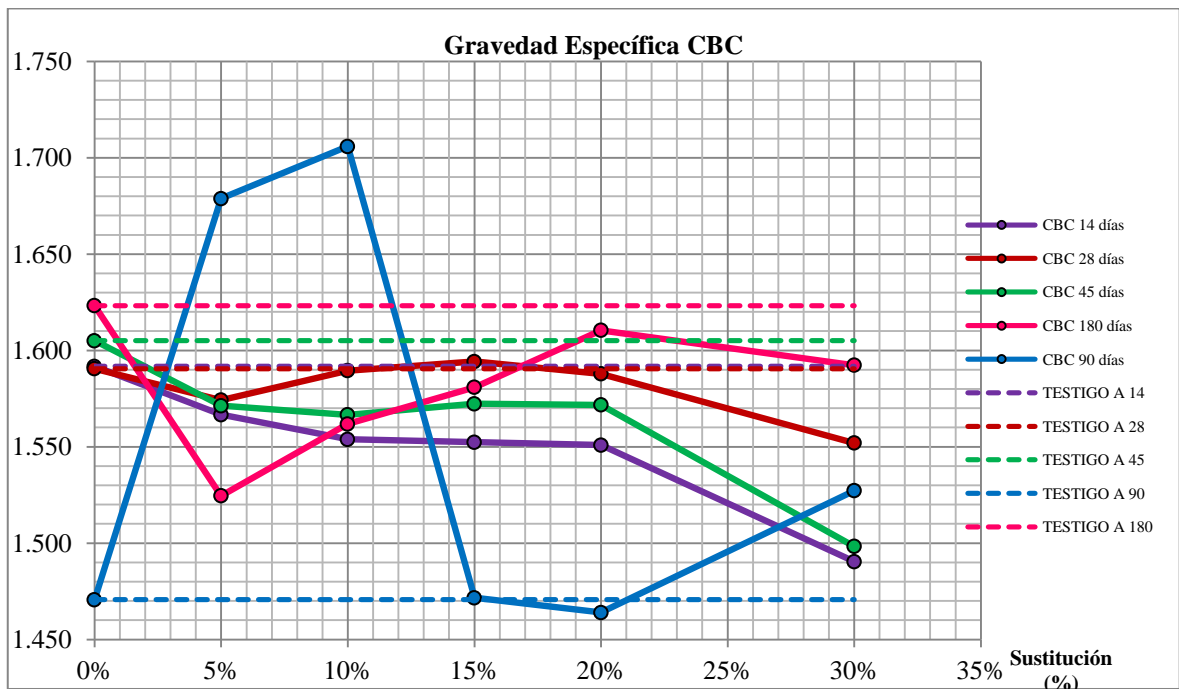
4.1.4.1.1.3. Masa



4.1.4.1.1.4. Densidad

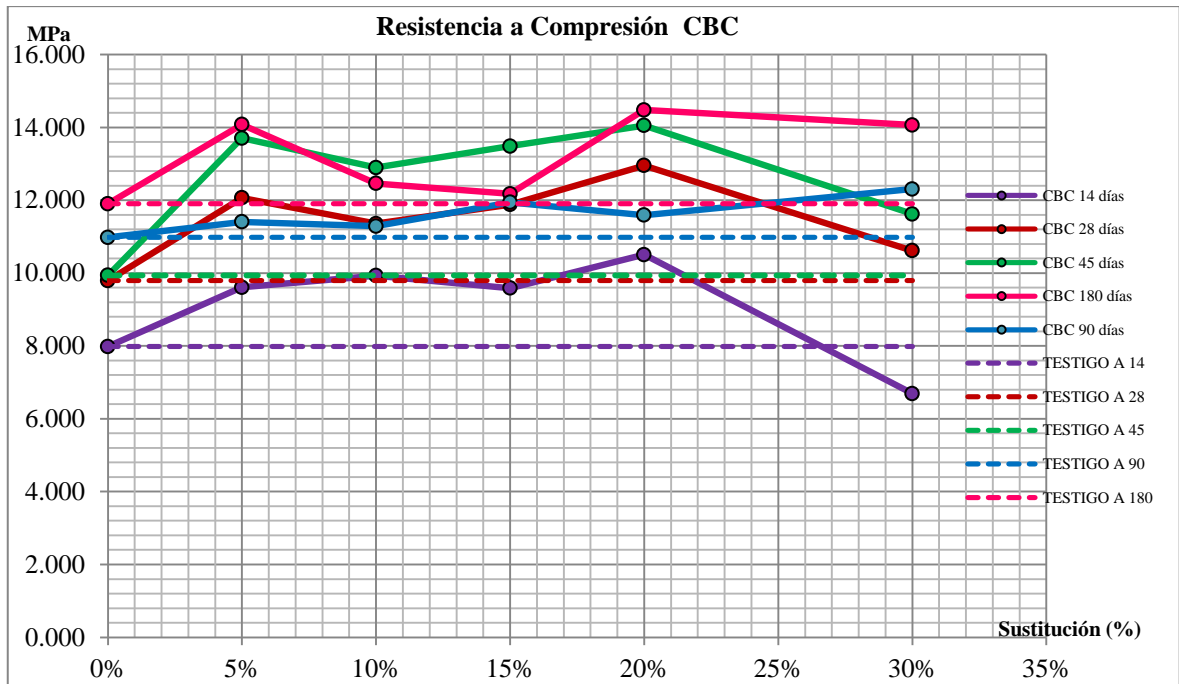


4.1.4.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.4.1.2. Pruebas Destructivas

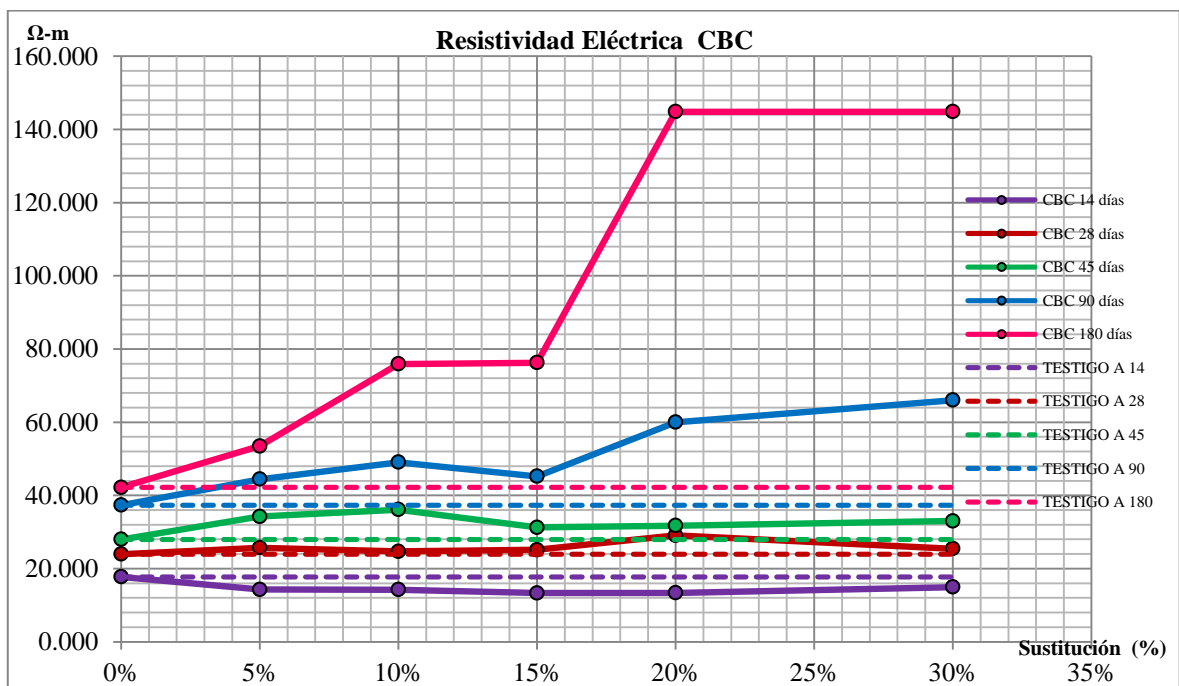
4.1.4.1.2.1. Compresión Simple



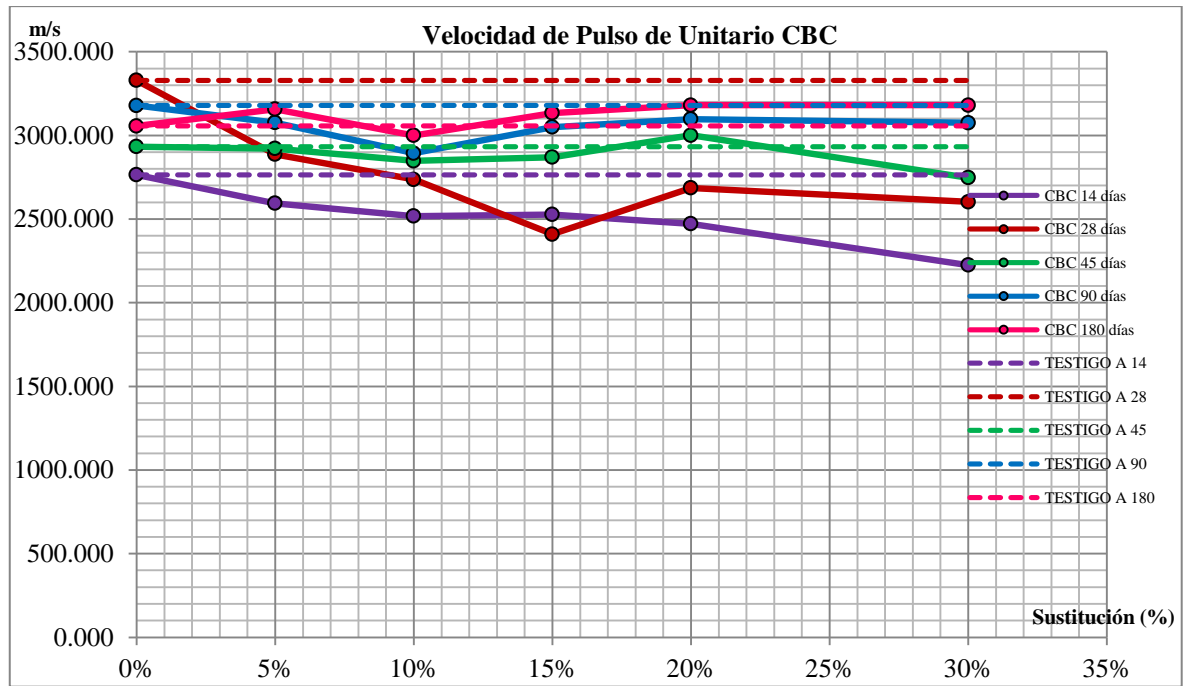
4.1.4.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.4.2.1. Pruebas No destructivas

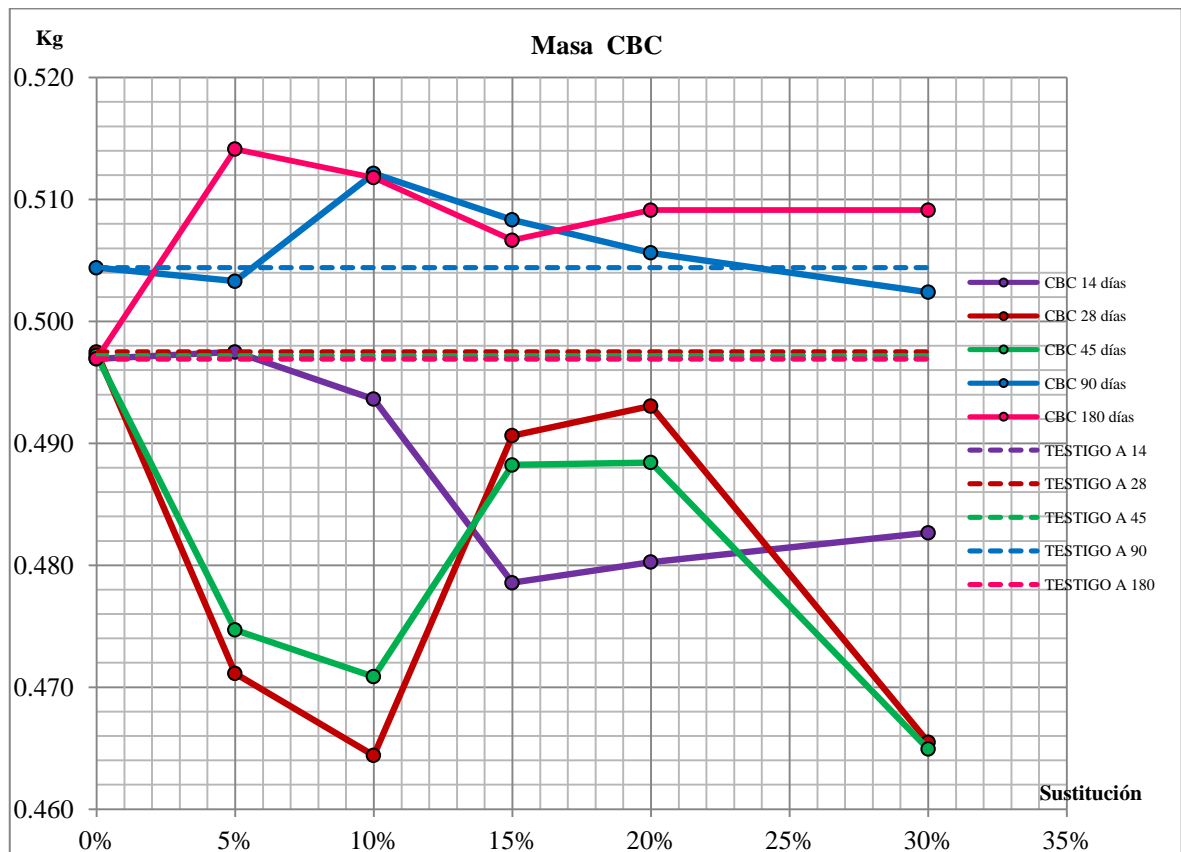
4.1.4.2.1.1. Resistividad



4.1.4.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

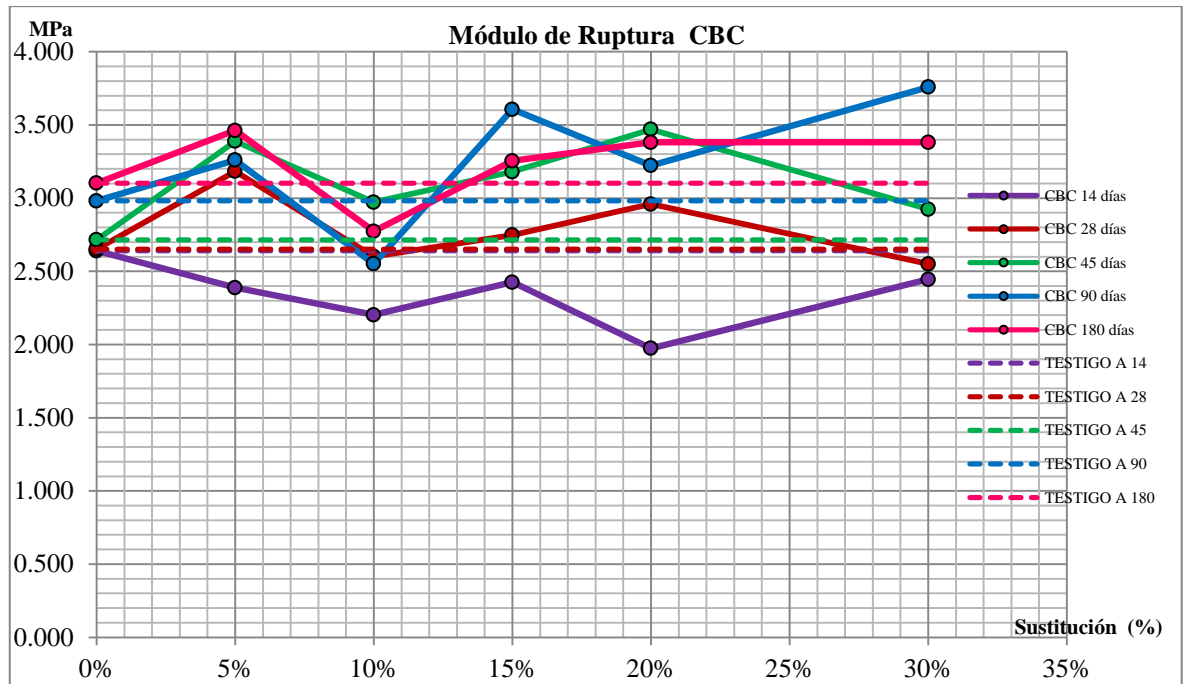


4.1.4.2.1.3. Masa



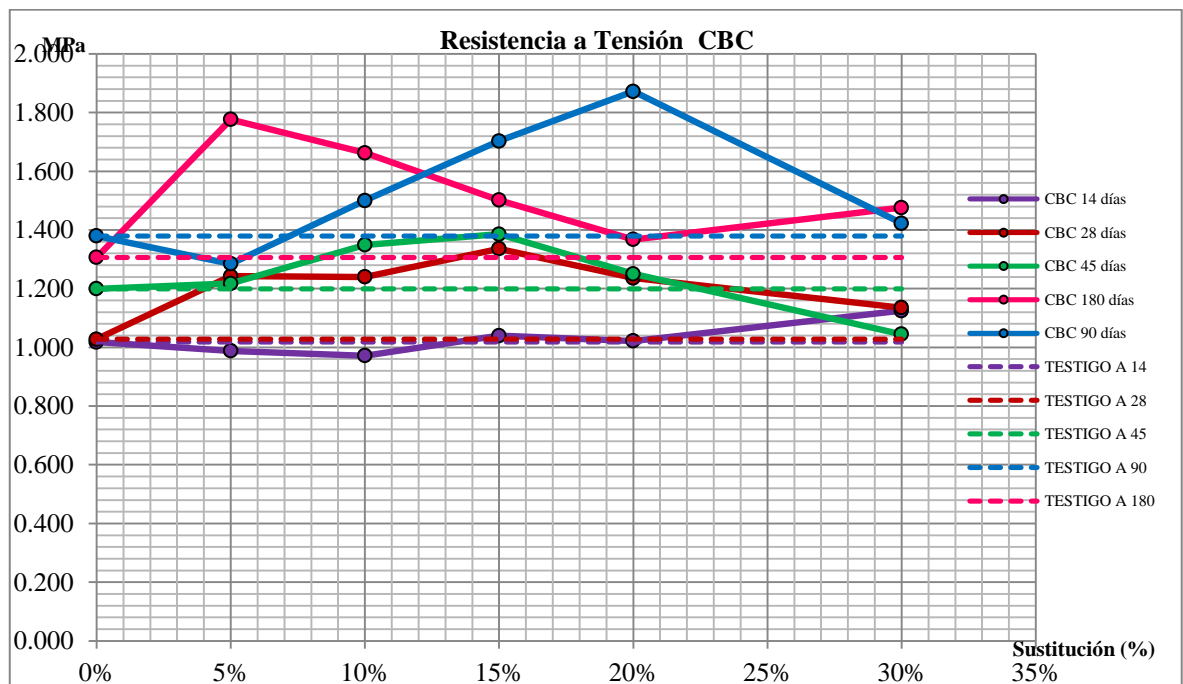
4.1.4.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.4.2.2.1. Flexión



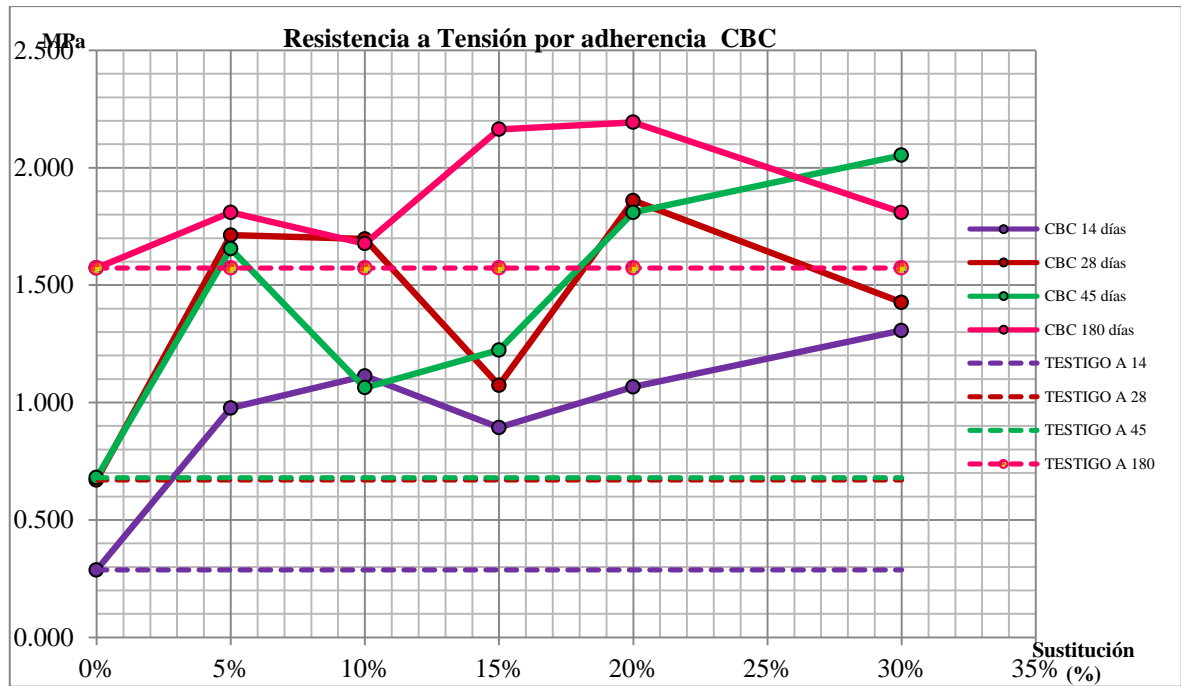
4.1.4.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.4.3.1. Tensión



4.1.4.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.4.4.1. Adherencia

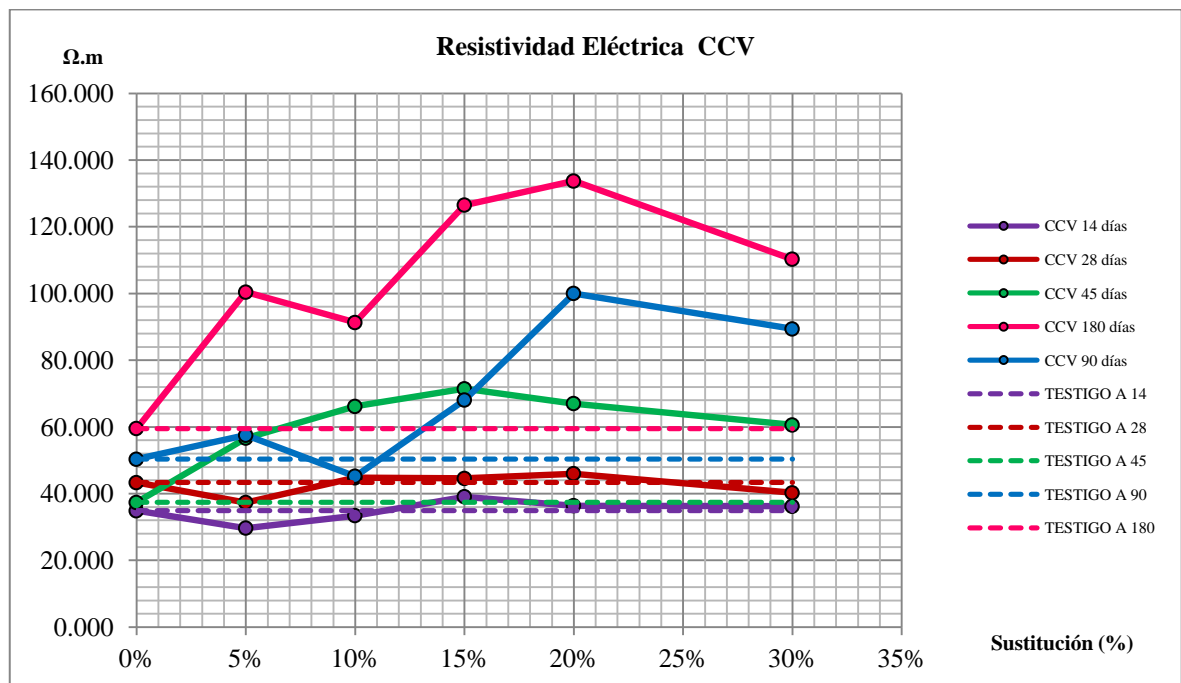


4.1.5. Ceniza de Carbón Vegetal (CCV)

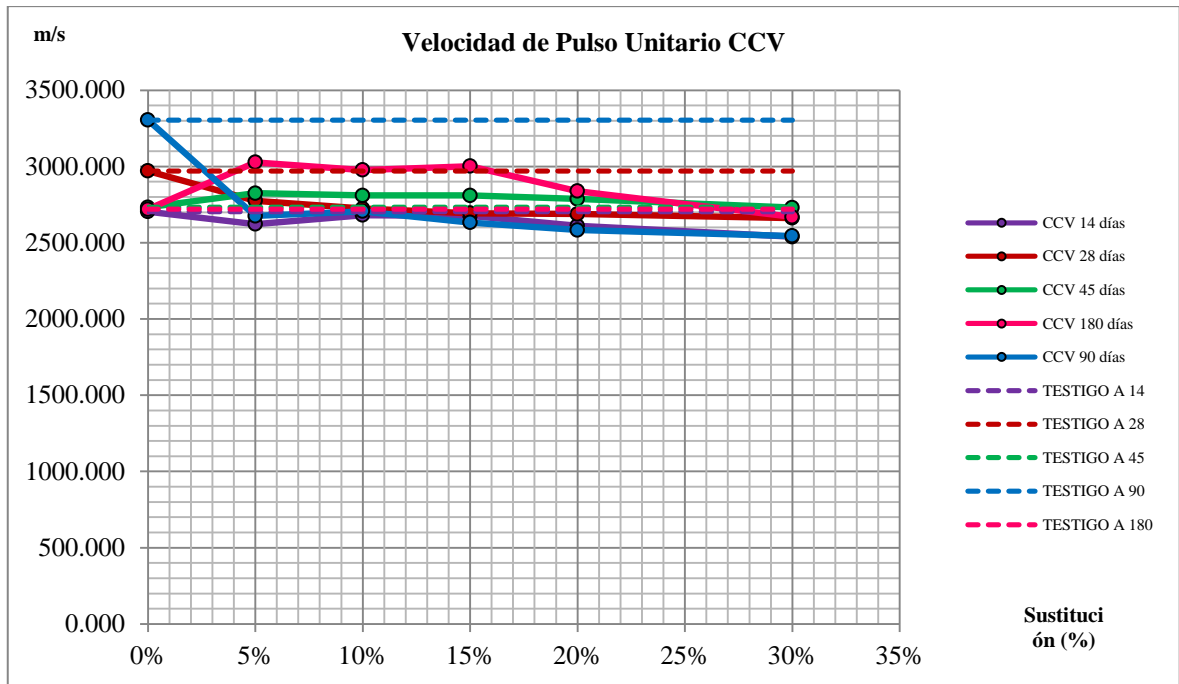
4.1.5.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.5.1.1. Pruebas No destructivas

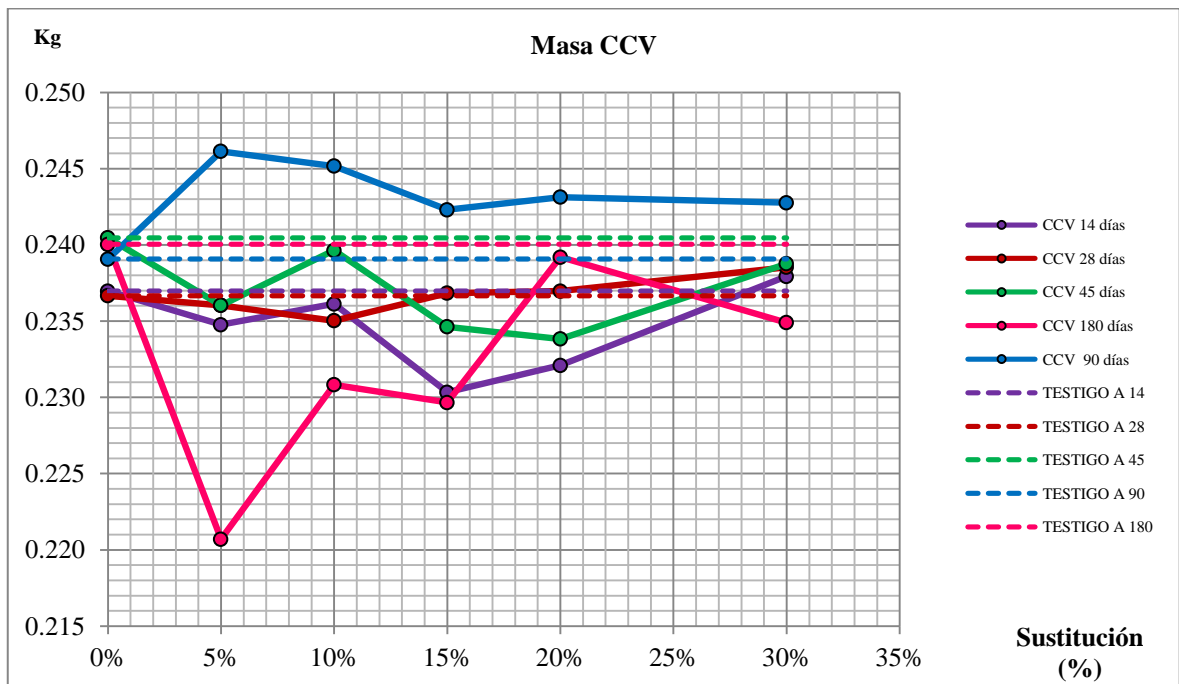
4.1.5.1.1.1. Resistividad



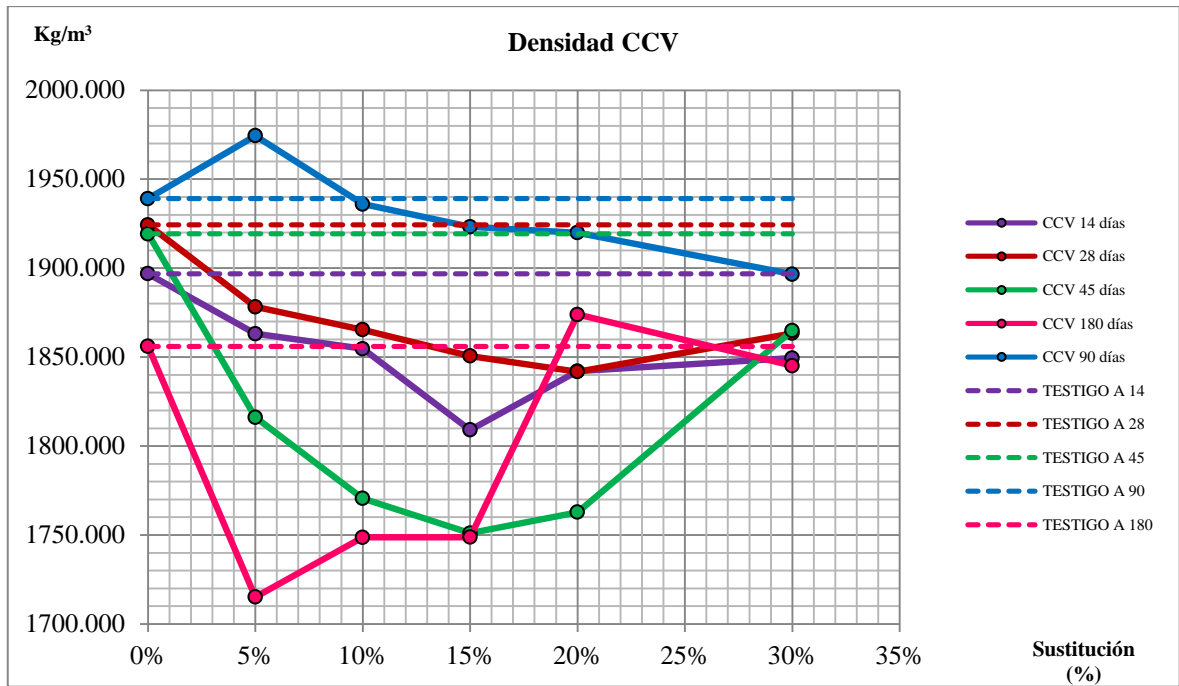
4.1.5.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



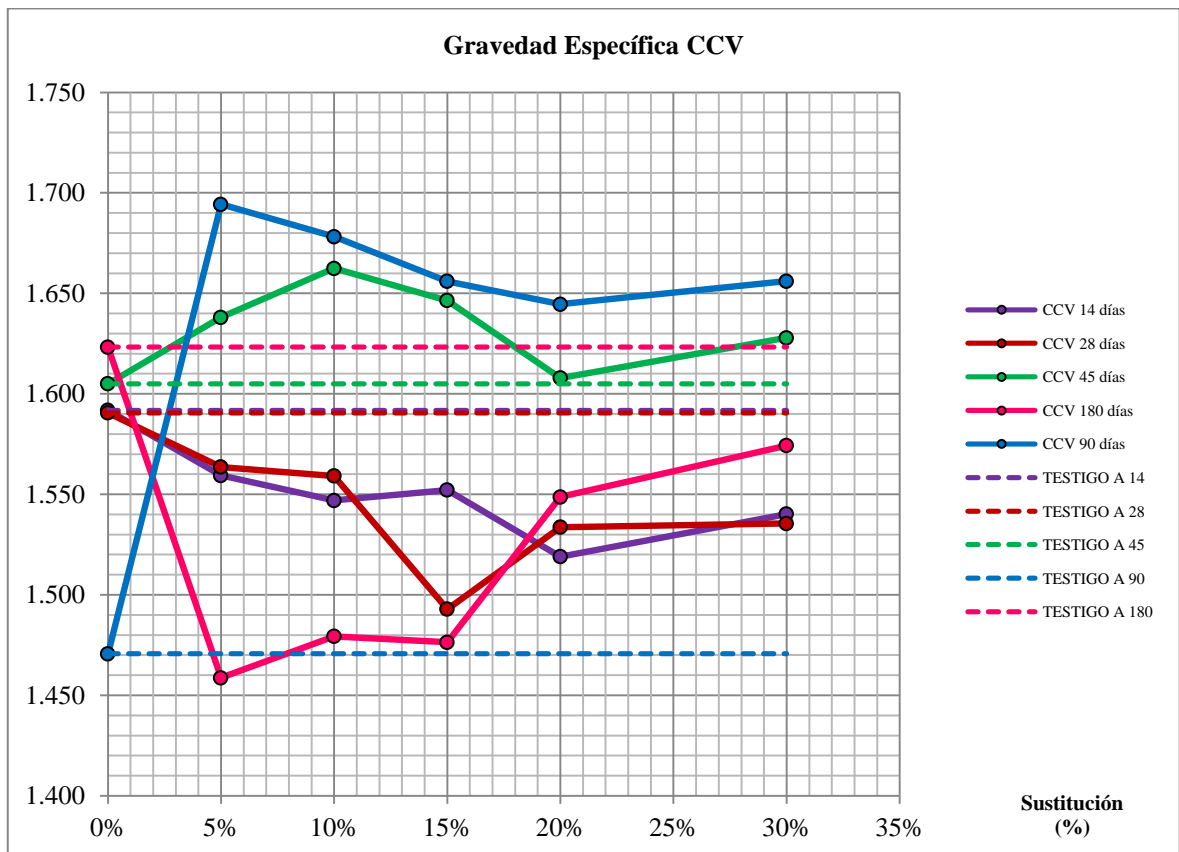
4.1.5.1.1.3. Masa



4.1.5.1.1.4. Densidad

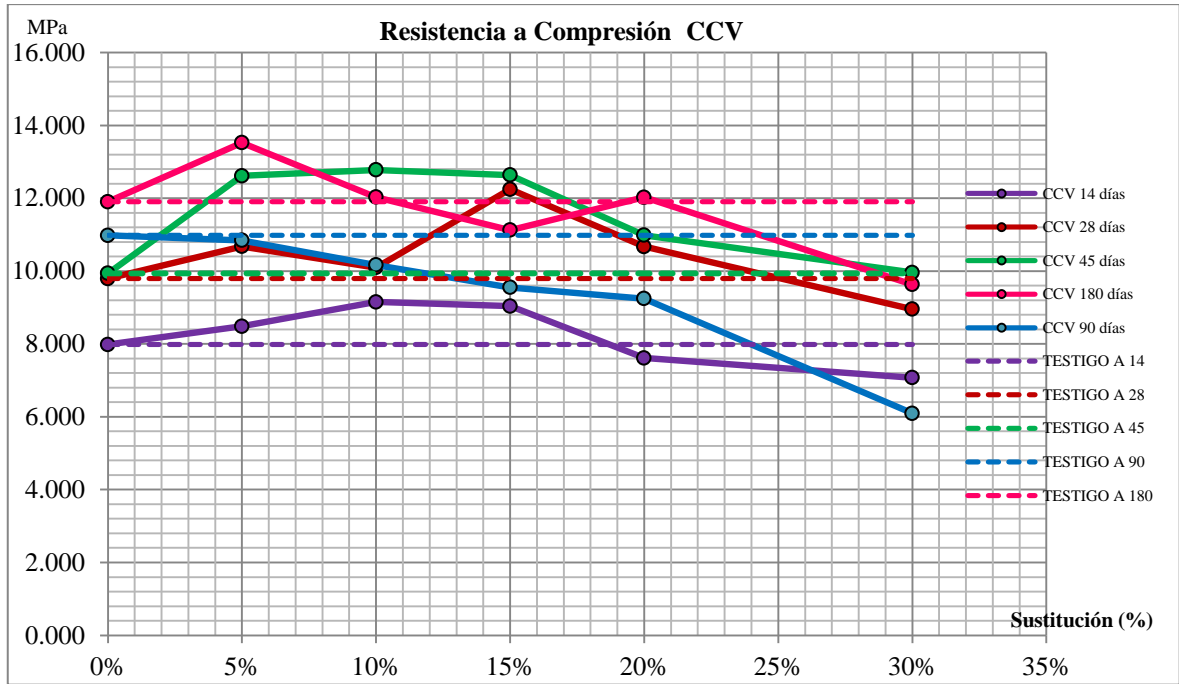


4.1.5.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.5.1.2. Pruebas Destructivas

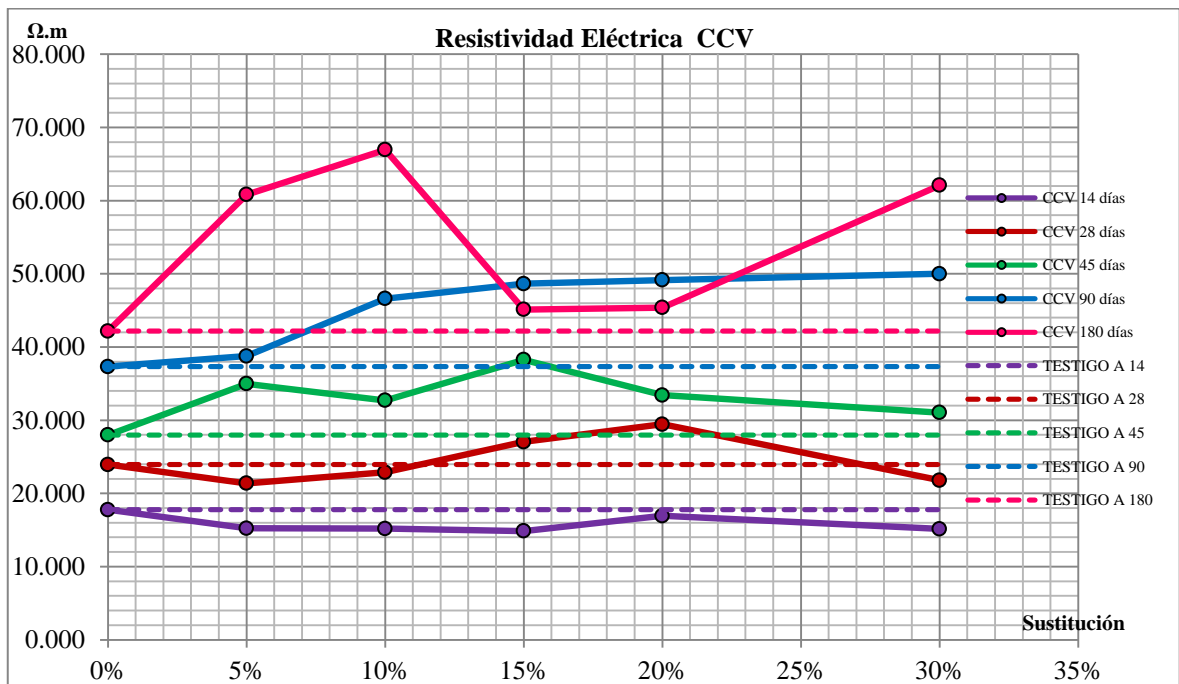
4.1.5.1.2.1. Compresión Simple



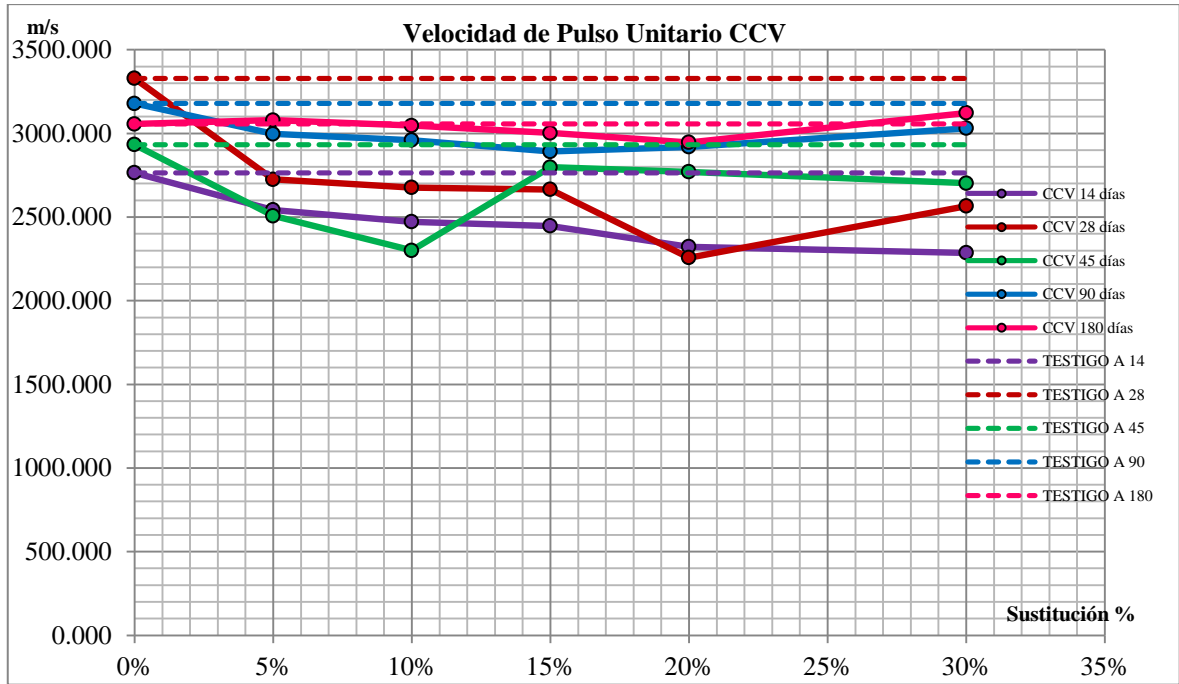
4.1.5.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.5.2.1. Pruebas No destructivas

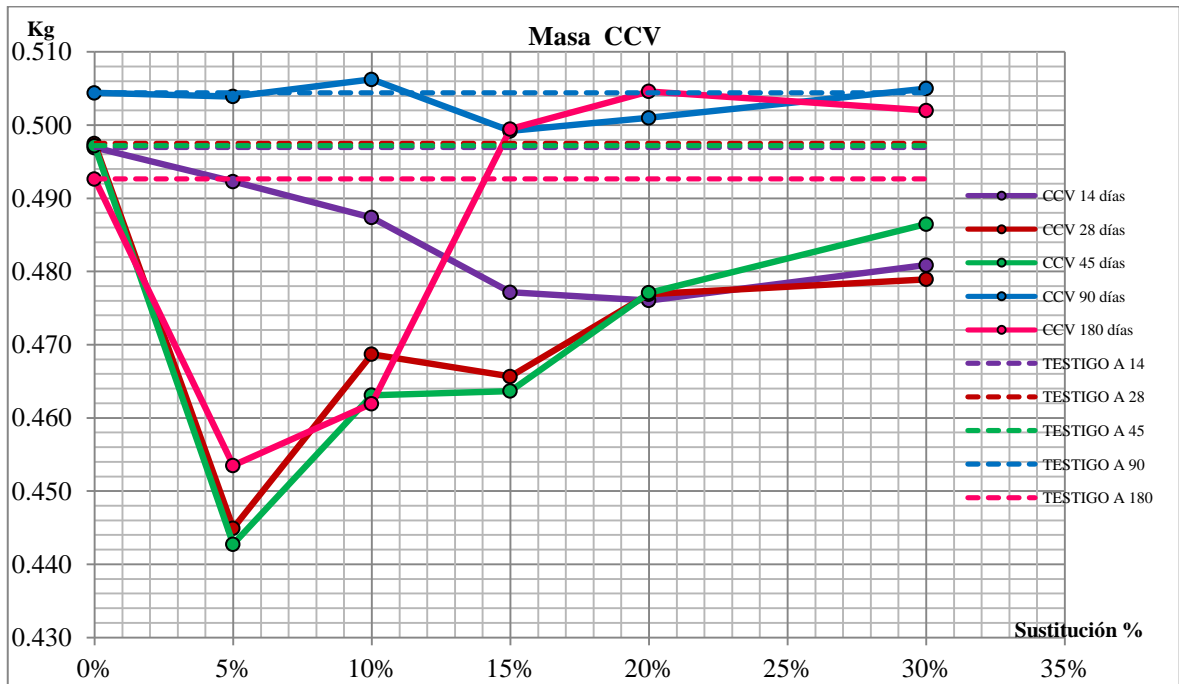
4.1.5.2.1.1. Resistividad



4.1.5.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

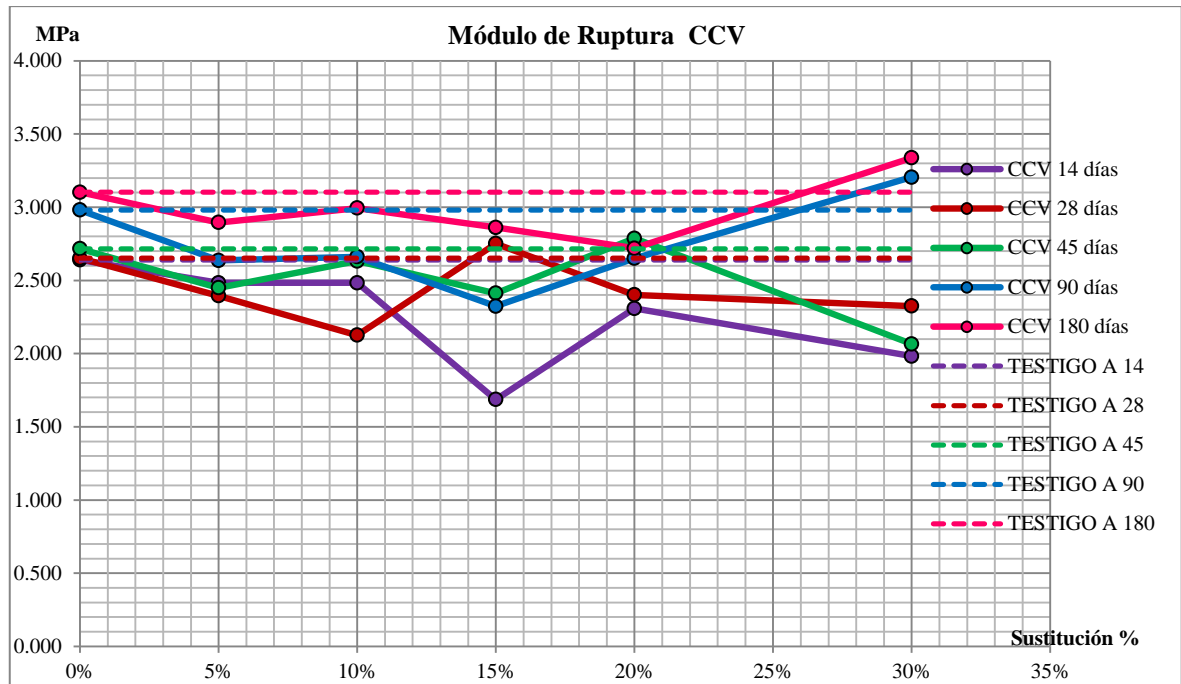


4.1.5.2.1.3. Masa



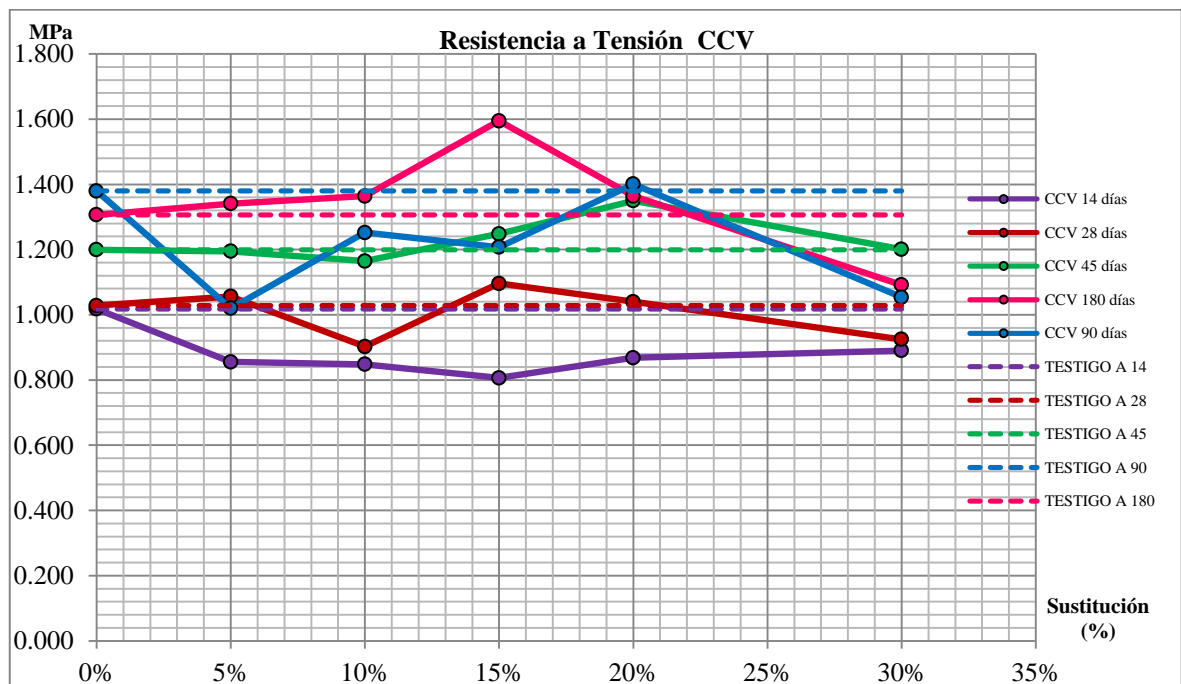
4.1.5.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.5.2.2.1. Flexión



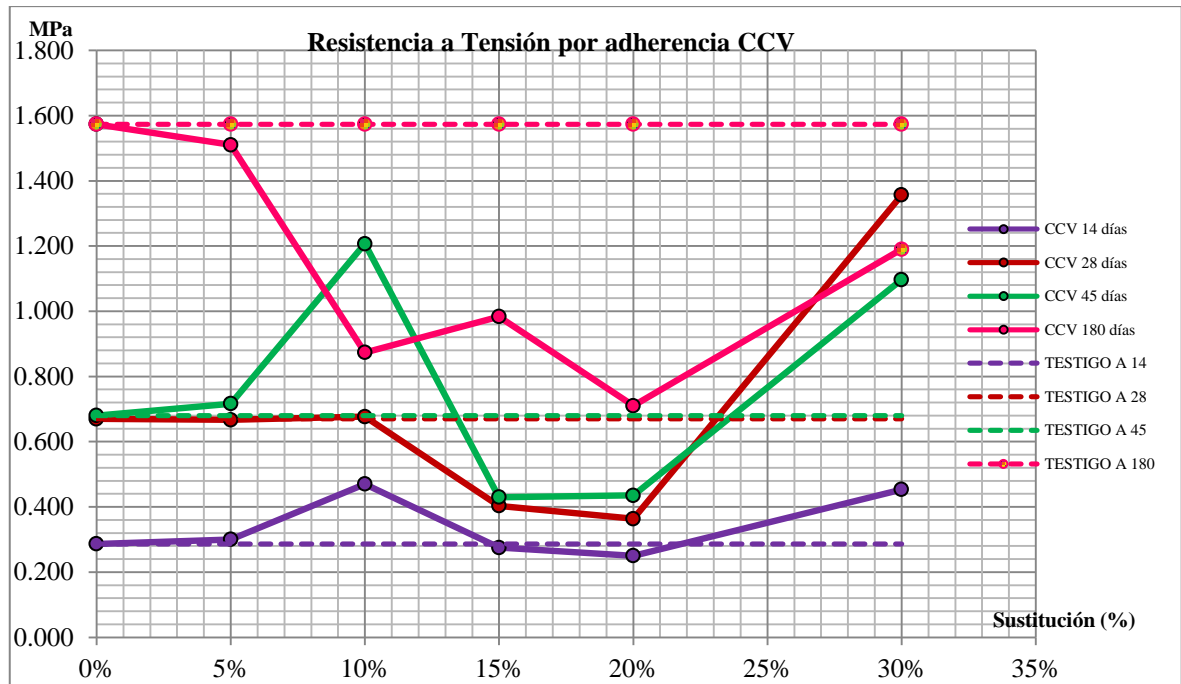
4.1.5.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.5.3.1. Tensión



4.1.5.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.4.5.1. Adherencia

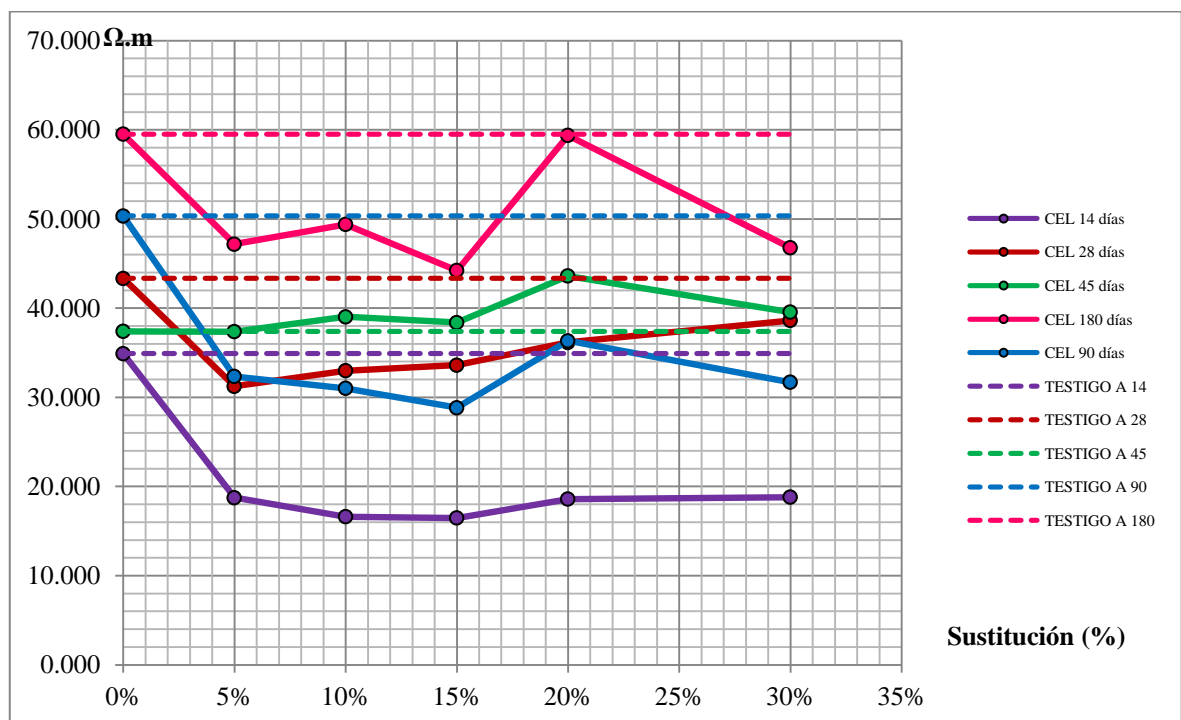


4.1.6. Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL)

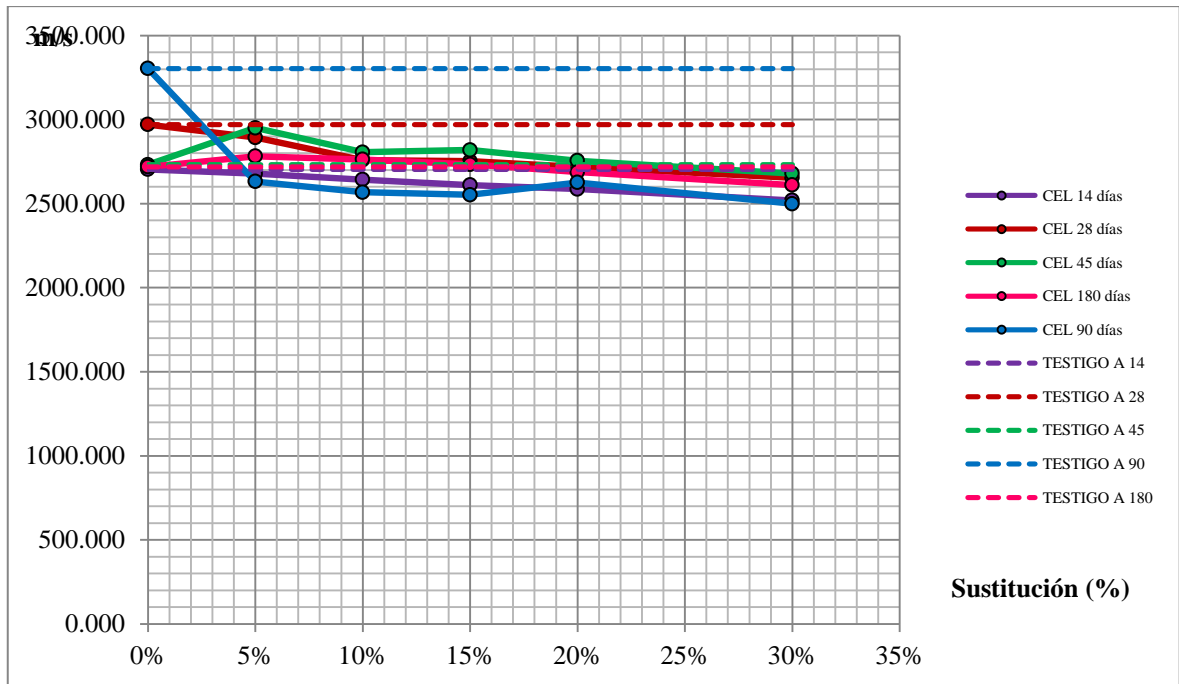
4.1.6.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.1.6.1.1. Pruebas No destructivas

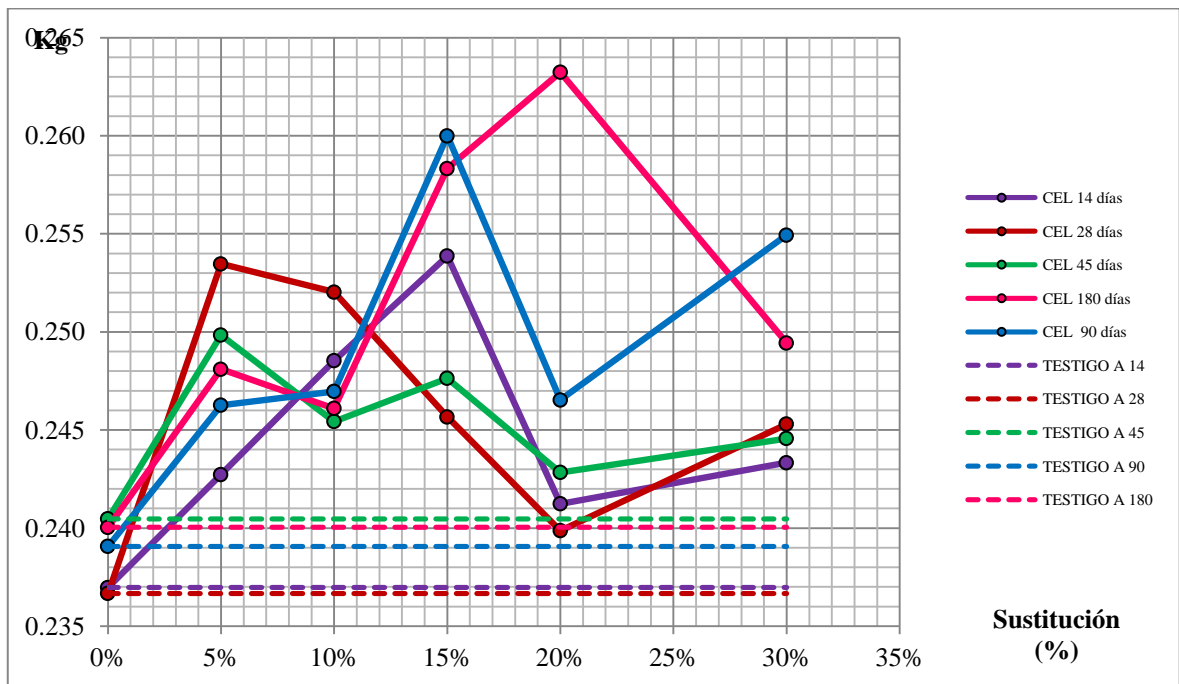
4.1.6.1.1.1. Resistividad



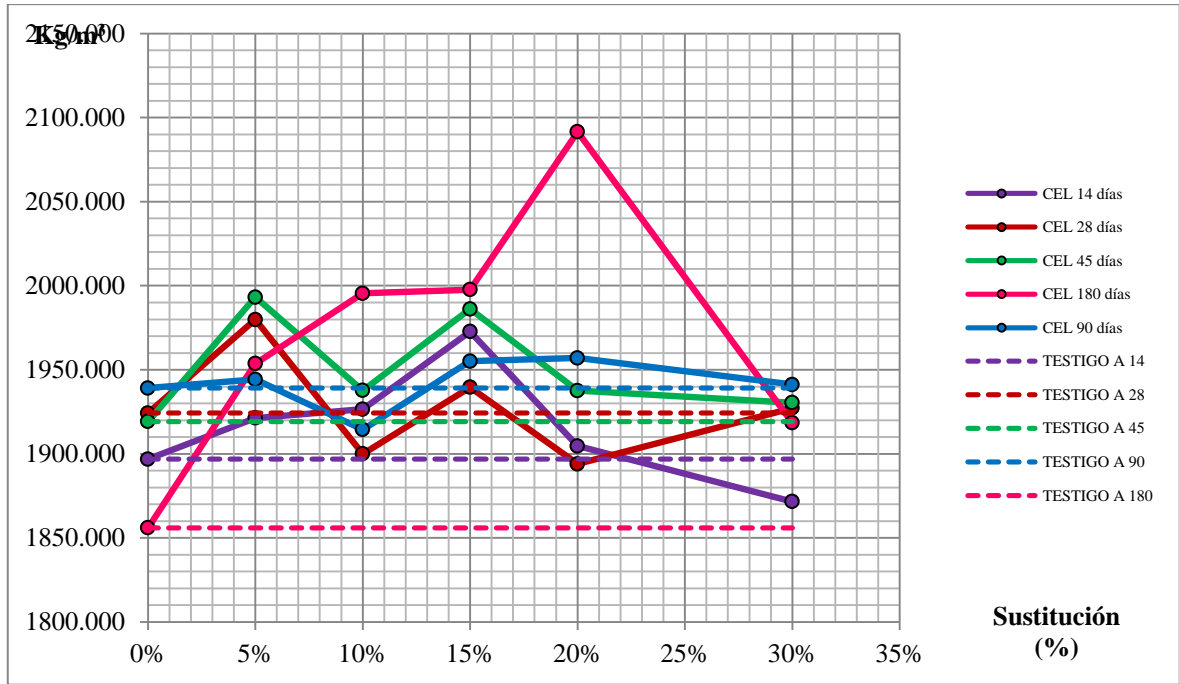
4.1.6.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



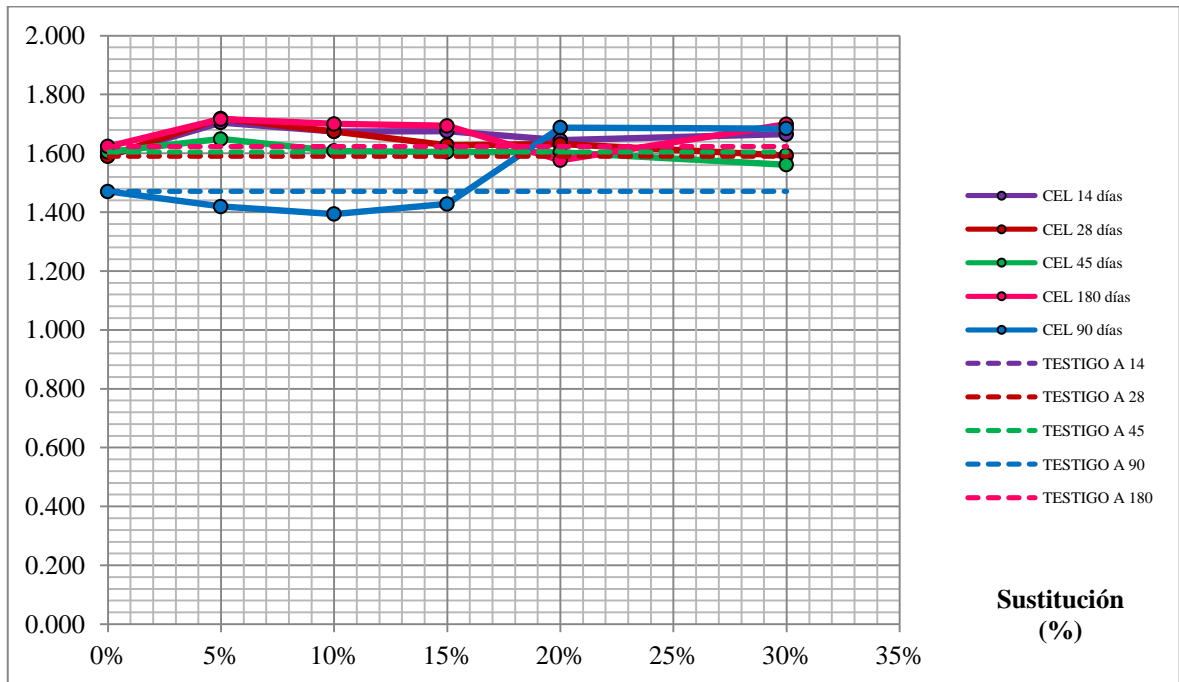
4.1.6.1.1.3. Masa



4.1.6.1.1.4. Densidad

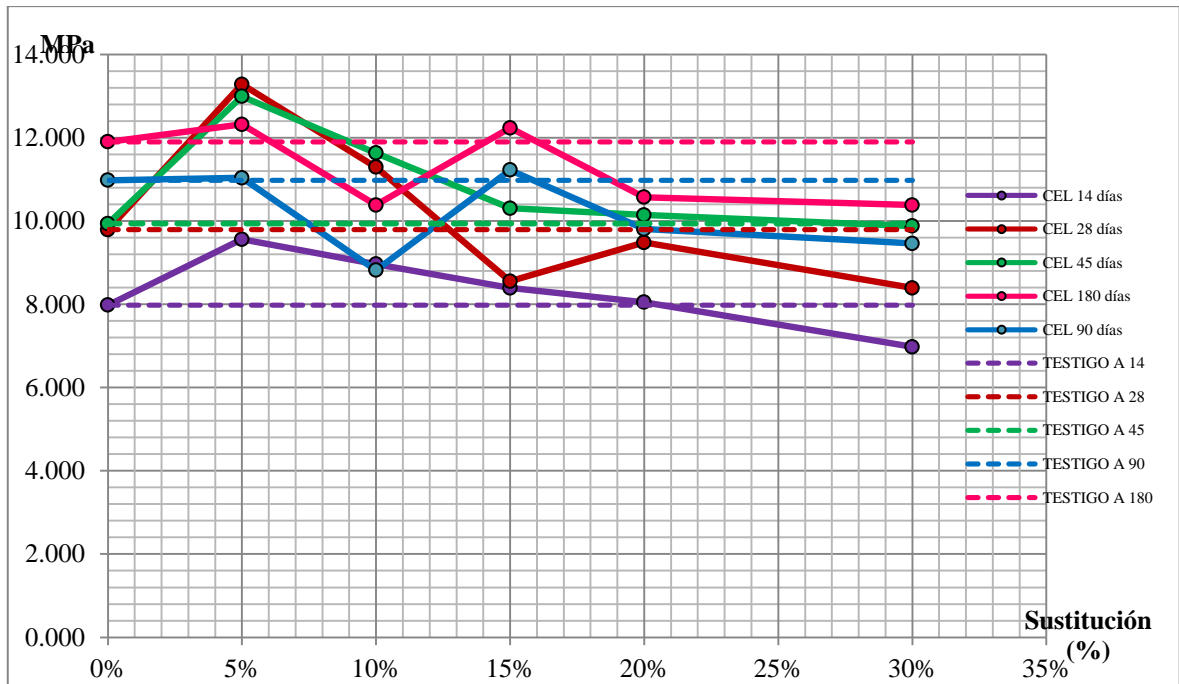


4.1.6.1.1.5. Gravedad Específica



4.1.6.1.2. Pruebas Destructivas

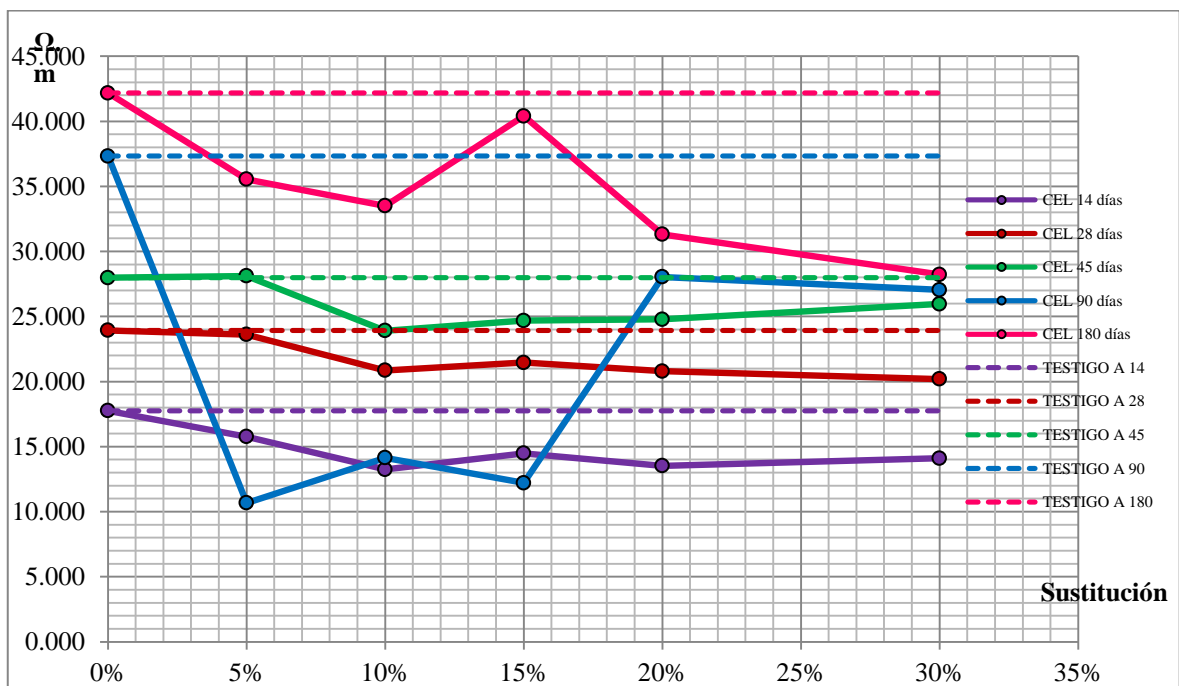
4.1.6.1.2.1. Compresión Simple



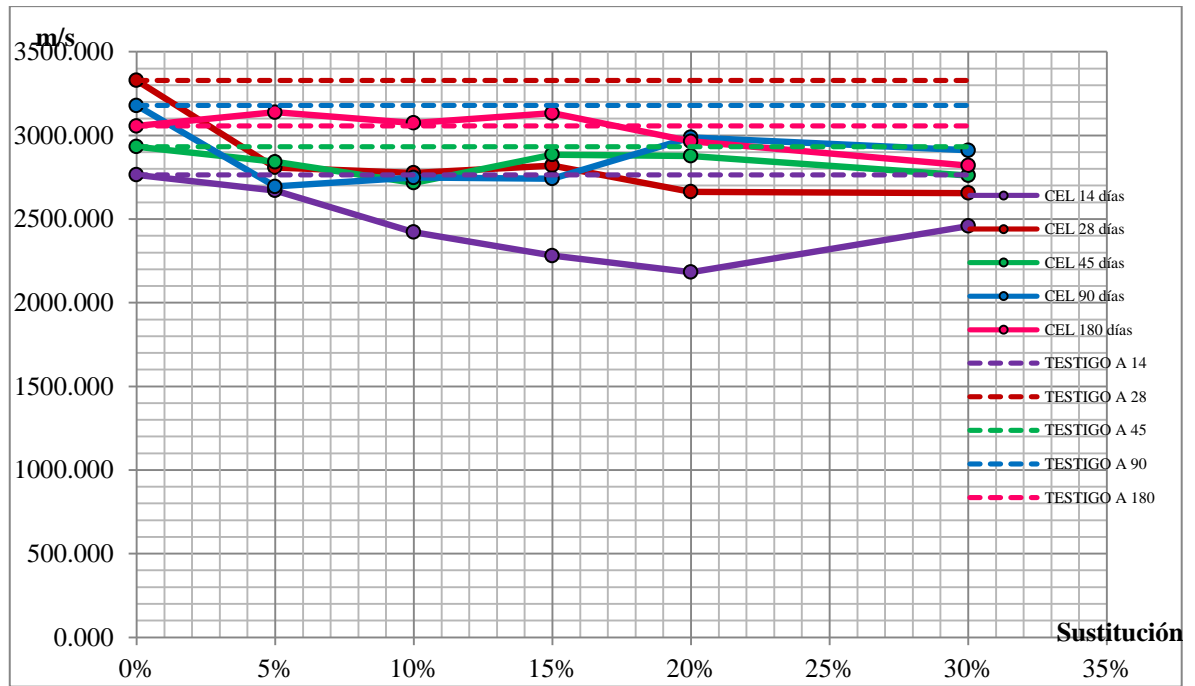
4.1.6.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.1.6.2.1. Pruebas No destructivas

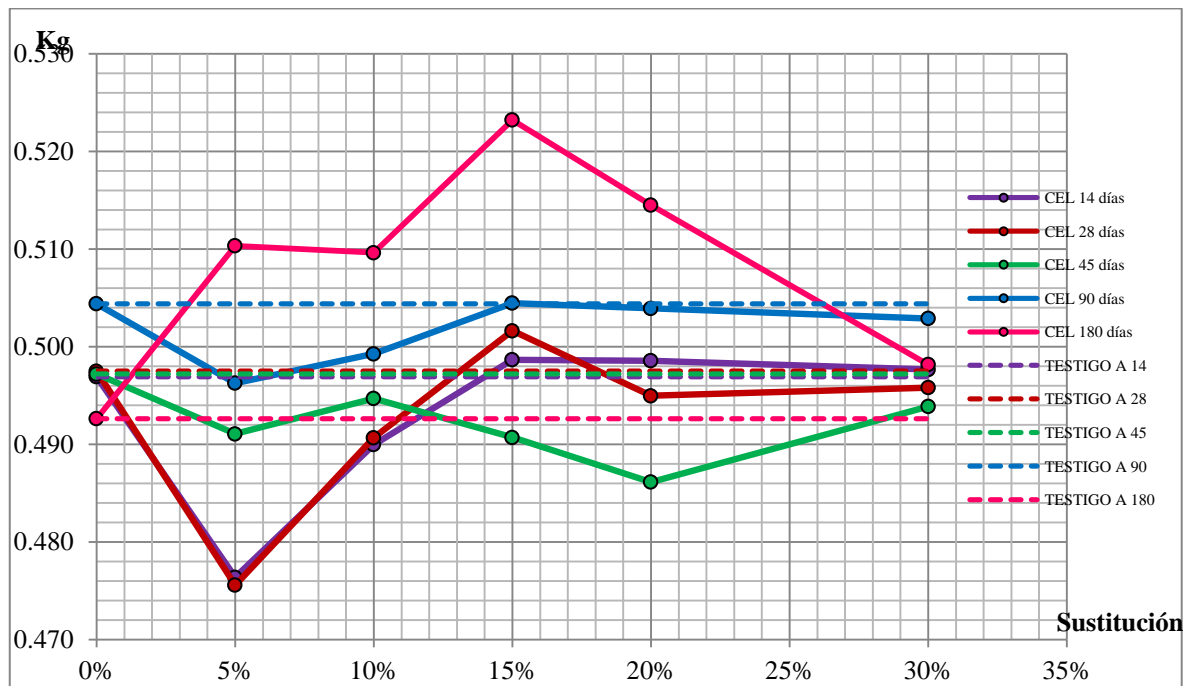
4.1.6.2.1.1. Resistividad



4.1.6.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

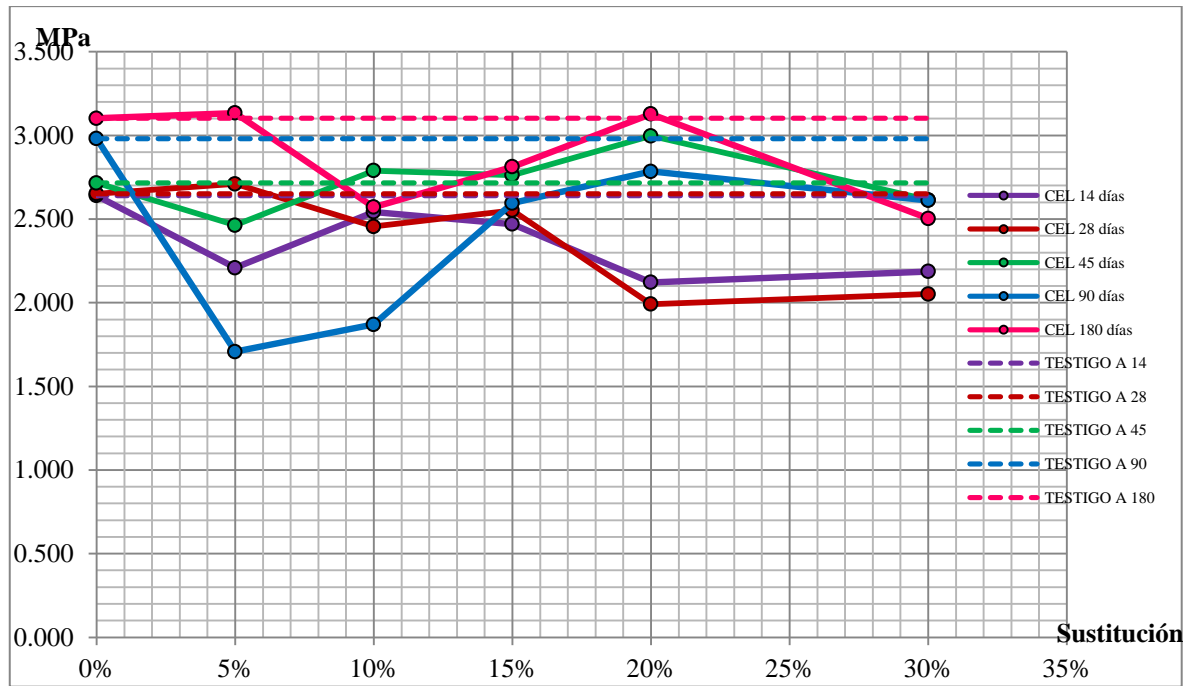


4.1.6.2.1.3. Masa



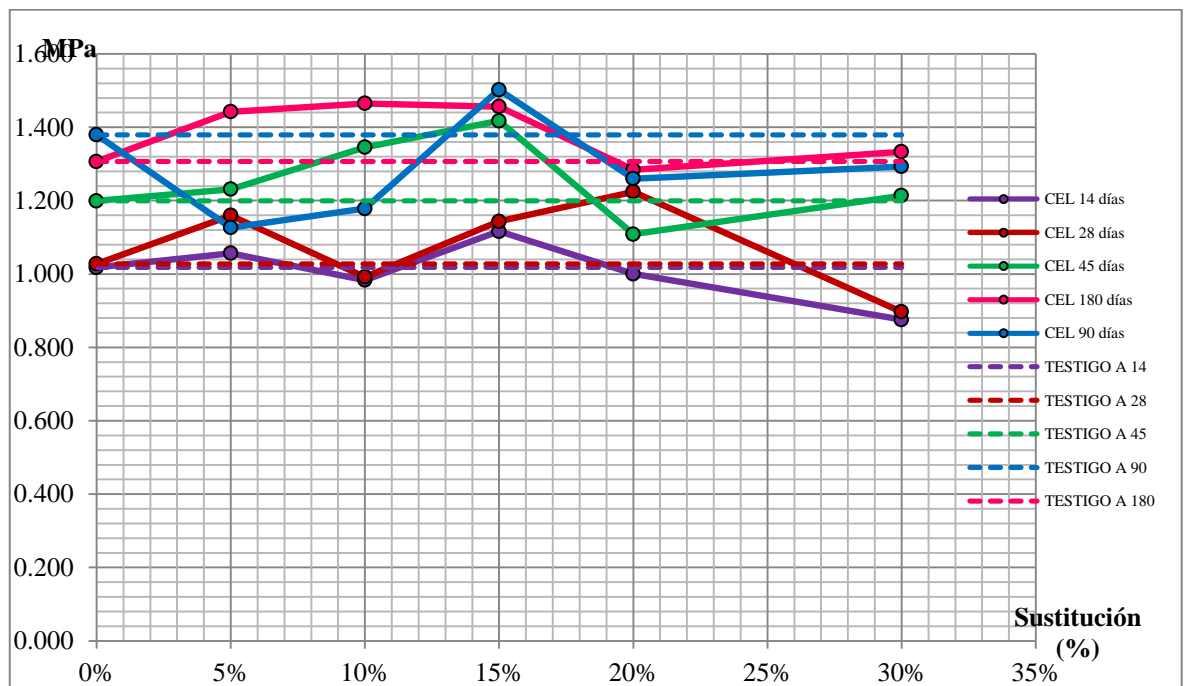
4.1.6.2.2. Pruebas Destructivas

4.1.6.2.2.1. Flexión



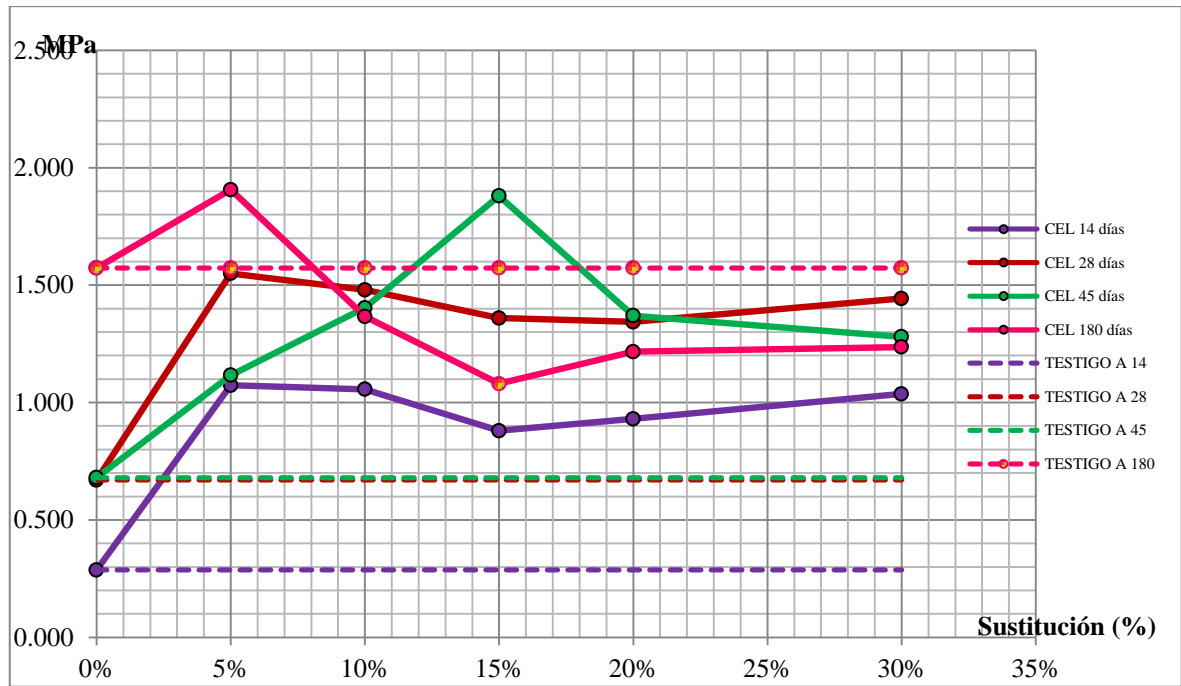
4.1.6.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.1.6.3.1. Tensión



4.1.6.4. Resultados en las losas de adherencia

4.1.6.4.1. Adherencia



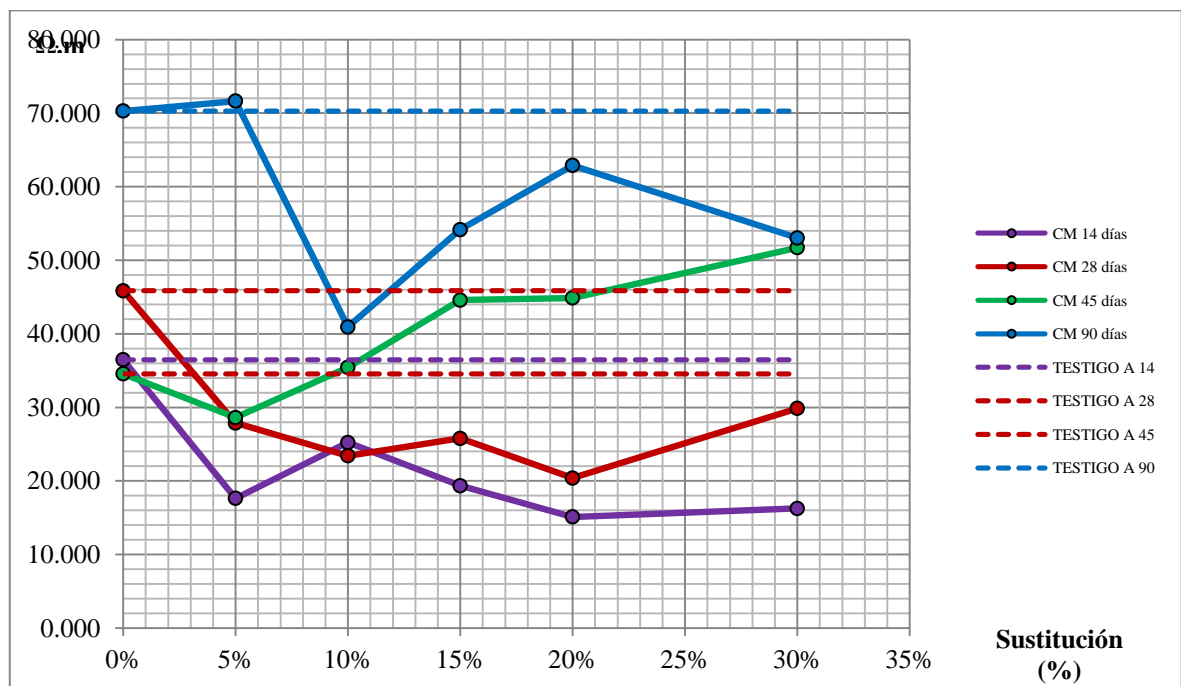
4.2. Morteros fabricados con agregado del Río Lerma

4.2.1. Carbón Mineral (CM)

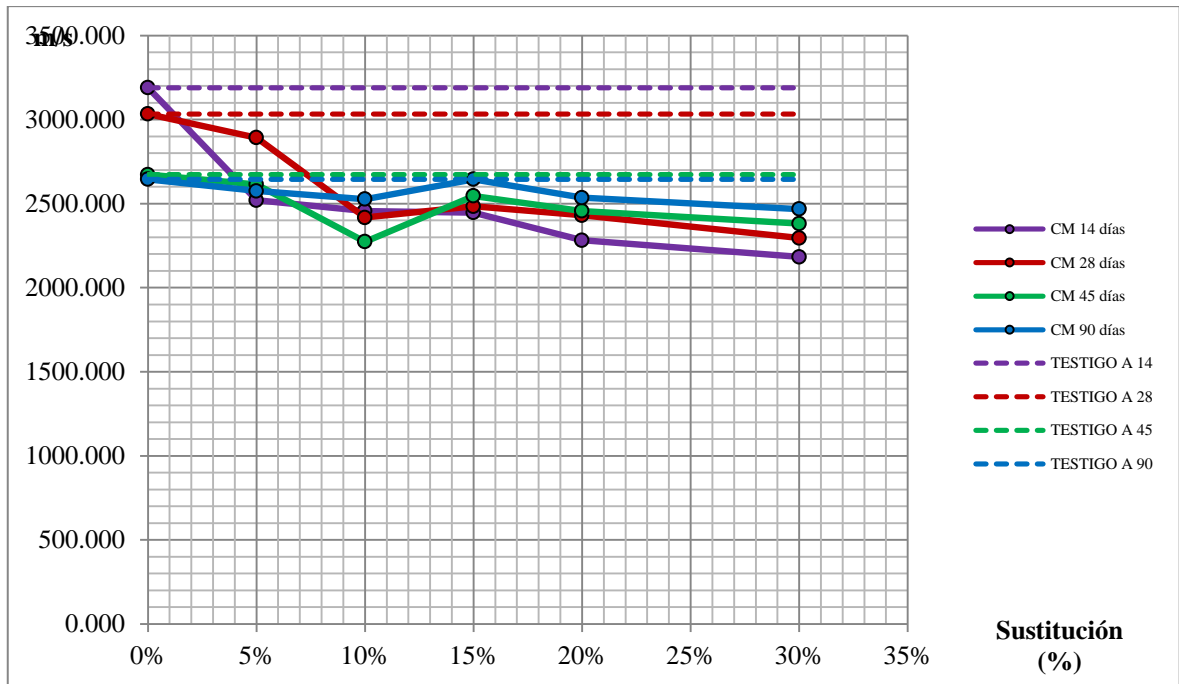
4.2.1.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.2.1.1.1. Pruebas No destructivas

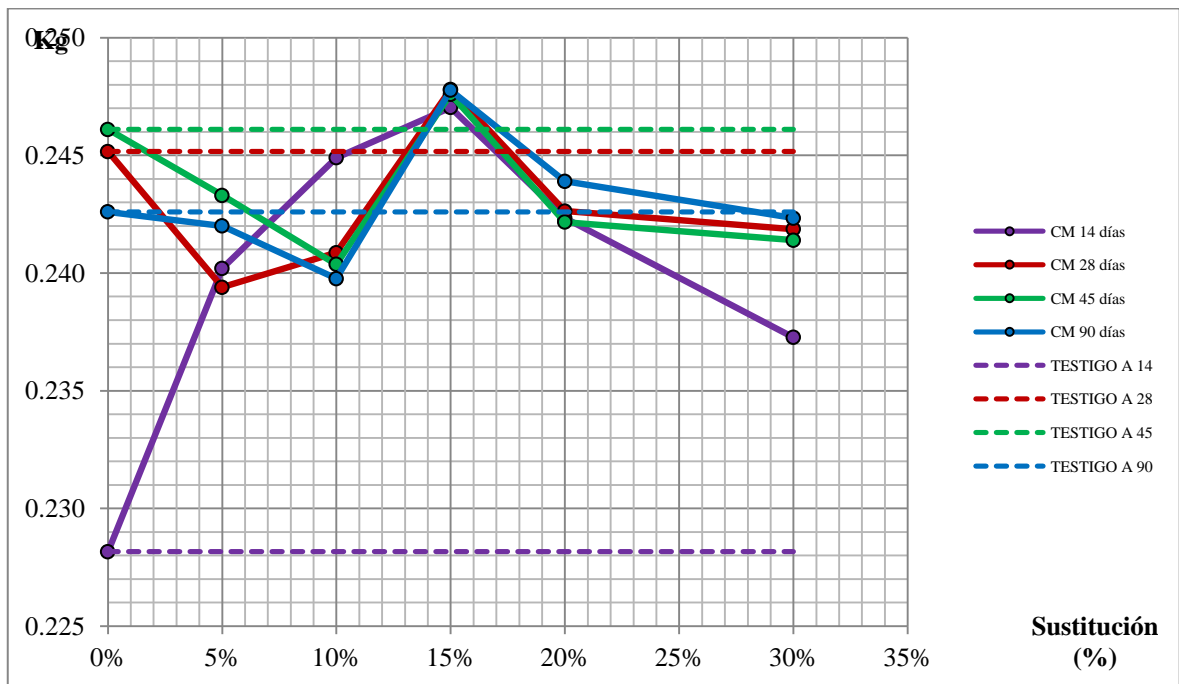
4.2.1.1.1.1. Resistividad



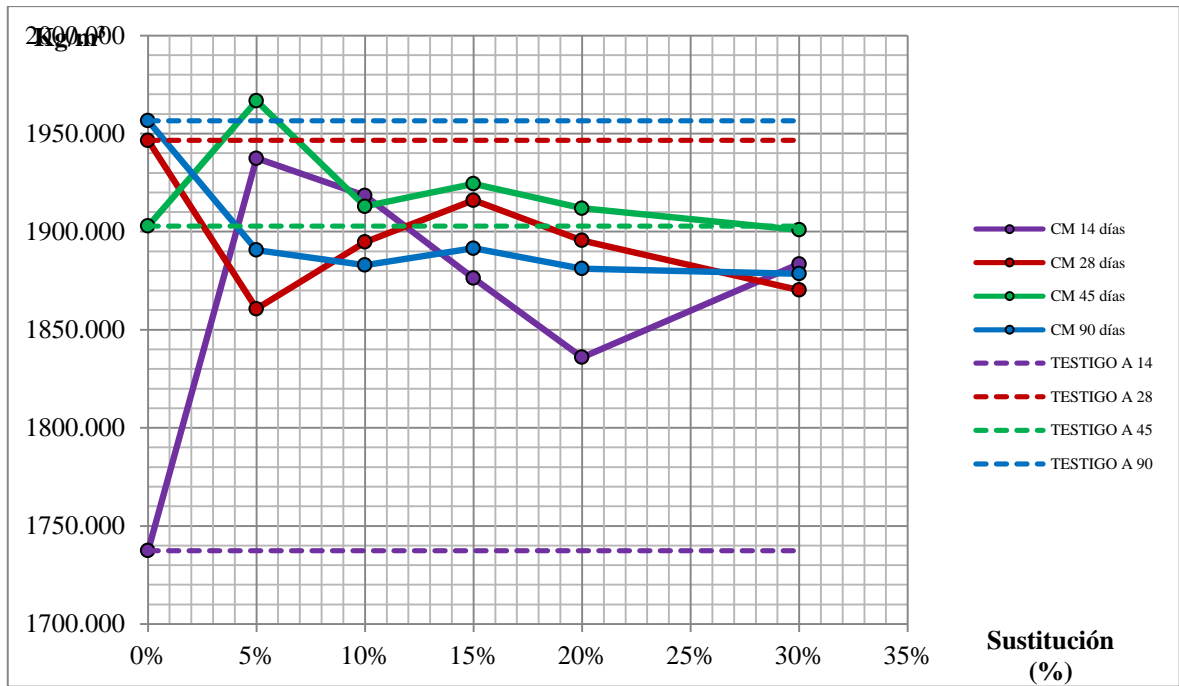
4.2.1.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



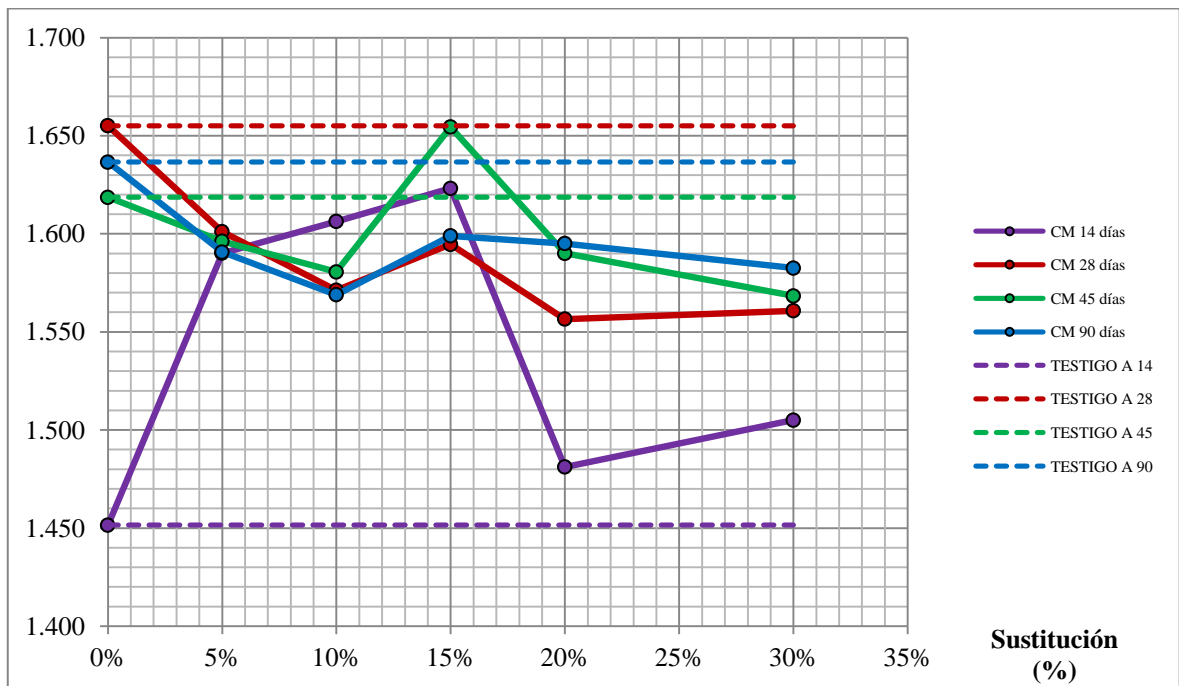
4.2.1.1.1.3. Masa



4.2.1.1.1.4. Densidad

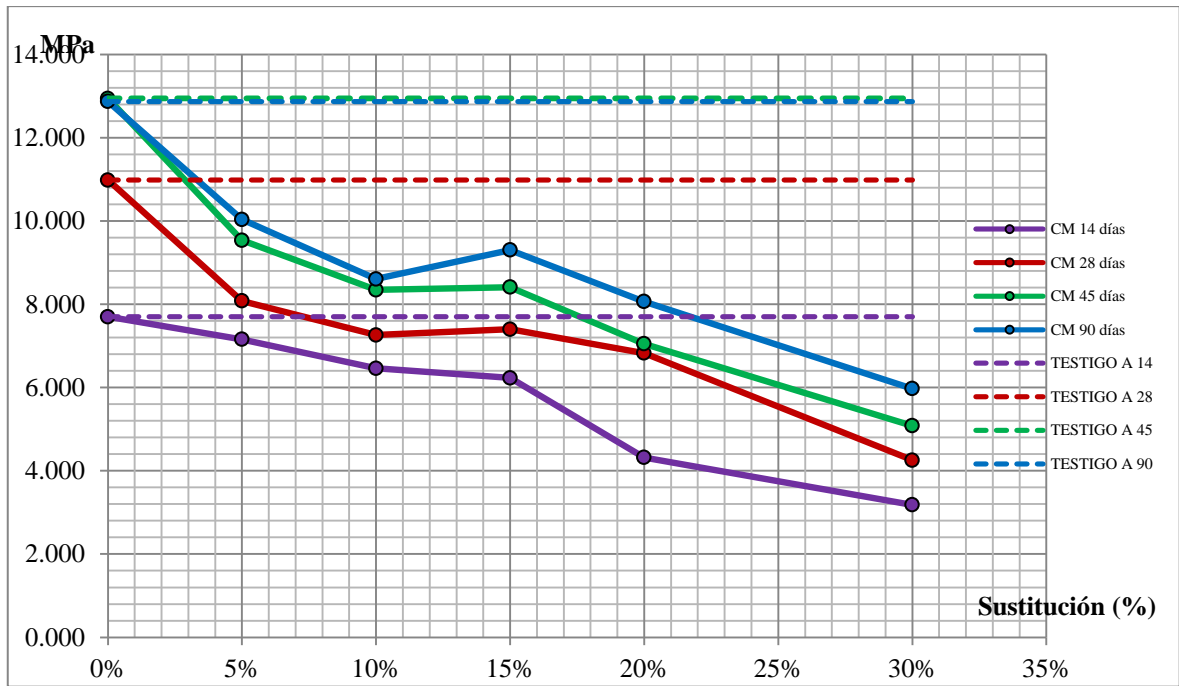


4.2.1.1.1.5. Gravedad Específica



4.2.1.1.2. Pruebas Destructivas

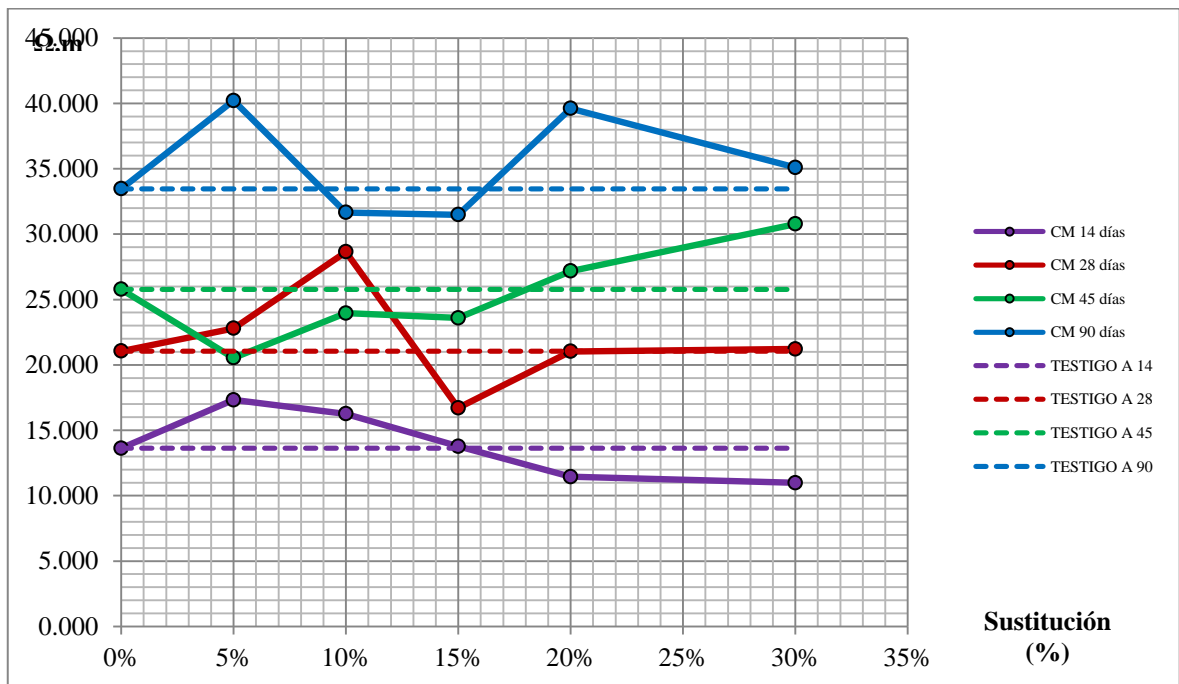
4.2.1.1.2.1. Compresión Simple



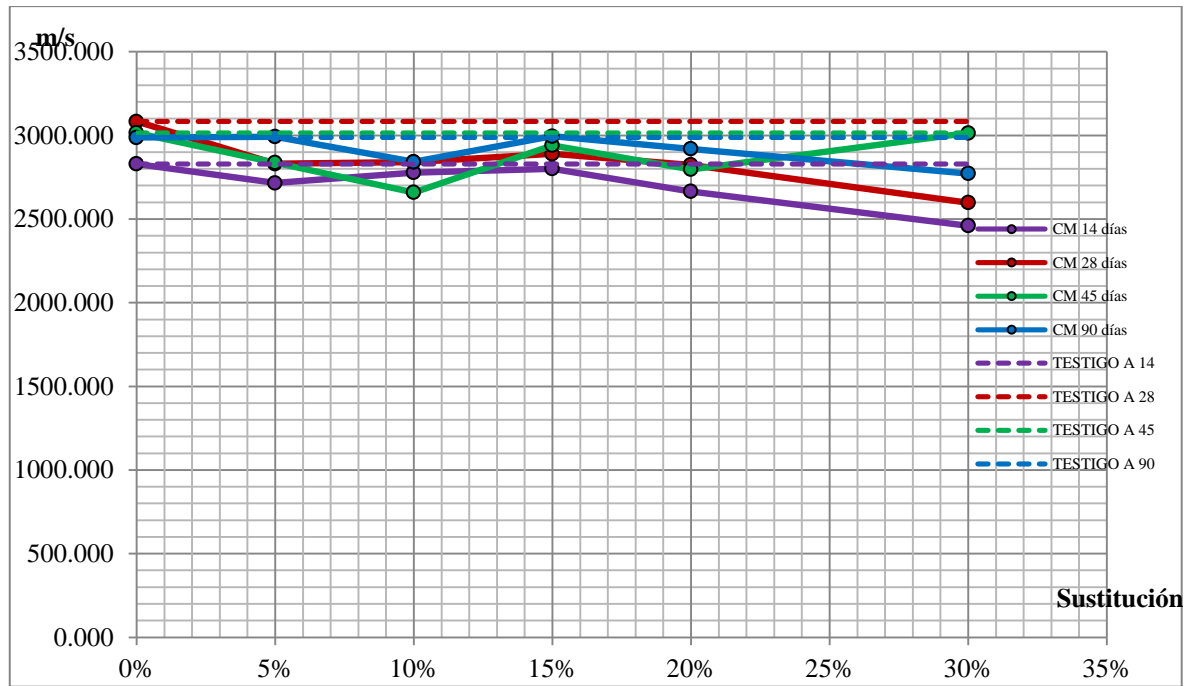
4.2.1.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.2.1.2.1. Pruebas No destructivas

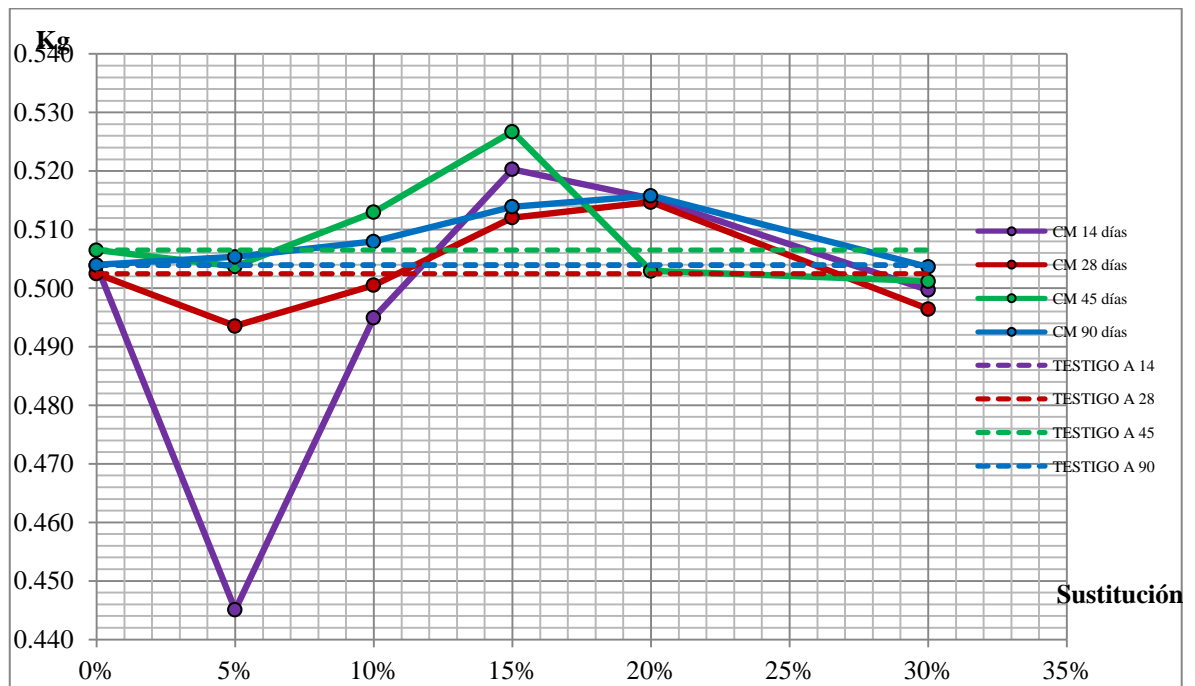
4.2.1.2.1.1. Resistividad



4.2.1.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

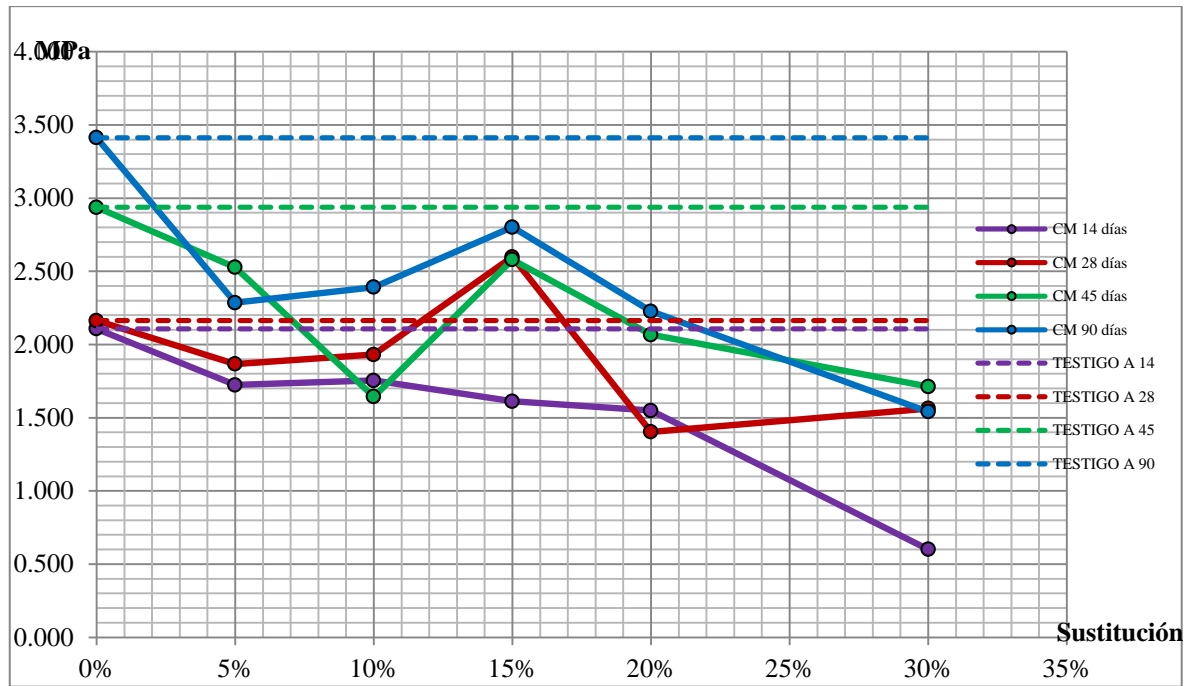


4.2.1.2.1.3. Masa



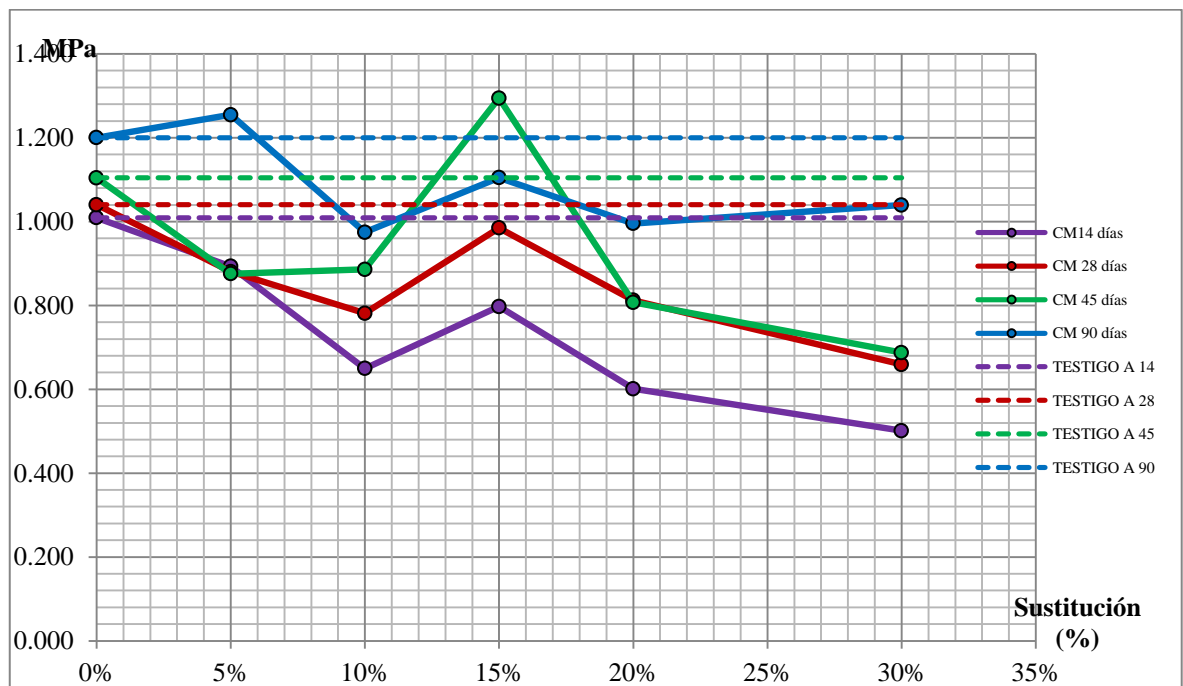
4.2.1.2.2. Pruebas Destructivas

4.2.1.2.2.1. Flexión



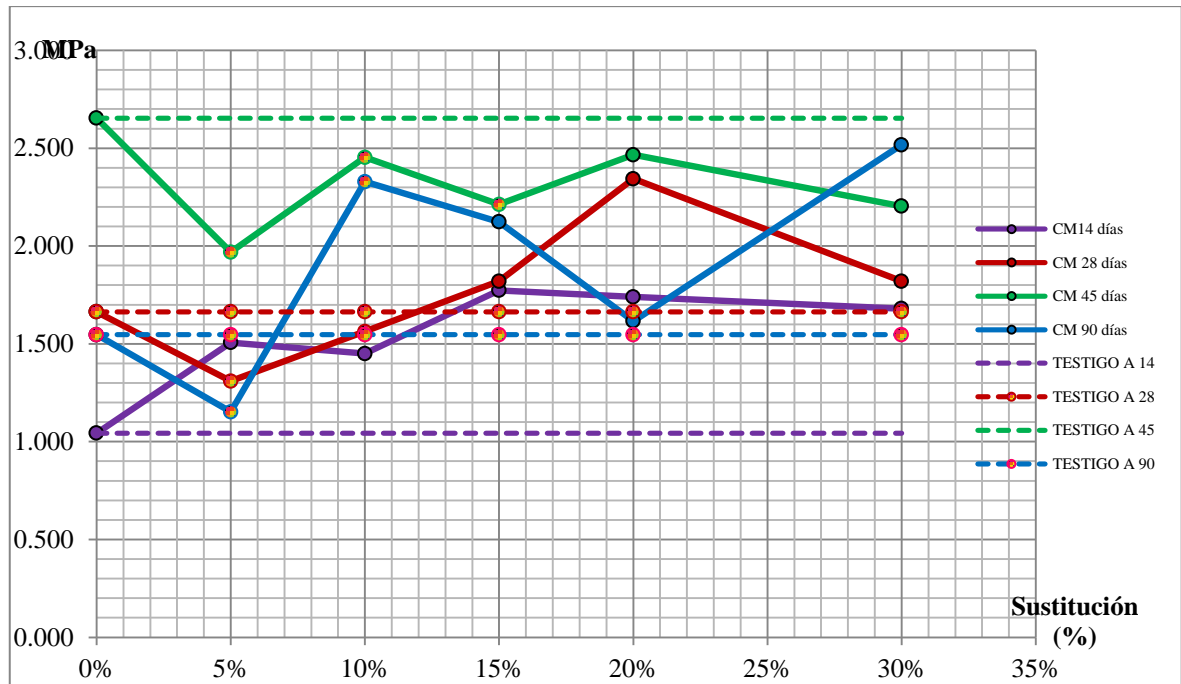
4.2.1.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.2.1.3.1. Tensión



4.2.1.4. Resultados en las losas de adherencia

4.2.1.4.1. Adherencia

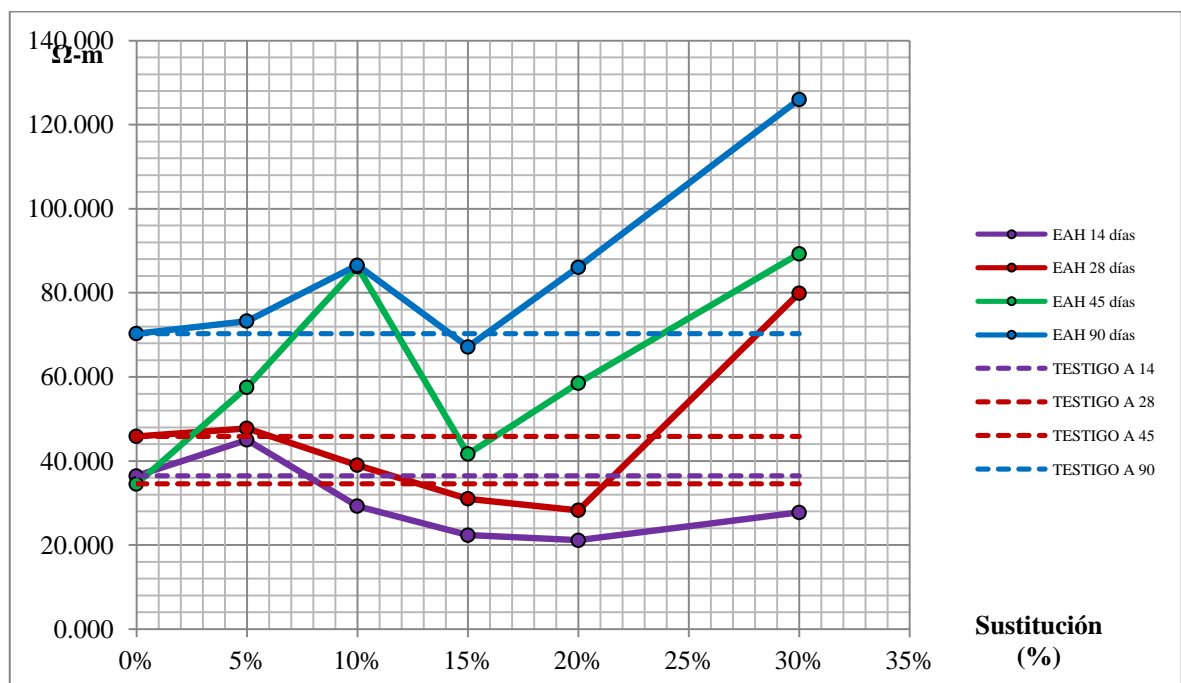


4.2.2. Escoria de Alto Horno (EAH)

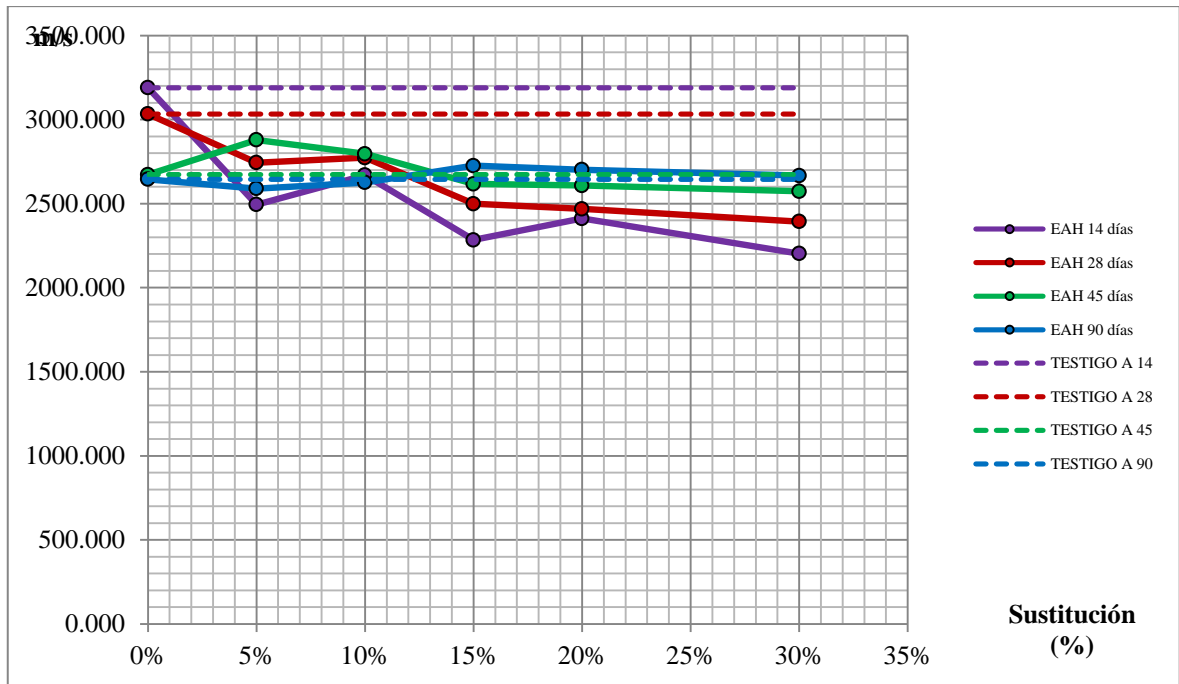
4.2.2.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.2.2.1.1. Pruebas No destructivas

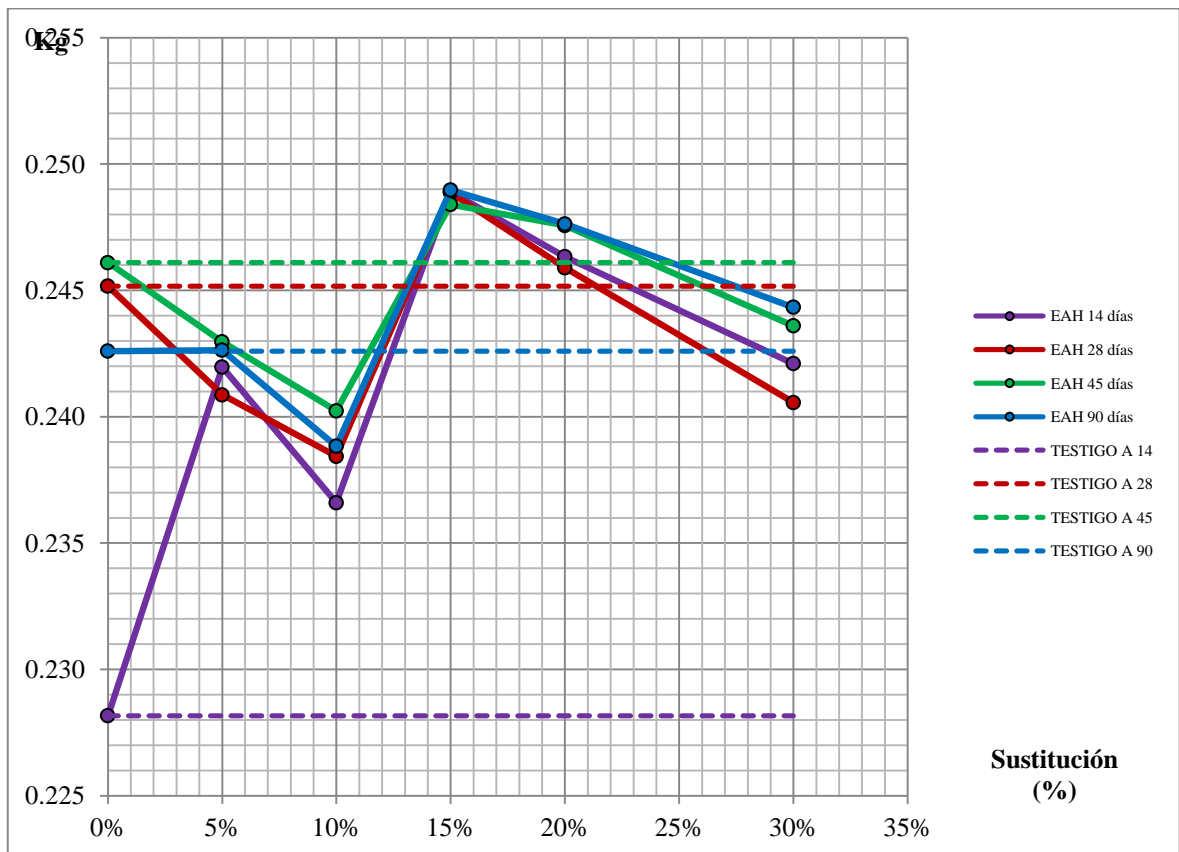
4.2.2.1.1.1. Resistividad



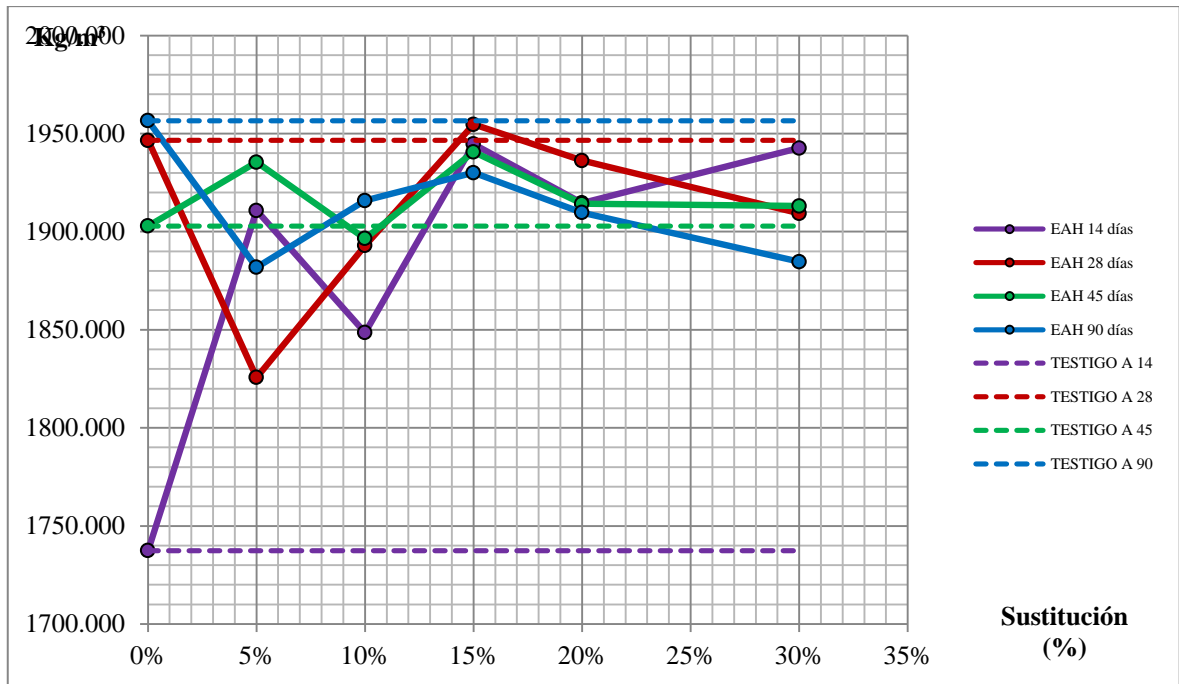
4.2.2.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



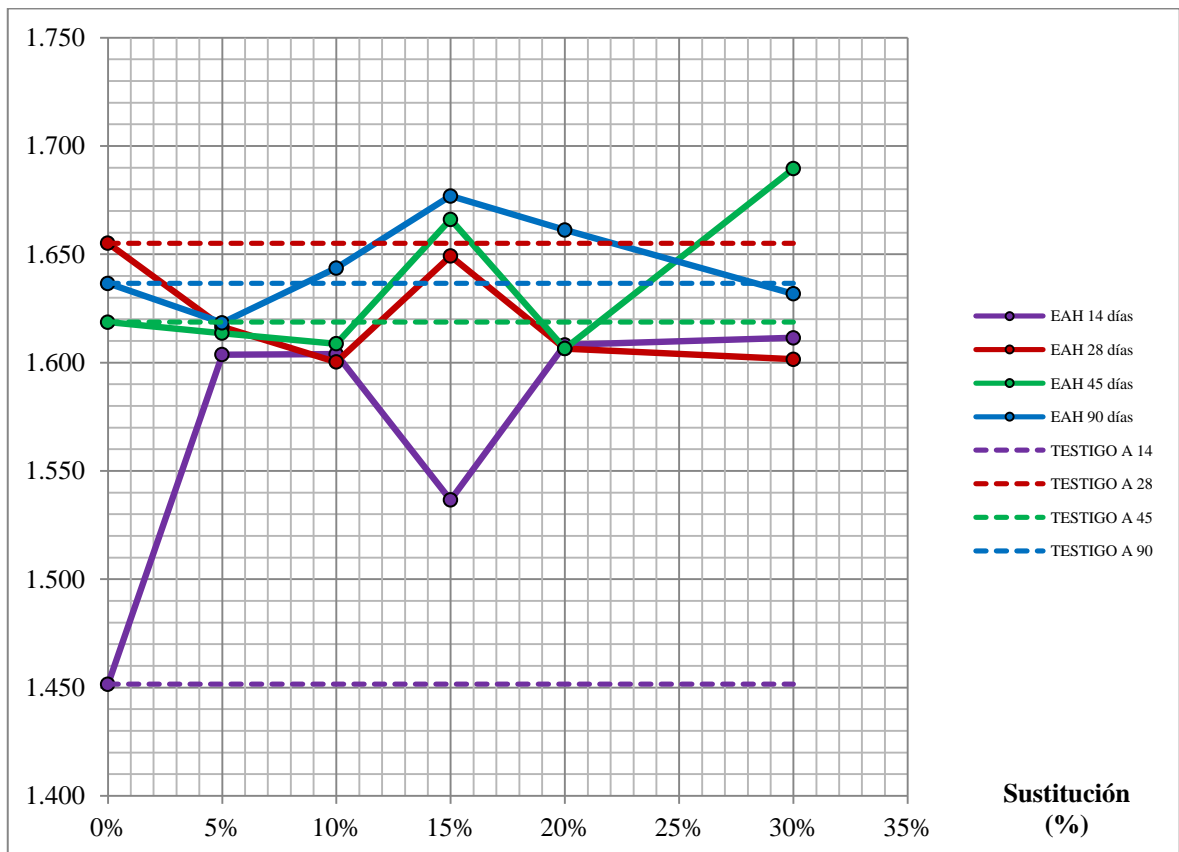
4.2.2.1.1.3. Masa



4.2.2.1.1.4. Densidad

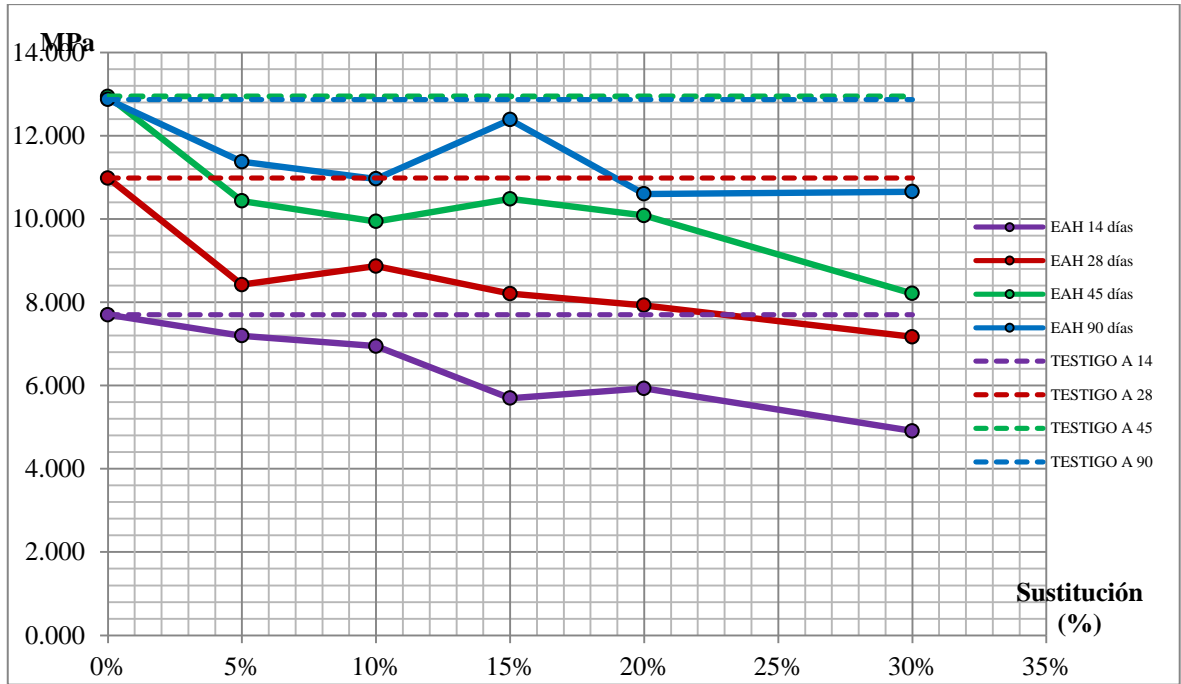


4.2.2.1.1.5. Gravedad Específica



4.2.2.1.2. Pruebas Destructivas

4.2.2.1.2.1. Compresión Simple



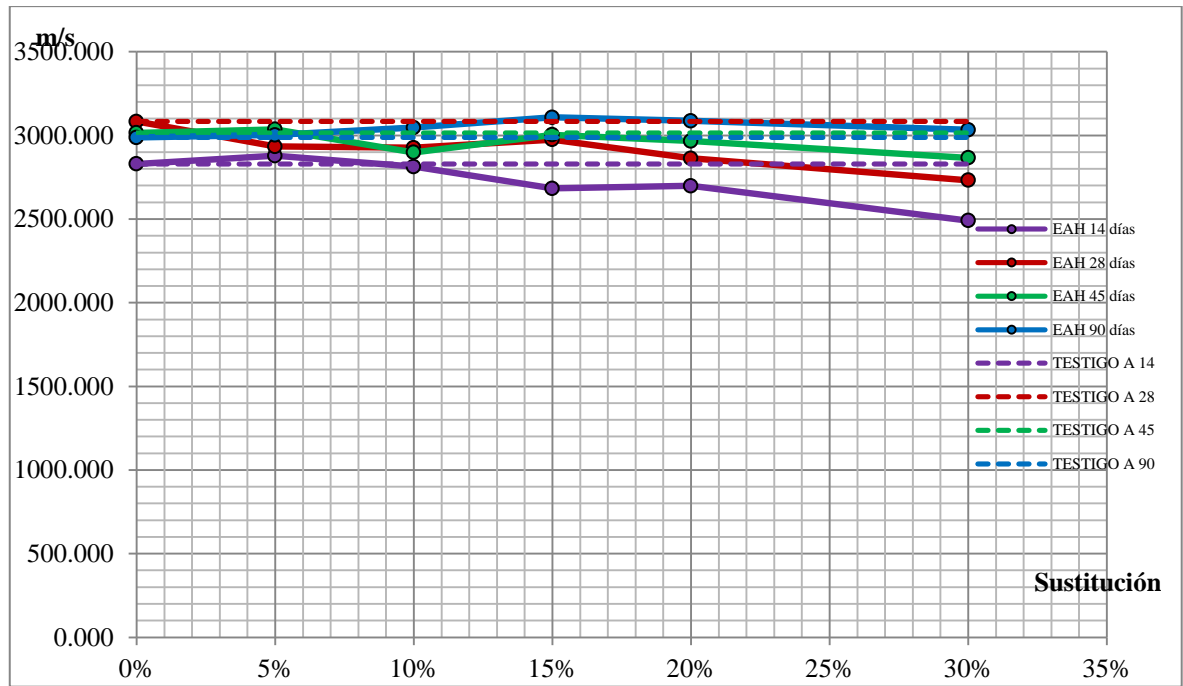
4.2.2.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.2.2.2.1. Pruebas No destructivas

4.2.2.2.1.1. Resistividad



4.2.2.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

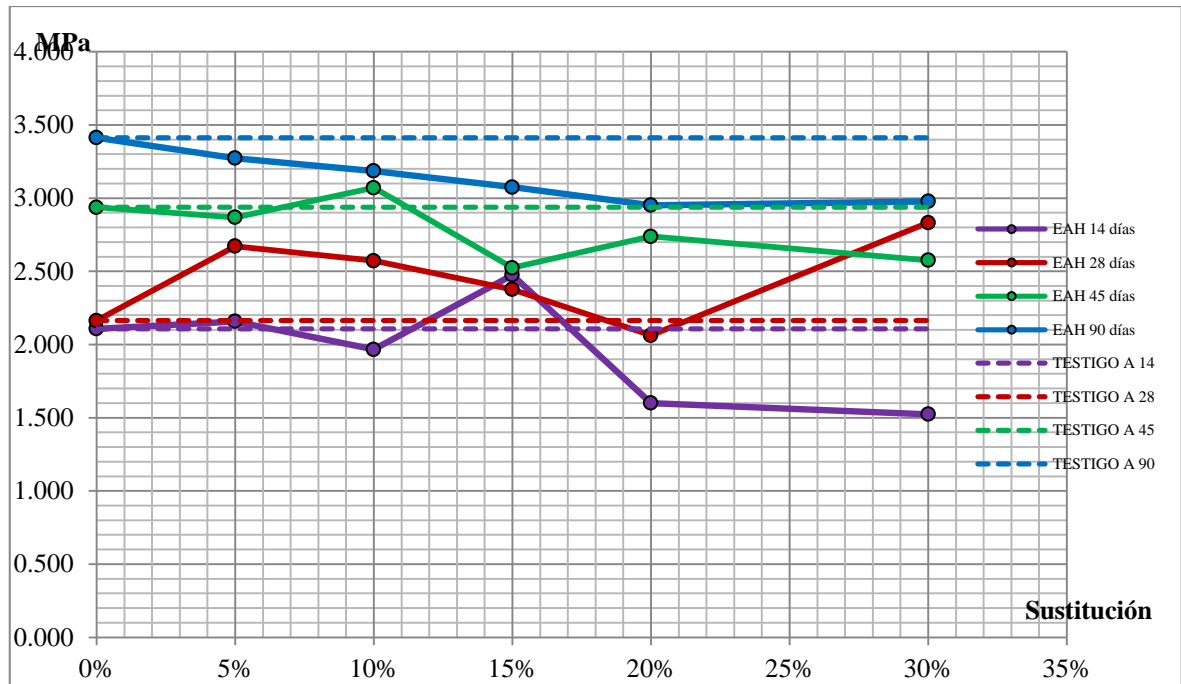


4.2.2.2.1.3. Masa



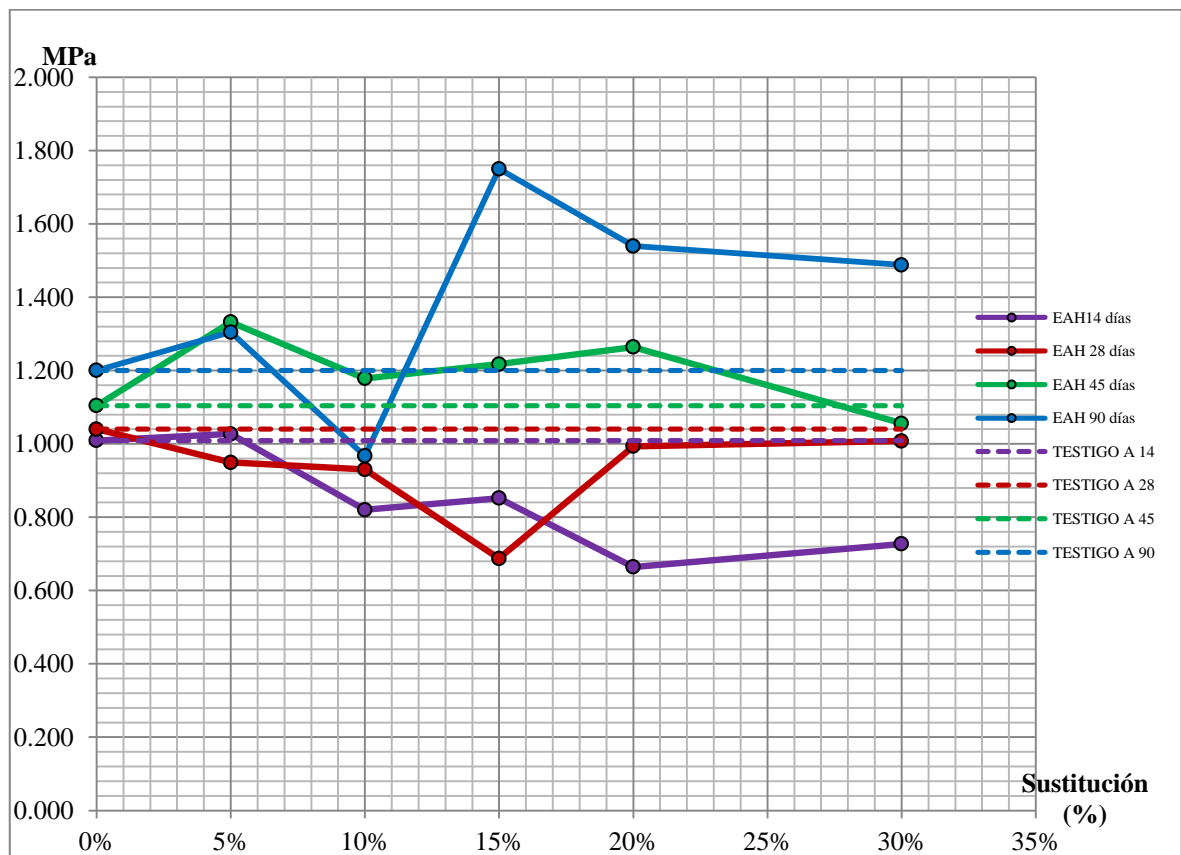
4.2.2.2.2. Pruebas Destructivas

4.2.2.2.2.1. Flexión



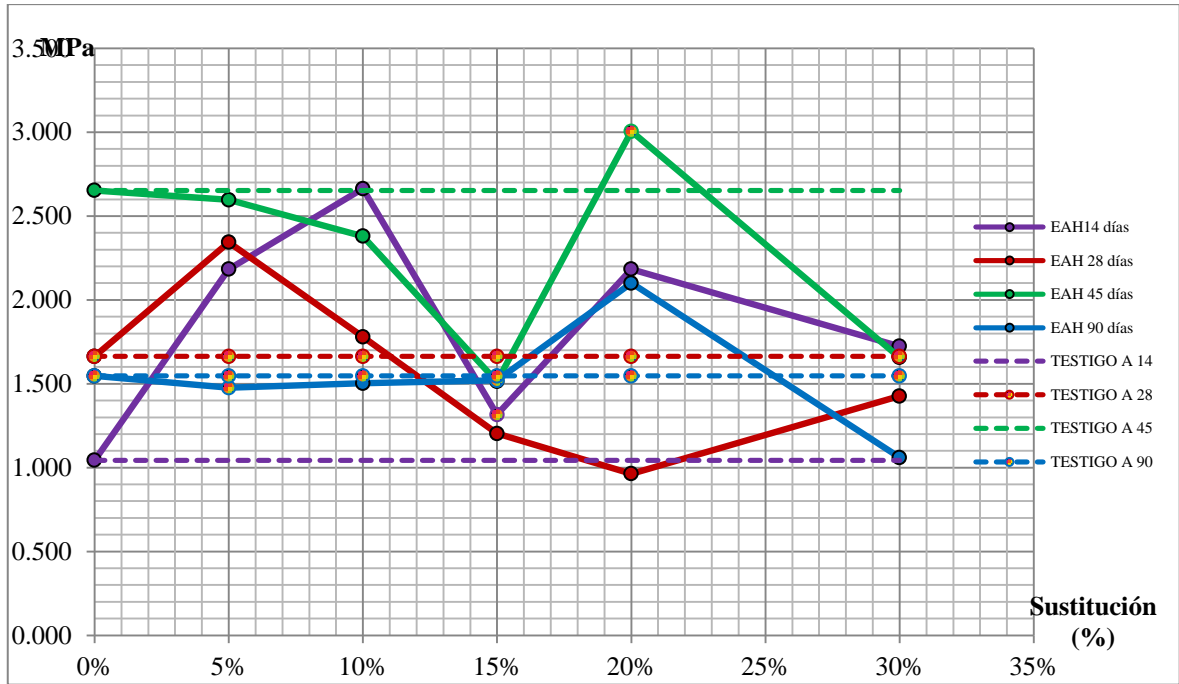
4.2.2.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.2.2.3.1. Tensión



4.2.2.4. Resultados en las losas de adherencia

4.2.2.4.1. Adherencia

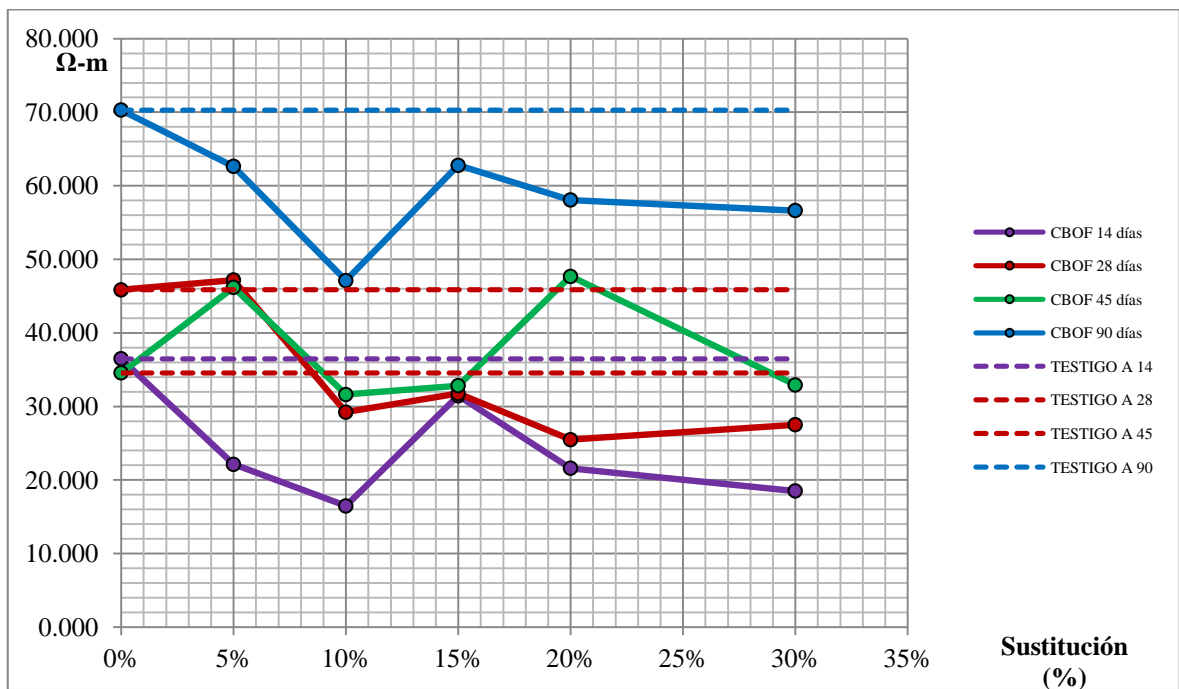


4.2.3. Ceniza del Horno de BOF (CBOF)

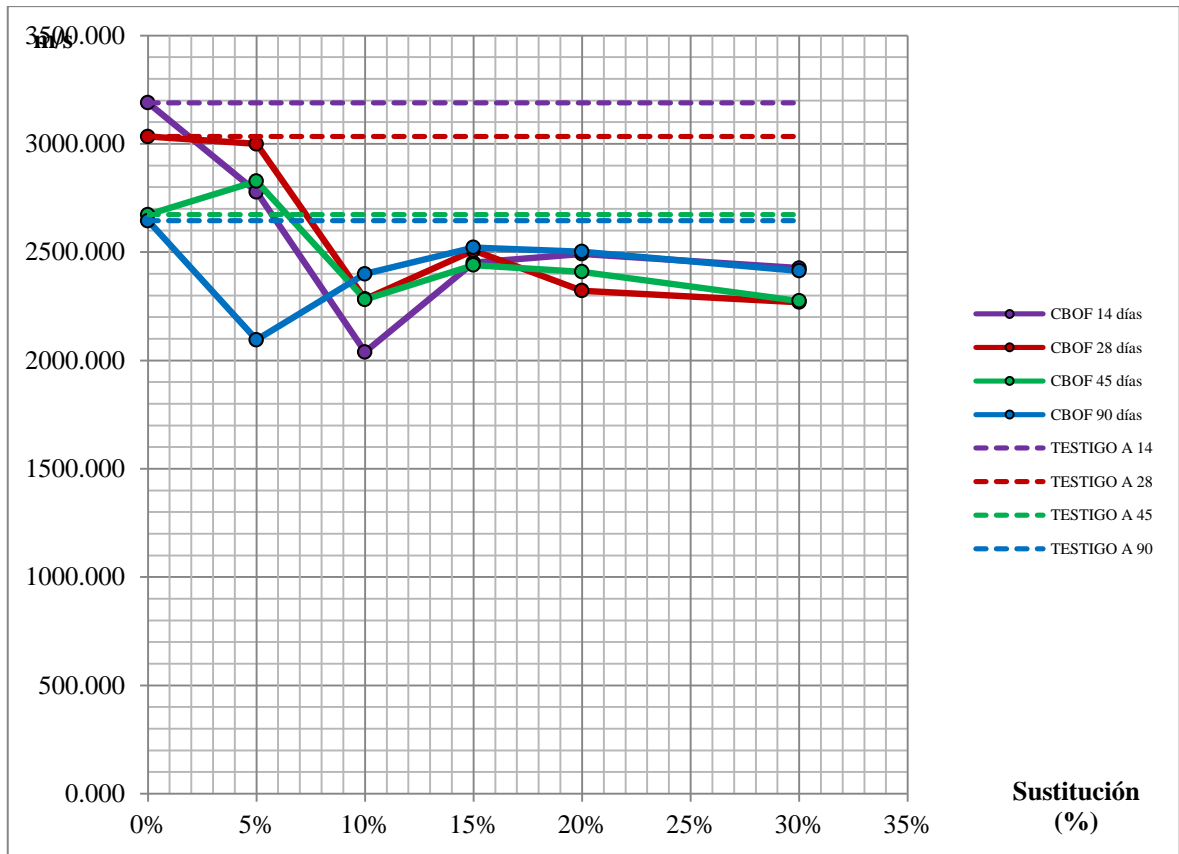
4.2.3.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.2.3.1.1. Pruebas No destructivas

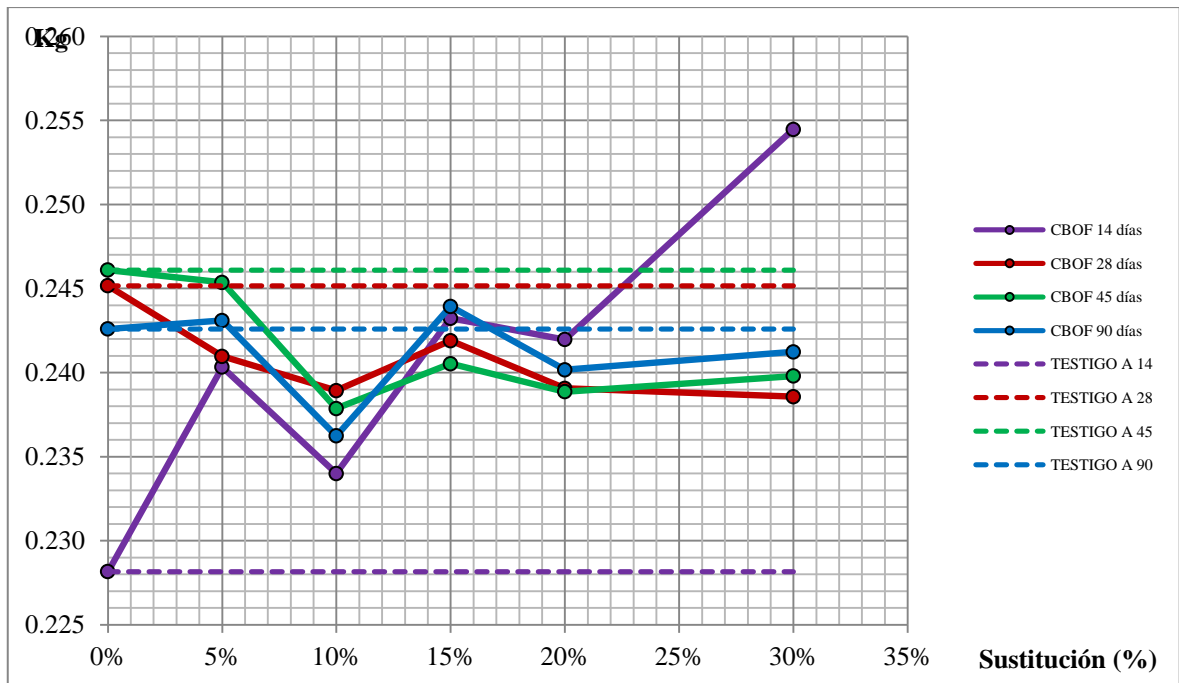
4.2.3.1.1.1. Resistividad



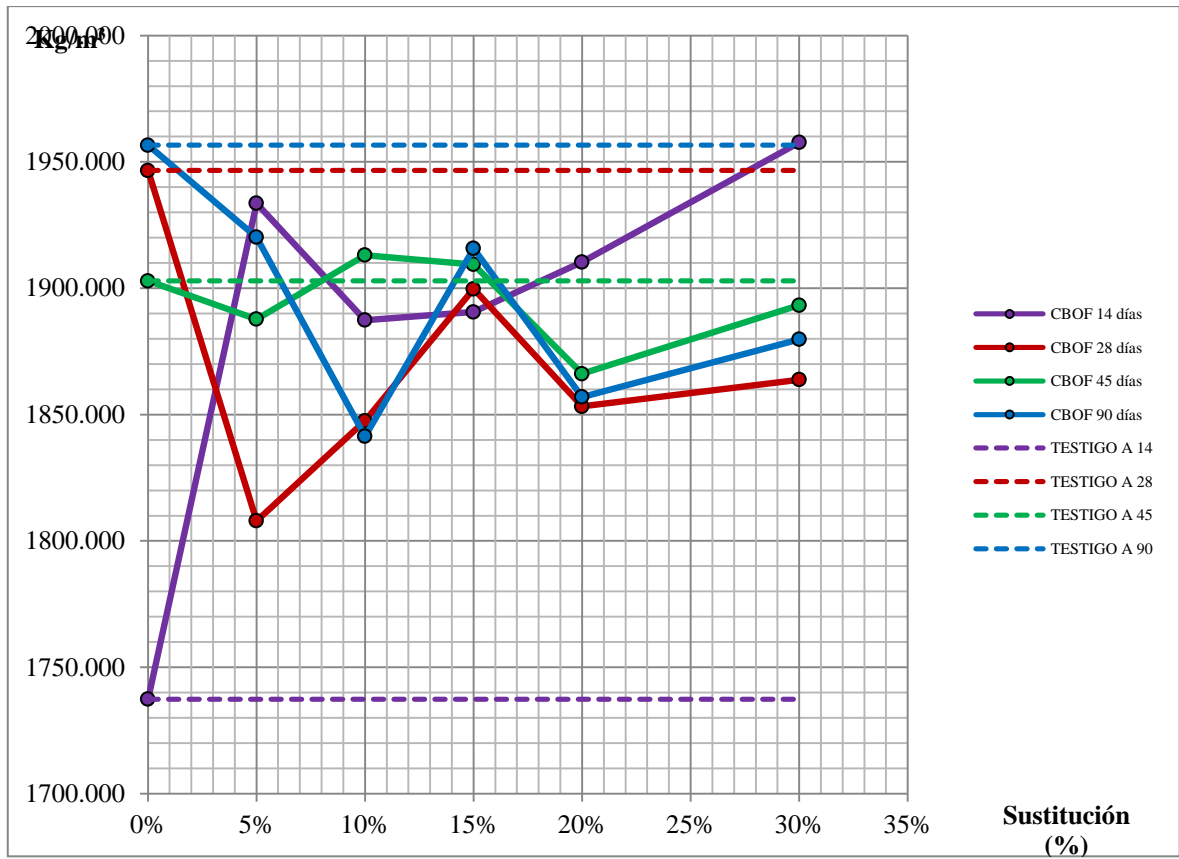
4.2.3.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



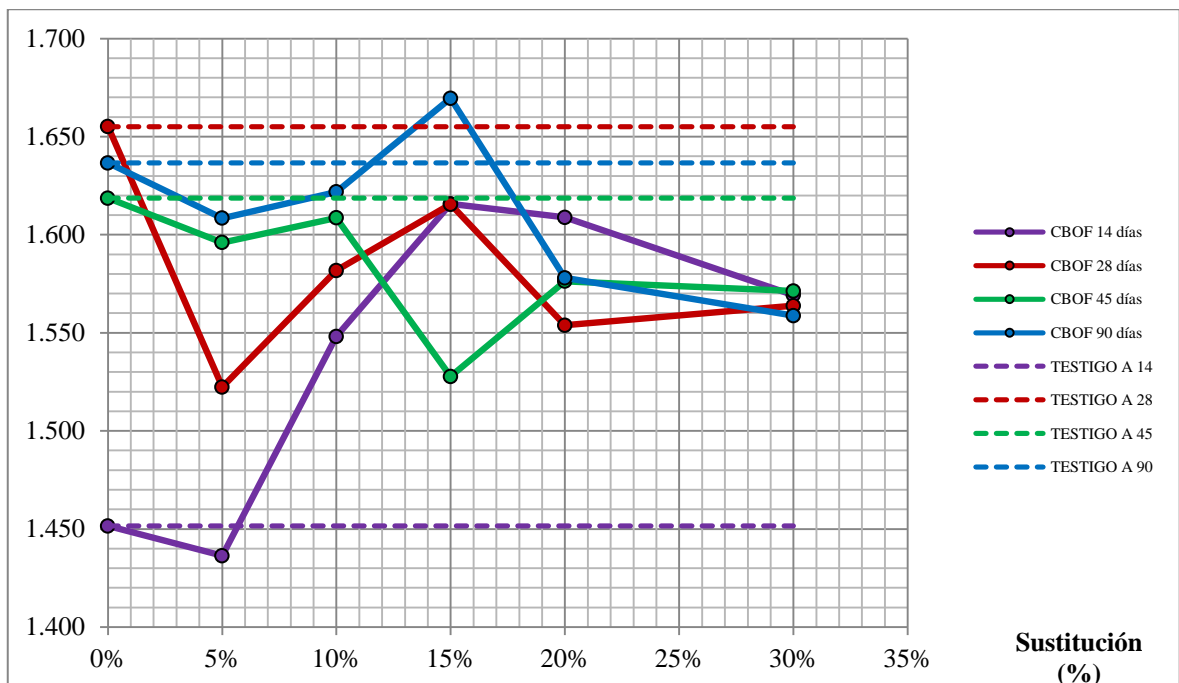
4.2.3.1.1.3. Masa



4.2.3.1.1.4. Densidad

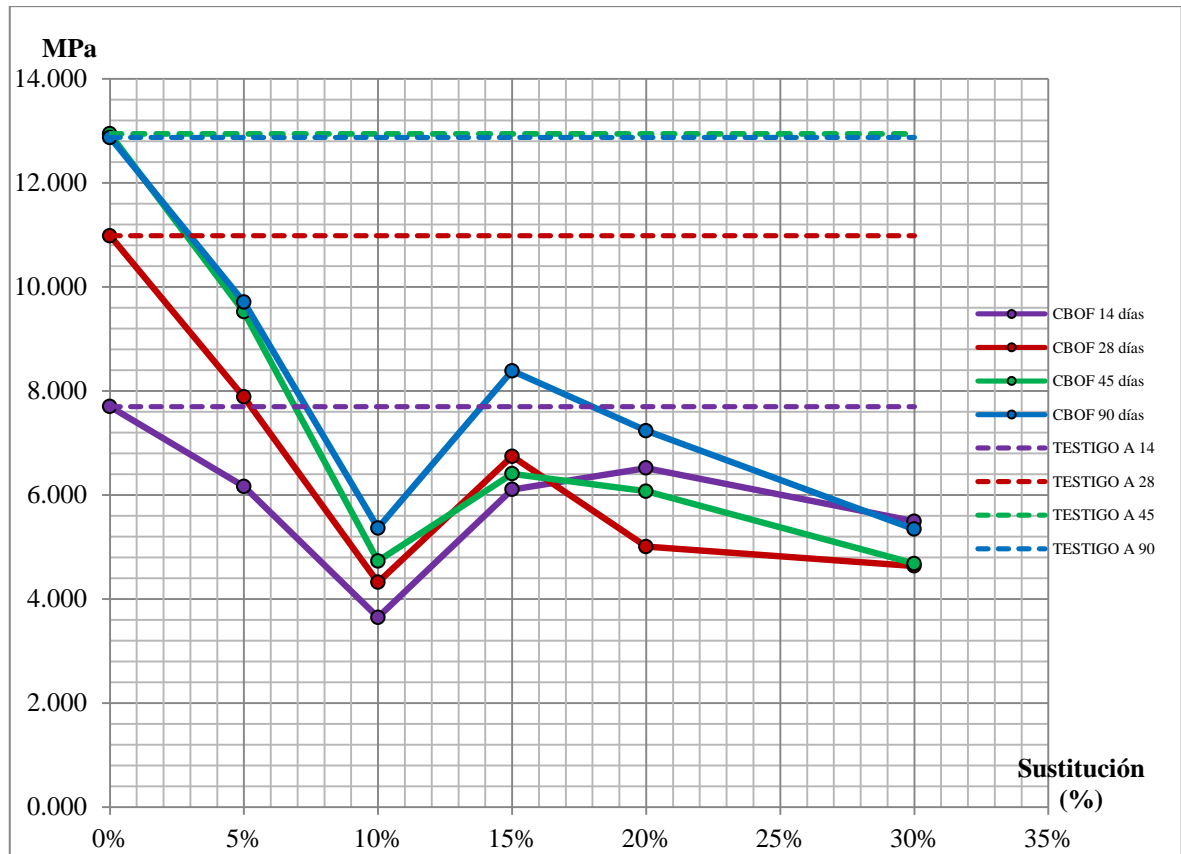


4.2.3.1.1.5. Gravedad Especifica



4.2.3.1.2. Pruebas Destructivas

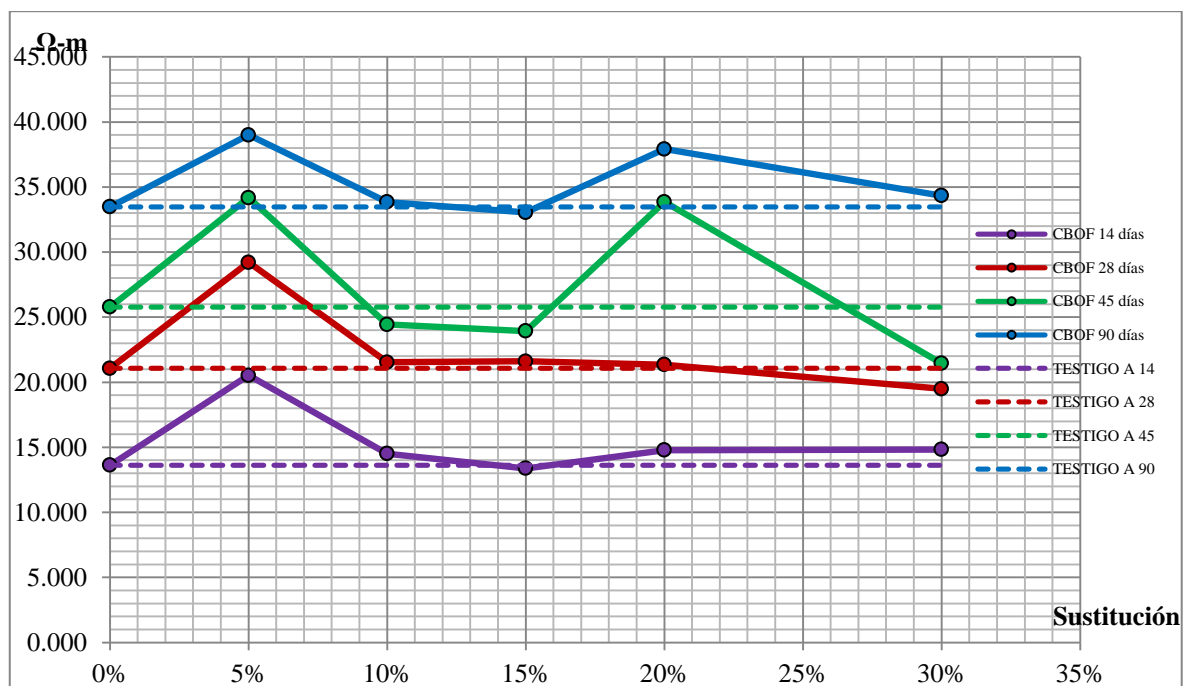
4.2.3.1.2.1. Compresión Simple



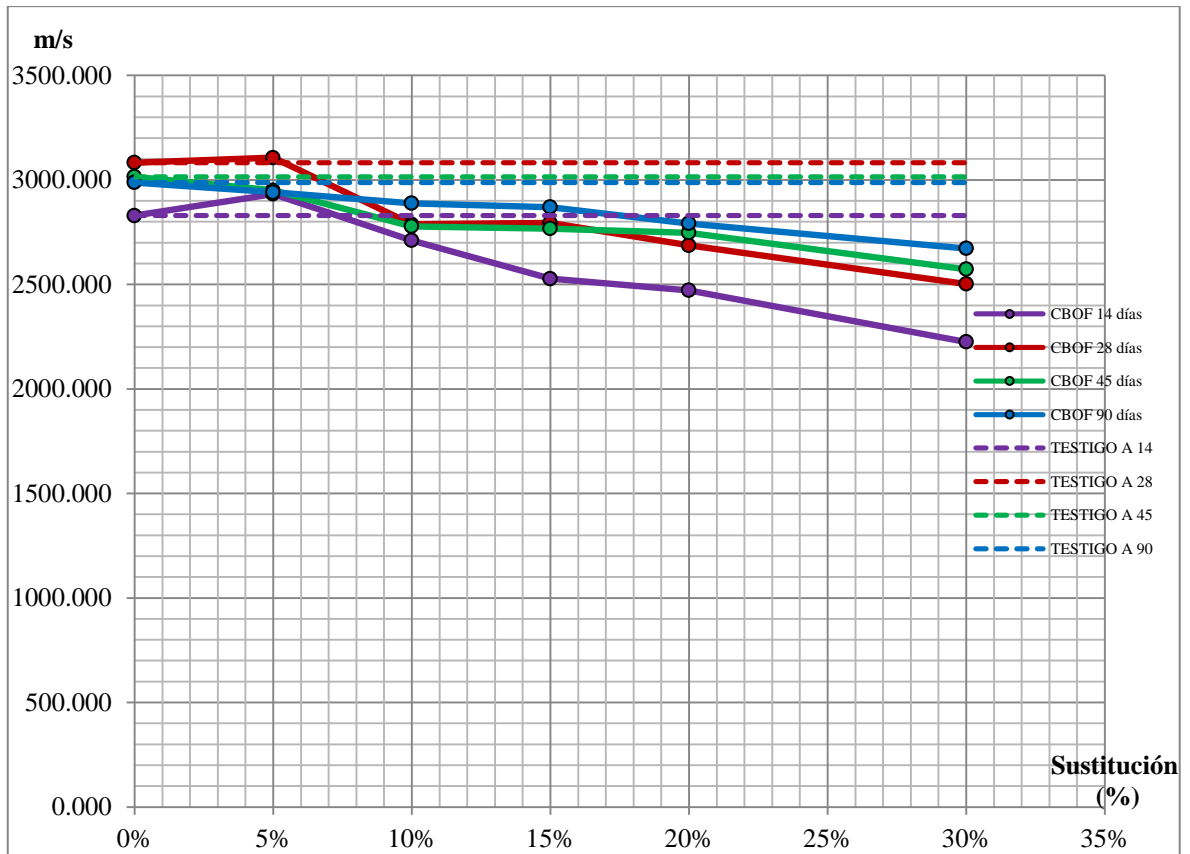
4.2.3.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.2.3.2.1. Pruebas No destructivas

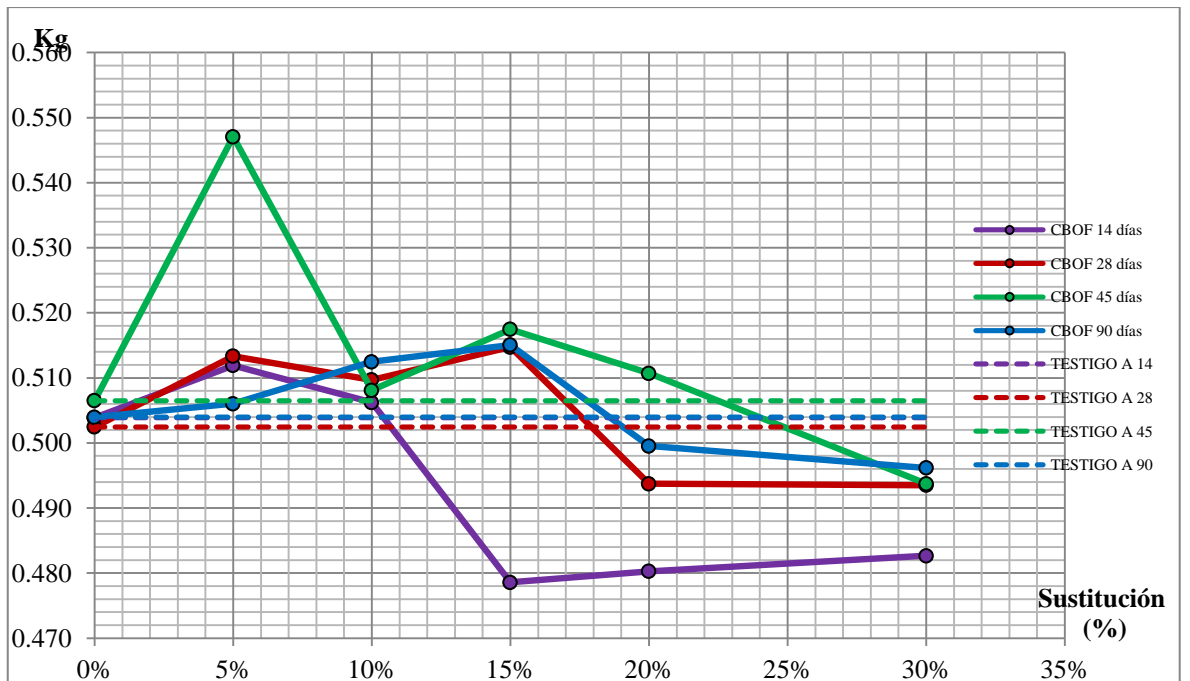
4.2.3.2.1.1. Resistividad



4.2.3.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

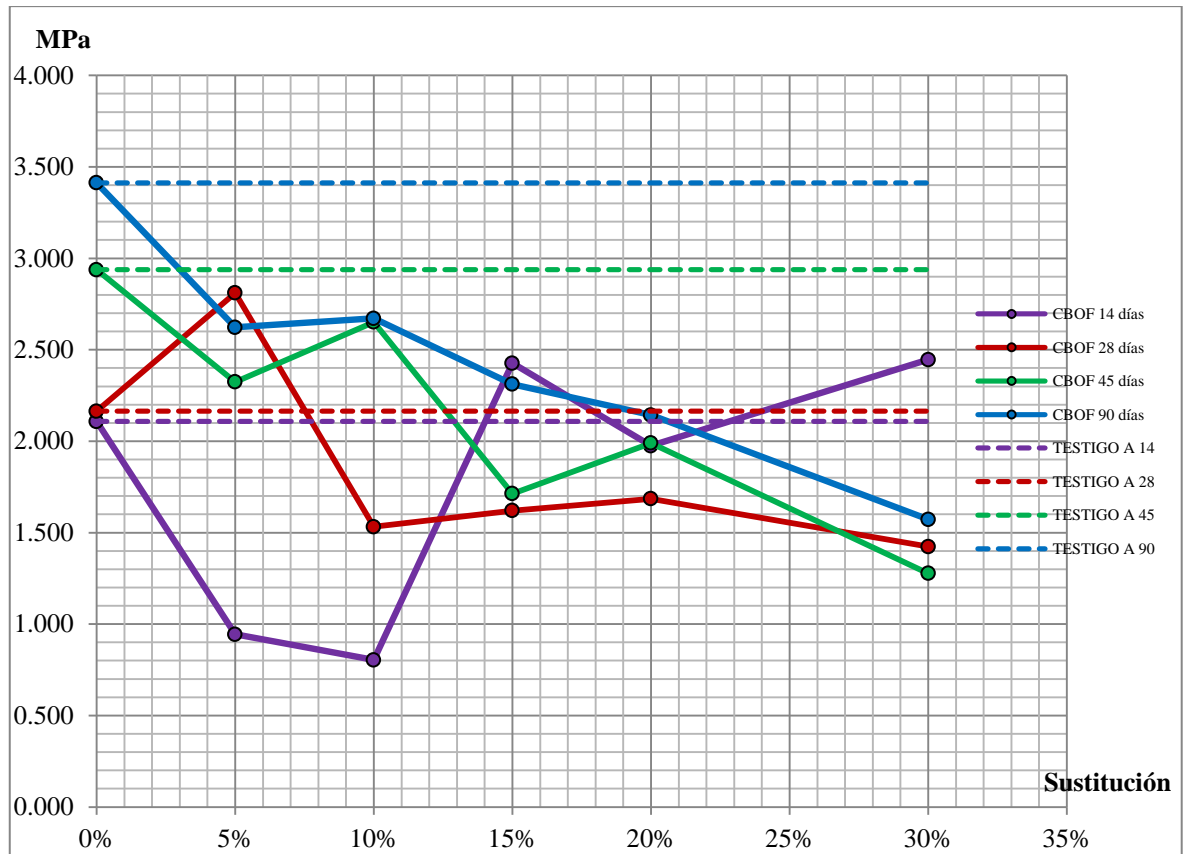


4.2.3.2.1.3. Masa



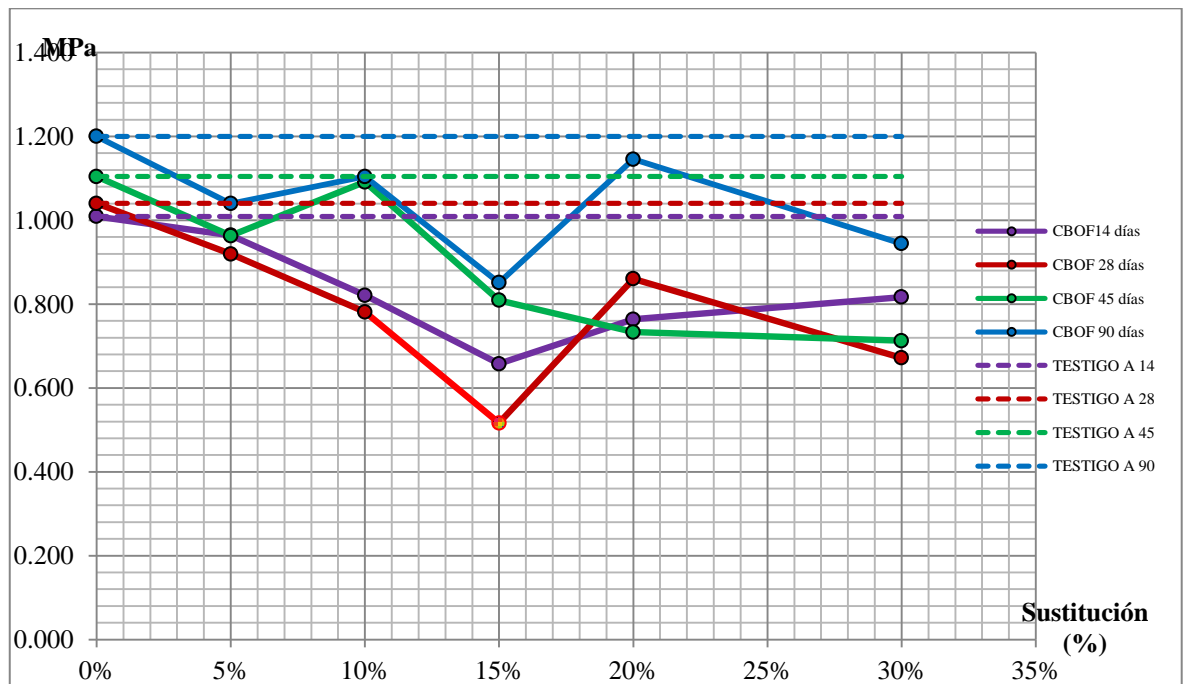
4.2.3.2.2. Pruebas Destructivas

4.2.3.2.2.1. Flexión



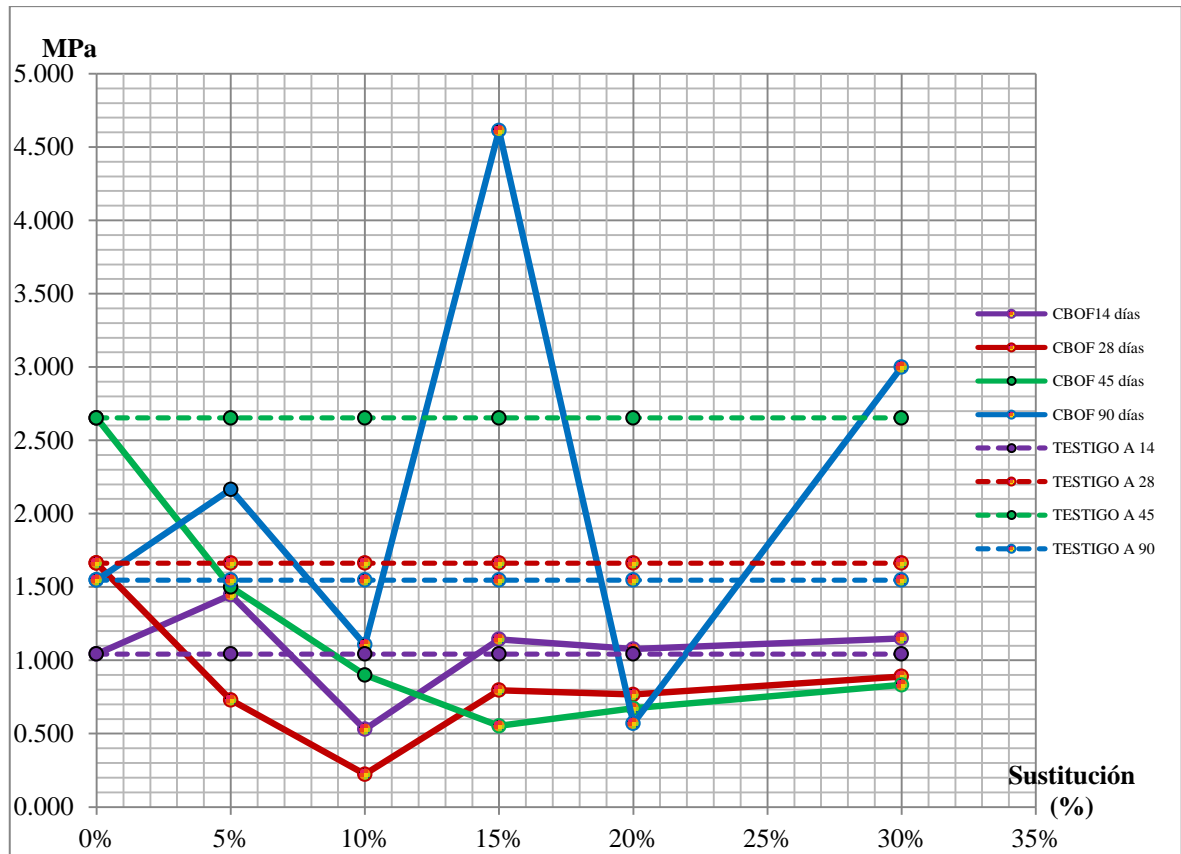
4.2.3.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.2.3.3.1. Tensión



4.2.3.4. Resultados en las losas de adherencia

4.2.3.4.1. Adherencia

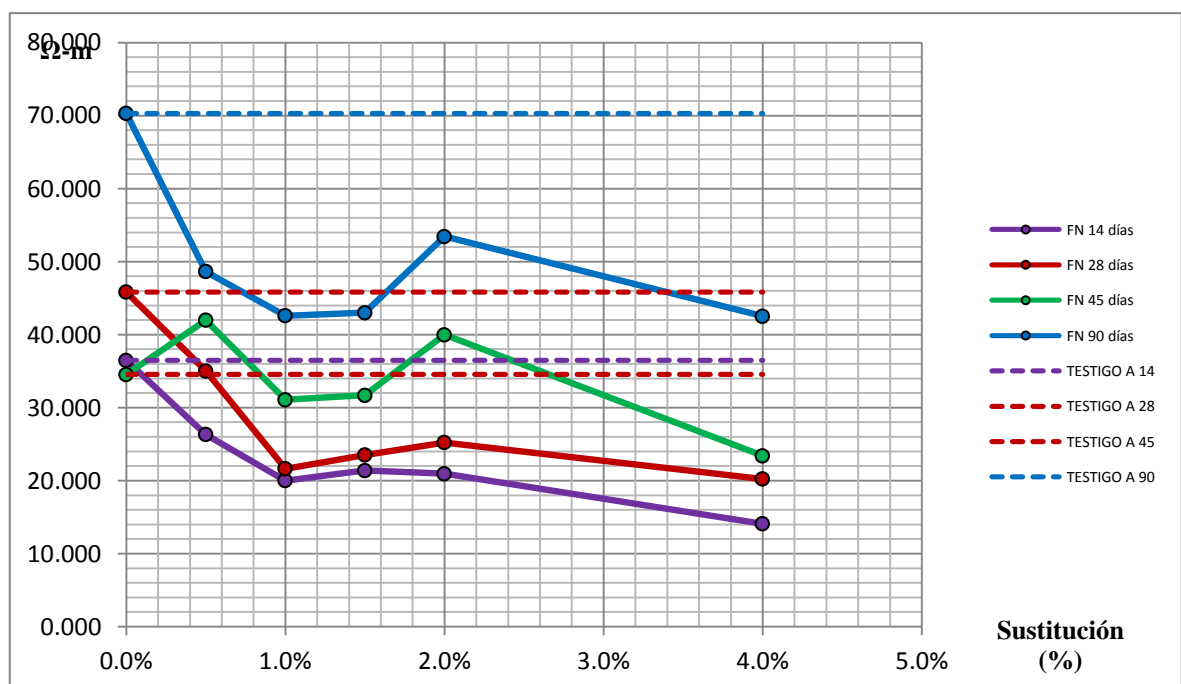


4.2.4. Fibra de Nopal (FN)

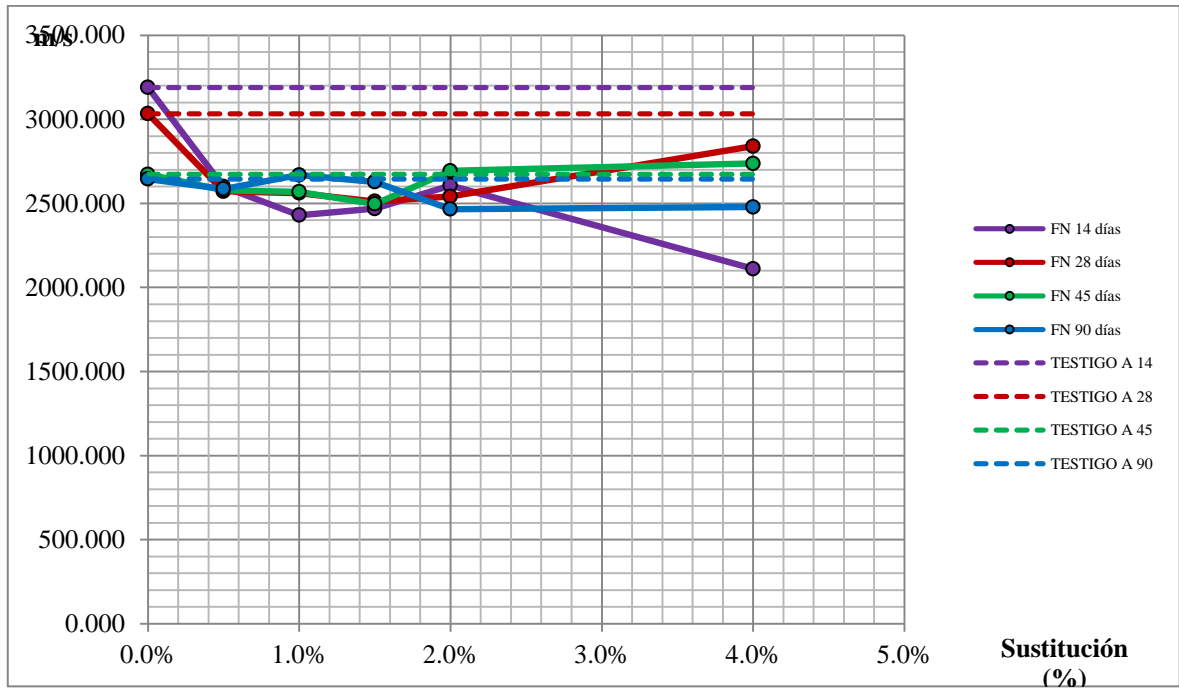
4.2.4.1. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes cúbicos.

4.2.4.1.1. Pruebas No destructivas

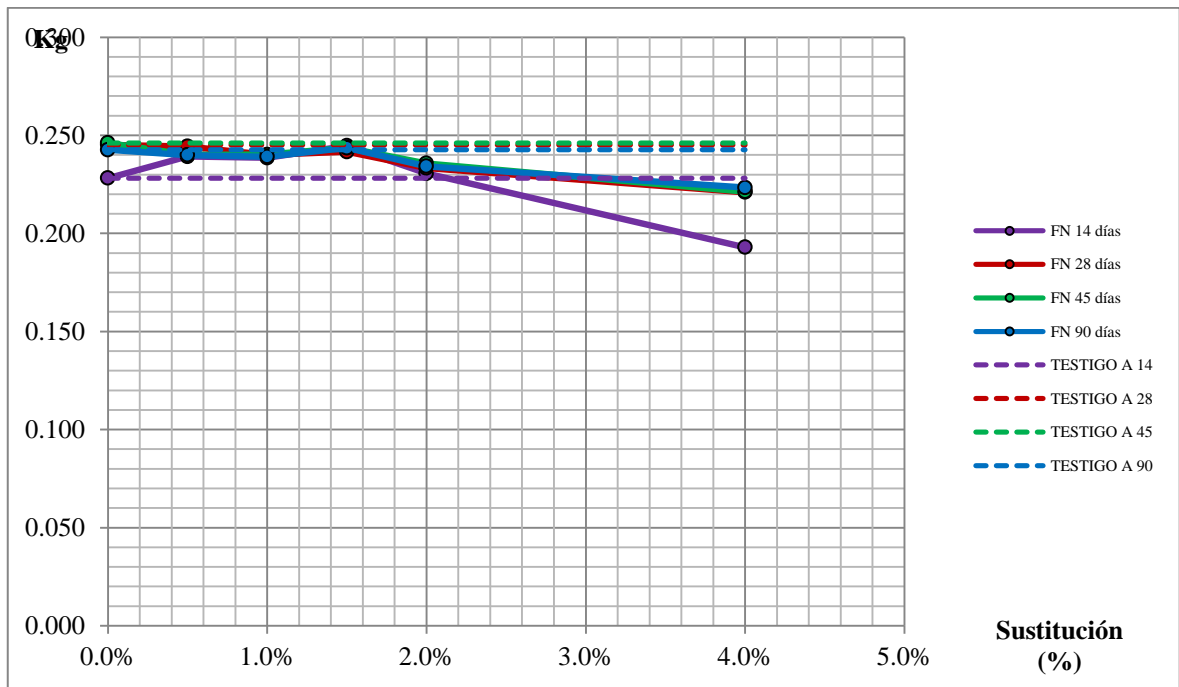
4.2.4.1.1.1. Resistividad



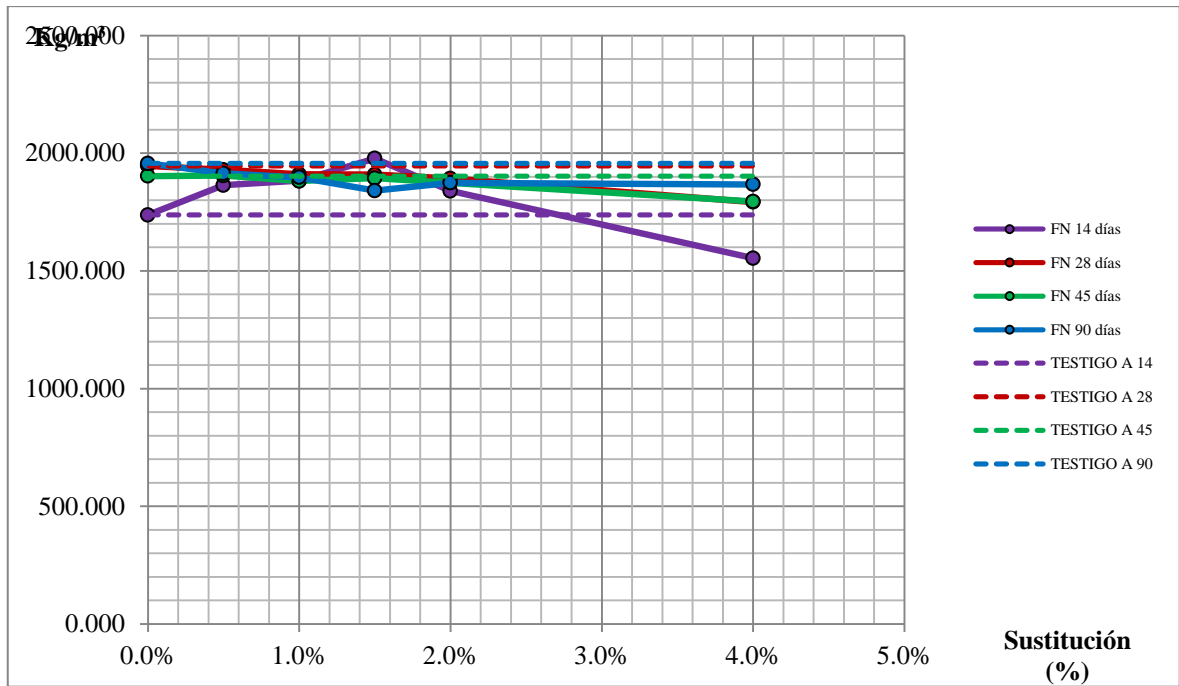
4.2.4.1.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico



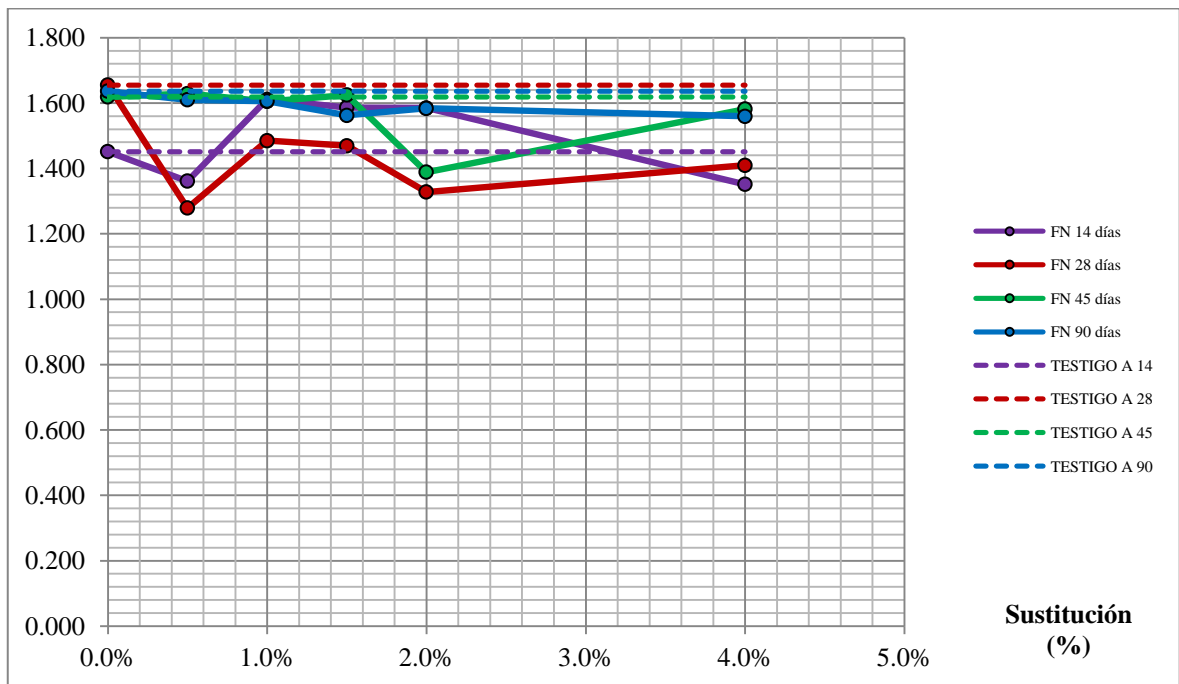
4.2.4.1.1.3. Masa



4.2.4.1.1.4. Densidad

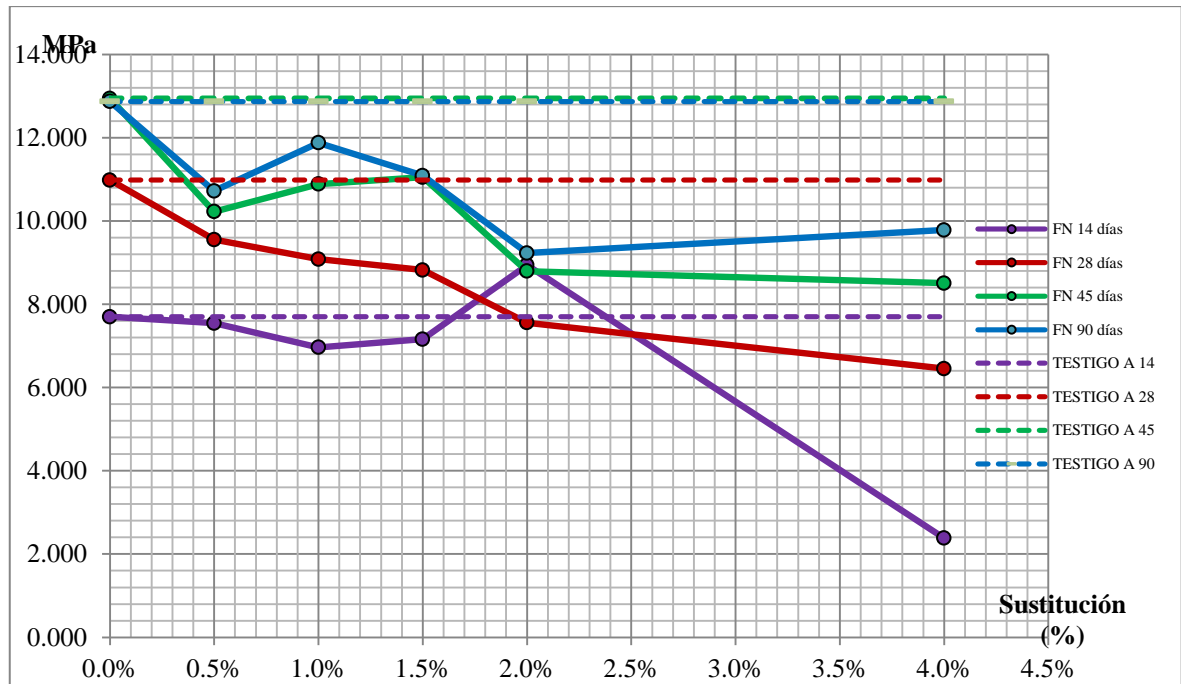


4.2.4.1.1.5. Gravedad Específica



4.2.4.1.2. Pruebas Destructivas

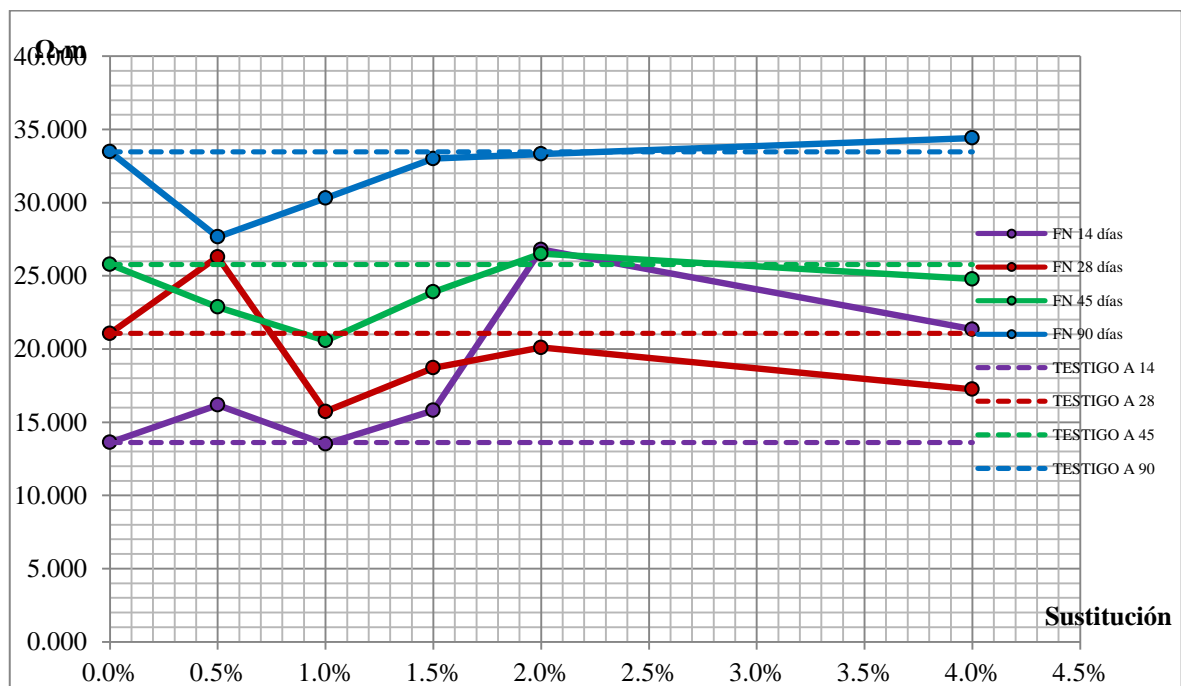
4.2.4.1.2.1. Compresión Simple



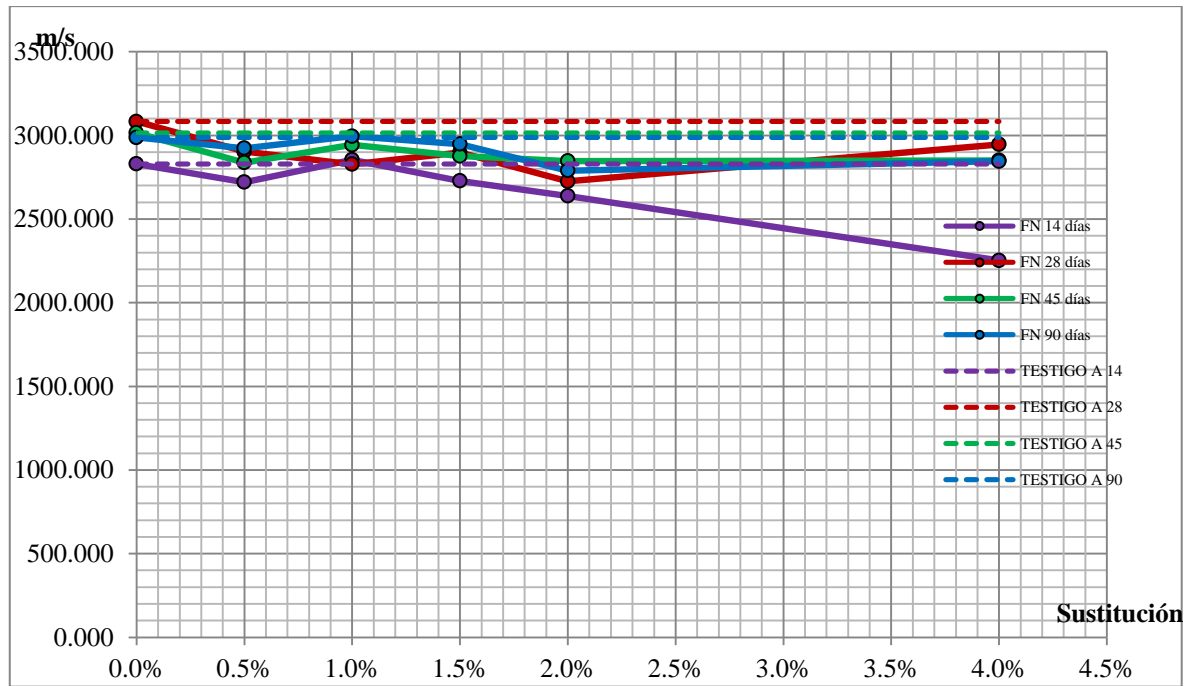
4.2.4.2. Resultados de las Pruebas realizadas en especímenes prismáticos.

4.2.4.2.1. Pruebas No destructivas

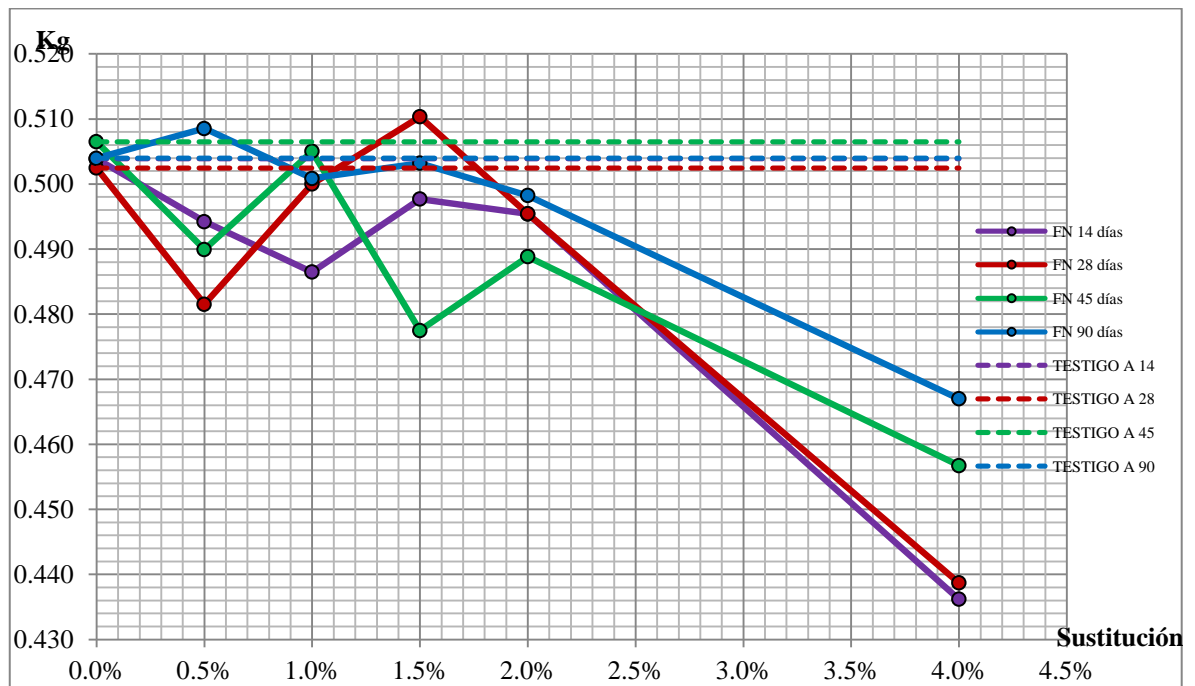
4.2.4.2.1.1. Resistividad



4.2.4.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

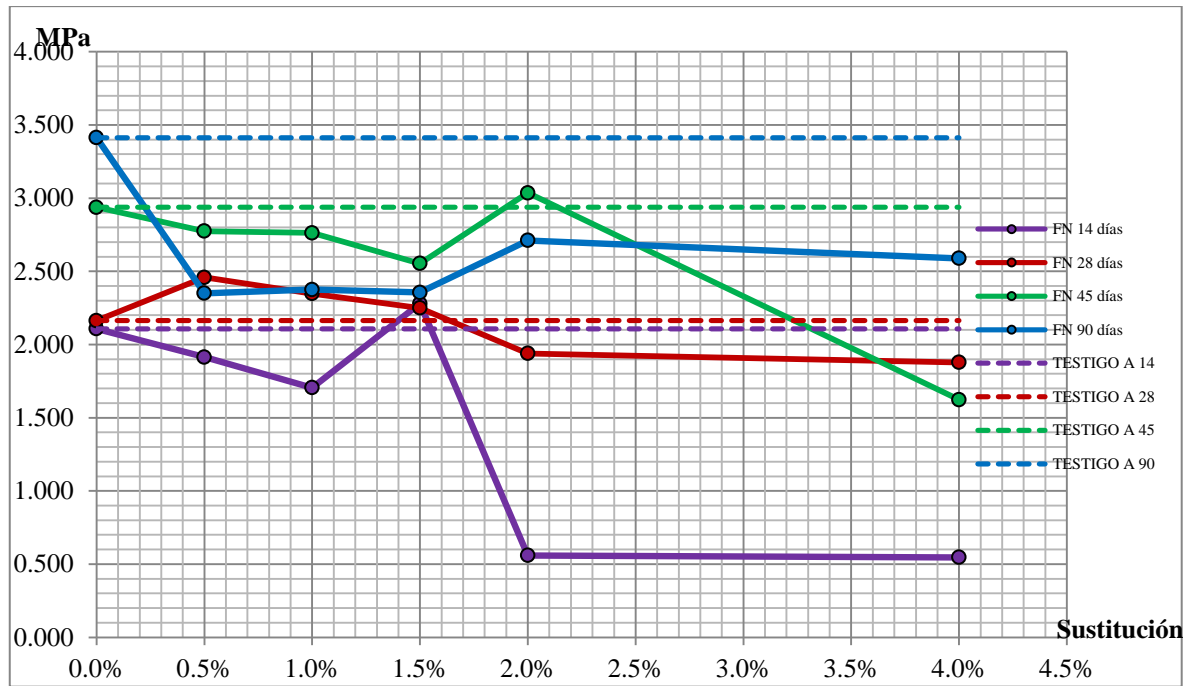


4.2.4.2.1.3. Masa



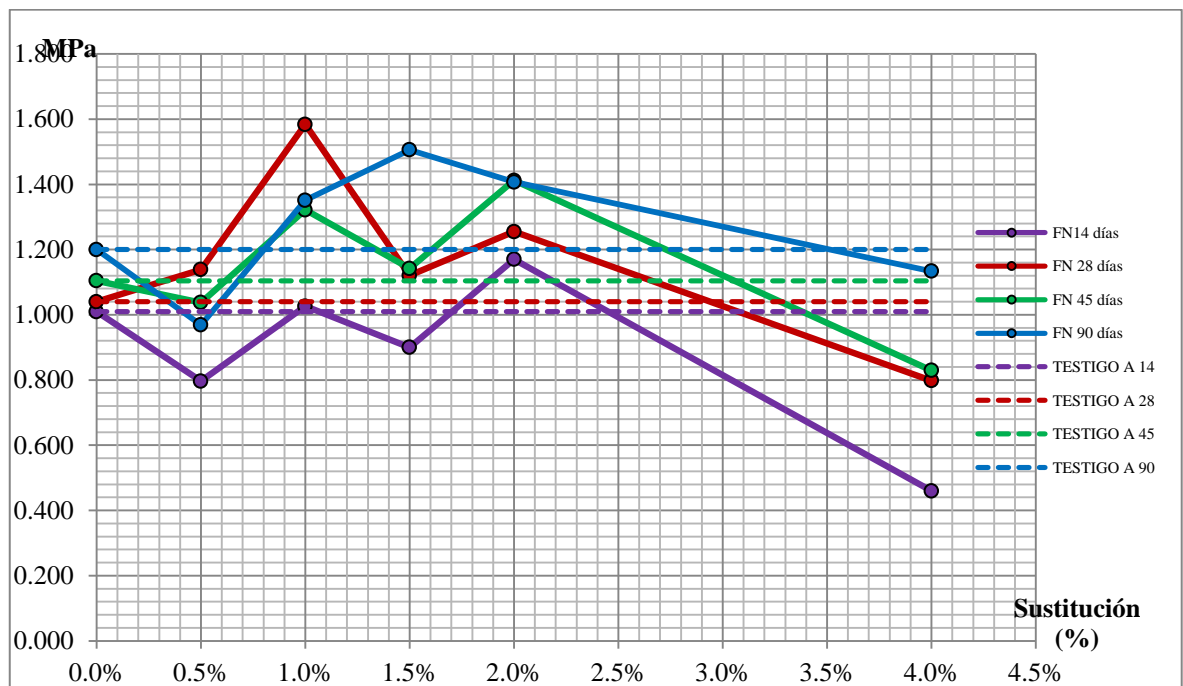
4.2.4.2.2. Pruebas Destructivas

4.2.4.2.2.1. Flexión



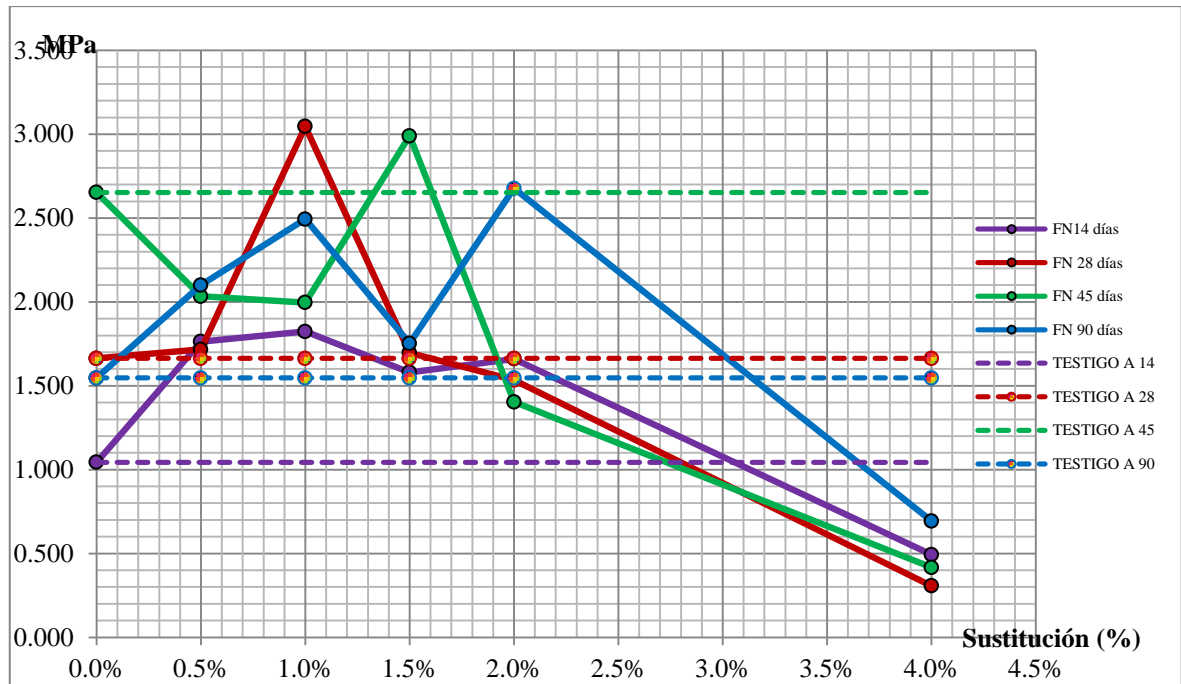
4.2.4.3. Resultados de las Pruebas realizadas en briquetas

4.2.4.3.1. Tensión



4.2.4.4. Resultados en las losas de adherencia

4.2.4.4.1. Adherencia



5. ANÁLISIS COMPARATIVO

El modelo seleccionado, LARS, está dentro de los modelos de regresión multi-variable y se selecciono debido a que la estadística del modelo puede proveer información de cómo cada variable en el modelo influye en la predicción (Qindan et al, 2011).

Se empleó Python, que es un lenguaje de programación el cual permite trabajar más rápido e integrar los sistemas de forma eficaz.

A continuación se resumen los modelos obtenidos para las predicciones, indicando los valores del factor de corrección, así como de la media del error medido en las predicciones.

Tabla 12. Comparación de modelos obtenidos para predecir la resistencia a la compresión

Esp.	Modelo	Media del error (%)	F.de correl.	Nom.
Cil. de 1 ^{er} etapa	$\sigma = 38.18928 * vpu - 0.0395 * frec + 5.2680 * rebote + 1.9106 * edad$	12.24	0.6115	M0
Cil. de 1 ^{er} etapa s/edad	$\sigma = 1.1523 * resistiv + 29.1588 * vpu - 0.0376 * frec + 6.0231 * rebote$	12.41	0.6205	M1
Cil. de 2 ^{da} etapa	$\sigma = 3.3681 * resistiv + 128.2588 * vpu - 0.0045 * frec - 597.2384 * a/c - 1.8255 * edad$	6.45	0.9792	M2
Cil. de 2 ^{da} etapa sin a/c	$\sigma = 12.3166 * resistiv - 20.3913 * vpu - 10.2499 * edad$	8.20	0.9706	M3
Cil. de 2 ^{da} etapa sin edad	$\sigma = 1.6944 * resistiv + 139.4792 * vpu - 621.6597 * a/c$	5.80	0.9789	M4
Cil. de 2 ^a etapa sin edad ni a/c	$\sigma = 3.0799 * resistiv + 28.8467 * vpu$	10.08	0.9439	M5
Valid M2	Validando M2 con cil de 1era etapa	22.08	0.4904	
Cil. de 1 ^{er} y 2 ^{da} etapa	$\sigma = 2.4515 * resistiv + 125.0479 * vpu - 0.0658 * frec - 396.6692 * a/c - 1.3238 * edad$	14.55	0.8145	M6
Valid M6	Validando M6 con 27 cilindros restantes	14.93	0.8000	
Vigas 1 ^{er} etapa	$MR = 1.6175 * vpu + 0.0151 * frec_long - 0.0943 * edad$	8.86	0.8017	M7
Vigas 2 ^{da} etapa	$MR = 4.0012 * resistiv + 1.1551 * vpu - 0.1291 * frec_long + 0.2808 * frec_trans - 4.3764 * a/c - 1.9452 * edad$	5.10	0.9484	M8
Valid M8	Validando M8 con vigas de 1era etapa	11.3	0.7542	

6. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El método de la velocidad de pulso es un excelente medio para investigar la uniformidad del concreto. El procedimiento de prueba es simple y los equipos disponibles en el mercado son fáciles de usar tanto en laboratorio como en campo.

El procedimiento de prueba ha sido estandarizado por la ASTM y otras organizaciones, y el equipo de prueba esta disponible en varias fuentes comerciales. Con la disponibilidad de instrumentos digitales pequeños, los cuales son relativamente baratos y fáciles de operar, la prueba de ultrasonido nos trae una nueva dimensión para el control de calidad del concreto en obra.

Debido a que un gran número de variables afectan las relaciones entre los parámetros de resistencia del concreto y su velocidad de pulso ultrasónico, su uso para estimar la resistencia a la compresión y/o a la flexión del concreto no es recomendado a menos que previamente se hayan desarrollado correlaciones entre estas (Malhotra, y otros, 2004).

Los modelos M0 y M1, tienen un factor de correlación bajo, este factor debe estar lo más próximo a 1, lo que quiere decir que si tenemos un factor de correlación de 1 las predicciones son exactas, por tanto estos modelos no son buenos; los modelos M2, M3, y M4 tienen factores de correlación arriba de 0.97 y el mejor es M2, con un factor de correlación de 0.9792, pero al validar este modelo con los cilindros de la primera etapa obtenemos un factor de correlación de 0.4904, por lo que se genera un nuevo modelo con los datos de los cilindros de la primera y segunda etapa, M6, se tienen 117 datos en conjunto, se tomaron 90 datos para generar el modelo M6 y este se valido con los 27 datos restantes obteniendo un factor de correlación de 0.800 y una media del error de 14.93% por lo que consideramos al modelos M6 como el más adecuado para predecir en este estudio la resistencia a la compresión del concreto hidráulico con las características de dicho concreto aquí consideradas.

Uno de los factores de correlación obtenido en otros trabajos fue de 0.94, (Castellanos, 1985), sin embargo no se podía usar un único modelo bivariado entre la velocidad y la resistencia, aún cuando los concretos fueran preparados con el mismo tipo de agregado. En otro trabajo que formula un modelo predictivo de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico en base a mediciones de rebote de esclerómetro y a velocidades de pulso ultrasónico (Qindan et al, 2011), se obtiene un factor de correlación de 0.89, y se concluye como un procedimiento adecuado y ejemplo a seguir para crear modelos de regresión. Nuestros factores de correlación son un poco bajos en comparación a los presentados por los trabajos mencionados sin embargo nuestro modelo puede ser aplicado con materiales locales y obtener resultados confiables, de acuerdo a las condiciones planteadas en esta investigación.

El algoritmo LARS nos proporciona las variables de acuerdo a su orden de importancia, esto lo determina gracias a que cuando obtiene la predicción de un cilindro usa los datos de todos los cilindros restantes que tiene para obtener dicha predicción, esto le permite definir que variables son más importantes que otras en la predicción.

En el caso del modelo M6, las variables de acuerdo a su orden de importancia son las siguientes:

1. Velocidad de pulso ultrasónico
2. Relación agua cemento
3. Resistividad eléctrica
4. Frecuencia de resonancia
5. Edad

7. BIBLIOGRAFÍA

2004. [aut. libro] Demetrio Mendoza, Eva Leticia Brito Benitez y Jesús A. Arenas Alatorre. *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología*. 2004, págs. 156-159.

Abrams, D. A. 1919. "*Design of Concrete Mixtures*". Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute. Chicago : s.n., 1919. Boletín No. 1.

Águila, Idalberto y Soso, Milena. 2008. *Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos*. Universidad Central de Venezuela : Revista de la Facultad de Ingeniería, 2008. págs. pp.51-62. Vol. No. 4.

Aguilar-Rivera, Noé, y otros. 2009. "¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México?", . [trad.] Competitividad y Gobernabilidad. Revista Globalización. Georgetown University – Universia : s.n., 2009. Vol. 3 N° 1. 1988.

Aïtcin, Pierre-Claude. 2008. *El futuro del concreto y el concreto del futuro*. Profesor Emérito de la Universidad de Sherbrooke. Québec, Canadá : s.n., 2008.

Amorocho Cortés, Enrique y Oliveros Villamizar, Germán. 2000. *Apuntes sobre Energía y Recursos Energeticos*. Bucaramanga, Colombia : Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2000.

ARQHYS. 2012. [En línea] 2012. [Citado el: 06 de Febrero de 2012.] <http://www.arqhys.com/construccion/mortero.html>.

ARQHYS. [En línea] [Citado el: 06 de Febrero de 2012.] <http://www.arqhys.com/construccion/mortero.html>.

ASTM C 109M. 2002. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. U.S.A. : s.n., 2002.

ASTM C 109M, Internacional. 2002. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Estados Unidos de America : s.n., 2002.

ASTM C 109M, International. 2002. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*1. Estados Unidos : s.n., 2002.

ASTM C 1583. 2004. *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. Estados Unidos : s.n., 2004.

ASTM C 188, Internacional. 1995. *Standard test method for Density oy Hydraulic Cement*. Estados Unidos de America : s.n., 1995.

ASTM C 293. 2002. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. Estados Unidos : s.n., 2002.

ASTM C 33, Internacional. 2003. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Estados Unidos de America : s.n., 2003.

ASTM C 469. 2002. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Estados Unidos : s.n., 2002.

ASTM C 511. 2003. *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. estados unidos : s.n., 2003.

BADOGIANNIS, E., et al. 2005. *Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. Cem. and Conc. Comp.,* 2005.

Beutel, R, y otros. 2007. *Quantitativer Verfahrensvergleich. In: Bergmeister, K., Wörner, J.-D, eds. Betonkalender 2007, Ernst & Sohn,* 2007. págs. 567–57.

Caldarone, A, Gruber, A y Burg, G. 1994. *Conc. Int.* 1994.

Caldarone, A. G. 1994. *"High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat."*. 1994. págs. 37-41.

Caldarone, A., Gruber, A., Burg, G. 1994. *High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat., 37-41,* 1994.

—. **1994.** *High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat., 37-41,* 1994.

CALDARONE, A., GRUBER, A., BURG, G. 1994. *High-Reactivity Metakaolin: A New J. ACI Mat., 37-41,* 1994.

CANACEM. [En línea] [Citado el: 27 de ENERO de 2012.]
http://www.canacem.org.mx/tipos_de_cemento.htm.

—. **2010.** Camara Nacional del Cemento. México : s.n., 2010.

Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza. **Escalante, Ivan, Navarro, A y Gomez, L. Y. 2011.** 2011, Revista ALCONPAT, págs. 156-169.

Cardim de Carvalho Filho, Arnaldo. 2001. "*Análisis del Ciclo de Vida de Productos Derivados de Cemento-Aportaciones al Análisis de los Inventarios del Ciclo de Vida del Cemento*". Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona, España, 2001. Tesis Doctoral .

Carreter F., Lázaro. 2004. *El Nuevo Dardo en la Palabra.* Madrid : Santillana, 2004.

Charles, J Hellier. 2001. *Handbook of Nondestructive Evaluation.* Estados Unidos : McGraw-Hill, 2001.

2001. Cujae. *Ecomateriales.* [En línea] 2001.
www.cujae.edu.cu/centros/cecat/html/eventos/Ecomateriales2001/HTML/Trabajos/c1t30.htm.

De Silva, P. S. y Glasser, F. P. 1993. "*Phase relations in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration*". 1993.

DICALITE DE MÉXICO S.D. *Perlita Expandida aplicada a la construcción.* México : s.n.

E., Rivera Flores. Morteros de albañilería para restaurción, como aditivo miel de abeja. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22.

Escalante, Ivan, Navarro, A y Gomez, L. Y. 2011. *Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza.* 2011. págs. 156-169.

—. **2011.** *Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza.* 2011. págs. 156-169.

Escalante, J. I., Navarro, A. y Gómez, L. Y. 2011. “*Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza*”. Revista ALCONPAT. 2011. págs. 156-169.

EUP-ALMADEN. 2010. [Http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf](http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf). [En línea] 15 de 11 de 2010.

Evolución reciente de la industria de cemento. Pacífica, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del. 2008. 2008, PORTES, págs. 165-202.

Fundación ICA. 22 de marzo del 2000. “*Curso Taller del Concreto*”, . 22 de marzo del 2000.

Gaete, L., Vargas Hernández, Y. y Pettorino, A. 2001. *Medida de los parámetros acústicos en sólidos II.* España : Jornadas Iberoamericanas en Ultrasonido e Imagen Ultrasónica, 2001.

García Rivero, José Luis. 2004. *Manual técnico de Construcción Holcim Apasco.* s.l. : Fernando Porrua, 2004.

Hamid, R., Yusof, K M y Zain, M. F. 2009. “ *A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume*”. 2009. págs. 94-98.

Hernández-Toledo, U I, Montes-García, Pedro y Caballero-Aquino, T. 2010. “*Efecto de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en las propiedades de morteros*” . CIIDIR-IPN-Oaxaca,México : s.n., 2010.

Hidalgo, Ciudad. 2012. Nuestro Mexico.com. [En línea] 20 de Febrero de 2012. <http://www.nuestro-mexico.com/Michoacán-de-Ocampo/Hidalgo/Huajumbaro/>.

INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS CAOLINES SOBRE EL DESEMPEÑO DE MORTEROS ADICIONADOS CON MK. **Torres Agredo, Janneth y Mejia de Gutierrez, Ruby. 2007.** 2007, Universidad del Valle.

INGTEKCH. El constructor civil. [En línea] [Citado el: 06 de Febrero de 2012.] <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>.

Instituto del Concreto. 1997. *"Manual Tecnología y Propiedades"*. [ed.] Asociación colombiana de productores de concreto- ASOCRETO. Tercera reimpresión. Colombia : s.n., 1997.

Instituto Mundial del Carbón. 2005. *EL CARBÓN COMO RECURSO, una visión general del carbón*. Reino Unido : s.n., 2005.

—. **2005.** *EL CARBÓN COMO RECURSO, una visión general del carbón*. Reino Unido : s.n., 2005.

Juárez Badillo, E y Rodríguez, Rico. 2006. *Mecánica de Suelos Tomo 1, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Tercera edición. México : Noriega Limusa, 2006. págs. 34-35. Vol. 13ª Reimpresión. 968-0069-9.

Kakali, G., et al. 2001. *Thermal Treatment of*. 2001.

KAKALI, G., et al. 2001. *Thermal Treatment of*. 2001.

Kantiranis, N. 2004. *"Re-cycling of sugar ash: a raw feed material for rotary kilns"*, . 2004. pág. 999. Vol. 24.

Kewalramani Manish, A. y Rajiv, Gupta. 2005. *"Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks*. s.l. : Automat Construction, 2005. págs. 374–9. Vols. 15, No. 3.

Kohl, C, y otros. 2005. *"2D- and 3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique"*,. 2005. págs. 817-826. Materials and Structures, Federal Institute for Materials Research and Testing..

Kosmatha, S. H. y Panarese, W. C. 1992. *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"*. [ed.] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC). Primera edición. 1992.

Marquez-Montero, S. y al, et. ALCOMPAT 2010. *Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos*. Xalapa, Veracruz, México. : s.n., ALCOMPAT 2010.

Martínez, W. 2007. *"Apuntes de la materia de Tecnología del Concreto: Criterios de evaluación de resultados de resistencia en el concreto"*,. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán : s.n., 2007.

Martirena, J. F., y otros. 1998. *"Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana"*. 1998.

MASSAZZA, F. 1993. *Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites.* 1993.

Mendoza, Demetrio, Brito Benitez, Eva Leticia y Arenas Alatorre, Jesús A. 2004. *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología.* 2004, págs. 156-159.

Moya, J. S. 1998. *Últimos avances sobre el Tratamiento Térmico del Caolín: Formación o no de Puzolanas Artificiales"*. 1998.

Neville, A. M. 1998. *"Tecnología del Concreto"*. Primera edición. México : Trillas, 1998.

NMX-C-061. 2010. *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos.* MEXICO : ONNCCE, 2010.

NMX-C-109. 2010. *Determinación del Cabeceo de los Especímenes.* México : ONNCCE, 2010.

NMX-C-122-ONNCCE. 2004. *Industria de la construcción – agua para concreto – especificaciones.* 2004.

NMX-C-148. 2010. *Curado de Especímenes.* MEXICO : ONNCCE, 2010.

NMX-C-403-ONNCCE. 1999. *Industria de la construcción – concreto-hidráulico para uso estructural.* 1999.

NMX-C-414-ONNCCE. 2004. *Industria de la Construcción-Concreto-Concreto Hidráulico Industrializado-Especificaciones.* Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción S.C. 2004.

Perlite Institute. 1950. *Perlite information.* New York : s.n., 1950.

Pozzolanic and Cementitious by-product. **MEHTA, P. K. 1989.** Trondheim : s.n., 1989. Proceedings 3rd International Conference.

Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and Concrete Research. **WILD, S. y KHATIB, J. M. y JONES, A. 1996.** 1996. págs. 1537-1544.

Rivera Flores, E. Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22.

Rivera Flores, E. Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22.

Sagar - Sagarpa. 1980-2009. *Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera.* s.l. : Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), 1980-2009.

Salazar, A. 1968. *Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos.* Cali : Corporacion Construir, 1968.

Sepulcre Aguilar, Alberto. 2005. *INFLUENCIA DE LAS ADICIONES PUZOLANICAS EN MORTEROS DE RESTAURACION.* MADRID : s.n., 2005.

Shetty, M. S. 2005. *"Concrete Technology Theory and Practice".* India. : S. Chand and Campanu LTD., Ram Nagar, New Dheli., 2005.

Solis, Carcano Rómel y Baeza Pereyra, Julio. 2003. *"Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto".* Universidad del Zulia, Venezuela. : Revista Técnica de Ingeniería, 2003. págs. 45-55. Vols. 26, No. 1. ISSN 0254-0770.

Wikipedia. [En línea] [Citado el: 06 de Febrero de 2012.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento.](http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento)

Wikipedia. 2011. [Http://es.wikipedia.org/wiki/Agua.](http://es.wikipedia.org/wiki/Agua) [En línea] 2011. [Citado el: 2011 de Febrero de 11.]

wikipedia. 2010. [http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_clim.](http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_clim) [En línea] 2010. [Citado el: 12 de Septiembre de 2010.]

Wild, S. y Khatib, J. M. y Jones, A. 1996. *Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and Concrete Research.* 1996. págs. 1537-1544.