

U.M.S.N.H.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

*ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO
ESTRUCTURAL DE NANOCEMENTOS HÍBRIDOS: CEMENTO
PORTLAND - GEOPOLÍMERO DE FRAGUADO RÁPIDO PARA
ULTRA THIN COMPOSITES PAVEMENTS (ETAPA CERO)*

TESIS.

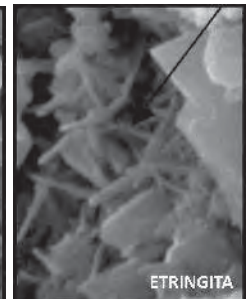
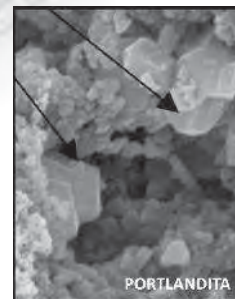
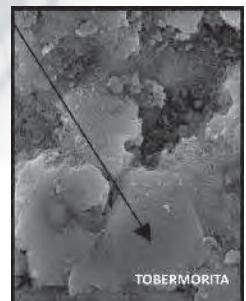
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. FERNANDO MARTÍNEZ MELGAREJO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ CARLOS RUBIO AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN. FEBRERO DE 2011



AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** que me dio salud y tantas bendiciones para lograr mis metas

A LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO Y A LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, a través de su departamento de materiales, por la infraestructura y apoyo en recursos humanos facilitados para la realización de este trabajo de investigación.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (CIDETEQ) por la infraestructura y equipo proporcionado para el desarrollo parcial del presente trabajo de investigación.

Al Dr. José de Jesús Pérez Bueno, por su colaboración y apoyo como investigador en este trabajo.

Al **Dr. José Carlos Rubio Avalos**, Por su colaboración y apoyo como Asesor e investigador durante toda la investigación la cual no se habría realizado sin sus conocimientos, al cual admiro y respeto como persona.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**, jefa de la división de posgrado de la Facultad de ingeniería Civil, por el apoyo brindado desde el primer día que se me abrieron las puertas en este laboratorio y por su grandeza como ser humano ya que he recibido su apoyo incondicional.

Al **M. A. Wilfrido Martínez Molina** por todas sus atenciones hacia mi persona en todo momento.

A **SIALATO** S.A de C.V por facilitarnos el acceso a sus instalaciones y por el apoyo con su infraestructura y equipo proporcionado para evaluaciones complementarias en el área de nano-tecnología de materiales para la construcción.

A **Holcim-Apasco** S.A de C.V por proporcionar las muestras de Cemento portland especiales para este trabajo de investigación.

Por último y siendo la parte fundamental y la más importante para la terminación de este proyecto, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) ya que sin su apoyo económico no hubiera podido continuar con mis estudios de posgrado.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Fernando Martínez Ruiz y Silvia Melgarejo Galván

No tengo palabras para poder expresar todo lo que siento por ustedes, porque gracias a ustedes he logrado todas mis metas tanto personales como profesionales gracias por la educación, cariño y el gran esfuerzo que han realizado a lo largo de mi vida, los quiero padres.

A MIS HERMANOS:

Edgar Martínez Melgarejo y Rosa Isela Martínez Melgarejo por todas las cosas que hemos pasado juntos a lo largo de nuestras vidas y por apoyarme en todos mis proyectos los quiero.

A MIS ABUELOS:

Maternos: Aurelio Melgarejo (†) y Ana María Galván (†)
Paternos: Epifanio Martínez y Ana María Ruiz (†)

A TODOS MIS TÍOS Y PRIMOS:

En especial a mis tíos (José Antonio Ruiz y Laura Eugenia González) así como a mis tías (Isaías Molina Martínez y Patricia Martínez Ruiz) por el apoyo incondicional que siempre me han dado.

A MI FUTURA ESPOSA:

Ileri Patricia Merino Arteaga por todos los momentos que hemos pasado y que hemos salido adelante, gracias por todo tu apoyo amor y por darme fuerzas para seguir adelante en todos mis proyectos en los cuales siempre estarás a mí lado te amo.

RESUMEN

La nano-tecnología de materiales para construcción es un línea de investigación reciente que está abriendo nuevas posibilidades para la I.D. & I.T. en aplicaciones de la ingeniería civil, permitiendo el desarrollo sistemático de nuevas tecnologías y nuevos análisis con mayor precisión de las estructuras, su diseño y su síntesis.

El presente trabajo de investigación en el área de nano-materiales cementantes inorgánicos en su fase “cero” busca alcanzar la viabilidad comercial y tecnológica del desarrollo y uso de nano-cementos base cemento portland para la industria de la construcción, lo cual es un reto científico y tecnológico por las rutas de proceso y/o síntesis de nano-cementos y nano-partículas. Para incorporar la nano-tecnología en materiales para construcción a un costo accesible se siguió el procedimiento “bottom-up approach”, el cual permite a partir de una solución química y generando intercambio iónico formar nuevas fases dentro de matrices existentes, fases nano-métricas las cuales buscan incrementar las propiedades mecánicas, Físicas y de Durabilidad de los concretos actuales.

En esta etapa “cero” se logró realizar la síntesis de un cemento Híbrido: Nano-cemento Geopolimerico-Cemento Portland, se realizó su caracterización física, mecánica nano y micro-estructural y se logro realizar una aplicación comercialmente viable de innovación tecnológica en el diseño de un pavimento rígido elaborado con estas composiciones y cementos portland ordinario usados como referencia.

ABSTRACT

The nano-technology construction materials is a recent line of research that is opening new possibilities for ID & IT in civil engineering applications, allowing the systematic development of new technologies and more precise analysis of structures, its design and synthesis.

The present research in the area of nano-materials, inorganic cementitious phase zero seeks to achieve commercial viability and technological development and use of nano-portland cement concrete base for the construction industry, which is a challenge science and technology for processing routes and / or synthesis of nano-cements and nano-particles. To incorporate nanotechnology in construction materials at an affordable cost procedure was followed "bottom-up approach", which allows, from a chemical solution and generating ion exchange form new phases in existing arrays, nano-metric phases which seek to increase the mechanical properties, Physical and durability of existing concrete.

At this phase "zero" it was development the synthesis of a cement Hybrid Nano-cement-cement geopolymers Portland, we underwent physical characterization, mechanical and Economic nano-structural and achievement make a commercially viable application of technological innovation in the design of a rigid pavement made with these compositions and ordinary portland cement used as a reference.

OBJETIVO GENERAL

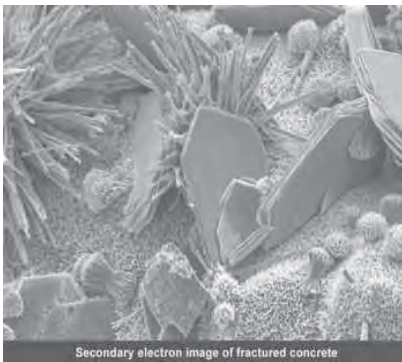
Sintetizar un cemento híbrido (Cemento portland-nanocemento geopolimérico) que permita elaborar nanoconcretos para su uso en obras de concreto hidráulico. Adicionalmente, realizar la caracterización nano, micro y macro estructural del cemento híbrido desarrollado a través de: TEM, SEM, FTIR y DRX, así como determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

Con las mejores composiciones cementantes realizar un nano concreto híbrido estándar y un nanoconcreto híbrido ecológico, evaluando sus propiedades mecánicas para el diseño de un pavimento rígido como aplicación final de la investigación en etapa cero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. **Sintetizar** diferentes composiciones de nanocementos híbridos: cemento portland-nanocemento geopolimérico
2. **Evaluar** las propiedades físicas y mecánicas de los nanocementos obtenidos.
3. **Evaluar** la relación estructura-propiedad de los nanocementos híbridos
4. Con los mejores nanocementos híbridos obtenidos **desarrollar** un nuevo nanoconcreto híbrido estándar y un derivado ecológico para su **aplicación** en pavimentos rígidos.

Cemento Portland



Nano-Cementos

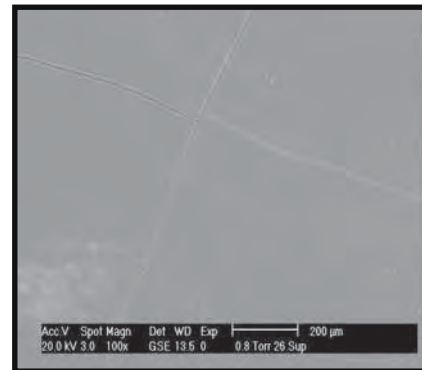
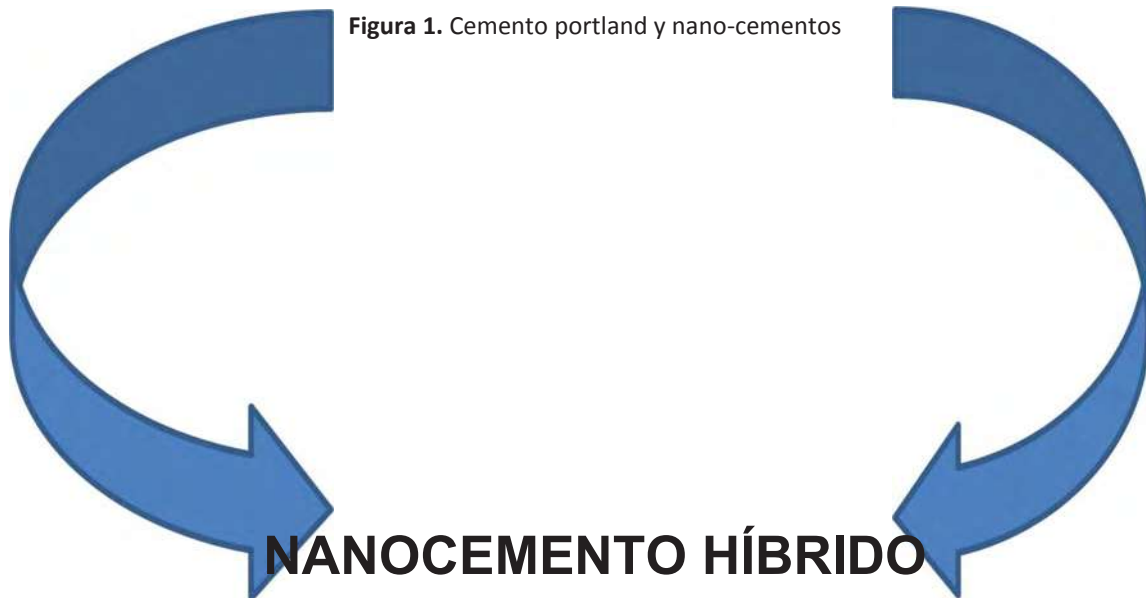


Figura 1. Cemento portland y nano-cementos



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la segunda etapa de la investigación	66
Tabla 4.2	Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la tercera etapa de la investigación	67
Tabla 4.3	Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la cuarta etapa de la investigación	68
Tabla 6.1	Esfuerzos a 24 horas con y sin polvo de neumático	91
Tabla 6.2	Esfuerzos a 3 días con y sin polvo de neumático	92
Tabla 6.3	Esfuerzos a 14 días con y sin polvo de neumático	93
Tabla 6.4	Esfuerzos a 28 días con y sin polvo de neumático	94
Tabla 6.5	Esfuerzos a 45 días con y sin polvo de neumático	95
Tabla 6.6	Esfuerzos a 45 días con y sin polvo de neumático	96
Tabla 6.7	Composiciones con y sin polvo de neumático variando algunos otros materiales	100
Tabla 6.8	Composiciones con y sin polvo de neumático variando algunos otros materiales (cuarta etapa)	102
Tabla 7.1	Clasificación Vehicular en Porcentaje (%)	138
Tabla 7.2	Datos estadísticos del TDPA	141
Tabla 7.3	Espesor de Pavimentos con diferentes Concretos	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Estructura de un nano-cemento geopolimérico	5
Figura 2.2	Pavimentos rígidos	6
Figura 2.3	Contaminación contra el ruido con panel zonoabsorbentes	6
Figura 2.4	Vigas armadas	6
Figura 2.5	Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización nanopartículas	9
Figura 2.6	Equilibrios del ion cloruro en el concreto	15
Figura 2.7	Efecto del Contenido de Humedad en los poros del concreto, en la corrosión de la armadura	16
Figura 2.8	Influencia de la humedad relativa sobre la capacidad de respiración del concreto	16
Figura 2.9	Proceso de carbonatación	18
Figura 2.10	Poros seco	18
Figura 2.11	Poros saturado de agua	18
Figura 2.12	Poros parcialmente lleno de agua	18
Figura 2.13	Top Down Pyramid	19
Figura 2.14	Bottom Up Pyramid	19
Figura 2.15	Lego Racer Pro / ENGINEER	21
Figura 2.16	Introducción – Tecnología – Pavimentadora de Cimbra Deslizante	26
Figura 2.17	Introducción – Evolución – Volumen de Concreto en Carreteras	29
Figura 2.18	Introducción – Marco de Referencia – Km de Concreto en Carreteras	33
Figura 2.19	Introducción – Marco de Referencia – Porcentaje de la Red en Concreto Hidráulico	33
Figura 2.20	Prueba de MR en vigas	38
Figura 2.21	Diversas condiciones de carga y uso en pisos industriales	39
Figura 2.22	Croquis esquemático de prueba de resistencia a la flexión, ASTM C-78	45
Figura 2.23	Consideraciones de diseño críticas en función del tamaño del área de contacto de la carga	47

Figura 2.24	Diversos tipos de cargas vehiculares aplicadas sobre el piso	50
Figura 2.25	Gráfica de la separación de ruedas en el eje cargado e ilustración del área de las llantas en contacto directo con el piso (área de contacto)	51
Figura 2.26	Tabla Relaciones de esfuerzo contra repeticiones de carga permitidas	54
Figura 2.27	Gráfica de diseño para ejes sencillos	55
Figura 2.28	Equipo Brookfield	60
Figura 4.1	Mezclado del material en seco	64
Figura 4.2	Mezclado del material con buena trabajabilidad y homogénea	64
Figura 4.3	Mala trabajabilidad y sin homogeneidad en la mezcla	65
Figura 4.4	Llenado de los moldes con diferentes mezclas	65
Figura 4.5	Desmolde de las muestras después de 24 horas	66
Figura 4.6	Mezclado en seco	69
Figura 4.7	Mezclado en húmedo	69
Figura 4.8	Prueba de revenimiento	69
Figura 4.9	Material con buena trabajabilidad y muy homogénea	70
Figura 4.10	Material con mucha segregación	70
Figura 4.11	Llenado de los especímenes	71
Figura 4.12	Curado de los especímenes	71
Figura 5.1	Humedad superficial y humedad de absorción en arenas	72
Figura 5.2	Densidad de la arena	72
Figura 5.3	Pesos volumétricos en gravas	73
Figura 5.4	Pesos volumétricos en arenas	73
Figura 5.5	Densidad en gravas	74
Figura 5.6	Granulometría en Arena	75
Figura 5.7	Granulometría en Grava	75
Figura 6.1	Equipo y muestras utilizadas para obtener tiempos de fraguado	80
Figura 6.2	Forma de medición del fraguado inicial imagen izquierda y fraguado final imagen derecha	80
Figura 6.3	Maquina Universal Tinius Olsen	85
Figura 6.4	Prueba de especímenes a velocidad constante	85
Figura 6.5	Imágenes de algunos especímenes llevados hasta la falla	86
Figura 6.1	Prueba a compresión en cilindro, se observa su tipo de falla	100
Figura 6.2	Micrografía por sem a 1000X de un cemento híbrido en la superficie vista	103
Figura 6.3	Formación de portlandita en la superficie del nanocemento	103
Figura 6.4	Formación de precipitados sin identificar como subproducto de la reacción del cemento portland y el nanocemento geopolimérico	104
Figura 6.5	Una aproximación de los precipitados a 10000X	104

Figura 6.6	Vista general a 1000X de un cemento híbrido utilizando alúmina	106
Figura 6.7	Cemento híbrido aproximación de su superficie a 3000X	106
Figura 6.8	Micrografía mostrando precipitados como subproductos de reacción sin identificar	107
Figura 6.9	Micrografía a 10000X del nanocemento utilizando alúmina formación de precipitados	107
Figura 6.10	Vista general a 1000X cemento portland con presencia de K ⁺ como activador geopolimérico	109
Figura 6.11	Acercamiento a 3000X en donde se muestra la presencia de un gel amorfo	109
Figura 6.12	Precipitados de los productos de reacción sin identificar	110
Figura 6.13	Acercamiento a 10000X en donde se muestra el gel desarrollado	110
Figura 6.14	Vista general a 100X de un cemento con microsílca	112
Figura 6.15	Formación de matriz de gel con precipitados a 1000X	112
Figura 6.16	Gel cementante con presencia de cristales de portlandita	113
Figura 6.17	Acercamiento a 10000X de la matriz de cemento	113
Figura 6.18	Vista general de un nanocemento híbrido con formación cristalina	115
Figura 6.19	Hojuelas de portlandita	115
Figura 6.20	Acercamiento de la eflorescencia de los cristales de portlandita, observe su morfología hexagonal	116
Figura 6.21	Matriz de cemento en donde se muestra el gel de tobermorita, agujas de etringita y precipitados sin identificar	116
Figura 6.22	Microestructura general de un cemento estándar a 100X con hiperfluidificante	118
Figura 6.22'	Acercamiento a 1000X de un cemento estándar	118
Figura 6.23	Precipitados sin identificar sobre la superficie del cemento estándar	119
Figura 6.24	Vista a 5000X de cemento estándar en donde se muestra el gel de tobermorita y precipitados	119
Figura 6.25	Vista general de un cemento activado con Na	121
Figura 6.26	Acercamiento de la superficie de un nanocemento activado con Na ⁺ e hiperfluidificante observe las fracturas del gel y la formación de agujas cristalinas	121
Figura 6.27	Acercamiento a 3000X de las agujas cristalinas observe que su diámetro es nanométrico	122
Figura 6.28	Dispersión de agujas sobre la superficie del cemento	122
Figura 6.29	Vista general de un cemento híbrido conteniendo Na ⁺ como activador alcalino y Alúmina	124
Figura 6.29'	Acercamiento a 5000X del cemento con partículas cristalinas sobre la superficie	124

Figura 6.30	Precipitados sobre la superficie de concreto híbrido si identificar, se muestra la presencia de agujas dentro del gel de tobermorita	125
Figura 6.31	Acercamiento a 10000X en donde se aprecia el gel de tobermorita y sus precipitados	125
Figura 6.32	Vista general de un cemento conteniendo Na ⁺ como activador alcalino y microsíllica	127
Figura 6.33	Gel de tobermorita a 3000X	127
Figura 6.34	Precipitados sobre el gel de tobermorita	128
Figura 6.35	Acercamiento a 40000X de los precipitados nanométricos de la pasta cementante	128
Figura 6.36	Acercamiento a 2nm	136
Figura 6.37	Acercamiento a 2nm	136
Figura 7.1	Macrolocalización del tramo en estudio	137
Figura 7.2	Microlocalización del tramo en estudio	138
Figura 7.3	Localización de Bancos Con características adecuadas para nuestro diseño	139
Figura 7.4	Inventario de Bancos de Materiales 2008	140
Figura 7.5	Clasificación Funcional	142
Figura 7.6	Desviación Estándar recomendada por ASSHTO	142
Figura 7.7	Modulo de Ruptura en Vigas	143
Figura 7.8	Criterios para estimar el MR	144
Figura 7.9	Prueba de Placa	145
Figura 7.10	Valores recomendables para el Coeficiente de Drenaje	145
Figura 7.11	Serviciabilidad Inicial	146
Figura 7.12	Serviciabilidad	147
Figura 7.13	Periodos de Vida Útil	148
Figura 7.14	Factor de Sentido	148
Figura 7.15	Tasa de Crecimiento	149
Figura 7.16	Factor de Carril 1	149
Figura 7.17	Factor de Carril 2	149
Figura 7.18	Factor de Carril 3	150
Figura 7.19	Datos del Tráfico	150
Figura 7.20	Repeticiones de Carga	152
Figura 7.21	Datos generales y Resultados	153
Figura 7.22	Datos generales y Resultados	153
Figura 7.23	Datos generales y Resultados	154
Figura 7.24	Datos generales y Resultados	154
Figura 7.25	Datos generales y Resultados	155

“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE NANOCEMENTOS: CEMENTO PORTLAND-GEOPOLÍMERO DE FRAGUADO RÁPIDO PARA ULTRA THIN COMPOSITES PAVEMENTS (ETAPA CERO)”

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS.....	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
OBJETIVO GENERAL	V
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ESTADO - DEL - ARTE.....	2
2.1. CEMENTO PORTLAND	2
2.1.1. <i>Fabricación</i>	2
2.1.2. <i>Transformación del clinker en cemento portland</i>	2
2.2. FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO.....	2
2.2.1. <i>Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento</i>	3
2.3. PRUEBA PARA CALCULAR TIEMPOS DE FRAGUADO	4
2.4. NANO-CEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS.....	5
2.4.1. <i>Algunos usos de los nano-cementos</i>	6
2.5. NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA	7
2.6. NANOMATERIALES.....	8
2.6.1. <i>Efectos producidos por las nanopartículas</i>	9
2.6.2. <i>Aplicaciones de los nanomateriales</i>	10
2.7. POLÍMERO	11
2.7.1. <i>Propiedades de los Polímeros</i>	11
2.7.2. <i>Micro estructura</i>	12
2.7.3. <i>Longitud de la Cadena</i>	12
2.8. DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	13
2.9. CAUSAS DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.....	14
2.9.1. <i>Cloruros</i>	14
2.9.2. <i>H₂O (Agua)</i>	15
2.9.3. <i>Oxígeno</i>	17
2.9.4. <i>Carbonatación</i>	17
2.10. TOP-DOWN Y BOTTOM-UP	19
2.10.1. <i>Enfoque de arriba hacia abajo</i>	20
2.10.2. <i>Enfoque de abajo hacia arriba</i>	21
2.11. TOP-DOWN Y BOTTOM-UP EN LA NANOTECNOLOGÍA	22
2.12. PAVIMENTOS RÍGIDOS	22
2.12.1. <i>Pavimentos Continuos</i>	23
2.12.2. <i>Pavimentos Discontinuos o por Elementos</i>	23
2.12.3. <i>Pavimentos discontinuos</i>	23
2.13. ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO	24
2.13.1. <i>Antecedentes</i>	24

2.13.2.	Tecnología.....	25
2.13.3.	Evolución.....	26
2.13.4.	Ventajas	29
2.13.5.	Durabilidad	29
2.13.6.	Bajo Costo de Mantenimiento	30
2.13.7.	Seguridad	30
2.13.8.	Altos Índices de Servicio	31
2.13.9.	Mejor Distribución de Esfuerzos bajo las Losas	31
2.13.10.	Trabajo continuo.....	31
2.13.11.	Marco de referencia.....	32
2.13.12.	Experiencia internacional.....	32
2.13.13.	Caso de Latinoamérica.....	32
2.14.	DISEÑO DE PAVIMENTOS	34
2.14.1.	Introducción a métodos de diseño	34
2.14.2.	Método AASHTO	34
2.14.3.	Método PCA	35
2.14.4.	Comparativa entre los métodos de diseño.....	37
2.14.5.	Medición de concreto premezclado (MR)	37
2.14.6.	Datos técnicos.....	38
2.15.	PISOS INDUSTRIALES.....	39
2.15.1.	Concreto para pisos industriales	40
2.15.2.	Propiedades en Estado Fresco y Endurecido	40
2.15.3.	Revenimiento	40
2.15.4.	Contenido de aire.....	41
2.15.5.	Sangrado.....	41
2.15.6.	Contracción	42
2.15.7.	Resistencia a la flexión por tensión	44
2.15.8.	Durabilidad	45
2.15.9.	Diseño del espesor de la losa	45
2.15.10.	Objetivos del Diseño.....	46
2.15.11.	Esfuerzos de Flexión y Factores de Seguridad	48
2.15.12.	Cargas de Vehículos	50
2.15.13.	Ejemplo de Diseño 1.....	55
2.15.14.	Datos de la subrasante y concreto.....	56
2.15.15.	Pasos de diseño.....	56
2.16.	MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)	57
2.17.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	57
2.18.	FTIR	58
2.19.	TEM	59
2.20.	VISCOSIDAD POR EL MÉTODO BROOKFIELD	60
2.20.1.	Procedimiento del método Brookfield.....	61
2.20.2.	Precisión del método Brookfield	61
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.	62
4.	SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC-GEOPOLÍMERO	63
4.1.	SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (PRIMERA ETAPA)	63
4.2.	SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (SEGUNDA ETAPA)	66
4.3.	SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (TERCERA ETAPA)	67
4.4.	SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (CUARTA ETAPA).....	68
5.	SÍNTESIS DEL CONCRETO CONVENCIONAL	72
5.1.	ESTUDIO DE AGREGADOS PÉTREOS	72

5.1.1. Método de diseño: ACI 211	76
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	80
6.1. RESULTADOS FÍSICOS.....	80
6.1.1. <i>Tiempos de fraguado</i>	80
6.1.2. <i>Medición de la Viscosidad por el Método de Brookfield</i>	82
6.2. RESULTADOS MECÁNICOS	84
6.2.1. <i>Comparación de esfuerzos a compresión (primera etapa)</i>	84
6.2.2. <i>Comparación de esfuerzos a compresión (segunda etapa)</i>	89
6.2.3. <i>Comparación de esfuerzos a compresión (tercera etapa)</i>	91
6.2.4. <i>Comparación de esfuerzos a compresión (cuarta etapa)</i>	99
6.2.5. <i>Modulo de ruptura en vigas de (15x15x60)cm (cuarta etapa)</i>	102
6.3. RESULTADOS MICRO ESTRUCTURALES.....	103
6.3.1. SEM.....	103
6.3.1.1. Composición 1.....	103
6.3.1.2. Composición 2.....	106
6.3.1.3. Composición 3.....	109
6.3.1.4. Composición 4.....	112
6.3.1.5. Composición 5.....	115
6.3.1.6. Composición 6.....	118
6.3.1.7. Composición 7.....	121
6.3.1.8. Composición 8.....	124
6.3.1.9. Composición 9.....	127
6.3.2. DRX.....	130
6.3.3. FTIR.....	133
6.3.4. TEM.....	136
7. DISEÑO TEÓRICO DE PAVIMENTO RÍGIDO	137
7.1. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO DE DISEÑO.....	137
7.1.1. <i>MACROLOCALIZACIÓN</i>	137
7.1.2. <i>MICROLOCALIZACIÓN</i>	138
7.2. TRÁFICO	138
7.3. ANÁLISIS DE LOS BANCOS DE MATERIALES	139
7.4. CÁLCULO DE LA CATEGORÍA DE TRÁFICO	141
7.5. DISEÑO POR EL MÉTODO DE ASSHTO.....	141
7.5.1. <i>Confiabilidad recomendada por AASHTO *</i>	142
7.5.2. <i>Desviación Estándar recomendada por AASHTO</i>	142
7.5.3. <i>Módulo de Elasticidad</i>	144
7.5.4. <i>Criterios para Estimar el Módulo de Ruptura</i>	144
7.5.5. <i>Módulo de Reacción</i>	144
7.5.5.1. Prueba de placa.....	145
7.5.5.2. Estimaciones y Correlaciones de K.....	145
7.5.6. <i>Valores recomendables para el Coeficiente de Drenaje</i>	145
7.5.7. <i>Serviciabilidad Inicial</i>	145
7.5.8. <i>Serviciabilidad Final</i>	146
7.5.9. <i>Datos del Tráfico</i>	147
7.5.9.1. Períodos de Vida Útil Comunes.....	148
7.5.10. <i>Factor de Sentido</i>	148
7.5.10.1. Valores comunes de Tasas de Crecimiento.....	148
7.5.10.2. Factor de Carril.....	149
7.5.10.3. Datos del Tráfico	150
7.5.10.4. Repeticiones de Carga.....	151
7.5.11. <i>Resultados del Programa para diferentes tipos de concreto</i>	152
7.5.11.1. Concreto para las especificaciones requeridas de proyecto	152
7.5.11.2. Diseño elaborado con la composición 6 A.....	153

7.5.11.3.	Diseño elaborado con la composición 6 A'	154
7.5.11.4.	Diseño elaborado con la composición 6 B.....	154
7.5.11.5.	Diseño elaborado con la composición 6 B'	155
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	157
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
10.	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	159

1 INTRODUCCIÓN

El uso del concreto es común en la construcción de todo tipo de obras civiles. Sin embargo en atmósferas agresivas, estos materiales pueden ser atacados por diversos agentes entre los que se encuentran sulfatos, cloruros y soluciones ácidas, entre otros pudiendo así ocurrir la destrucción de las estructuras realizadas con estos materiales.

El problema de durabilidad del concreto ha sido un tema importante por muchos años debido a su significancia que trasciende en el nivel de servicio del concreto o de las estructuras de concreto, además del gran impacto económico en el sector de la construcción.

En los últimos años se han intensificado las investigaciones relacionadas con el mejoramiento de los materiales utilizados en obras de ingeniería, con el objetivo de mejorar sus propiedades lo que su utilización implique. Una de las últimas tecnologías desarrolladas con muchas aplicaciones en este campo es la nanotecnología, que como su nombre lo indica, se desarrolla a escalas nanométricas, en que un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro.

En el presente trabajo se pretende elaborar un Concreto Híbrido, que tiene como objeto principal la determinación de la influencia de los nanocementos en el concreto frente a la acción de los problemas que se presentan y que afectan su tiempo de fraguado, durabilidad y propiedades mecánicas considerando los efectos superficiales y estructurales, físicos y químicos, de esta acción en el concreto.

2 ESTADO - DEL - ARTE

2.1. CEMENTO PORTLAND

Varios siglos antes de Cristo los romanos descubrieron la “puzzolana”, material volcánico que extraían de Puzzouli, cerca de Nápoles, Italia. Mezclada con cal y arena endurecía cuando se amasaba con agua. La puzzolana experimenta un fraguado hidráulico porque su transformación es causada por la acción del agua. Muchas veces se intentó imitar sin éxito hasta que, en 1824 el albañil inglés John Aspdin elaboró un polvo que, empastado con agua, adquiriría dureza y colocación grisácea. Como se parecía a las piedras de Portland (Inglaterra), fue llamado cemento Portland. ^[1]

2.1.1. FABRICACIÓN

Las materias primas son piedras calizas y arcillas. En un principio se buscaron canteras de piedras calizas arcillosas, con 20-40% de arcillas. En la actualidad se explotan por separado calizas y arcillas, mezcladas luego en la proporción adecuada. Las sucesivas etapas de la fabricación son: Mezcla y molienda de las materias primas: Ambos procesos se cumplen conjuntamente dentro del molino de bolas, gran tambor horizontal giratorio dentro del cual hay bolas metálicas. Los choques, durante su rotación, pulverizan las materias primas, convertidas en pasta cruda. Se puede trabajar de dos maneras: por vía seca, en la que la mezcla y molienda se efectúan con las materias primas solamente, o por vía húmeda, en la que se mezcla y muele en presencia de agua. ^[1]

2.1.2. TRANSFORMACIÓN DEL CLINKER EN CEMENTO PORTLAND

El clinker se estaciona un mínimo de 15 a 30 días. Luego se muele finalmente en el molino de bolas. Durante la molienda se incorpora un 3% de yeso crudo. Este aditivo regula el tiempo de fraguado. El cemento portland no enyesado fragua velozmente: a los 5 minutos de empastado con agua endurece, en cambio cuando contiene yeso, se inicia el fraguado a los 45 minutos de agregada el agua. El cemento molido se conserva dentro de enormes silos, protegido de la humedad ambiente. ^[1]

2.2. FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: Agregado y pasta. La pasta, compuesta de Cemento Portland 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.

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

La pasta está compuesta de Cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto. El volumen absoluto del Cemento está comprendido usualmente entre el 7 y el 15 % y el agua entre el 14 y el 21 %. El contenido de aire y concretos con aire incluido puede llegar hasta el 8% del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso.

Como los agregados constituyen aproximadamente el 60 al 75 % del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción. ^[1]

2.2.1. HIDRATACIÓN, TIEMPO DE FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO

La propiedad de liga de las pastas de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación.

El cemento Portland no es un *compuesto químico* simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más de el peso del cemento Portland y son: *el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico*. Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Los dos *silicatos* de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: *el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio*. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, - fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional - principalmente dependen del *gel del hidrato de silicato de calcio*. Es la medula del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO₂), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. El área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 3000 metros cuadrados por gramo. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcla el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. ^[1]

2.3. PRUEBA PARA CALCULAR TIEMPOS DE FRAGUADO

Esta prueba consiste en determinar los tiempos de fraguado inicial y final de las diferentes composiciones de cementos híbridos así como del convencional, mediante las agujas de Gillmore.

Al determinar el tiempo de fraguado manténgase las agujas en posición vertical y póngase en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, considere que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la menos pesada), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable.

Una de las recomendaciones para el I tiempo de fraguado es que se ve afectado no solo por el porcentaje y temperatura del agua empleada, y cantidad de

amasado que haya recibido la pasta, sino también por la temperatura y humedad, entonces su determinación es solo aproximada. [2]

2.4. NANO-CEMENTOS GEOPOLIMÉRICOS

Son materiales alcalinamente activados, que se sintetizan a partir de nano partículas de óxido de silicio ó de óxido de aluminio en presencia de una solución alcalina, los cuales por el proceso de policondensación forman redes tridimensionales espaciales, esto quiere decir que son tetraedros de sílice y alúmina unidos tridimensionalmente los cuales forman nano estructuras amorfas a semicristalinas.

VENTAJAS:

- ✓ NO TENEMOS FASES LIBRES
- ✓ NO TENEMOS FASES INESTABLES
- ✓ GENERA UN CONCRETO MÁS DURABLE

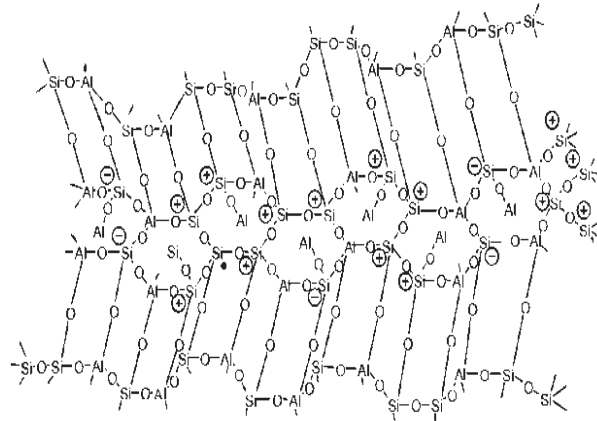


Figura2.1. Estructura de un nano-cemento geopolimérico

En el siglo XXI la ciencia se ha visto revolucionada por investigaciones relacionadas con nanociencia y nanotecnología, conceptos que se traducen en un gran desarrollo tecnológico en una variada gama de actividades de gran impacto para la sociedad. Una de ellas es el estudio de materiales relacionados con la ingeniería civil.

En relación al nanosílice en los últimos años se ha estudiado sus características generales (tamaño de la partícula, área específica de superficie, apariencia, etc.), como también sus propiedades físicas y químicas (densidad, pH, viscosidad, etc.) y ha sido creada como un producto para ser usado en el concreto u hormigón.

En cuanto al concreto que tiene incorporado nanomoléculas de sílice en su estructura, en la actualidad se han realizado estudios para determinar, sus propiedades mecánicas de resistencia, rugosidad superficial, análisis microscópico y sus propiedades reológicas de plasticidad y autocompactación. [3]

2.4.1. ALGUNOS USOS DE LOS NANO-CEMENTOS



Figura. 2.2. Pavimentos rígidos



Figura.2.3. Contaminación contra el ruido con paneles zonoabsorbentes



Figura.2.4 Vigas armadas

2.5. NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA

La **nanotecnología** es un campo de las ciencias aplicadas dedicado al control y manipulación de la materia a una escala menor que un micrómetro, es decir, a nivel de átomos y moléculas (nanomateriales). Lo más habitual es que tal manipulación se produzca en un rango de entre uno y cien nanómetros. Se tiene una idea de lo pequeño que puede ser un nanobot sabiendo que un nanobot de unos 50 nm tiene el tamaño de 5 capas de moléculas o átomos -depende de qué esté hecho el nanobot.

Nano es un prefijo griego que indica una medida, no un objeto; de manera que la nanotecnología se caracteriza por ser un campo esencialmente multidisciplinar, y cohesionado exclusivamente por la escala de la materia con la que trabaja.

La Nanociencia es un área emergente de la ciencia, revolucionaria en diversos ámbitos (biología, medicina, ingeniería, construcción, etc.), que se ocupa del estudio de los materiales de muy pequeñas dimensiones. No puede denominarse química, física o biología dado que los científicos de este campo están estudiando un campo dimensional muy pequeño para una mejor comprensión del mundo que nos rodea. La nanociencia se define como una ciencia que se ocupa del estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica cuyo tamaño es desde cientos a décimas de nanómetros.

El concepto de nanotecnología fue presentado en 1959 por el físico Richard Feynman, quien exploró la posibilidad de manipular el material en la escala de átomos individuales y moléculas, introduciendo la capacidad creciente de examinar y controlar el material a escalas nanométricas.

Es así como es posible definir la nanotecnología como el diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala.

Para comprender el potencial de esta tecnología es clave saber que las propiedades físicas y químicas de la materia cambian a escala nanométrica, lo cual se denomina efecto cuántico. La conductividad eléctrica, el color, la resistencia, la elasticidad, la reactividad, entre otras propiedades, se comportan de manera diferente que en los mismos elementos a mayor escala. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear materiales, aparatos y sistemas novedosos y poco costosos con propiedades únicas (Euroresidentes, 2006).

El significado del prefijo "nano" es una dimensión: 10 elevado a -9.

Esto es: 1 nanómetro = 0,000000001 metros.

Es decir, un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o millonésima parte de un milímetro.

También: 1 milímetro = 1.000.000 nanómetros (nm.).

Como se mencionó anteriormente la nanociencia y nanotecnología tienen su fundamento en el estudio de los fenómenos ocurridos en la nanoescala, que dentro de esta investigación, relacionada con el área de materiales de ingeniería, involucra directamente el estudio de materiales nanométricos o nanomateriales.^[4]

2.6. NANOMATERIALES

¿Qué son los nanomateriales?

Los nanomateriales son una clase de materiales (sean cerámicos, metales, semiconductores, polímeros, o bien una combinación de estos), en donde sus dimensiones se encuentran entre 1 y 100nm. Estos presentan una transición entre moléculas y átomos, y un material con dimensiones de sólido volumétrico (bulk).

Mientras que un material de orden micrométrico aun presenta propiedades similares a la de un sólido volumétrico (bulk), en los nanomateriales, debido a su tamaño reducido a unos cuantos nanómetros, se modifican sus propiedades que finalmente difieren del mismo material con dimensiones de sólido volumétrico, de las moléculas y los átomos.

De acuerdo al número de dimensiones que se encuentren en el régimen nanométrico, los nanomateriales se pueden clasificar en cuatro tipos (Gutiérrez, 2005):

- a) Materiales de dimensión cero: las tres dimensiones se ubican en el régimen nanométrico, a esta corresponden las nanopartículas.
- b) De una dimensión, teniendo una longitud variable, conservan una sola dimensión en el régimen de nanómetros, como es el caso de nanoalambre y nanotubos.
- c) De dos dimensiones: con áreas de tamaño indefinido, mantienen su espesor en el orden e 1 a 100nm, como en el caso de películas delgadas.

d) De tres dimensiones: en que los sólidos tridimensionales están formados por unidades nanométricas.

Aunque el interés por el estudio de los nanomateriales surgió con fuerza en las últimas décadas, estos ya existían desde hace varios siglos atrás. Las nanopartículas específicamente, han existido en el planeta por siglos, algunos ejemplos son partículas de humo y las nanopartículas dentro de bacterias. Más adelante en algunas civilizaciones antiguas ya se utilizaban, aprovechando sus propiedades ópticas y medicinales. ^[4]

2.6.1. EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS NANOPARTÍCULAS

A medida que la dimensión de las partículas se reduce, sobre todo en el intervalo de 1 a 10nm los efectos de tamaño y de superficie son cada vez más notables.

Entre el efecto de tamaño más importantes, se ha determinado el confinamiento de los electrones, lo que implica una manifestación de efectos cuánticos en el material y que pueden percibirse a través de sus propiedades de conducción electrónica, magnéticas, etc. Es por esto que a este tipo de partículas se les ha conocido también como puntos cuánticos.

Por otra parte los efectos de superficie también son de gran importancia, ya que se tiene en las partículas pequeñas un incremento en áreas superficiales por unidad de volumen y en energías libre superficiales respecto a los sólidos volumétricos.

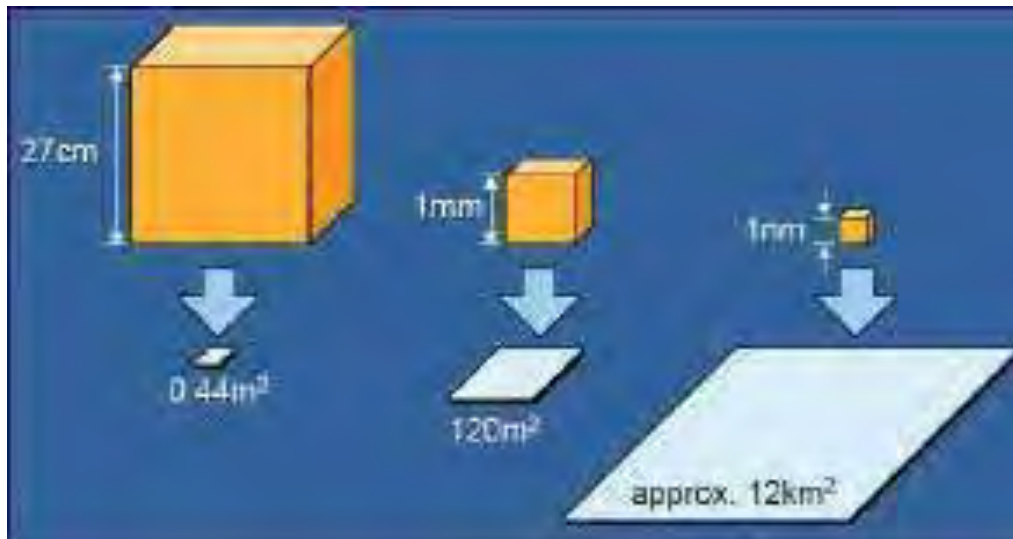


Figura 2.5. Incremento en áreas superficiales en materiales por la utilización nanopartículas. (Fuente: Gutiérrez, 2005)

Debido a que los átomos en la superficie de la nanopartícula están menos enlazados que el resto de sus átomos y su esfera de coordinación está incompleta, se incrementa su energía libre superficial, afectando las propiedades como temperatura de fusión de nanopartículas de Pt se reduce de 1773°C en un sólido volumétrico a 600°C en nanopartículas de 8nm en promedio.

Por otra parte la absorción óptica en nanopartículas también es un fenómeno de superficie que se modifica, y se puede modular dependiendo de las características de la partícula (composición, tamaño, protectores de superficie, etc.)^[4]

2.6.2. APLICACIONES DE LOS NANOMATERIALES

Existen diversas aplicaciones de nanopartículas metálicas, cerámicas y poliméricas las cuales se mencionan a continuación:

Medicina: gasas para quemaduras serias o heridas crónicas, contienen nanopartículas de plata. La plata es un bactericida, que en forma de nanopartículas incrementa el área superficial mejorando la eficiencia antibacteriana contra 150 tipos de microbios, incluyendo los resistentes a drogas. Crema para dolores musculares y adhesivos dentales, etc.

Deportes: pelotas de golf que corrigen vibraciones o pequeños corrimientos, canalizando la energía recibida del palo de golf, mejor que las pelotas convencionales. Pelotas de tenis, recubiertas de nanopartículas para alargar su duración.

Higiene: desinfectantes de grado militar, utilizado en aviones para combatir el problema del SARS (síndrome respiratorio agudo severo) a base de nanoemulsiones.

Materiales para la construcción: recubrimientos super-hidrofóbicos, repelentes de mugre. Se emplea como recubrimientos de concreto, ladrillos y yeso. Es un aditivo a base de nanopartículas utilizado para reforzar el efecto hidrofóbico en materiales de construcciones, reduciendo la adhesión al agua y partículas de tierra al mínimo.^[4]

2.7. POLÍMERO

¿Qué es un polímero?

Un polímero es una gran molécula (macromolécula), integrado por repetición de unidades estructurales . Estas subunidades están normalmente conectados por covalentes enlaces químicos . Aunque el término *polímero* se toma a veces para referirse a los plásticos , que en realidad abarca una amplia clase de materiales naturales y sintéticos con una amplia variedad de propiedades.

Debido a la enorme variedad de propiedades de los materiales poliméricos, que desempeñan un papel esencial y omnipresente en la vida cotidiana. Esto va papel de familiares plásticos sintéticos y elastómeros naturales de biopolímeros , como los ácidos nucleicos y proteínas que son esenciales para vida.

Natural de materiales poliméricos tales como goma laca , de color ámbar , y natural de caucho se han utilizado durante siglos. Una gran variedad de polímeros naturales existentes, tales como la celulosa, que es principal constituyente de la madera y el papel.

La lista de los polímeros sintéticos incluye el caucho sintético , la baquelita , neopreno , nylon , PVC , poliestireno , polietileno , polipropileno , poliacrilonitrilo , PVB , de silicona , y muchos más.

Lo más común es la espina dorsal vinculados continuamente de un polímero utilizado para la preparación de los plásticos se compone principalmente de carbono átomos. Un ejemplo simple es el polietileno, cuya unidad de repetición se basa en etileno monómero . Sin embargo, existen otras estructuras, por ejemplo, elementos como el silicio de forma familiar materiales como las siliconas, los ejemplos que se plastilina y sellador de tuberías a prueba de agua.

El oxígeno es también comúnmente presentes en las redes troncales de polímero, como los de glicol de polietileno , polisacáridos (en enlaces glucosídicos) y ADN (en enlaces fosfodiéster).

Los polímeros son estudiados en los campos de la química de polímeros , física de polímeros , y la ciencia de los polímeros . ^[1 B]

2.7.1. PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS

Propiedades del polímero se dividen en varias clases sobre la base de la escala en que se define la propiedad, así como de su base física. La propiedad más básica de un polímero es la identidad de sus monómeros constituyentes.

Un segundo conjunto de propiedades, conocida como microestructura, esencialmente describir la disposición de estos monómeros en el polímero en la escala de una sola cadena.

Estas características estructurales básicas de desempeñar un papel importante en la determinación de a granel propiedades físicas de los polímeros, que describen cómo el polímero se comporta como un material macroscópico continuo. Propiedades químicas, en la nano escala, describen cómo las cadenas de interactuar a través de diversas fuerzas físicas. ^[1 B]

2.7.2. MICRO ESTRUCTURA

La microestructura de un polímero (llamado a veces de configuración) se refiere a la disposición física de los restos de monómeros a lo largo de la columna vertebral de la cadena. Estos son los elementos de estructura de polímero que requieren la ruptura de un enlace covalente con el fin de cambiar.

Estructura tiene una fuerte influencia sobre las otras propiedades de un polímero. Por ejemplo, dos muestras de caucho natural pueden presentar resistencia diferentes, a pesar de que sus moléculas constituyen los mismos monómeros

2.7.3. LONGITUD DE LA CADENA

Las propiedades físicas de un polímero dependen en gran medida el tamaño o la longitud de la cadena polimérica. Por ejemplo, la longitud de la cadena se incrementa, de fusión y ebullición aumentan rápidamente.

Resistencia a los impactos también tiende a aumentar con la longitud de la cadena, así como la viscosidad o resistencia al flujo, del polímero en estado fundido.

Longitud de la cadena está relacionado con la viscosidad de fusión más o menos como 01:10 de modo que un aumento de diez veces en el polímero de longitud de la cadena de resultados un aumento de la viscosidad de más de 1000 veces.

El aumento de longitud de cadena, además, tiende a disminuir la movilidad de la cadena, aumentar la fuerza y resistencia, y aumentar la temperatura de transición vítrea (T_g) Este es el resultado del aumento en las interacciones de la cadena como Van der Waals atracciones y enredos que vienen con la cadena de longitud.

Estas interacciones tienden a fijar las cadenas individuales con más fuerza en su posición y resistir la deformación y ruptura de la matriz, tanto a altas presiones y temperaturas más altas.

Una forma común de expresar la longitud de una cadena es el grado de polimerización, que cuantifica el número de monómeros incorporados en la cadena. Al igual que con otras moléculas, polímeros de un tamaño también se puede expresar en términos de peso molecular.

Puesto que las técnicas de síntesis de la polimerización normalmente producen un producto de polímero incluida una gama de pesos moleculares, el peso se expresa a menudo para describir estadísticamente la distribución de longitudes de cadena en la misma.

Los ejemplos más comunes son las de peso molecular medio número y peso molecular medio de peso. La relación de estos dos valores es el índice de polidispersidad, comúnmente utilizada para expresar el "ancho" de la distribución del peso molecular. A finales medición es la longitud del contorno, que puede ser entendido como la longitud de la columna vertebral de la cadena en su prolongado estado completamente.^[1 B]

2.8. DURABILIDAD DEL CONCRETO

La durabilidad del concreto ha sido un tema importante por muchos años debido a su significancia que trasciende en el nivel de servicio del concreto o de las estructuras de concreto reforzado, además del gran impacto económico en el sector de la construcción.

El código de diseño ACI define la durabilidad del concreto de cemento Pórtland como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto.

La conclusión primordial que se desprende de la definición anterior, es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos, punto en el cual se centrará esta investigación.

En este sentido, no existe un concreto "durable" por si mismo, ya que las características físicas, químicas y mecánicas que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias no necesariamente lo habilitan para seguir siendo "durable" bajo condiciones diferentes.

Tradicionalmente se asoció la durabilidad a las características resistentes del concreto y particularmente a su resistencia en compresión, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que es solo uno de los aspectos involucrados, pero no el único ni el suficiente para obtener un concreto durable.

El problema de la durabilidad es sumamente complejo, en la medida en que cada situación de exposición y condición de servicio ameritan una especificación particular tanto para los materiales y diseño de mezcla, como para los aditivos, la técnica de producción y el proceso constructivo, por lo que es usual que en este campo las generalizaciones resulten nefastas.

Bryant Mather, uno de los pioneros en la investigación en la Tecnología del Concreto y en el área de la durabilidad indica en uno de sus trabajos: “Está demostrado científicamente que las estructuras de concreto se comportan inadecuadamente debido a que las especificaciones técnicas fueron deficientes o que éstas fueron correctas pero no se siguieron en la obra”.

No se debe copiar o “adaptar” especificaciones técnicas locales y foráneas para proyectos y situaciones que muestren similitudes aparentes, pero que, sin embargo, desde el punto de vista de la tecnología del Concreto y la durabilidad, se requiere una evaluación y criterios particulares.

Se ha demostrado que las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la micro-estructura del concreto y reducen su permeabilidad por lo que consecuentemente reducen la penetración de aguas y sales disueltas en el hormigón.

La impermeabilidad del concreto reducirá varias formas de deterioro del mismo, tales como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de químicos. Las mayorías de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del concreto debido a reacciones químicas tales como la reacción árido álcali y ataques de sulfatos. La combinación óptima de materiales varía para diferentes requisitos de desempeño y para el tipo de adición. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006).^[4]

2.9. CAUSAS DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

2.9.1. CLORUROS

La corrosión inducida por cloruro se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino. Los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también los desplace el viento de la brisa marina a la zona costera y los deposite en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado, lo cual aumenta el alto riesgo de corrosión.

De acuerdo al modelo de vida útil, también es necesario que los iones cloruro avancen desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla. Una vez que

llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión.

Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros, lo que constituye la disolución poro. La Figura No 5 ilustra los tres casos, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto.

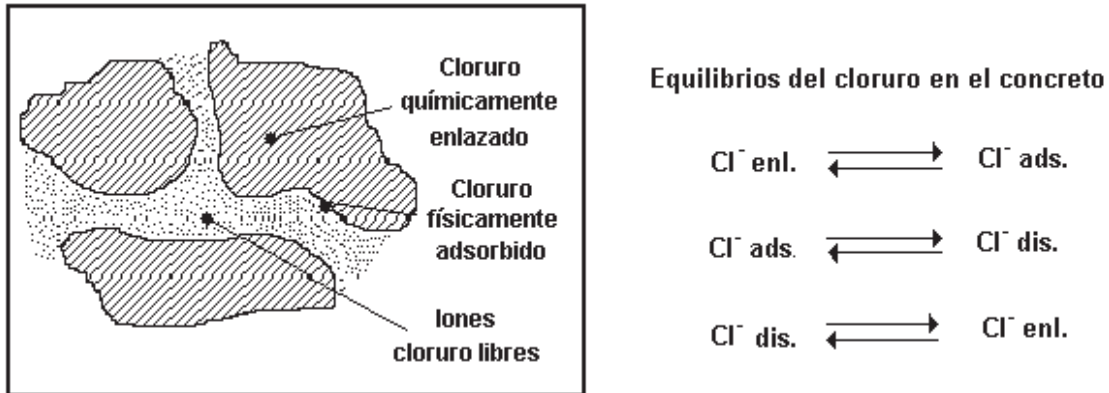
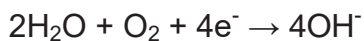


Figura 2.6. Equilibrios del ion cloruro en el concreto

Es importante mencionar que parte de ellos se pueden combinar con las fases aluminicas y ferríticas de los cementos, por lo que los más peligrosos son los que quedan sin combinar o “libres”. [5]

2.9.2. H₂O (AGUA)

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



Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrolito. En el hormigón seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivamente sobre el acero; solo la existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del concreto, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión.

El contenido en agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente. La humedad

relevante, es decir, la que influye en los procesos de corrosión, es la realmente contenida en los poros.

A título de ejemplo se muestran en las figuras 6 y 7 distintas interpretaciones de la influencia que la humedad contenida en los poros del concreto.

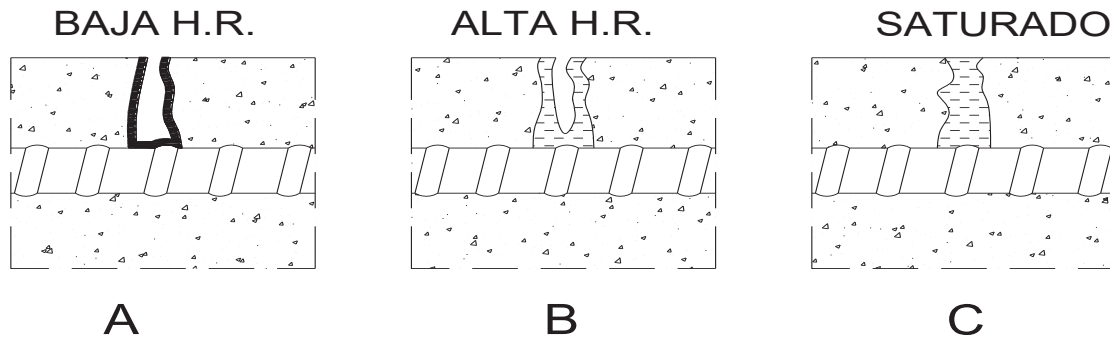


Figura 2.7. Efecto del Contenido de Humedad en los poros del concreto, en la corrosión de la armadura

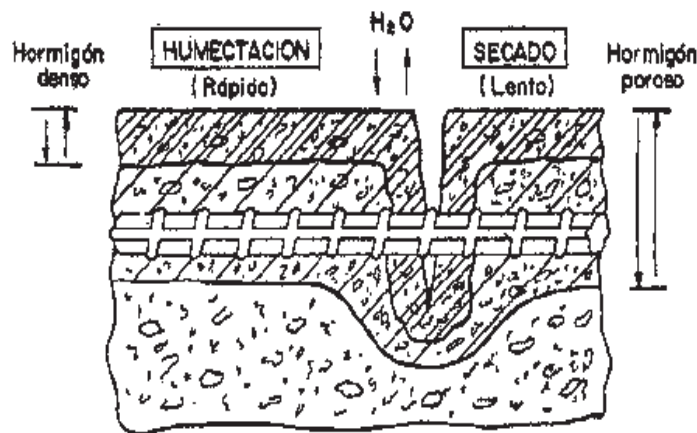


Figura 2.8. Influencia de la humedad relativa sobre la capacidad de respiración del concreto

2.9.3. OXIGENO

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta “aireación” de las mismas.

Durante mucho tiempo se ha considerado que el acceso o flujo de oxígeno es el factor determinante de la velocidad de corrosión. Así, se piensa a menudo que el espesor del recubrimiento influye mucho en el acceso de oxígeno y se han realizado múltiples trabajos para medir la permeabilidad del concreto al oxígeno, al aire o a los gases. [5]

2.9.4. CARBONATACIÓN

El pH del concreto puede cambiar por el ingreso de diversas sustancias desde el medio ambiente. Estas sustancias son principalmente el CO₂ que se encuentra de manera natural en el aire y el SO₃ que se produce de la combustión de combustibles fósiles. De estos, el CO₂ en el aire es de mayor importancia, de ahí el nombre de carbonatación.

Inicialmente el CO₂ no es capaz de penetrar profundamente dentro del concreto debido a que reacciona con el caliche del concreto superficial (Figura N° 2.9) de acuerdo con la siguiente reacción:



Dando como resultado un cambio en el pH:
pH = 12.5 a 13.5 → pH ≈ 9

Aunque la porción de mezcla externa del concreto se carbonata rápidamente, el CO₂ continúa su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo es cercano a 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, dando paso a la corrosión del acero.

A la profundidad que el CO₂ ha penetrado y por lo tanto que ha modificado el pH, generalmente se le llama “frente de carbonatación”.

En la práctica es útil conocer a qué velocidad progresa el “frente de carbonatación” para estimar si ha alcanzado la interface acero-concreto y poder aproximar el estado superficial que guarda la varilla metálica. La penetración del CO₂ está determinada por la forma de la estructura de los poros y por el volumen de ellos que está ocupado por la disolución poro del concreto, ya que la velocidad de difusión del CO₂ en agua es 10⁴ veces más lenta que la velocidad de difusión del 10₂ en el aire. [5]

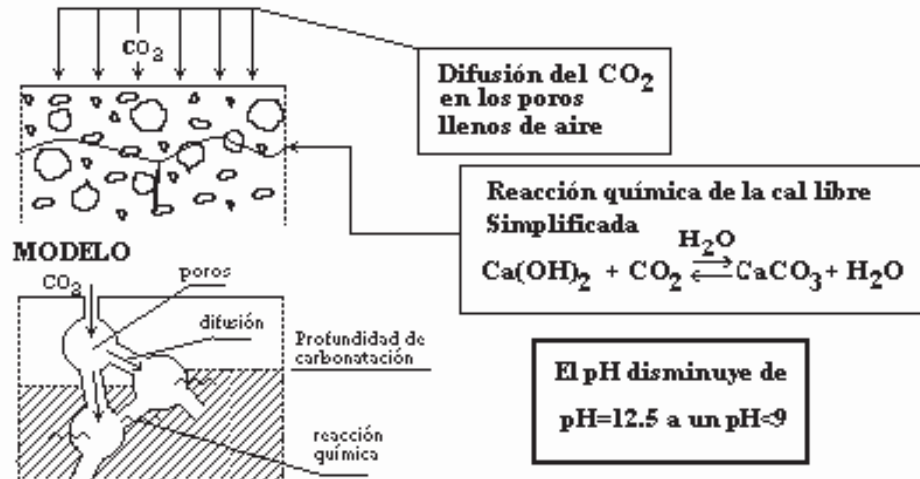


Figura 2.9. Proceso de carbonatación

Si el poro está seco, como se muestra en la Figura 10, el CO₂ difunde fácilmente, pero la carbonatación no puede ocurrir debido a la falta de agua. Este caso solo se presenta en concreto que está sobre secado, como ocurre en climas muy secos.

Si los poros están llenos de agua (Figura 11) hay apenas alguna carbonatación debido a la poca difusión del CO₂ en agua, que es el caso de estructuras sumergidas.

Si los poros están parcialmente llenos de agua (Figura 12), la carbonatación puede proceder hasta un espesor donde los poros del concreto están secos.

Los parámetros que determinan la velocidad de carbonatación, son: la composición y cantidad del cemento, la compactación, condiciones de curado y condiciones ambientales de exposición del concreto. [5]

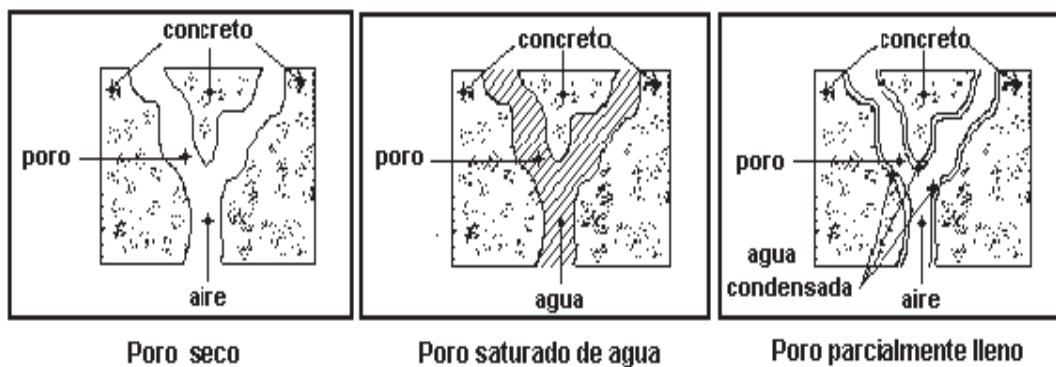


Figura 2.10 Poro seco

Figura 2.11. Poro saturado de agua

Figura 2.12 Poro parcialmente lleno de agua

La carbonatación se presenta comúnmente en medios rurales y con mayor incidencia en zonas urbanas, en las que se alcanzan grandes concentraciones de óxidos sulfurosos (SOx) y nitrosos (NOx), que son combinados con el agua de la humedad ambiental formando los respectivos ácidos sulfurosos y nitrosos. En zonas de alta contaminación ambiental y altas precipitaciones pluviales, el pH llega a tomar valores cercanos a 4, lo que se conoce como lluvia ácida, que afecta las estructuras de concreto de la misma forma que la carbonatación. [5]

2.10. TOP-DOWN Y BOTTOM-UP

son estrategias de procesamiento de la información y el conocimiento de pedidos, sobre todo con programas, sino también otras teorías humanistas y científicos (véase sistémicos). En la práctica, que puede ser visto como un estilo de pensamiento y la enseñanza. En muchos casos, *de arriba hacia abajo* se utiliza como sinónimo de *análisis* o *descomposición*, y *de abajo hacia arriba* de la *síntesis*.

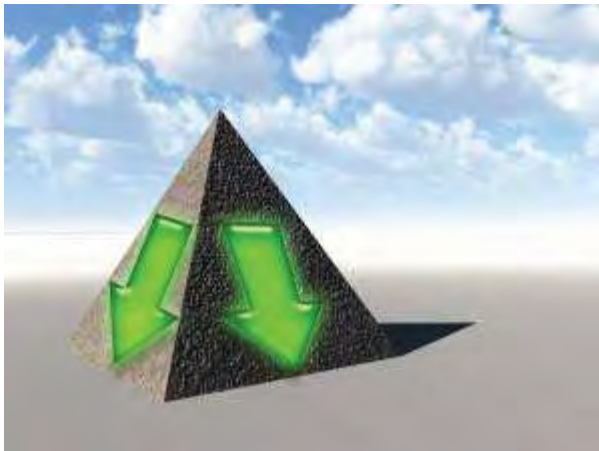


Figura 2.13. Top Down Pyramid

Fuente www.craigburton.com

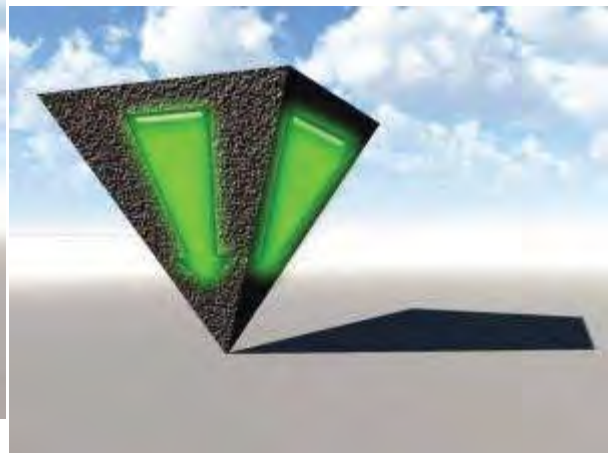


Figura 2.14. Bottom Up Pyramid

Fuente www.craigburton.com

Un enfoque de **arriba hacia abajo** (también se conoce como diseño racional-paso) es esencialmente la ruptura de un sistema para ganar la penetración en sus sub-sistemas de composición. En un enfoque de arriba hacia abajo una visión general del sistema se formula, pero no especifica ningún detalle subsistemas de primer nivel.

Cada subsistema se refina en detalle aún mayor, a veces en muchos niveles adicional para el subsistema, hasta que la especificación completa se reduce a los elementos de base. Un modelo de arriba hacia abajo se especifican a menudo con la ayuda de "cajas de negro", esto hace que sea más fácil de manipular. Sin embargo, las cajas de negro puede fallar para dilucidar los mecanismos de primaria o de ser lo suficientemente detallada para validar el modelo realista.

Un enfoque de **abajo-arriba** es la reconstruyendo los sistemas para dar lugar a sistemas más grandioso, con lo que los sistemas de sub-sistemas originales del sistema emergente.

En un enfoque de abajo hacia arriba los elementos individuales de la base del sistema primero se especifican en gran detalle. Estos elementos se unen para formar grandes subsistemas, que a continuación, a su vez están vinculados, a veces en muchos niveles, hasta un sistema completo de nivel superior se forma.

Esta estrategia a menudo se asemeja a una "semilla" del modelo, por el que los inicios son pequeños pero con el tiempo crecen en complejidad e integridad. Sin embargo, "las estrategias orgánica" puede resultar en una maraña de elementos y subsistemas, desarrollarse en forma aislada y sin perjuicio de optimización local en lugar de cumplir un propósito global. ^[2 E]

2.10.1. ENFOQUE DE ARRIBA HACIA ABAJO

La práctica de la programación de arriba hacia abajo tiene varias ventajas:

- Separar el trabajo de bajo nivel de las abstracciones de alto nivel da lugar a un diseño modular.
- El diseño modular significa que el desarrollo puede ser autónomo.
- Después de haber "esqueleto" de código ilustra claramente cómo el punto bajo nivel de integración de módulos.
- Menos errores en las operaciones (para reducir los errores, ya que cada módulo tiene que ser procesados por separado, por lo que los programadores de obtener gran cantidad de tiempo para el procesamiento).
- Mucho menos tiempo consume (cada programador es sólo intervengan en una parte del gran proyecto).
- Muy optimizada forma de procesar (cada programador tiene que aplicar sus propios conocimientos y experiencia a sus partes (módulos), por lo que el proyecto se convertirá en un optimizado uno).
- Fácil de mantener (si se produce un error en la salida, es fácil identificar los errores generados a partir de qué módulo de todo el programa). ^[2 E]



2.10.2.

E

ENFOQUE DE ABAJO HACIA ARRIBA

Es un buen ejemplo del diseño de abajo hacia arriba porque las partes se crean por primera vez y luego se ensamblan sin tener en cuenta cómo las partes trabajarán en la asamblea.

En un enfoque de abajo hacia arriba los elementos individuales de la base del sistema primero se especifica en gran detalle. [2 E]

Figura 2.15. Pro / WF4.0 INGENIERO proetools.com - Lego Racer Pro / ENGINEER

Estos elementos se unen para formar grandes subsistemas, que a continuación, a su vez están vinculados, a veces en muchos niveles, hasta un sistema completo de nivel superior se forma. Esta estrategia a menudo se asemeja a una "semilla" del modelo, por lo que los comienzos son pequeños, pero con el tiempo crecen en complejidad e integridad.

Programación orientada a objetos (POO) es un paradigma de programación que usa "objetos" para diseñar aplicaciones y programas informáticos.

En Ingeniería Mecánica con programas de software como Pro / ENGINEER, SolidWorks y usuarios de Autodesk Inventor pueden diseñar productos como piezas que no forman parte del todo y después añadir las piezas juntas para formar conjuntos como la construcción de LEGO. Ingenieros de llamar a este diseño de la pieza final.

Este enfoque de abajo hacia arriba tiene una debilidad. Es necesaria una buena intuición para decidir la funcionalidad que debe ser proporcionada por el módulo. Si un sistema se va a construir desde el sistema existente, este enfoque es más adecuado, ya que parte de algunos módulos existentes.

No obstante tener la posibilidad de hacerlo de arriba abajo de diseño mediante el uso de los llamados *esqueletos* así. Son estructuras genéricas que contienen información sobre el diseño global del producto. Las piezas se pueden heredar de interfaces y los parámetros de esta estructura genérica. Al igual que las piezas, los esqueletos se pueden poner en una jerarquía. Por lo tanto, es posible construir el diseño general de un producto antes de las piezas se han diseñado. [2 E]

2.11. TOP-DOWN Y BOTTOM-UP EN LA NANOTECNOLOGÍA

Top-down y bottom-up son dos enfoques para la fabricación de productos. Estos términos se aplicó por primera vez en el campo de la nanotecnología por el Foresight Institute en 1989 con el fin de distinguir entre la fabricación molecular (para la producción masiva de objetos de gran precisión atómica) y la fabricación convencionales (que pueden producir en masa los objetos grandes que no están precisión atómica) .

Enfoques de abajo-arriba buscan más pequeñas (por lo general moleculares) componentes acumulado en más conjuntos complejos, mientras que los enfoques de arriba hacia abajo buscan crear dispositivos de nanoescala utilizando más grande, controlado por los externos para dirigir su montaje.

El enfoque de arriba hacia abajo a menudo se utiliza en el taller o los métodos tradicionales de microfabricación en el exterior-herramientas de control se utilizan para cortar, fresar, y la forma de los materiales en la forma deseada y el orden. micropatterning técnicas, como la fotolitografía y la impresión de inyección de tinta pertenecen a esta categoría.

Enfoques de abajo-arriba, en cambio, el uso de la química propiedades de moléculas individuales a causa de moléculas componentes individuales (a) se auto-organizan y auto-ensamblan en algunos conformación útil, o (b) se basan en el montaje de posición. Estos enfoques utilizan los conceptos de auto-ensamblaje molecular y / o reconocimiento molecular

Estos enfoques de abajo hacia arriba, en términos generales, pueden ser capaz de producir dispositivos en paralelo y mucho más barato que los métodos de arriba hacia abajo, pero podría ser abrumado como el tamaño y la complejidad de los aumentos de montaje deseado. ^[3 E]

2.12. PAVIMENTOS RÍGIDOS

El uso de los pavimentos rígidos se remonta a más de 100 años. george bartholomew, un norteamericano de ohio, realizó las primeras pruebas en una faja experimental de 2.44 metros de ancho. Este descubrimiento dio inicio al proyecto de obras públicas más grande en la historia de la humanidad: el sistema de carreteras inter-estatal de los estados unidos de Norteamérica, con aproximadamente 27.500 km de longitud.

La historia registra a las carreteras americanas que vincularon las áreas agrícolas con los centros urbanos, como el eslabón vital entre los productos y sus

consumidores, que literalmente pavimentaron la prosperidad de los estados unidos.

Los Tipos de Pavimentos pueden clasificarse inicialmente en rígidos y flexibles, continuos y discontinuos, en tipos de pavimentos hay gran variedad de soluciones para pavimentar cualquier vía, eligiendo además entre los permeables y los impermeables.

El pavimento de una vía es la capa superficial del firme del conjunto de los elementos que componen el suelo de la vía, como calles, calzadas, aceras, bulevares, celdas de estacionamiento, etc.

En general se habla de 2 tipos de pavimentos, los cuales se subdividen en otros tipos y variedades: pavimentos continuos y pavimentos discontinuos: ^[4 E]

2.12.1. PAVIMENTOS CONTINUOS

Se hacen en el sitio y la superficie es continua, los tipos o clases de pavimentos continuos son:

Pavimentos con ligantes: los bituminosos, de cemento continuo, de hormigón en masa, de mortero hidráulico, empedrados, hechos con resinas, terrazos contruidos in situ, etc. Pueden ser rígidos o flexibles, permeables o impermeables. ^[4 E]

Pavimentos sin ligantes: enarenados, engravillados, zahorras, etc. ^[4 E]

2.12.2. PAVIMENTOS DISCONTINUOS O POR ELEMENTOS

Son aquellos que se ejecutan mediante la instalación en el sitio de elementos naturales o prefabricados. ^[4 E]

2.12.3. PAVIMENTOS DISCONTINUOS

Son los Ligados por mortero de cemento o rígidos: como las losas prefabricadas de hormigón, baldosas hidráulicas, baldosas de terrazo, losas de piedra natural, granito etc., adoquinado de piedra natural, pavimentos cerámicos (ladrillo, baldosas cerámicas), etc.

Sellados sobre arena y sin ligante: adoquinados de hormigón, adoquines de piedras, enlosados, pavimentos de madera, granito etc. ^[4 E]

2.13. ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

“Las crecientes necesidades de desarrollo, la búsqueda de soluciones perdurables y la demanda de contar más y mejores caminos han contribuido para lograr que en la modernización y ampliación de la red carretera de México se esté especificando el uso de pavimentos del concreto hidráulico bajo estándares internacionales de calidad.” ^[4 E]

2.13.1. ANTECEDENTES

La extensión territorial de México cuenta con una gran diversidad de climas, tipos de suelos, zonas ambientales y etnias, su heterogeneidad nos ha ido marcando el camino del desarrollo y crecimiento, de alguna manera esta diversidad ha influido en la conformación de nuestra infraestructura carretera.

En México tenemos aproximadamente 95,000 km de caminos pavimentados cuyas condiciones de servicio no son las óptimas, de hecho la mayoría de ellos está catalogado por las propias autoridades como pavimentos en regulares y malas condiciones. Una razón importante del bajo nivel de servicio es debido a que estas carreteras se proyectaron, diseñaron y construyeron en su mayoría entre los años de 1925 a 1970.

La red estuvo proyectada para soportar cargas vehiculares que varían entre las 6 y 8 toneladas y en la actualidad llega a tener camiones cargados los cuales en algunos casos alcanzan a pesar hasta 60 toneladas. Además de no considerar el aumento en los pesos de los vehículos, no se consideró tampoco el crecimiento del tránsito de camiones pesados en la red, ya que se considero en el diseño el tráfico diario que anteriormente se tenía y que variaba entre los 500 y 1,000 vehículos, sin embargo en la actualidad se tienen valores significativamente mayores de hasta 15,000 vehículos.

Antes del año de 1993 la especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México fue relativamente escasa. Se considera que esto se debió principalmente a que nuestro país es un importante productor de petróleo y por consiguiente de asfalto y como anteriormente existía un subsidio importante en el precio del asfalto, los pavimentos asfálticos en nuestro país resultaban en costo muy inferiores a los del concreto hidráulico.

Adicionalmente existía una gran desinformación y desconocimiento sobre el diseño y construcción con nuevas tecnologías de los pavimentos de concreto hidráulico. Otro factor importante es que cuando se diseñaron los caminos de

México para el tránsito que se pensaba tenían que soportar, los pavimentos de asfalto parecían ser una alternativa suficiente.

Ante la preocupación acerca del deterioro de las carreteras en la red y considerando los puntos anteriormente planteados la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se dio a la tarea de buscar soluciones alternativas a tal situación que pudieran soportar adecuadamente las cargas y el volumen de tráfico pesado buscando que los niveles de servicio permanecieran en buen nivel durante períodos mayores. Tales exigencias orientaron a la SCT a la solución con pavimentos de concreto hidráulico, que representaban un costo razonable, con una capacidad estructural adecuada tanto para el volumen de tránsito como para la intensidad del mismo y un período de vida costeable de acuerdo a la magnitud de la inversión. ^[4 E]

2.13.2. TECNOLOGÍA

Para satisfacer la demanda de diseñar, especificar y construir los pavimentos de concreto hidráulico con las mejores tecnologías a nivel mundial y con altos estándares en sus especificaciones, tuvo que llevarse a cabo un programa de capacitación intensivo y avanzado para los técnicos e ingenieros especificadores, esto se logró con el apoyo de la iniciativa privada mexicana interesada en el desarrollo de la infraestructura del país con base en este tipo de pavimentos. Este tipo de capacitaciones se ha seguido desarrollando tanto en México como en el extranjero.

Se realizó una revisión exhaustiva sobre los tipos de maquinaria que estaban disponibles en el mercado internacional para realizar estas tareas, tanto plantas de mezclado central para la elaboración del concreto con la calidad y en las cantidades necesarias para lograr altos rendimientos en la pavimentación, así como pavimentadoras de cimbra deslizante con las características necesarias para lograr altos niveles de servicio, seguridad y confort.

Se analizaron también las ventajas y desventajas de unas marcas de equipos con respecto a otras, la experiencia de las empresas dedicadas a la fabricación de estos equipos, la facilidad con la que dichas empresas podrían ofrecer los servicios de capacitación, refacciones y mantenimiento para dichos equipos, e incluso la posibilidad de desarrollar representantes locales de dichas empresas para dar servicio en México.

De igual forma se trabajó en lo referente a equipos para dar el texturizado final al pavimento de concreto, las máquinas cortadoras para conformar los tableros de losas, los diferentes tipos de discos para estos cortes, y algunos otros equipos de medición de las características físicas de los pavimentos.

Terminados los análisis anteriores se importaron los equipos seleccionados a nuestro país y se dio inicio propiamente al desarrollo de este tipo de soluciones.
[4 E]



Figura 2.16. Introducción – Tecnología – Pavimentadora de Cimbra Deslizante

Fuente [www: Cemex.com](http://www.Cemex.com)

2.13.3. EVOLUCIÓN

Ante la globalización se hicieron más imperantes las necesidades de contar con una infraestructura que permita el desarrollo de la actividad económica y social del país.

En el año de 1993 la SCT con el apoyo de Cementos Mexicanos construyó la primera carretera de concreto hidráulico con el uso de especificaciones internacionales y las nuevas tecnologías de pavimentación, siguiendo estrictas normas de calidad tanto en la producción como en el tendido del concreto y contemplando una serie de alternativas en las especificaciones que permitirían establecer posteriormente situaciones comparativas que permitirían establecer adecuadamente las características ideales en las especificaciones de los pavimentos de concreto hidráulico. Así en 1993 el libramiento Ticumán ya era una realidad en concreto hidráulico, con una longitud de 8.5km.

A partir de este proyecto y con los resultados programados que se fueron obteniendo del mismo, se continuo con la especificación y construcción de algunas otras carreteras de concreto hidráulico en el país, de tal forma que al final de 1994 ya se habían iniciado los trabajos en los tramos de las Autopistas Guadalajara – Tepic, Tuxpan – Tihuatlán y Tihuatlán – Poza Rica, así como el primer tramo de la Cárdenas – Agua Dulce.

A pesar de la crisis económica que sufrió el país, para el año de 1995 ya se estaban realizando los trabajos de algunas carreteras como: Yautepec - Jojutla, Atlapexco – Tianguistengo, Jiutepec – Zapata y un tramo de la Autopista Querétaro – San Luis Potosí.

Durante el año de 1996 se construyeron también de concreto los tramos: Entronque Aeropuerto de San Luis Potosí – Entronque Libramiento de San Luis Potosí, Libramiento de San Luis Potosí – El Huizache y el tramo Aeropuerto de Ixtapa – Zihuatanejo.

Para los años de 1997 y 1998 se especificaron y construyeron los siguientes tramos: Autopista Pirámides – Tulancingo, un segundo tramo de Ixtapa – Aeropuerto, el Libramiento Ruta Dos en Nuevo Laredo, la Autopista Cancún – Tulum, la Autopista Huizache – Matehuala, tres tramos de la Autopista Querétaro – Palmillas, el Libramiento Uman en el estado de Yucatán, el Libramiento Rincón de Romos en el estado de Aguascalientes, Boulevard Aeropuerto La Paz y el tramo de Chihuahua – Aldama. En este período se realizó una ampliación a la aeropista del aeropuerto de Mérida con la tecnología del concreto hidráulico.

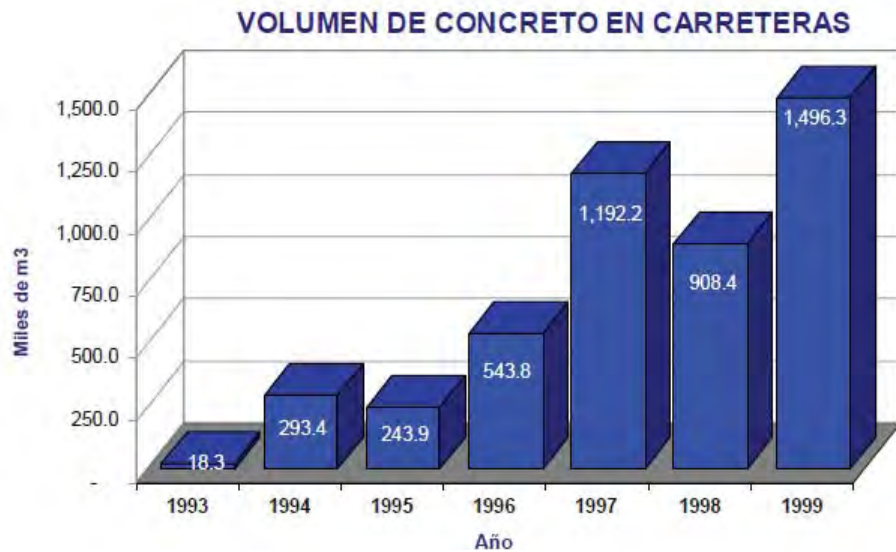
Para 1999 se estuvieron realizando ó por iniciar los trabajos de construcción de los tramos de: la Autopista Rosario – Escuinapa en el estado de Sinaloa, Aeropuerto Vallarta – Río Ameca en Jalisco, Río Ameca - Cruz de Huanacastle en Nayarit, el segundo tramo de la Cárdenas – Agua Dulce en Tabasco, la carretera Yautepec – Oacalco, el tramo Poxila – Límite de Estados en Yucatán, Libramiento de Colima, Chajul – Flor de Café en el estado de Chiapas, Entronque Feliciano – Lázaro Cárdenas Michoacán, Acceso al Puerto Fronterizo Laredo puente Internacional III, Matehuala – San Roberto y San Roberto – Puerto México en el estado de Nuevo León, el acceso al puerto de Altamira (API), las laterales del Paseo Tollocán en Toluca Estado de México, los tramos de Huayacocotla y la Chinantla en Veracruz, el Libramiento Nororiente de Querétaro, así como la aeropista del aeropuerto de Kaua en el estado de Yucatán. ^[4 E]



Figura 2.17. Introducción – Evolución – Autopista de Concreto Hidráulico
Fuente www.cemex.com

Como se ha descrito en la información presentada anteriormente el crecimiento y evolución de los pavimentos de concreto hidráulico ha aumentado de una manera que resulta muy favorable para el país, por las ventajas que los mismos representan, esto ha propiciado que la demanda de caminos de excelente calidad haya ido en aumento.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento del consumo de concreto hidráulico para la construcción de carreteras. ^[4 E]



Nota: el volumen de 1999 incluye tramos terminados, en ejecución y licitados.

Figura 2.17. Introducción – Evolución – Volumen de Concreto en Carreteras

Fuente www.cemex.com

2.13.4. VENTAJAS

Entre las principales ventajas de un pavimento de concreto hidráulico podemos enumerar las siguientes:

- Durabilidad
- Bajo Costo de Mantenimiento
- Seguridad
- Altos Índices de Servicio
- Mejor Distribución de Esfuerzos bajo las Losas ^[4 E]

2.13.5. DURABILIDAD

Una de las ventajas más significativas de los pavimentos de concreto hidráulico es la durabilidad del concreto, para lograr esta durabilidad es importante considerar además de la resistencia adecuada del concreto ante las sollicitaciones mecánicas todos los agentes externos de exposición a los que estará sujeto el pavimento para elaborar la mezcla apropiada y definir las recomendaciones para la colocación del concreto hidráulico.

Se deben de realizar los proporcionamientos de mezcla adecuados, con ciertas relaciones agua / cemento, utilizando aditivos que permitan una reducción de agua en la mezcla y que den la trabajabilidad adecuada al concreto aun con revenimientos bajos como los utilizados en autopistas.

Otro aspecto importante para lograr esta durabilidad tiene que ver con los materiales que forman la estructura de soporte, es importante conocer con detalle las características de los mismos y sus grados de compactación apoyados con los estudios de mecánica de suelos de la ruta.

Es importante que el diseñador cuente con la suficiente información para poder estimar de forma precisa el volumen de tráfico y las cargas vehiculares que estarán transitando por el pavimento con el objeto de realizar un diseño estructural adecuado para las cubrir adecuadamente la durabilidad del proyecto por efectos de fatiga. ^[4 E]

2.13.6. BAJO COSTO DE MANTENIMIENTO

Los pavimentos de concreto hidráulico se han caracterizado por requerir de un mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil. Esto es sin duda una de las ventajas mayores que ofrecen estas alternativas de pavimentación. La significativa reducción en los costos de mantenimiento de una vía permite que el concreto sea una opción muy económica.

Esto normalmente se puede visualizar al realizar un análisis del costo ciclo de vida que puede ser comparado con algunas otras alternativas de pavimentación. El análisis del costo ciclo de vida es una herramienta que nos ayuda para soportar la toma de decisiones.

El mantenimiento que requieren los pavimentos rígidos es mínimo, sin embargo es muy importante que el mismo se provea en tiempo y forma adecuados para garantizar las propiedades del pavimento. ^[4 E]

2.13.7. SEGURIDAD

El concreto hidráulico colocado bajo las especificaciones y con los equipos mencionados anteriormente permite lograr una superficie de rodamiento con alto grado de planicidad y dada su rigidez esta superficie permanece plana durante toda su vida útil, evitando la formación de roderas las cuales disminuyen el área de contacto entre llanta y pavimento produciendo el efecto de acuaplaneo en los días de lluvia. Otro fenómeno que se evita con la utilización del concreto hidráulico es la formación de severas deformaciones en las zonas de arranque y de frenado que hacen a los pavimentos ser más inseguros y maltratan fuertemente los vehículos.

Por el color claro del pavimento de concreto hidráulico se tiene una mejor visibilidad en caso de transitar de noche o en la oscuridad de días nublados. ^[4 E]

2.13.8. ALTOS ÍNDICES DE SERVICIO

Los pavimentos de concreto hidráulico permiten ser construidos con altos índices de servicio, como se menciona en el punto anterior se puede lograr un alto grado de planicidad o un índice de perfil muy bueno, adicionalmente siguiendo las recomendaciones de construcción adecuadas se puede proveer al pavimento de una superficie altamente antiderrapante.

La utilización de pasajuntas permite mantener estos índices de servicio, evitando la presencia de escalonamientos en las losas sobretodo en tramos donde el tráfico es significativamente pesado. ^[4E]

2.13.9. MEJOR DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS BAJO LAS LOSAS

Dada la rigidez de la losa los esfuerzos que se transmiten a las capas inferiores del pavimento se distribuyen de una manera prácticamente uniforme, cosa contraria a lo que sucede con los pavimentos flexibles en donde las cargas vehiculares concentran un gran porcentaje de su esfuerzo exactamente debajo del punto de aplicación de la carga y que se van disminuyendo conforme se alejan de la misma.

La distribución uniforme de las cargas permite que los esfuerzos máximos que se transmiten al cuerpo de soporte sean significativamente menores en magnitud, lo que permite una mejor condición y menor deterioro de los suelos de soporte. ^[4E]

2.13.10. TRABAJO CONTINUO

Poco a poco se ha ido logrando tener una mayor experiencia en el diseño, especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México, estas experiencias han ido mostrando las ventajas de este tipo de soluciones, de tal modo que cada vez son más las entidades gubernamentales responsables de la construcción, mantenimiento y operación de las vías que están interesadas en proveer a sus caminos de las características de un pavimento de concreto hidráulico lo que les significa ahorros sustanciales en mantenimiento, mejores niveles de servicio del camino, mayor vida útil y consecuentemente economía de los recursos.

Podemos afirmar que la alternativa de pavimentación con concreto hidráulico es una realidad en nuestro país y el siguiente paso, en el que estamos trabajando a pesar de que son mínimas las necesidades, es el de dar a conocer a los especificadores y constructores los métodos de rehabilitación, reparación y mantenimiento que se deben de seguir en los pavimentos rígidos para aprovechar de mejor forma todas sus ventajas. ^[4E]

2.13.11. MARCO DE REFERENCIA

“El desarrollo de los pavimentos de Concreto Hidráulico se ha incrementado notablemente en Latinoamérica en la década de los 90’s, gracias a las ventajas que ofrecen para el desarrollo económico de los países del tercer mundo” ^[4 E]

2.13.12. EXPERIENCIA INTERNACIONAL

En muchos países del mundo se han utilizado por muchos años los pavimentos de concreto hidráulico tanto para proyectos carreteros como para vías de comunicación urbanas, tal es el caso de Estados Unidos, Canadá, Alemania, España, Francia, Italia, Bulgaria, Etc. De diferentes formas estos países han contribuido para que los métodos de diseño se hayan ido perfeccionando en base a los estudios realizados en el tiempo, así mismo se ha evolucionado en las técnicas de construcción y de evaluación de los pavimentos de concreto hidráulico.

Todas las experiencias recopiladas durante más de 50 años han servido de base para la tecnología actual de pavimentos y obviamente se sigue experimentando e investigando para mejorar y perfeccionar las técnicas actuales. ^[4 E]

2.13.13. CASO DE LATINOAMÉRICA

En los países de América Latina se han utilizado los pavimentos de concreto principalmente para vialidades urbanas, sin embargo las tecnologías de diseño y construcción utilizadas normalmente no habían sido las más actualizadas.

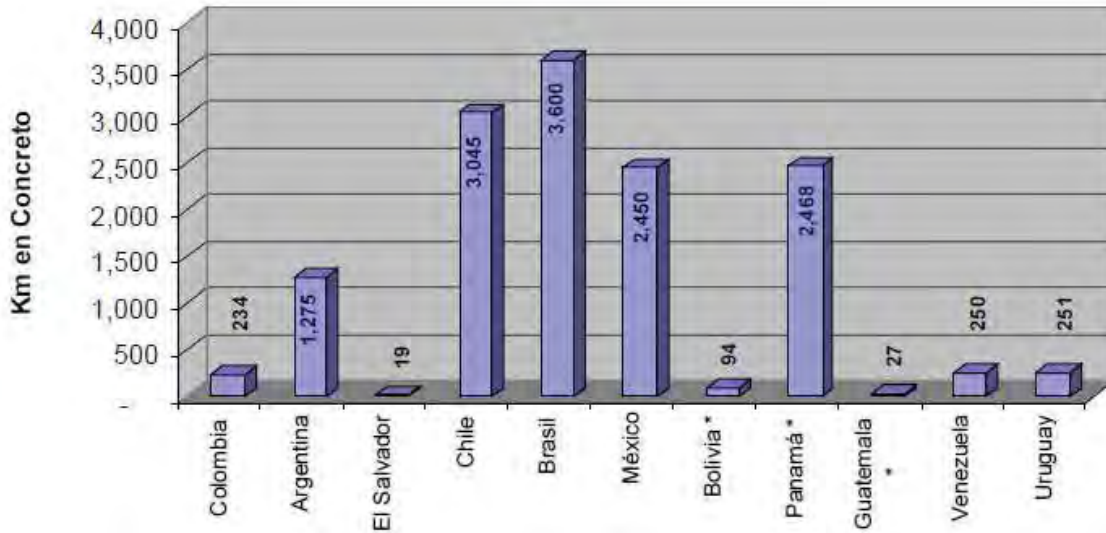
El país de Latinoamérica que más pronto inició su incursión en las nuevas tecnologías de pavimentación fue Panamá esto en consecuencia de la fuerte influencia tecnológica que tuvieron de los Estados Unidos por su presencia en el Canal. Posteriormente algunos otros países empezaron a utilizar estas tecnologías tanto en especificaciones como en procedimientos constructivos, sin embargo el desarrollo más importante se ha dado durante la última década, la de los noventas.

Países como: Brasil, Chile, México, Argentina, han empezado a utilizar ampliamente estas nuevas tecnologías en el desarrollo de sus Carreteras, Autopistas y Vialidades Urbanas.

En menor escala pero con una fuerte tendencia de crecimiento lo están haciendo países como Venezuela, Colombia, Uruguay, Guatemala, El Salvador y Bolivia, sin embargo esta tendencia parece estar ampliándose a todos los países de América Latina.

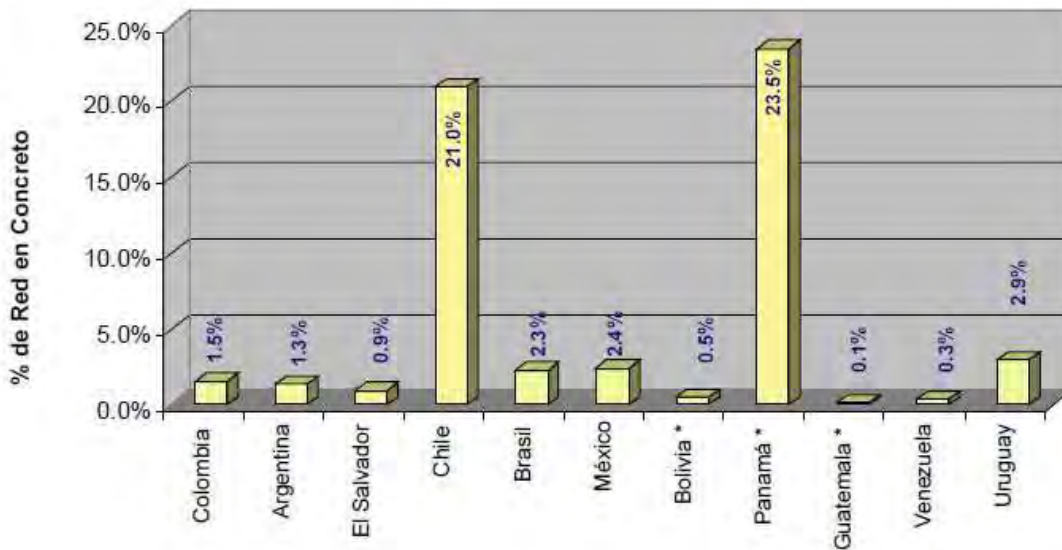
En las gráficas siguientes podemos observar de manera aproximada el porcentaje de la red carretera pavimentada de estos países que ya cuenta con concreto hidráulico como superficie de rodamiento, así como el número de kilómetros construidos por país con estas nuevas tecnologías en Carreteras y Autopistas.

Como puede observarse, el crecimiento es importante y el potencial de desarrollo es aún mayor. ^[4E]



Fuente: 2do Foro Interamericano de Pavimentos de Concreto, Brasil agosto de 1999.

Figura 2.18. Introducción – Marco de Referencia – Km de Concreto en Carreteras



* Datos aproximados Fuente: 2do Foro Interamericano de Pavimentos de Concreto, Brasil agosto de 1999.

Figura 2.19. Introducción – Marco de Referencia – Porcentaje de la Red en Concreto Hidráulico

2.14. DISEÑO DE PAVIMENTOS

2.14.1. INTRODUCCIÓN A MÉTODOS DE DISEÑO

Los dos métodos de diseño descritos en este Sistema de Diseño de Pavimentos de Concreto, el de la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) y el de la Portland Cement Association (PCA) corresponden a los métodos de diseño de espesores de pavimentos más ampliamente usados a nivel mundial. Por este motivo se ha decidido incluir ambos métodos en el Sistema Pavimentos de Concreto. ^[4 E]

2.14.2. MÉTODO AASHTO

DISEÑO POR MÉTODO AASHTO

a. Prueba de pavimentación AASHTO

El método de diseño de espesores de pavimentos rígidos está basado en los resultados obtenidos de la prueba de carreteras concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente en secciones conocidas de pavimentos rígidos y flexibles.

La planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. El tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960 y el método estuvo listo para 1961. ^[4 E]

b. Formulación del método de diseño

El objetivo principal de las pruebas consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas, o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferente espesores de pavimentos, conformados con bases y sub-bases, colocados en suelos de características conocidas.

En total se examinaron 368 secciones de pavimento rígido y 468 secciones de pavimento flexible.

Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas que podían dar nuevamente valores numéricos de capacidad de servicio. Estos valores graficados contra las aplicaciones de carga forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de cada uno de los diversos diseños. ^[4 E]

c. Evolución de la guía AASHTO

Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASHTO para 1961 salió publicada la primer "Guía AASHTO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles". Posteriormente para 1972 se realizó una revisión y se publicó como la "Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimento - 1972". Para 1981 se hizo una Revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Portland.

Para 1986 se publicó una revisión de la "Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento".

En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de Sobrecarpetas de pavimento.

Para 1998 se publicó un método alternativo para diseño de pavimentos, que corresponde a un "Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimento".

d. Variables del método de diseño

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen en realidad la base del diseño del pavimento por lo que es necesario conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos al mismo tiempo.

Variables de diseño de Pavimentos Rígidos:

- Espesor.
- Serviciabilidad (inicial y final).
- Tráfico (ejes equivalentes).
- Transferencia de carga.
- Propiedades del concreto (módulos de ruptura y elasticidad).
- Resistencia de la subrasante (módulo de reacción).
- Drenaje.
- Confiabilidad (confiabilidad y desviación estándar). ^[4 E]

2.14.3. MÉTODO PCA

DISEÑO POR MÉTODO PCA

a. Formulación del método

El método de diseño de la Portland Cement Association es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto.

Teniendo como base el conocimiento de varias teorías de pavimentos como Westergaard, Picket and Ray así como de elementos finitos. También la experiencia en el comportamiento de varias pruebas e investigaciones como la Arlington Test y diversos proyectos de la misma PCA. Y derivado de lo anterior se generó finalmente este método de diseño.

Parte del método fue desarrollado interpretando los resultados del modelo de elementos finitos basados en el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (180 x 144 pulgadas) a la cual se le aplicaron cargas al centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte.

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de evaluación en el procedimiento de diseño, el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y la fatiga del pavimento de concreto.

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallar, presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga.

A diferencia del método AASHTO el método de diseño PCA, consideró un valor fijo de módulo de elasticidad del Concreto (E_c) = 4'000,000 psi que no lo hizo variar en relación con la resistencia a la flexión del concreto (MR), así como tampoco varió el coeficiente de poisson de 0.15.

Este método considera algunas limitaciones en los valores de módulo de reacción K del suelo, en donde el rango de valores para los que el método fue desarrollado oscila entre los 50 y 700 psi.

Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo Ejes Sencillos Equivalentes.

b. Variables

Las variables que intervienen en el diseño son:

- Espesor Inicial del Pavimento.
- Módulo de Reacción K del suelo.
- Tráfico.
- Transferencia de Carga y Soporte Lateral.
- Propiedades del Concreto.
- Módulo de Ruptura (Considera una reducción del 15% por seguridad).
- Módulo de Elasticidad Fijo = 4, 000,000 psi.
- Módulo de Poisson Fijo = 0.15. ^[4 E]

2.14.4. COMPARATIVA ENTRE LOS MÉTODOS DE DISEÑO

Ambos métodos de diseño son apropiados para el diseño de espesores de pavimentos rígidos en cualquier tipo de proyecto, sin embargo el método AASHTO hace intervenir un mayor número de variables que nos ayudan a modelar de mejor manera las condiciones del proyecto al momento de estar diseñando su espesor.

Los resultados del método de la PCA son adecuados para cualquier tipo de proyecto a pesar de que no se puedan tomar en cuenta algunos factores importantes como lo son la serviciabilidad inicial y final. En cambio considera de una manera más real la contribución del tráfico en la formulación.

El Concreto Profesional Resistente a la Flexión o Módulo de Ruptura (MR) es el concreto ideal para las condiciones de carga más comunes en una estructura de concreto soportada sobre terreno.

CEMEX Concretos pone a tu disposición una gama diversa de concretos de resistencia a la flexión, que cumplirá con las necesidades estructurales y de comportamiento en estado fresco y endurecido, en los proyectos de piso industrial.^[4 E]

Ventajas

- Tiene una vida útil mayor que un concreto diseñado a la compresión, ya que está diseñado para resistir los esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la flexión de las losas.
- Más resistente a los esfuerzos causados por la combadura (alabeo) de las losas por efectos de los cambios de temperatura.
- Mayor resistencia al desgaste por el paso de los vehículos ya que, sometiendo la losa a cargas dinámicas, los esfuerzos de flexión internos en una losa de concreto se encuentran más cercanos a su resistencia última a la flexión (MR), que los esfuerzos internos de compresión contra su resistencia última a la compresión ($f'c$).^[4 E]

2.14.5. MEDICIÓN DE CONCRETO PREMEZGLADO (MR)

La resistencia a la flexión se determina a través de la prueba de Módulo de Ruptura (MR) de acuerdo con la norma ASTM C 78 "Resistencia a la Flexión del concreto", en la que se aplica la carga a los tercios del claro en una viga de concreto.

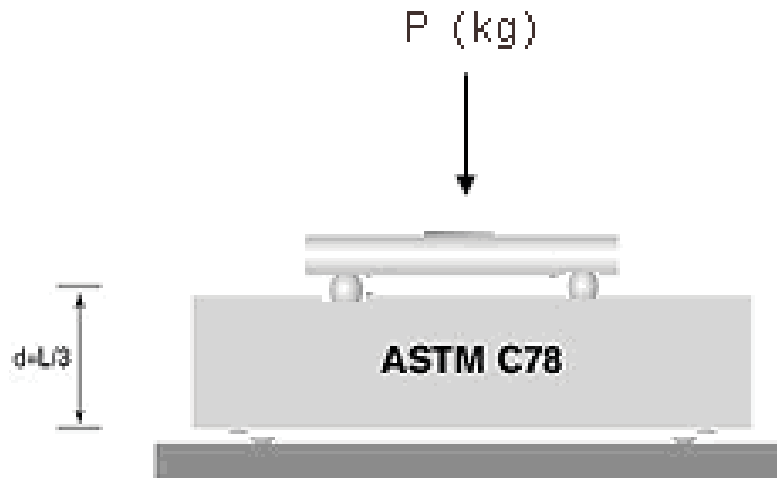


Figura 2.20. Prueba de MR en vigas

Usos

- Patios de maniobra.
- Pavimentos para vivienda.
- Pisos industriales.
- Calles.
- Plataformas.
- Estacionamientos.
- Lotes de autos.
- Terminales de tránsito aéreo y terrestre.
- Carreteras.
- Puertos.
- Pistas y plataformas de aeropuertos. ^[4 E]

2.14.6. DATOS TÉCNICOS

Concreto fresco

- Rango de revenimiento desde 6 hasta 12 cm.
- Trabajabilidad adecuada aun con bajos rendimientos.

Concreto endurecido

- Módulos entre 32 y 50 kg/cm².
- Apto para proveer características antiderrapantes.
- Peso volumétrico mayor a 2,200 kg/m³. ^[4 E]

2.15. PISOS INDUSTRIALES

Llamaremos pisos industriales, es decir, aquellos pisos que estén sometidos a cualquiera de las siguientes aplicaciones de carga:

- * Cargas móviles (entre los que podemos citar vehículos pesados, montacargas y cualquier vehículo con ruedas en contacto con la superficie de la losa).
- * Cargas puntuales a través de los soportes de maquinarias o estructuras de almacenamiento, como racks o anaqueles.
- * Cargas uniformemente distribuidas, aplicadas directamente sobre la superficie de la losa de concreto. ^[4 E]



Figura 2.21. Diversas condiciones de carga y uso en pisos industriales

Fuente www.cemex.com

Los pisos de concreto, industriales, comerciales o de tráfico ligero, deben ser diseñados y construidos sin olvidarnos de los aspectos económicos a los que van ligados.

En términos de economía no se habla exclusivamente de construcción o inversión inicial, más bien incluyendo además los costos asociados con el mantenimiento y reparaciones necesarias en el piso, así como el mantenimiento y reparaciones de los equipos que transiten sobre él, etc.

La construcción de un buen piso de concreto requiere comunicación estrecha entre el propietario, arquitecto, ingeniero y contratista, con un mutuo entendimiento del nivel de calidad necesaria para el uso proyectado de la instalación. ^[4 E]

2.15.1. CONCRETO PARA PISOS INDUSTRIALES

La función primordial de la mayoría de los pisos de concreto es la de brindar un adecuado soporte a la aplicación de cargas, incluyendo gente, vehículos y diversos objetos. En resumen, el concreto habitualmente sirve como superficie y una buena calidad del concreto es necesaria para soportar las cargas y resistir el uso para el que fue diseñado.

Los ingredientes y cómo todos éstos son combinados, así como las técnicas empleadas de colocación del concreto (procedimiento constructivo), generan efectos en la calidad y el funcionamiento del piso. De esta manera en el presente capítulo se mencionan propiedades importantes de cuidar del concreto, así como más adelante se detallan cuestiones de procedimiento constructivo o técnicas de acabado. ^[4 E]

2.15.2. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

Las propiedades del concreto en estado fresco afectan directamente tanto en la colocación del mismo como las características del concreto una vez endurecido. Para el caso de los pisos, el concreto endurecido debe ser capaz de soportar las cargas y resistir cierto nivel de desgaste.

En ambos casos, la capacidad de soportar cargas y de resistencia al desgaste dependen de la resistencia del concreto. ^[4 E]

2.15.3. REVENIMIENTO

El uso excesivo de agua empleada para conseguir revenimientos altos es una de las causas principales de un mal desempeño del piso. El agua en exceso provoca el sangrado del concreto, segregación de agregados e incrementa la contracción por secado.

Si se espera tener un piso nivelado, de apariencia uniforme y resistente al desgaste, deberemos tener todos los camiones más o menos uniformes de revenimiento, cumpliendo con la especificación requerida.

Revenimientos bajos (de 5 a 10 cm) se usan comúnmente para equipos mecánicos tales como reglas vibratorias, aunque no del todo para casos de pisos industriales en donde el proceso de acabado debe dejar una superficie muy plana y nivelada, en estos casos la recomendación común es un concreto de revenimiento máximo de 12 cm, a pesar que se tiene muy claro las ventajas de trabajar con el revenimiento más bajo posible. ^[4 E]

2.15.4. CONTENIDO DE AIRE

Usualmente el concreto para pisos no lleva incluso de aire. Sin embargo, pequeñas cantidades de incluso de aire en el concreto para pisos es útil para reducir el sangrado e incrementar la plasticidad.

Un contenido total de aire (incluyendo tanto el aire aplicado como el ya incluido) deberá ser entre del 2% al 3%. Para el concreto expuesto a ciclos de congelamiento y descongelamiento la aplicación de aire deberá ser la mayor posible (entre el 5% y el 8% dependiendo del tamaño máximo de agregado).

Visto que el contenido de aire es bien aceptado para la durabilidad del concreto, existe entonces una razón para considerar una aplicación máxima: cuando los trabajos de acabado del piso incluyen el allanado con llanas de acero.

Un contenido máximo de aire de un 3% se ha definido para disminuir la posibilidad de delaminación. Esto se da debido a que las llanas de acero pueden sellar la superficie y dejar atrapadas bolsas de aire debajo de ella, especialmente cuando se usan tratamientos superficiales monolíticos.

No se deberá usar incluso de aire cuando el concreto reciba una aplicación de endurecedor superficial.

Estos productos requieren cierta humedad en algunas partes de la superficie, para poder penetrar a través de ella y ejercer su función. Debido a que el incluso de aire desacelera el sangrado, la humedad necesaria quizá no se encuentre presente en la losa, por lo que es muy probable que en la superficie endurecida se generen burbujas y delaminaciones. ^[4E]

2.15.5. SANGRADO

En la colocación del concreto, el sangrado es el desarrollo de una capa de agua superficial producto del asentamiento de partículas sólidas (cemento y agregados) y la consecuente salida del agua hacia la superficie.

El sangrado en ocasiones resulta normal y resulta ser un auxiliar en el control de la contracción plástica, pero un sangrado excesivo incrementa la relación agua/cemento cerca de la superficie, particularmente si los trabajos de acabado se llevan a cabo mientras el concreto sigue sangrando. Esto puede generar una superficie débil con una durabilidad pobre.

La cantidad de sangrado se incrementa con altos contenidos de agua iniciales en el concreto, así como con pisos de mayor espesor. Las siguientes reglas pueden ser aplicadas para reducir el sangrado:

- * Buenas granulometrías de agregados.
- * Cementos finos.

- * Ciertos aditivos químicos.
- * Incluser de aire. ^[4 E]

2.15.6. CONTRACCIÓN

El agrietamiento se puede producir por una combinación de factores tales como contracción por secado, contracción térmica, restricción (externa o interna), asentamiento de la subrasante y la aplicación de cargas. Realizando cortes en los pisos de concreto, se inducirán las grietas producto de la contracción en lugares discretos y con ello se controlará la aparición aleatoria de grietas.

Las grietas que aparecen antes del endurecimiento del concreto son usualmente el producto del acomodo de la masa de concreto o contracción de la superficie, causada por una rápida pérdida de agua cuando el concreto aún se encuentra en su estado plástico. Estas grietas son producto de una contracción plástica.

Mientras el concreto sigue su proceso de acomodamiento, las grietas pueden desarrollarse sobre miembros embebidos, tales como el acero de refuerzo.

Estas grietas, resultan de una consolidación insuficiente (vibrado), revenimientos altos o la falta de un adecuado recubrimiento sobre los miembros embebidos en la masa de concreto.

Las grietas por contracción plástica son relativamente cortas, y pueden aparecer antes de que se concluyan los trabajos de acabado, en aquellos días cuando uno o más de los siguientes factores existen: viento, bajos niveles de humedad y altas temperaturas.

En estas condiciones la humedad de la superficie se evapora más rápido que lo que puede ser sustituida por un ascenso de agua de sangrado a la superficie. Dando como resultado, que la parte superficial de la losa se endurece más rápido que el fondo de la misma y por lo tanto, mientras se endurece se empieza a contraer más que el concreto del fondo, permitiendo que el agrietamiento plástico se desarrolle en la superficie.

Frecuentemente las grietas por contracción plástica llegan a la mitad del espesor de la losa. Varían en longitud y usualmente están paralelas una a otra grieta, con separaciones de pocos centímetros, hasta 3 metros de distancia.

Usualmente las grietas que aparecen después del endurecimiento son el resultado de la contracción por secado, contracción térmica, o asentamiento de la subrasante. Después del endurecimiento, el concreto comienza a secarse y a contraerse como resultado de la liberación de humedad.

Para controlar la contracción y la ubicación de grietas, las juntas de contracción deberán ubicarse en intervalos regulares. La experiencia nos muestra que las juntas por contracción (grietas inducidas), deberán tener una distancia de separación de 20 a 24 veces el espesor de la losa, procurando no pasarnos de 4.5 metros.

Esto equivale a intervalos de 4 a 4.8 m para losas de 20 cm de espesor. Si se añade acero de refuerzo a la losa y si la aparición de agrietamiento aleatorio es aceptable, se puede aumentar la separación de juntas.

El factor de mayor influencia en la contracción por secado del concreto es el contenido total de agua. A medida que el contenido de agua en el concreto aumenta, la cantidad de contracción aumentará proporcionalmente.

Altos incrementos en el contenido de arena y reducciones significativas en el agregado grueso incrementará la contracción debido a que el contenido de agua se elevará y porque el tamaño más pequeño de agregado grueso disminuyen la resistencia interna a la contracción. El uso de agregados de alta contracción con aditivos de cloruro de calcio también incrementan la contracción.

La colocación de concreto en las temperaturas altas del mediodía producirá una contracción mientras el concreto se enfría durante la noche. Una caída de temperatura de 22°C entre el día y la noche podría generar una contracción de cerca de 0.8 mm en una losa de 3 m de longitud, suficiente para causar un agrietamiento si el concreto es restringido en su contracción.

El agrietamiento en las losas de concreto sobre el terreno con un espesor adecuado para el uso al que fueron diseñadas, se puede reducir significativamente o eliminar por completo siguiendo las siguientes recomendaciones:

- * Prepare adecuadamente la base de la losa, que incluya una compactación uniforme y un material adecuado para la sub- base con un contenido adecuado de humedad.
- * Minimice el contenido de agua de la mezcla, maximizando el tamaño y cantidad de agregado grueso y usando agregados de baja contracción.
- * Use la mínima cantidad de agua requerida en la mezcla, para la trabajabilidad, evite sobrepasar la consistencia de humedad.
- * Evite el uso de aditivos con cloruro de calcio.
- * Evite la rápida pérdida de humedad de la superficie mientras el concreto se encuentre en estado plástico a través de la aplicación de membranas de curado o protecciones de plástico para evitar las grietas por contracción plástica.

- * Realice juntas de contracción (inducidas) a intervalos razonables, de 20 a 24 veces el espesor de la losa.
- * Evite variaciones extremas de la temperatura.
- * Para minimizar el agrietamiento con el uso barreras de vapor (o retardadoras de vapor), coloque una capa de al menos 10 cm de material granular, de baja humedad, compactable que pueda ser drenada con material fino. Si el concreto debe ser colocado directamente sobre una hoja de polietileno u otro retardante de vapor, use una mezcla con el menor contenido de agua posible.
- * Coloque adecuadamente el concreto, logre su consolidación, su acabado y cúrelo.
- * Considere el uso de fibras plásticas para controlar la aparición de grietas por contracción plástica.

Un diseño adecuado de mezcla y la selección de los materiales adecuados podrán reducir significativamente o eliminar por completo la aparición de grietas. ^[4 E]

2.15.7. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN POR TENSIÓN

Cuando una carga es aplicada a un piso industrial soportado sobre el terreno, está producirá esfuerzos en la losa de concreto. Los esfuerzos por compresión provocados por la carga en la losa son considerablemente menores que la resistencia a la compresión del concreto, sin embargo, no sucede lo mismo con los esfuerzos de flexión.

La flexión es crítica ya que una parte de la losa al aplicar la carga se encuentra en tensión y la resistencia a la tensión del concreto es apenas una pequeña porción de la resistencia a la compresión.

Por esta razón, la resistencia a la flexión por tensión del concreto o módulo de ruptura (MR) será la resistencia del concreto a considerar en diseño de espesor de losas soportadas sobre el terreno, ya sean pavimentos exteriores o pisos industriales.

La resistencia a la flexión se determina a través de la prueba de módulo de ruptura (MR) de acuerdo con la norma ASTM C 78, “Resistencia a la Flexión del Concreto”, en la que se aplica la carga a los tercios del claro en una viga de concreto, tal y como se muestra en la figura 3.1-1. Usualmente se aplica la resistencia a 28 días como la resistencia de diseño a emplear en el diseño del espesor, a pesar de saber el concreto sigue ganando resistencia más allá de los 28 días. ^[4 E]

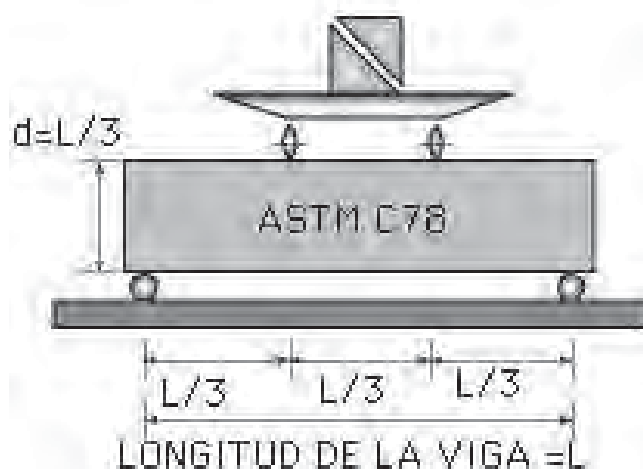


Figura 2.22. Croquis esquemático de prueba de resistencia a la flexión, ASTM C-78.

Fuente www.cemex.com

2.15.8. DURABILIDAD

Afortunadamente hoy en día los lineamientos de durabilidad en la ingeniería son cada vez más comunes e importantes. Es muy cierto que lo básico es cumplir con ciertos requisitos del concreto digamos de aspecto estructural, por ejemplo, de resistencia mínima para el cálculo de espesor de la losa ante ciertas condiciones de carga, sin embargo, no debemos olvidarnos de evaluar en términos de durabilidad las condiciones específicas de uso del concreto.

El caso de pisos industriales no es la excepción, los concretos también pueden ser diseñados para condiciones extremas de durabilidad, por ejemplo, para soportar temperaturas bajas en cámaras de congelación en las que también van a circular montacargas con sus constantes repeticiones de ruedas sólidas sobre la superficie de concreto. ^[4 E]

2.15.9. DISEÑO DEL ESPESOR DE LA LOSA

Muchas variables determinan directa o indirectamente los requerimientos de espesor para losas de concreto. Incluir todas ellas en un solo método de diseño sería excesivo y complejo por lo que podría llevar a una sobre confianza en el diseño como forma de garantizar un buen desempeño del piso. Algunas veces la deficiencia en la mano de obra en lugar de un mal diseño o especificación son las causas de un mal comportamiento de los pisos.

Dado que la parte superficial de un piso es la que evalúa el usuario, normalmente se pone mayor atención a la construcción de la parte superficial de la losa que al diseño del espesor de la losa.

Sin embargo, por razones de diseño estructural se debe escoger un espesor de losa. Basado en extensos estudios y muchas prácticas de laboratorio, el método de la Asociación del Cemento Portland para losas de concreto sobre el terreno está bien establecido y aceptado a nivel mundial. Las gráficas mostradas en el presente capítulo ofrecen una manera rápida de determinar el espesor adecuado para ciertas condiciones de carga.

Las losas de concreto simple (sin acero de refuerzo) ofrecen ventaja de económica y de facilidad de construcción. Reconociendo la similitud obvia y las diferencias entre un pavimento sin acero de refuerzo y una losa de concreto simple, la teoría de método de diseño de pavimentos fue reducida para utilizar tablas de diseño para losas de concreto simple.

Este método de diseño es aplicable tanto para losas de almacenamiento a la intemperie o en el interior de las naves.

Al igual que en el método de diseño de pavimentos exteriores de la Asociación del Cemento Portland (PCA), los factores que se requieren para el diseño del espesor de losa incluyen:

- * Capacidad portante de la subrasante y la sub-base.
- * Resistencia del concreto.
- * Ubicación y Frecuencia de cargas impuestas.
- * Magnitud de las cargas, incluyendo las de construcción.

Existen dos propiedades del concreto que para efectos del método de diseño de la PCA se mantienen fijas o constantes, sabiendo de antemano que ambas propiedades tienen poca influencia en el diseño del espesor de la losa. Los valores que se usaron para desarrollar las gráficas de diseño son módulo de elasticidad $E = 281,227 \text{ kg/cm}^2$ (4,000,000 psi) y módulo de poisson $m = 0.15$. [4 E]

2.15.10. OBJETIVOS DEL DISEÑO

El exceso de cargas puede provocar diversos tipos de fallas, por ejemplo, grietas por esfuerzos de flexión excesivos, deflexiones excesivas, asentamientos por exceso de presión al suelo, y para el caso de cargas altamente concentradas, las fallas o grietas pueden ser provocadas por esfuerzos de cortante excesivos.

La estrategia del diseño de pisos es mantener todos estos factores dentro de los límites de seguridad. Sin embargo, el factor más crítico de éstos, es decir, la consideración que rige el diseño es diferente dependiendo del área de contacto de la carga como se muestra en la figura 2.23, por ejemplo, en casos normales los esfuerzos de flexión son la consideración de diseño crítica para montacargas, mientras que para cargas distribuidas cubriendo áreas muy grandes de almacenamiento, el esfuerzo por flexión debajo de la carga no es tan crítico como otras.

Los efectos de carga y las consideraciones de diseño a controlar son también mencionados en los siguientes temas, cargas de vehículos, en racks y carga distribuida. ^[4 E]

2.15.11. ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y FACTORES DE SEGURIDAD

La flexión es un criterio admisible para el diseño de pisos debido a que se relaciona directamente el comportamiento estructural global del piso bajo cierta condición de carga.

Esta resistencia a la flexión también se le conoce como el módulo de ruptura y se abrevia MR, mientras que la resistencia a compresión se refiere directamente al comportamiento del material, es decir, únicamente al concreto.

Es de todos conocido que la resistencia a la flexión es proporcional a la resistencia a la compresión y mientras más grande sea la resistencia a la compresión, mayor también será la resistencia a la flexión y a pesar que existen correlaciones entre una y otra siempre será más recomendable el hacer pruebas de laboratorio para tener la mayor confiabilidad.

Uno de los pasos preliminares en el diseño de espesores de losa es determinar los esfuerzos de flexión que el concreto puede soportar, es decir, los esfuerzos de flexión permisibles. El esfuerzo permitido de trabajo se determina dividiendo la resistencia a la flexión del concreto entre un apropiado factor de seguridad.

La carga sobre un piso de concreto inducirá esfuerzos en él y el trabajo del diseñador es mantener ese esfuerzo debajo del permitido por el concreto y su espesor. Los factores de seguridad para cargas de vehículos han sido determinados por experiencias obtenidas en el desempeño de los pavimentos y consideran la influencia del número de repeticiones de carga, esfuerzos por contracción e impactos.

Los factores de seguridad apropiados para cargas estáticas, ya sean concentradas o distribuidas, no están bien establecidos por falta de experiencia o investigación. El diseñador debe de tomar precauciones para ciertas consideraciones de diseño y requerimientos especiales de desempeño y determinar las características de desempeño de la losa bajo condiciones similares de carga.

Los esfuerzos en las losas para las condiciones de carga de vehículos y carga de poste se determinaron mediante el uso de programas computacionales con sus modificaciones apropiadas en las áreas de contacto (Packard 1967).

Los esfuerzos de flexión indicadas en las gráficas de diseño son los esfuerzos en el interior de la losa, asumiendo que la carga es aplicada a cierta distancia de cualquier borde libre.

Para cargas aplicadas cerca o en los bordes de la losa los esfuerzos de flexión calculados serán de un 50 a 60% mayores que los calculados para posiciones de carga en el interior de la losa.

Cuando se presenta la transferencia de carga a través de la junta (tanto con pasajuntas como con trabazón de agregados), los esfuerzos de flexión en el borde disminuyen, sin embargo, esta disminución depende de la eficiencia obtenida en la transferencia de carga.

Debido a que el esfuerzo por flexión es 50% a 60% mayor en los bordes de la losa sin una adecuada transferencia de carga, el espesor de la losa se debe de incrementar en los casos de juntas sin pasajuntas, aunque las juntas estén en la parte interna o en la periferia de la losa. El aumentar el espesor de la losa compensa la falta de transferencia de carga y mantienen los esfuerzos por flexión en los bordes dentro de límites seguros.

Las gráficas de diseño de espesores de losa presentadas en este capítulo, fueron desarrolladas para cargas localizadas en el interior de la losa. Sin embargo, las mismas gráficas pueden ser usadas para condiciones de carga dinámicas con juntas sin la adecuada eficiencia de transferencia de carga.

Los efectos de esfuerzos de borde se consideran ajustando el esfuerzo permisible de trabajo usando un apropiado factor de juntas considerando los altos esfuerzos de flexión en los bordes.

Por ejemplo, para un módulo de ruptura de 39 kg/cm² (560 psi), usando un factor de seguridad (FS) de 2.2 para las cargas localizadas en el interior provee esfuerzos de trabajo de 18 kg/cm² (255 psi). Para cargas en los bordes, el factor de seguridad es ajustado por un factor de junta de 1.6 (60% más alto que para la condición de carga interior) para considerar el esfuerzo de flexión más grande del concreto, es decir, en el borde. De esta manera el esfuerzo permisible de trabajo es más bajo: $39/(2.2 * 1.6) = 11 \text{ kg/cm}^2$ [$560/(2.2 * 1.6) = 160 \text{ psi}$].

Cuando la transferencia de cargas en las juntas (y así la transferencia de esfuerzos) puede ser asegurada- por ejemplo, por una buena trabazón de agregados o por pasajuntas - el ajuste del esfuerzo de trabajo por cargas frecuentes no es grande. Sin embargo, el diseñador deberá tener cuidado al saber que las grietas formadas en las juntas de control por la contracción del concreto, pueden llegar a ser lo suficientemente anchas para perder la transferencia de carga por trabazón de agregados.

La eficiencia de transferencia de carga lograda únicamente por la trabazón de agregados decrece significativamente conforme la grieta se abre con el tiempo.

El ancho de la grieta depende de la cantidad de contracción de la losa y del espaciamiento de juntas. De acuerdo al estudio de Colley y Humphrey de 1967, el ancho de las grietas máximo para garantizar la efectividad de transferencia de carga por trabazón de agregados será de 0.89 mm (0.035 pulgadas), aunque para losas de espesores fuertes, la trabazón de agregados se mantiene efectiva aún con mayor abertura de las grietas. ^[4 E]

2.15.12. CARGAS DE VEHÍCULOS

El procedimiento de diseño para cargas de vehículos involucra la determinación de los siguientes factores específicos de diseño:

- * Carga de eje máxima.
- * Número de repeticiones de carga.
- * Área de contacto de la llanta.
- * Espaciamiento de ruedas del eje más pesado.
- * Resistencia de la subrasante.
- * Resistencia de flexión del concreto MR.
- * Factor de seguridad.
- * Transferencia de carga en las juntas.



Figura 2.24. Diversos tipos de cargas vehiculares aplicadas sobre el piso

Fuente www.cemex.com

En los casos con largas separaciones de juntas, digamos juntas separadas a más de 4 ó 4.5 metros, el uso de barras pasajuntas en las juntas de contracción es muy recomendado, debido a que la transferencia de carga por trabazón de agregados no resultará efectiva al tener una junta o grieta que abra demasiado.

Para los casos de separaciones de juntas pequeñas, como de 3 metros pueden proveer una buena transferencia de carga si la junta o grieta no abre demasiado.

Si no se desea proveer transferencia de carga se puede incrementar el espesor de la losa en el área de la junta para mejorar su desempeño bajo la aplicación de la carga. Normalmente se recomienda incrementar el espesor un 20%, sin embargo, esta práctica que era común en el pasado ya no lo es en la actualidad por lo complicado que esto resulta en la construcción.

El diseño del piso requiere que el tráfico sea estimado de forma correcta, incluyendo la siguiente información:

- * Magnitudes de las Cargas.
- * Frecuencias.
- * Configuraciones de los ejes de los vehículos que circularían en el piso.

La magnitud de las cargas cuantifica la fuerza actuante sobre el piso, mientras que la frecuencia se refiere al número de veces que una magnitud de carga dada es aplicada al concreto. La falla provocada por la repetición de carga se le conoce como fatiga y también se manifiesta con agrietamiento. Adicionalmente la geometría de las llantas en los ejes afectan en la manera en que los esfuerzos son aplicados a la losa.

Los datos de tráfico y cargas necesarios para el diseño del piso industrial de cierta nave pueden conseguirse de varias fuentes, por ejemplo, de otra nave o planta ya en operación, del departamento de mantenimiento, de ingeniería, operación y planeación, así como de las hojas técnicas de los fabricantes de los vehículos. Basados en esta información, un adecuado factor de seguridad puede ser seleccionado para determinar los esfuerzos de trabajo permisibles.



Figura 2.25. Gráfica de la separación de ruedas en el eje cargado e ilustración del área de las llantas en contacto directo con el piso (área de contacto) Fuente www.cemex.com

Para pisos, el factor de seguridad es la relación de la resistencia a la flexión del concreto (módulo de ruptura) entre el esfuerzo de trabajo a flexión, lo que puede entenderse como la capacidad total admisible que pueda ocurrir antes de la falla, con la resistencia utilizada.

El inverso del factor de seguridad (esfuerzo de trabajo dividido entre la resistencia a la flexión) se conoce como relación de esfuerzos y en estudios de fatiga, los valores de la relación de esfuerzos influyen en el número de repeticiones de carga permisibles.

Mientras la relación de esfuerzos se mantenga por debajo de 0.45, el concreto puede resistir un número ilimitado de repeticiones de carga sin presentar agrietamiento por fatiga (una relación de esfuerzos de 0.45 es equivalente a un factor de seguridad de 2.2).

Para relaciones de esfuerzo mayores de 0.45 (factor de seguridad menor que 2.2), la tabla 2.23 presenta el número máximo de repeticiones de carga que puede ser permitido sin causar agrietamiento por fatiga.

El factor de seguridad o su correspondiente relación de esfuerzo depende de la frecuencia de tráfico del montacargas más pesado. Un factor de seguridad de 2.2 puede ser usado para todas las áreas del piso y en el caso de áreas muy grandes de piso puede resultar más económico el emplear diferentes factores de seguridad.

La recomendación de la Asociación de Cemento Portland en materia de factores de seguridad es la siguiente:

- * Pisos o áreas con un gran número de repeticiones esperadas de montacargas, se recomienda diseñarlos con un factor de seguridad alto (de 2.0 o superior).
- * En otras áreas en donde se espere menor tráfico de montacargas se puede emplear un factor de seguridad entre 1.7 y 2.0.
- * En áreas no críticas, como áreas de almacenamiento sin un constante tráfico de montacargas, el factor de seguridad podrá ser de 1.4 a 1.7.

Esta flexibilidad en el diseño puede en ocasiones tener ventajas económicas al permitir áreas de menor espesor o el uso de concretos de menor resistencia, sin embargo, habrá también que considerar que este tipo de decisiones puede limitar el futuro uso del piso y posibles ampliaciones al proyecto.

Debido a la gran variación de tamaños, cargas de ejes y espaciamiento de las llantas de los montacargas, no es práctico proveer de gráficas de diseño para cada vehículo en específico. Por consiguiente, dos gráficas de diseño, figuras 2.26 Y 2.27, fueron preparadas y pueden ser usadas para configuraciones de carga y

de ejes de la mayoría de los montacargas industriales que afectan el diseño de los pisos.

Las gráficas de diseño de espesores se presentan en su formato original y en las unidades en las que fueron desarrolladas, por lo que en su caso deben ser convertidas las unidades métricas a libras - pulgada antes de proceder al diseño de espesores por este método.

La figura 2.27 se emplea para montacargas equipados con ejes sencillos, es decir, ejes con una sola rueda de cada lado del eje, se entra a la gráfica con un esfuerzo de trabajo permisible por cada 1000 libras de carga en el eje.

Este esfuerzo de trabajo permisible es calculado por la división de la resistencia a la flexión del concreto entre el factor de seguridad y si es necesario entre el factor de junta y después dividir este resultado entre la carga del eje en kips (1 kips=1000 lb). El factor de seguridad es obtenido por consideraciones de la relación de esfuerzos y las repeticiones de cargas, como provee la tabla 2.23.

Para el caso de ejes dual, es decir, ejes equipados con doble llanta, las figuras 2.27 son usadas para determinar el espesor de la losa del piso. Primero, se usa la figura 2.27 para convertir la carga del eje dual a una carga equivalente de eje sencillo (el eje cargado es multiplicado por el factor F).

Después, con la carga equivalente, se usa la figura 2.27 para determinar los esfuerzos de flexión en la losa.

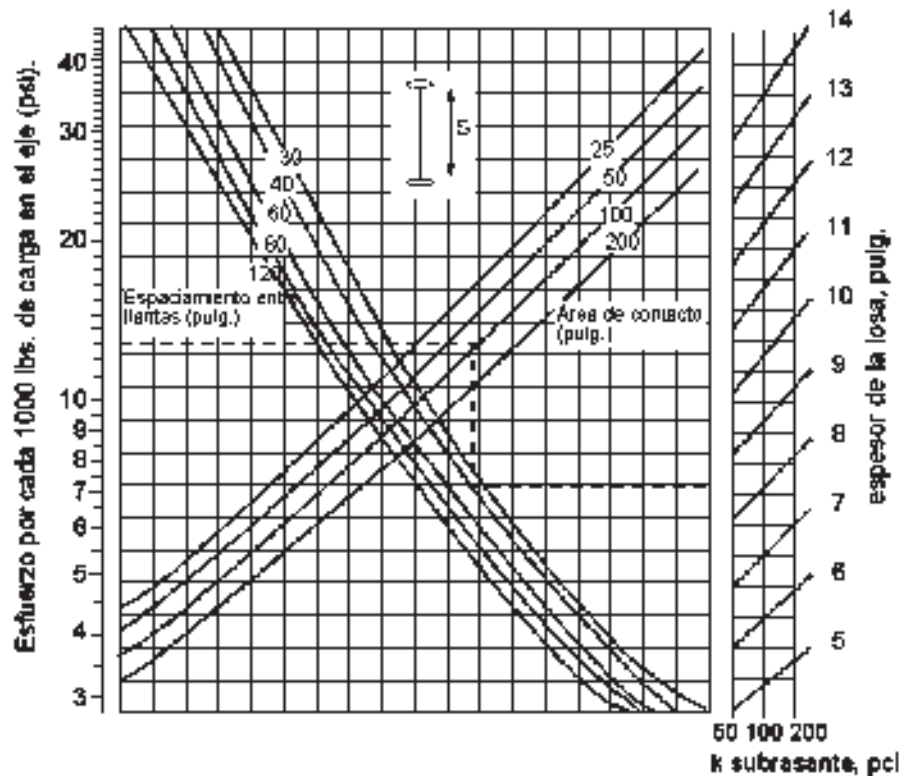


Figura 2.26. Tabla Relaciones de esfuerzo contra repeticiones de carga permitidas¹.

¹Fuente: "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements", Portland Cement Association, 1984.

El área de contacto de la carga se refiere al área de una llanta en contacto directo con la losa, sin importar el diseño o huella de la llanta. Si los datos de la llanta no se conocen, el área de contacto puede ser estimada para el caso de llantas neumáticas dividiendo la carga de la llanta entre la presión de inflado y en el caso de ruedas sólidas, el área de contacto puede ser más o menos estimada multiplicando el ancho de la llanta (en pulgadas) por 3 ó 4.

Cuando el área de contacto de la llanta fue determinada, se usa la figura 2.27 para encontrar el área efectiva de contacto a usar en las gráficas de diseño. Esta corrección se hace porque los esfuerzos en las losas provocados por pequeñas áreas de contacto son sobre estimados cuando se calculan por las teorías convencionales. Las bases para este ajuste fueron dadas por la teoría de Westergaard en 1925 (estos mismos ajustes son usados para cargas en postes discutidos más adelante).

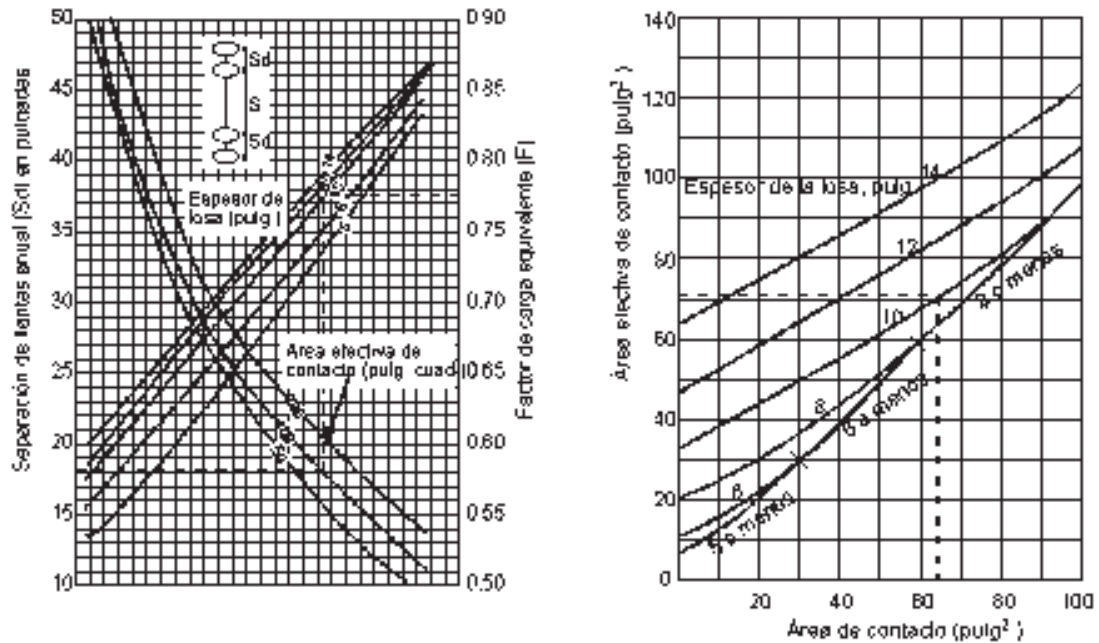


Figura 2.27. Gráfica de diseño para ejes sencillos
Fuente www.cemex.com

En el uso de la figura 2.27 es necesario suponer un espesor inicial de losa; esto es un proceso de prueba y error que se debe comprobar al final con el diseño de espesor requerido. El grado de corrección se incrementa a medida que el área de contacto llega a ser muy pequeña y el espesor de la losa incrementa. [4 E]

2.15.13. EJEMPLO DE DISEÑO 1

Montacargas de eje sencillo.

Datos del montacargas

Eje cargado: 11.3 Ton (25 kips)

Espaciamiento de llantas: 94 cm (37 pulg.)

Número de llantas por eje: 2

Presión de inflado de la llanta: 0.76 Mpa (110 psi)

$$\text{Área de contacto} = \text{cargas en una llanta} / \text{presión de inflado}$$

$$25000/2 = \text{-----} = 114 \text{ pulg}^2 \text{ 110 [4 E]}$$

2.15.14. DATOS DE LA SUBRASANTE Y CONCRETO

Modulo de reacción k de la subrasante: 100 psi

Resistencia a la flexión del concreto (MR): 44 kg/cm² (640 psi) a 28 días. ^[4 E]

2.15.15. PASOS DE DISEÑO

(Convertir todos los valores métricos a valores en libras - pulgadas antes de continuar).

1.- Factor de Seguridad (FS):

Seleccionar el factor de seguridad definiendo el diseñador el criterio de acuerdo a la estimación de repeticiones o intensidad de tráfico esperado. Seleccionar un factor de seguridad de 2.2 para un número ilimitado de repeticiones.

2.- Factor de Junta (FJ):

Para el diseño basado en cargas en el interior de la losa el factor de junta a emplear será de 1.0, sin embargo, para cargas frecuentes cruzando juntas sin sistemas de transferencia de carga, el factor de junta recomendado será de 1.6.

Este valor es usado porque el espaciamiento de las juntas en el piso está relativamente en el límite mayor, es decir, de 4.50 metros.

3.- Esfuerzo de trabajo del Concreto:

$$WS = (MR / FS * FJ) = (640 / 2.2 * 1.6) = 182 \text{ psi}$$

4.- Esfuerzos en losa por cada 1000 lb de carga en el eje: = (WS / carga en el eje, kips) = (182 / 25) = 7.3 psi

5.- Entre por el eje de la parte izquierda de la figura 2.27 con un esfuerzo de 7.3 psi y muévase a la derecha para el área de contacto de 114 pulgadas². Desde ese punto, desplácese hacia arriba para el espaciamiento de llantas de 37 pulgadas. Desde ahí, muévase horizontalmente a la derecha para leer el espesor de la losa de 11.2 pulgadas, sobre la línea para subrasante con módulo de reacción k = 100 psi y use 11 1/4 pulgadas (29 cm) como espesor de la losa.

Si el uso de áreas más bajas es identificable (instalaciones largas), cambie los factores de seguridad desde la tabla 2.23 por los números estimados de repeticiones de cargas. Esto puede resultar en un espesor de piso reducido para otras áreas. ^[4 E]

2.16. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características.

Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores de la comunidad científica y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución ($\sim 100 \text{ \AA}$), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.^[6]

2.17. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética de elevada energía y pequeña longitud de onda, del orden de los espacios interatómicos de los sólidos. Cuando un haz de rayos X incide en un material sólido, parte de este haz se dispersa en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que se encuentran en el trayecto, pero el resto del haz puede dar lugar al fenómeno de difracción de rayos X, que tiene lugar si existe una disposición ordenada de átomos y si se cumplen las condiciones que vienen dadas por la longitud de onda de los rayos X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado.

En otras palabras la difracción de rayos X es uno de los fenómenos que se producen al interaccionar un haz de rayos, de una determinada longitud de onda, con un material cristalino. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de

onda de la radiación) y a su vez en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase dispersándose en determinadas direcciones del espacio.

La geometría que se presenta en el proceso de difracción de los rayos X cuando se analizan sustancias cristalinas es análogo al de la reflexión de la luz por un espejo plano, y la condición para que una familia de planos paralelos, separados regularmente, refracte un haz incidente de rayos X, se conoce como la ecuación de Bragg (ecuación que predice la dirección en la que se da la interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal) y se expresa como lo indica la siguiente ecuación.

$$2d \operatorname{sen}\theta = n\lambda$$

La difracción de rayos X permite 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 poliformismo, transiciones de fase, medida del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase, etcétera; se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

En el presente trabajo se ha utilizado un difractómetro de polvo, con una geometría denominada “Bragg-Brentano”, donde los rayos x filtrados divergen desde una línea de origen e inciden sobre la muestra en polvo. Los rayos difractados por los planos cristalinos son recogidos por un detector y los mismos son convertidos en unos impulsos eléctricos que se traducen en un gráfico característico.^[7]

2.18. FTIR

Cuando la radiación infrarroja incide sobre una muestra, es capaz de provocar cambios en los estados vibracionales de las moléculas constituyentes de la misma. La absorción de la radiación por parte de una muestra es indicativa del tipo de enlaces y grupos funcionales presentes en dicho compuesto. Un análisis detallado de éste y haciendo una comparación con espectros similares se pueden determinar el tipo de compuesto en estudio.

Aplicaciones de la espectrometría de Infrarrojo por transformada de Fourier.

- Caracterización e identificación de materiales:
 - ✓ Polímeros y plásticos,
 - ✓ Sólidos inorgánicos (minerales, catalizadores, materiales compuestos),
 - ✓ Análisis de productos farmacéuticos y de síntesis,
 - ✓ Análisis de contaminantes, seguimiento de procesos químicos,

- ✓ Polimerizaciones, curado, reticulaciones,
- ✓ Reacciones catalíticas,
- ✓ Análisis de aceites y combustibles.

El espectrofotómetro utilizado en este estudio fue un FT-IR modelo Perkin Elmer (Spectrum one) en un intervalo de número de onda de $4000 - 450 \text{ cm}^{-1}$.

La espectroscopia infrarroja es ampliamente utilizada tanto en la investigación y la industria es un instrumento sencillo y confiable para la medición, control de calidad y mediciones dinámicas. Es de uso especial en análisis forense en ambos casos penales como civiles, que permita la identificación de la degradación de polímeros por ejemplo.

Los instrumentos son pequeños, y pueden ser transportados, incluso para el uso en ensayos de campo. Con la tecnología cada vez mayor en equipo de filtrado y la manipulación de los resultados, las muestras en solución ahora se puede medir con precisión (el agua produce una absorbancia amplia en toda la gama de intereses, y por lo tanto hace que el espectro ilegible sin este tratamiento informático). Algunos instrumentos también automáticamente le dirá qué sustancia se mide en una tienda de miles de espectros de referencia en los depósitos.

Mediante la medición a una frecuencia específica a través del tiempo, los cambios en el carácter o la cantidad de un vínculo especial se puede medir. Esto es especialmente útil para medir el grado de polimerización en polímero fabricación.

Los instrumentos modernos de investigación pueden tomar mediciones infrarrojas a través de toda la gama de intereses con tanta frecuencia como 32 veces por segundo. Esto se puede hacer mientras se realizan mediciones simultáneas usando otras técnicas. Esto hace que las observaciones de las reacciones químicas y procesos más rápidos y precisos.

La espectroscopia infrarroja ha sido altamente exitosa para aplicaciones tanto en la química orgánica e inorgánica. espectroscopia de infrarrojos también se ha utilizado con éxito en el campo de la microelectrónica semiconductores: Por ejemplo, la espectroscopia infrarroja se pueden aplicar a los semiconductores como silicio, arseniuro de galio, nitruro de galio, seleniuro de zinc, Silicio amorfo, nitruro de silicio, Etc. ^[7]

2.19. TEM

El microscopio electrónico de transmisión es uno de los equipos más apropiados para llevar a cabo un buen estudio de la red cristalina y los defectos de los materiales. Como todos los microscopios electrónicos, utiliza un haz de electrones que se caracteriza por tener una longitud de onda mucho menor que la

2.20.1. PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO BROOKFIELD

1. Todas las mediciones deben efectuarse con el viscosímetro Brookfield a $25 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.
2. Bajar lentamente la aguja núm. 4, la que debe estar bien sujeta al viscosímetro, hasta que quede muy cerca del centro de la superficie de la muestra y sumergir a la profundidad adecuada. Después, correr lentamente el recipiente en un plano horizontal hasta que la aguja esté localizada aproximadamente en el centro del recipiente para que la prueba sea efectuada en una zona sin turbulencias.

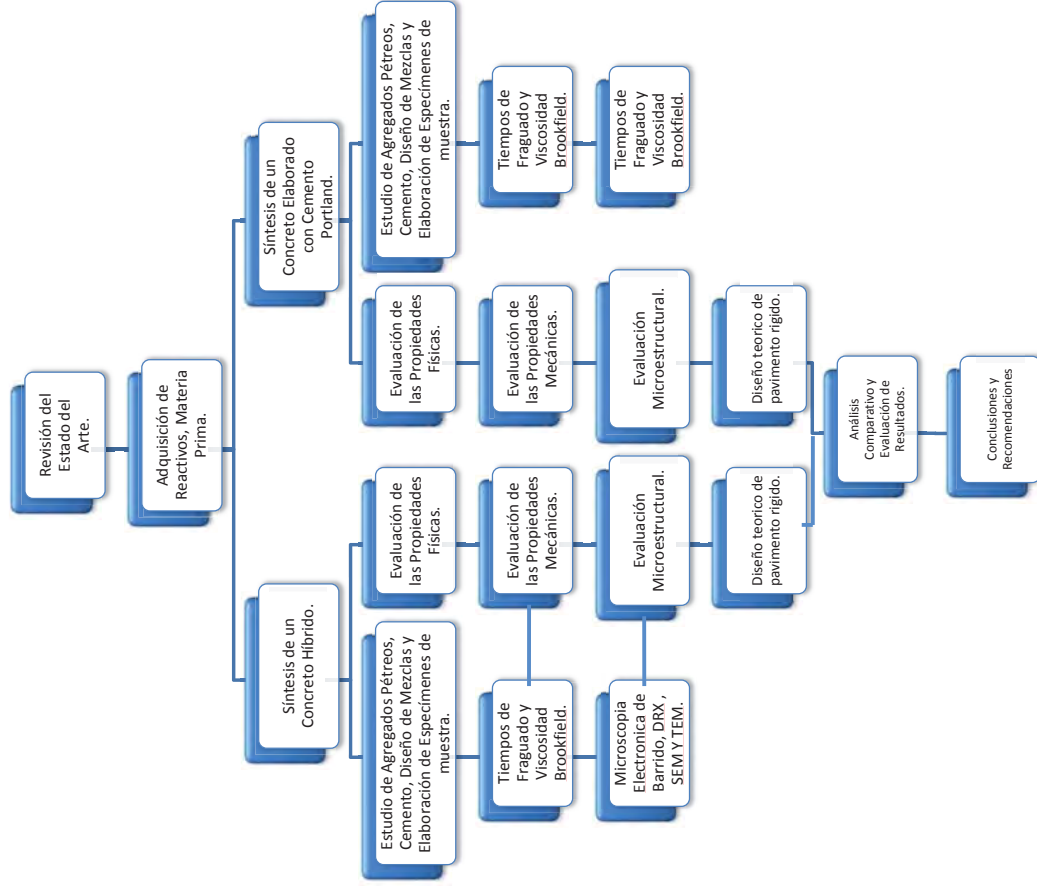
Iniciar la prueba con el viscosímetro a 6rpm y anotar la lectura de la escala después de 10 revoluciones. Incrementar la velocidad del viscosímetro a 12rpm y anotar la lectura de la escala después de 10 revoluciones.

Hacer las observaciones de la misma manera a 30 y 60rpm. Después de haber efectuado la observación a 60rpm, reducir la velocidad a 30, 12 y 6rpm, anotando las lecturas de la escala después de 10 revoluciones a cada una de las velocidades mencionadas. Una vez que ha sido tomada la última lectura a 6rpm, desconectar el viscosímetro, dejando que tanto el viscosímetro como la muestra estén en reposo durante 2 minutos. Al término del período de reposo de 2 minutos conectar de nuevo el viscosímetro y anotar la lectura de la escala después de 10 revoluciones. ^[5 E]

2.20.2. PRECISIÓN DEL MÉTODO BROOKFIELD

La precisión varía conforme a la velocidad del viscosímetro y con el grado de viscosidad de la muestra. La repetibilidad y la reproducibilidad de la lectura de viscosidad deben estar dentro del 10%, excepto las lecturas de viscosidad inicial a la más baja velocidad. ^[5 E]

3. DISEÑO EXPERIMENTAL.



4. SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC-GEOPOLÍMERO

Uno de los aspectos más importantes en esta investigación es la síntesis de nuestro material la cual nos llevo aproximadamente un año y medio para poder determinar algunas composiciones con las mejores características físicas, mecánicas y químicas.

Estas composiciones se realizaron en “**cuatro etapas**” a lo largo de esta investigación, de las cuales se mostraran las síntesis y resultados de las mismas más adelante.

La síntesis, elaboración y pruebas a compresión de las cuatro etapas fueron exactamente las mismas, los factores que cambiaron fueron los siguientes: se agregaron nuevos materiales, se realizaron especímenes de diferentes dimensiones y se probaron a diferentes edades.

4.1. SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (PRIMERA ETAPA)

Los materiales utilizados para esta primera etapa, fueron tres tipos de cemento portland para observar el comportamiento de reacción con los nanocementos. Una vez determinado el tipo de cemento con las mejores características de reacción con los nanocementos, se realizaron infinidad de corridas de nano-cementos híbridos cambiando las proporciones de los materiales dando lugar a la obtención de diversos nano-cementos híbridos con muy buenas características.

Para la síntesis de nuestro concreto híbrido se realizaron diferentes composiciones en las cuales se siguió una metodología de elaboración la cual se presenta continuación:

- Se pesaron los diferentes materiales en una balanza con aproximación al centésimo de gramo, teniendo así una muy buena exactitud en cada uno de los pesos.
- Una vez pesados los materiales se mezclan por separado los sólidos y los líquidos.
- Ya mezclados los materiales por separado se mezclan ahora los sólidos con los líquidos hasta tener una homogeneidad en nuestro material (concreto híbrido).

- Después de hacer el mezclado final se vierten en moldes cúbicos, posteriormente se desmoldan a las 24Hr para poder ser curados en agua hasta el día que se prueben.

Durante la síntesis de los nano-cementos se vieron diferentes tipos de reacciones y comportamientos de las mezclas, en la siguiente memoria fotográfica se muestran algunos comportamientos y la elaboración de los especímenes.



Figura 4.1. Mezclado del material en seco

Después de pesar los materiales se mezclaron en seco hasta tener una buena homogeneidad en la mezcla en seco.

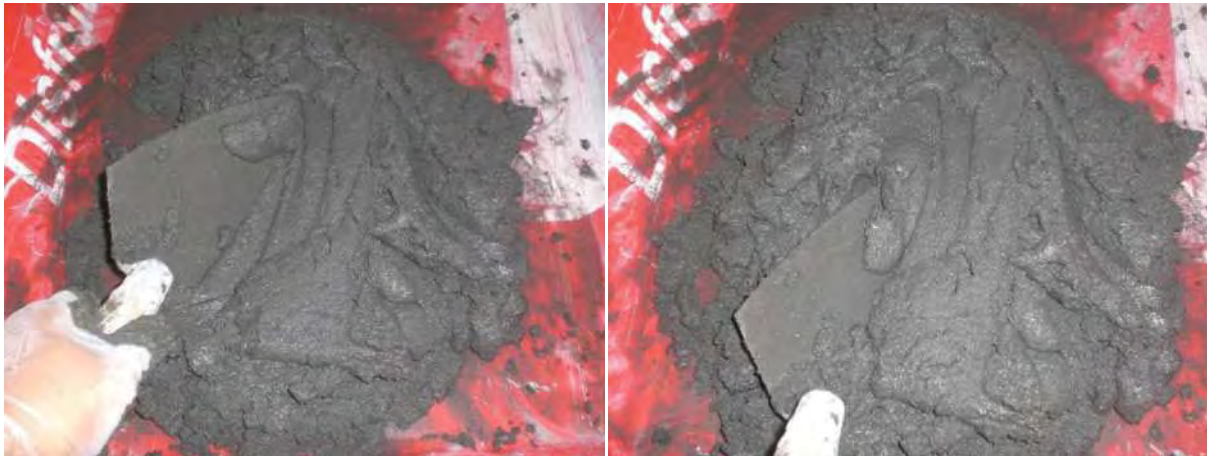


Figura 4.2. Mezclado del material con buena trabajabilidad y homogénea.

Posteriormente se le agregan los materiales líquidos para elaborar nuestra mezcla, como se puede ver en la fotografía la mezcla muestra una muy buena trabajabilidad lo cual nos da la pauta a ser una mezcla con buenas características.

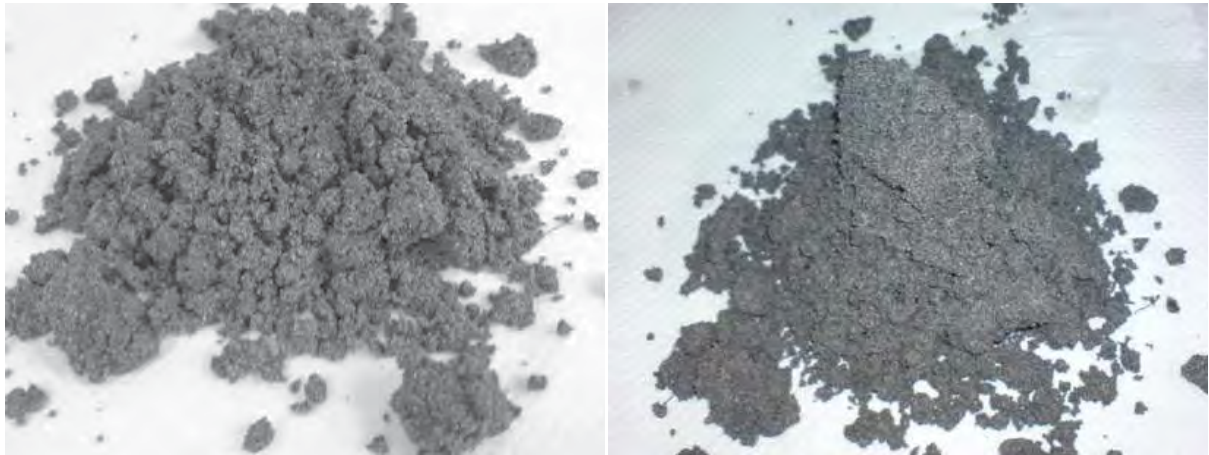


Figura 4.3. Mala trabajabilidad y sin homogeneidad en la mezcla

En estas imágenes se muestran lo que nosotros manejamos como mala trabajabilidad ya que no hay una buena homogeneidad en la mezcla, por lo tanto se iban desechando este tipo de composiciones.

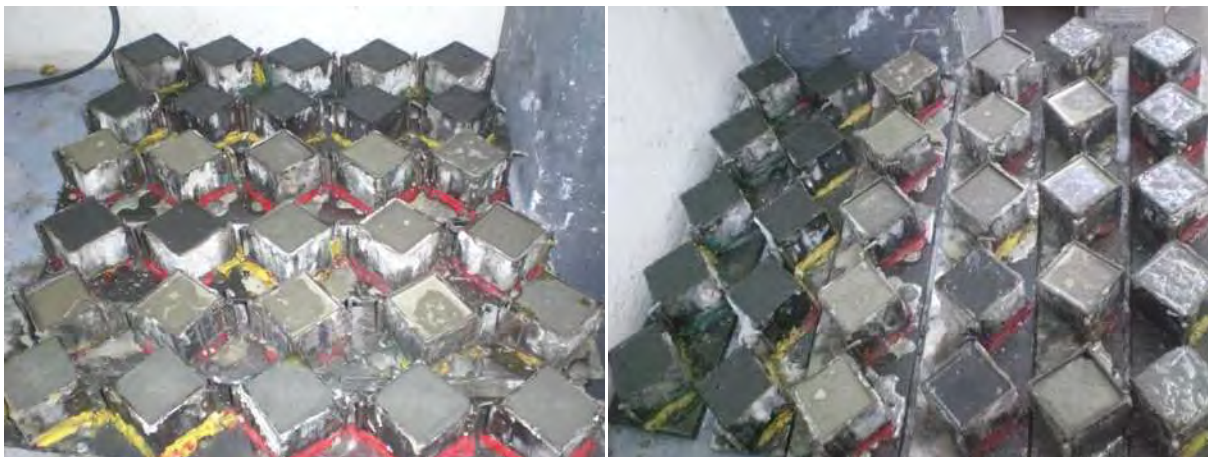


Figura 4.4. Llenado de los moldes con diferentes mezclas

Ya que se tiene la mezcla se hace el llenado de los cubos, en esta investigación para realizar pruebas a compresión simple se realizaron cubos de 5x5x5 cm y de 10x10x10 cm.



Figura 4.5. Desmolde de las muestras después de 24 horas

Después de 24 horas se desmoldan los cubos para ser llevados a la pila de curado.

4.2. SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (SEGUNDA ETAPA)

Como ya se menciona anteriormente la síntesis, elaboración y pruebas a compresión de las cuatro etapas fueron las mismas, los parámetros que cambiaron en esta etapa fueron los siguientes: se realizaron cubos de (5x5x5)cm y de (10x10x10)cm y se probaron a diferentes edades.

En esta segunda etapa y después de un arduo trabajo en la primera se llegó a 9 composiciones con las mejores características tanto físicas como mecánicas, las cuales se presentan a continuación en la tabla 4.1 mostrando su trabajabilidad, composición y materiales utilizados en cada una de ellas.

Tabla 4.1. Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la segunda etapa de la investigación. Nota los recuadros en amarillo nos representan la ausencia de ese material en la composición.

Materiales	% respecto al peso del cemento	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
Cemento Portland	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Relación A/C	60	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Relación C/M Tipo 1	275	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Alúmina	20		*			*			*	
Microsílica	20	*			*					*
Carbonato de Potasio	1.5	*	*	*						
Carbonato de Sodio	1.5							*	*	*
Hiperfluidificante	1.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*

4.3. SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (TERCERA ETAPA)

A continuación se muestran las composiciones de la tercera etapa de esta investigación.

Tabla 4.2. Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la tercera etapa de la investigación.
Nota los recuadros en amarillo nos representan la ausencia de ese material en la composición.

Materiales	% respecto al peso del cemento	Comp. 1	Comp. 6	Comp. 8	Comp. 1	Comp. 6	Comp. 8
Cemento Portland	100	*	*	*	*	*	*
Relación A/C	60	*	*	*	*	*	*
Relación C/M Tipo 1	275	*	*	*	*	*	*
Alúmina	20			*			*
Microsílica	20	*			*		
Carbonato de Potasio	1.5	*			*		
Carbonato de Sodio	1.5			*			*
Hiperfluidificante	1.5	*	*	*	*	*	*
Polvo de neumático (Nº 80)	5				*	*	*

En esta tercera etapa se tomaron las dos mejores composiciones de las nueve mostradas en la segunda etapa, así como la composición 6 que hemos manejado como la estándar para tener un punto de comparación.

Además se les agrego polvo de neumático para ver su comportamiento y hacer una comparación, teniendo así un mortero ecológico dándole un plus a nuestra investigación.

4.4. SÍNTESIS DE NANO-CEMENTOS HÍBRIDOS: OPC GEOPOLÍMERO (CUARTA ETAPA)

Como se ya se ha venido trabajando, en esta cuarta etapa se escogieron dos composiciones finales la estándar que es la de comparación y la composición 8 que es la que mejor comportamiento tubo a lo largo de esta investigación.

En la tabla 4.3 se muestra los nuevos materiales agregados a la composición 8.

Tabla 4.3. Trabajabilidad y composiciones de las mezclas de la cuarta etapa de la investigación.
Nota los recuadros en amarillo nos representan la ausencia de ese material en la composición.

Materiales	% respecto al peso del cemento	Comp. 6A	Comp. 8A	Comp. 8B	Comp. 8C	Comp. 6A'	Comp. 8A'	Comp. 8B'	Comp. 8C'	Comp. 8D'
Cemento Portland	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Relación A/C	65	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Alúmina	20		*	*	*		*	*	*	*
Microsílica	20									
Carbonato de Potasio	1.5									
Carbonato de Sodio	1.5		*		*		*		*	*
Hiperfluidificante	1.5	*	*	*	*		*		*	*
Polvo de neumático (Nº 80)	5					*	*	*	*	*
Fibra de Acero	10				*				*	20%
Mezcla de concreto	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Otros agregados										*

En esta última etapa de la síntesis se concluye que de todas las composiciones realizadas a lo largo de la investigación la composición 8 es la que mejores características tubo tanto físicas como mecánicas, se le agregaron nuevos materiales a la composición 8 para tratar de mejorar sus propiedades dando muy buenos resultados los cuales se presentaran más adelante.

A continuación se presenta una memoria fotográfica de la elaboración de cilindros y vigas en esta cuarta etapa:

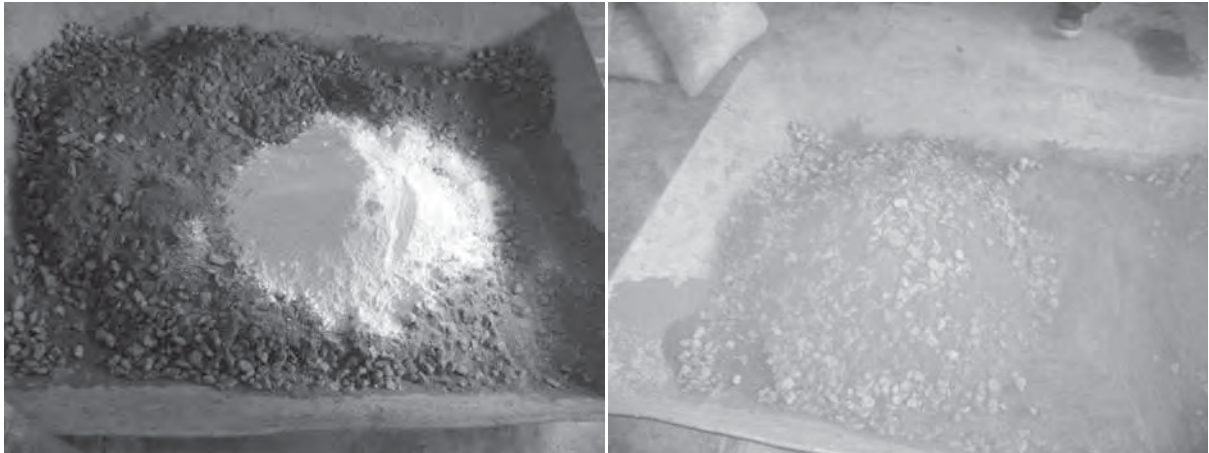


Figura 4.6. Mezclado en seco



Figura 4.7. Mezclado en húmedo



Figura 4.8. Prueba de revenimiento



Figura 4.9. Material con buena trabajabilidad y muy homogénea



Figura 4.10. Material con mucha segregación



Figura 4.11. Llenado de los especímenes



Figura 4.12. Curado de los especímenes

En las imágenes mostradas se puede observar la elaboración de cilindros, vigas y cubos, en algunas imágenes se presentó la trabajabilidad y algunos problemas que se tuvieron en las mezclas.

5. SÍNTESIS DEL CONCRETO CONVENCIONAL

5.1. ESTUDIO DE AGREGADOS PÉTREOS

En la siguiente memoria fotográfica se muestran todas las pruebas requeridas para la elaboración del proporcionamiento por el método de la ACI 211.

Los resultados obtenidos de las pruebas serán reflejados en el proporcionamiento antes mencionado, estos se presentara más adelante en el diseño.



Figura 5.1. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas

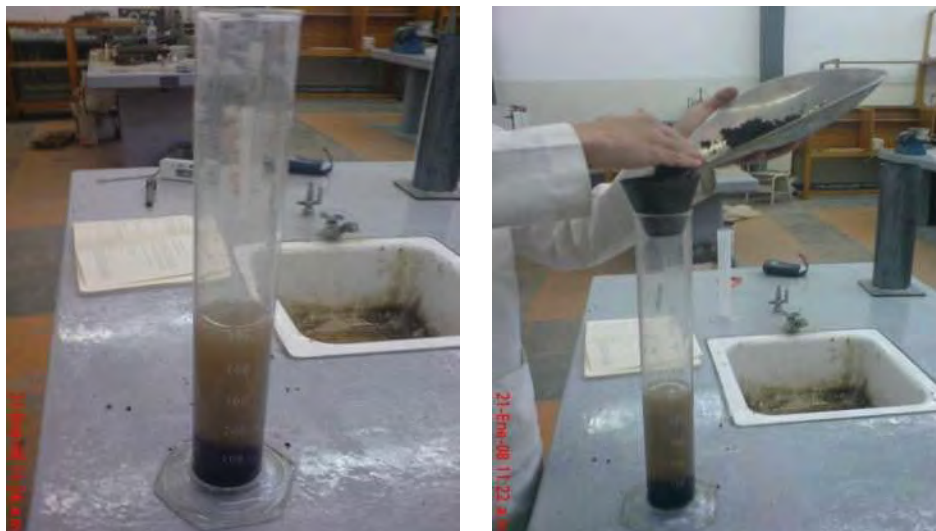


Figura 5.2. Densidad de la arena



Figura 5.3. Pesos volumétricos en gravas



Figura 5.4. Pesos volumétricos en arenas



Figura 5.5. Densidad en gravas



Figura 5.6. Granulometría en Arena



Figura 5.7. Granulometría en Grava

5.1.1. MÉTODO DE DISEÑO: ACI 211

En las siguientes tablas se muestra el proporcionamiento realizado para un concreto el cual dentro de esta investigación lo llamaremos concreto convencional.

<i>Datos y características del concreto</i>	
Estructura	Pavimento
Colocación del concreto:	Directo
Cond. Amb. del colado:	28°C
<u>Revenimiento, cm:</u>	10
Tipo de aditivo:	sin aditivos
Armado:	sin armado
<u>TMA, mm:</u>	19
Resistencia de proyecto:	
<u>Relación a/c requerida:</u>	0.65
Medio ambiente:	Agresivo
<u>Relación a/c a emplear:</u>	0.65
Agregados:	De Mina
Tipo de cemento:	Cemento Portland

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

MATERIAL	PROPIEDAD	Valor
CPO 30 R	Densidad, g/cm ³	3.1
Arena del Tigre	Módulo de finura	2.9
	Densidad, g/cm ³	2.14
	Absorción, %	5.4
	Pérdida por lavado, %	1.4
	PVSS, Kg/m ³	1406
	PVSC, Kg/m ³	1530
	Materia orgánica, No.	1
	Humedad, %	3
	Grava Supra triturada	Tamaño máximo, mm
Densidad, g/cm ³		2.69
Absorción, %		2.6
PVSS, Kg/m ³		1410
PVSC, Kg/m ³		1540
Humedad, %		1.1

CALCULO DE MEZCLA

PASO 1							
Revenimiento:	10	cm					
PASO 2							
Tamaño máximo de agregado:	19	mm					
PASO 3							
Agua de mezclado:	205	L/m3	Red. de agua con el aditivo, %:			0.0	
Vacíos en el concreto:	2.0	%					
Agua real de mezclado:	205	L					
PASO 4							
Rel. a/c por resistencia:	0.65		(ver notas tabla 6.3.6)				
Rel. a/c por durabilidad:	0.65						
PASO 5							
Cemento, Kg/m3:	315				Rel. a/c selec.:	0.65	
PASO 6							
PVSC grava:	1,540	kg/m3					
Contenido de grava:	0.61	m3					
Peso de grava:	939	kg/m3					
PASO 7							
Contenido de arena:					Densidades:		
Vol. Cto., L/m3:	102				3.10		
Vol. Agua, L/m3:	205				1.00		
Vol. Vacíos, L/m3:	20						
Vol. Grava, L/m3:	349				2.69		
suma:	676						
Vol. de arena, L/m3:	324	(= 1000 - volumen resto de materiales)					
Peso de arena, Kg/m3:	693				2.14		
PASO 8							
Corrección por humedad:							
			+		-		
Material	Kg/m3	Humedad, %	Peso, Kg	Absorción, %	Peso, Kg	Pesos correc., Kg	
Arena	693	3.0	21	5.4	37	677	
Grava	939	1.1	10	2.6	24	925	

Agua	205		31		62	235	
Prop. Corregida por humedad:							
	Cemento, Kg/m3:	315					
	Agua, L/m3:	235					
	Arena, Kg/m3:	677					
	Grava, Kg/m3:	925					
	Suma:	2153	Kg/m3				
PASO 9							
Corrección por rendimiento:							
	Volumen de mezcla, L:	6					
Notas:							
1. Adición o sobrante de agua para alcanzar el revto. deseado:						0.000	L
2. Adición o reducción de cemento para conservar la relación a/c:						0.000	Kg
3. Adición de arena para mejorar la trabajabilidad:						0.000	Kg
4. Adición de grava:						0.000	Kg
4. Masa unitaria del concreto fresco:						2153	kg/m3
					Rendimiento:	1000	L/m3
Materiales reales empleados:							
	Cemento, Kg:	1.892	(=cemento de diseño + cemento adicional)				
	Agua, L:	1.412	(=agua de diseño+agua adicional)				
	Arena, Kg:	4.063	(=arena de diseño+arena adicional)				
	Grava, Kg:	5.552	(=grava de diseño+grava adicional)				
	Suma, Kg:	12.919					
Rendimiento de la prueba:							
	Rendimiento, L =	6.001					
Mezcla corregida:							
	Cemento, Kg/m3:	315					
	Agua, Kg/m3:	235					
	Arena, Kg/m3:	677					
	Grava, Kg/m3:	925					
	Suma:	2153	kg/m3				

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. RESULTADOS FÍSICOS

6.1.1. TIEMPOS DE FRAGUADO

Esta prueba consiste en determinar los tiempos de fraguado inicial y final de las diferentes composiciones de cementos híbridos así como del convencional, mediante las agujas de Gillmore.



Figura 6.1. Equipo y muestras utilizadas para obtener tiempos de fraguado

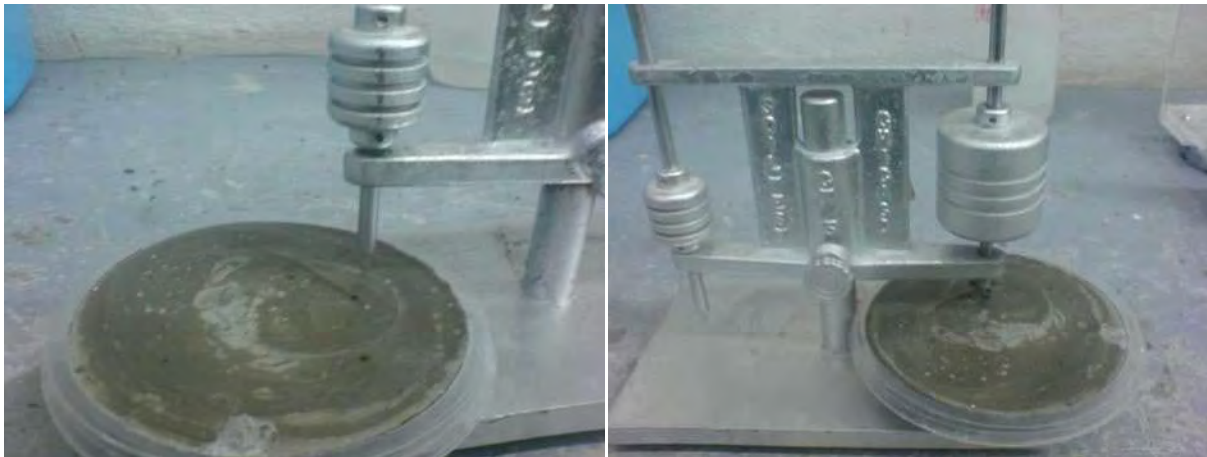
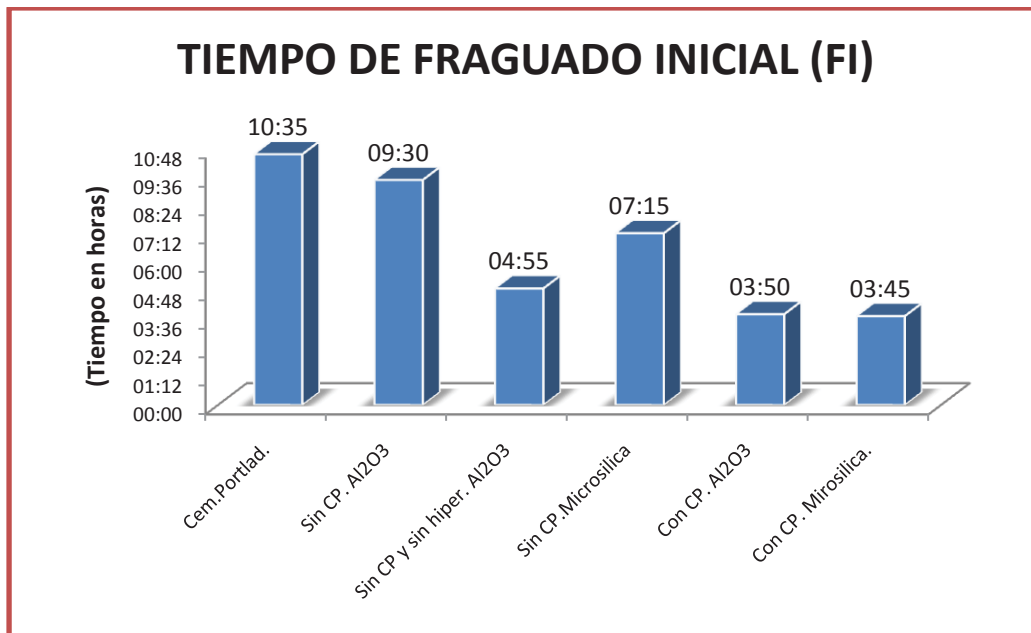


Figura 6.2. Forma de medición del fraguado inicial imagen izquierda y fraguado final imagen derecha

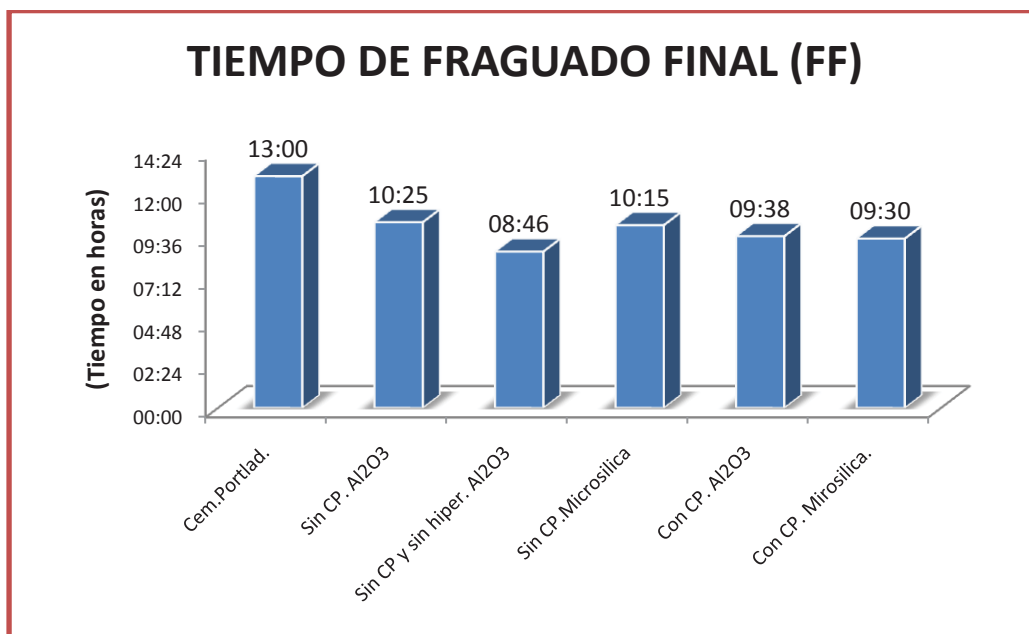
En las siguientes graficas se muestran los resultados de tiempo de fraguado inicial y final con diferentes composiciones, esto con la finalidad de compararlos con el concreto convencional.

Como ya se menciona anteriormente se harán las mediciones por el método de las agujas de Gillmore.



Grafica 6.1. Medición de tiempos de fraguado inicial

Se observa en los resultados que el mortero convencional tiene un mayor tiempo de fraguado inicial comparado con los morteros híbridos siendo este un excelente resultado ya que uno de los objetivos que se siguen en esta investigación es bajar los tiempos de fraguado para la elaboración de nuevos elementos y utilizarlos en el menor tiempo posible.



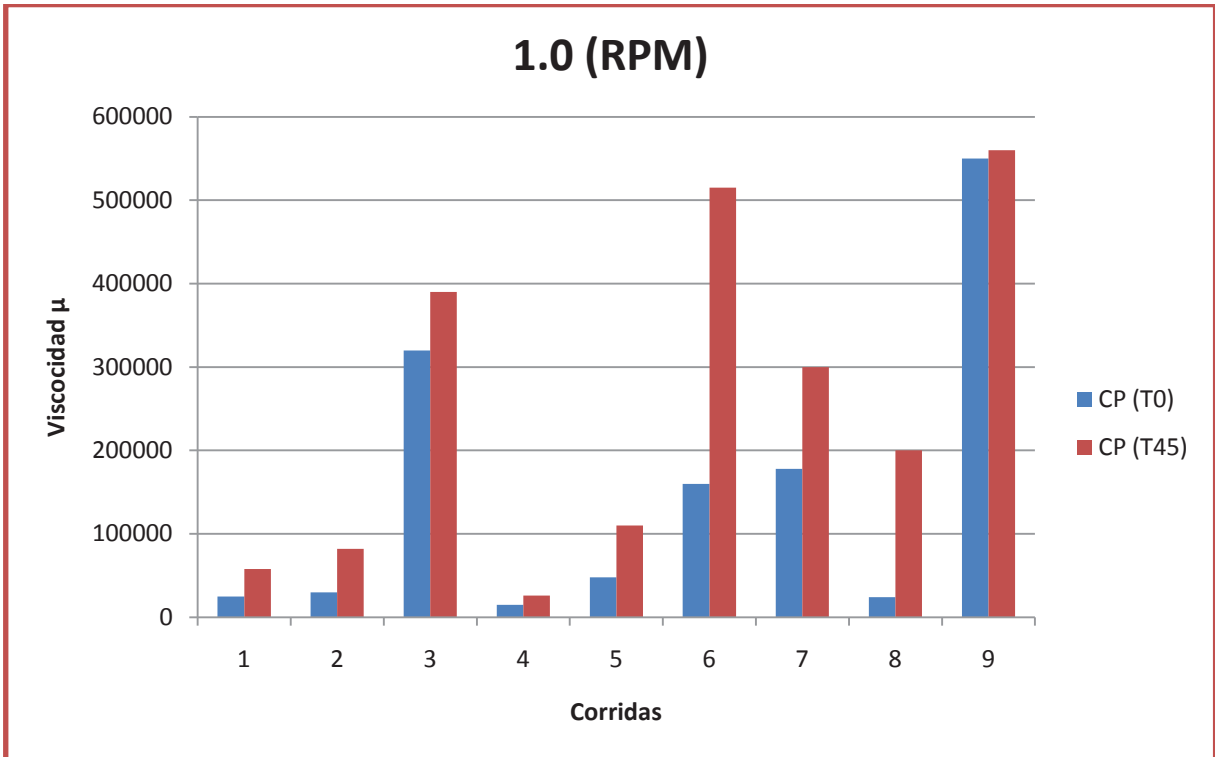
Grafica 6.2. Medición de tiempos de fraguado final

Los resultados del fraguado final de los morteros híbridos siguen mostrando muy buen comportamiento comparado con el mortero convencional.

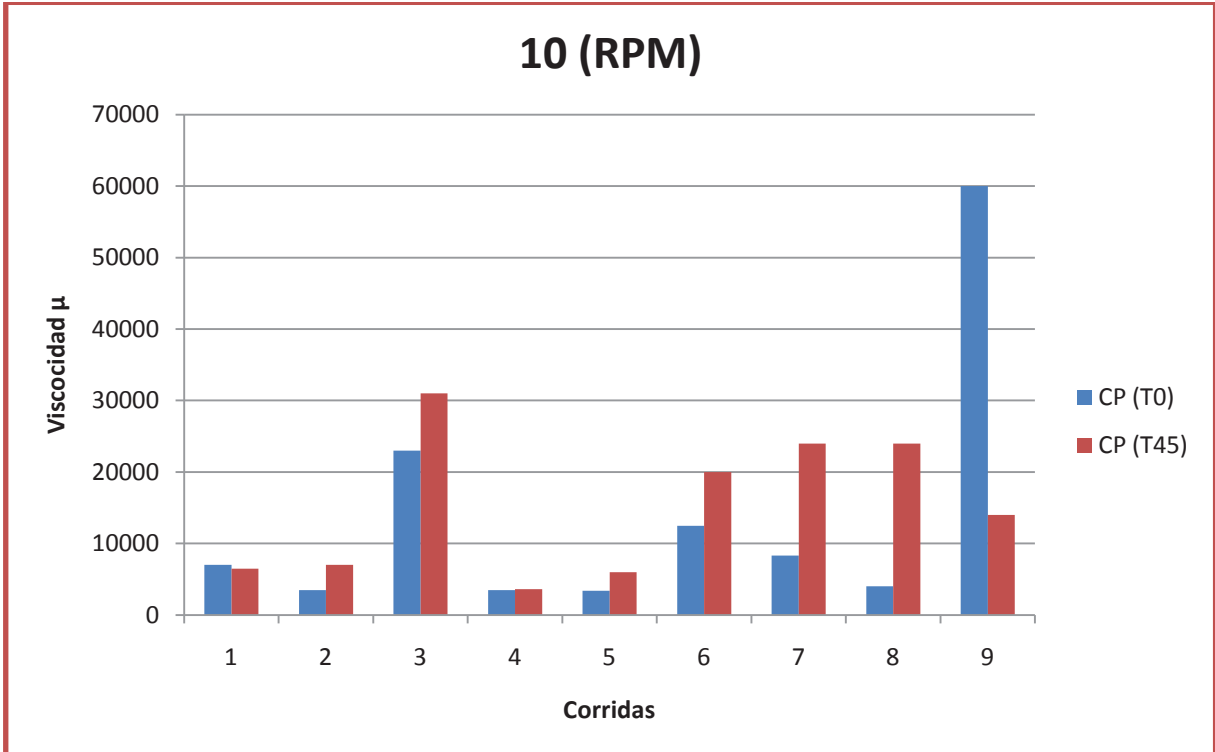
6.1.2. MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD POR EL MÉTODO DE BROOKFIELD

En las siguientes graficas se presentan los resultados de viscosidad de cada una de las composiciones, a diferentes revoluciones por minuto (RPM) tomando un tiempo inicial cero y un final a los 45 minutos.

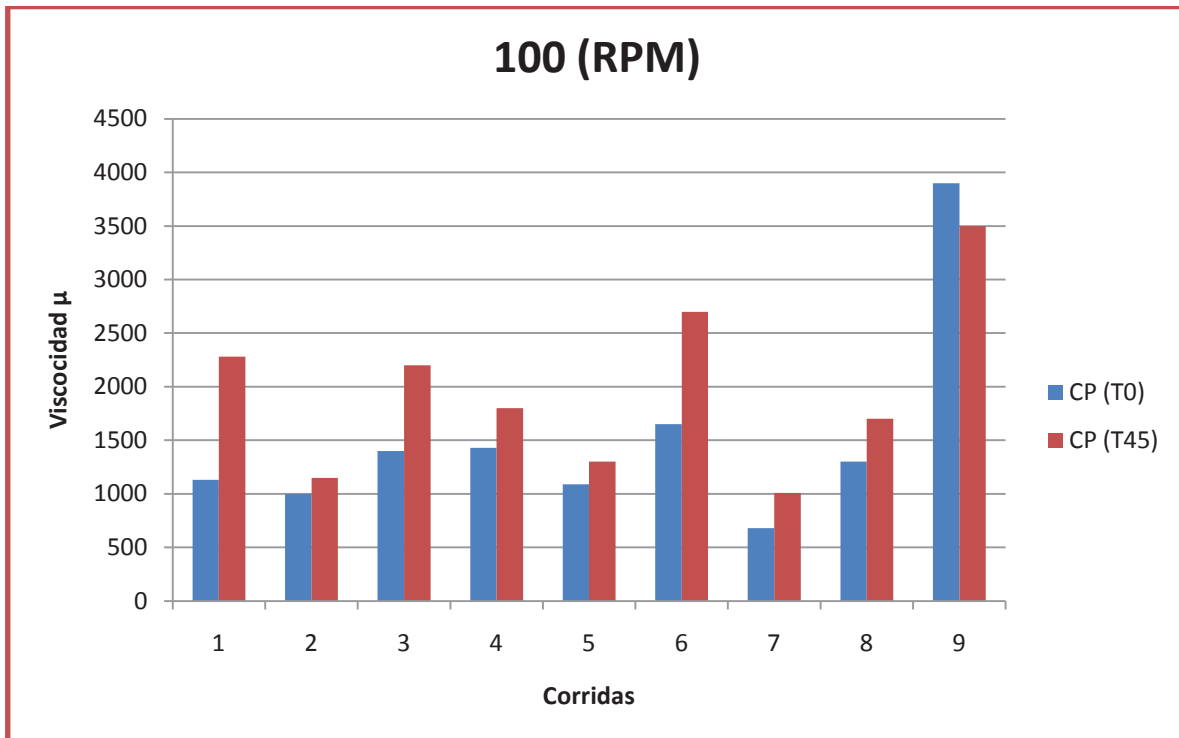
Al analizar estos resultados se observa que las composiciones con mejor comportamiento de viscosidad son las mismas que se escogieron anteriormente en la prueba de compresión, siendo así un buen resultado para darle seguimiento a esta investigación.



Grafica 6.3. Viscosidades a 1.0 RPM



Grafica 6.4. Viscosidades a 10 RPM



Grafica 6.5. Viscosidades a 100 RPM

Los resultados presentados en las graficas de viscosidad se puede concluir que las composiciones que se registraron con buena trabajabilidad coinciden con la baja viscosidad en las composiciones presentadas en las gráficas.

6.2. RESULTADOS MECÁNICOS

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos de compresión en los diferentes especímenes probados a diferentes edades y distintas composiciones en las cuatro etapas de nuestra investigación.

6.2.1. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN (PRIMERA ETAPA).

En esta comparación de esfuerzos se pretende observar la diferencia que existe entre el concreto convencional y los diferentes concretos híbridos.

En los resultados obtenidos se observa que los esfuerzos a compresión aumentaron en los concretos híbridos comparados con los del concreto convencional en las cuatro etapas de la investigación.

A continuación se muestran algunas imágenes de los especímenes probados a compresión y la maquina utilizada en la primera etapa, llevados hasta

la falla, se presentan las más representativas y con el fin de mostrar el tipo de falla que se presentó.



Figura 6.3. Maquina Universal Tinius Olsen

Maquina utilizada para las pruebas a compresión en cubos de 5x5x5, la cual tiene una capacidad de 50 toneladas.



Figura 6.4. Prueba de especímenes a velocidad constante

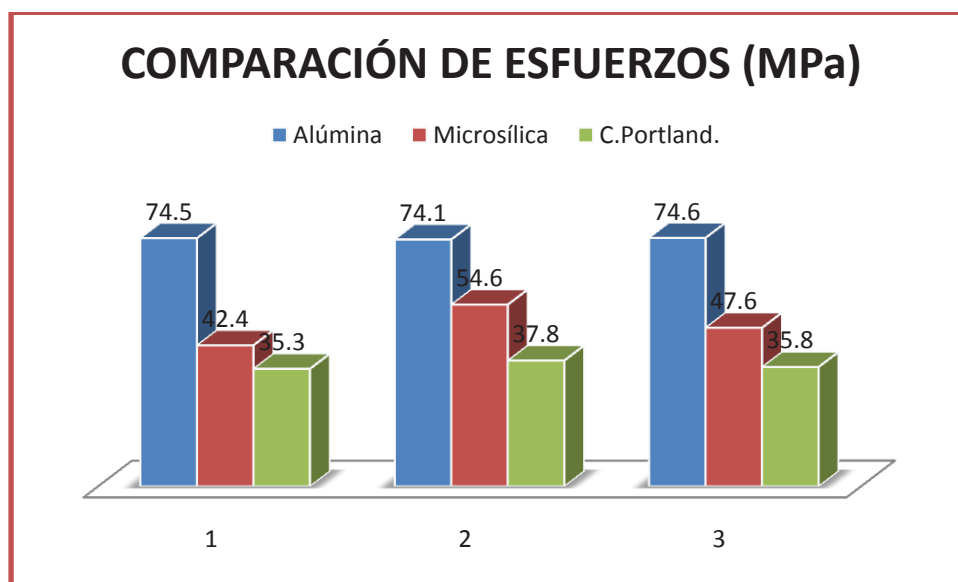
Los especímenes se prueban a una velocidad constante hasta obtener la falla de muestra.



Figura 6.5. Imágenes de algunos especímenes llevados hasta la falla

A continuación se presentan resultados de los especímenes que fueron probados a compresión, estos representan la primera etapa de la síntesis del mortero híbrido, se realizaron morteros híbridos y un mortero convencional para comparar esfuerzos a compresión.

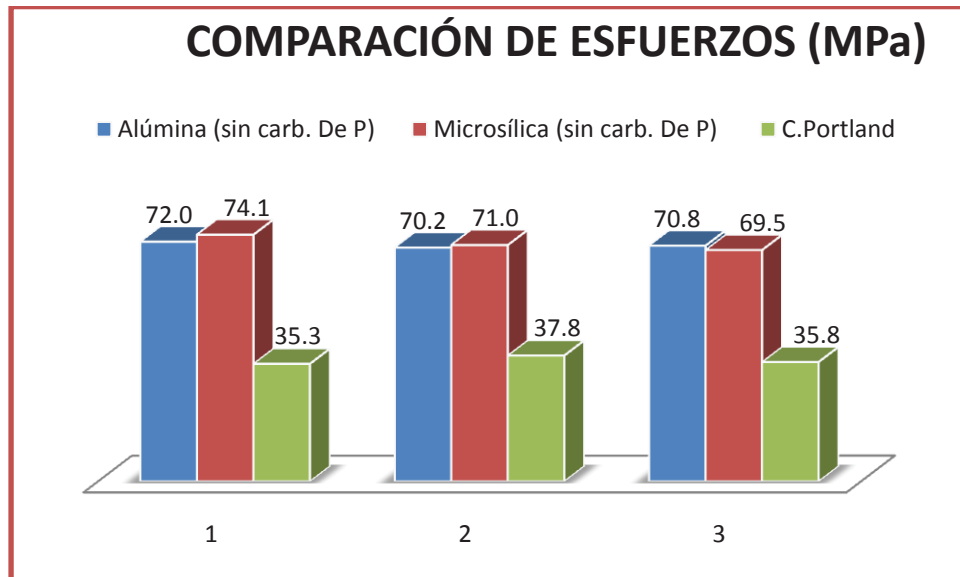
En la grafica 6.6 podemos observar que los morteros híbridos contienen alúmina y microsíllica que se muestran en color azul y guinda respectivamente, mientras que el que tenemos en verde nos representa el mortero convencional con el cual aremos la comparación.



Grafica 6.6. Comparación de especímenes probados a compresión a edad de 7

De la grafica 6.6 se puede observar y concluir que los especímenes de cemento híbrido tienen mejor comportamiento a compresión comparado con el mortero convencional, siendo los de mejor comportamiento y aumentando en un 100% los esfuerzos a compresión los especímenes que contienen alúmina.

Estos resultados preliminares en la investigación nos dieron la pauta para pensar y elaborar nuevas composiciones que presentaran mejores características, agregando nuevos materiales.



Grafica 6.7. Comparación de especímenes probados a compresión a edad de 7 días

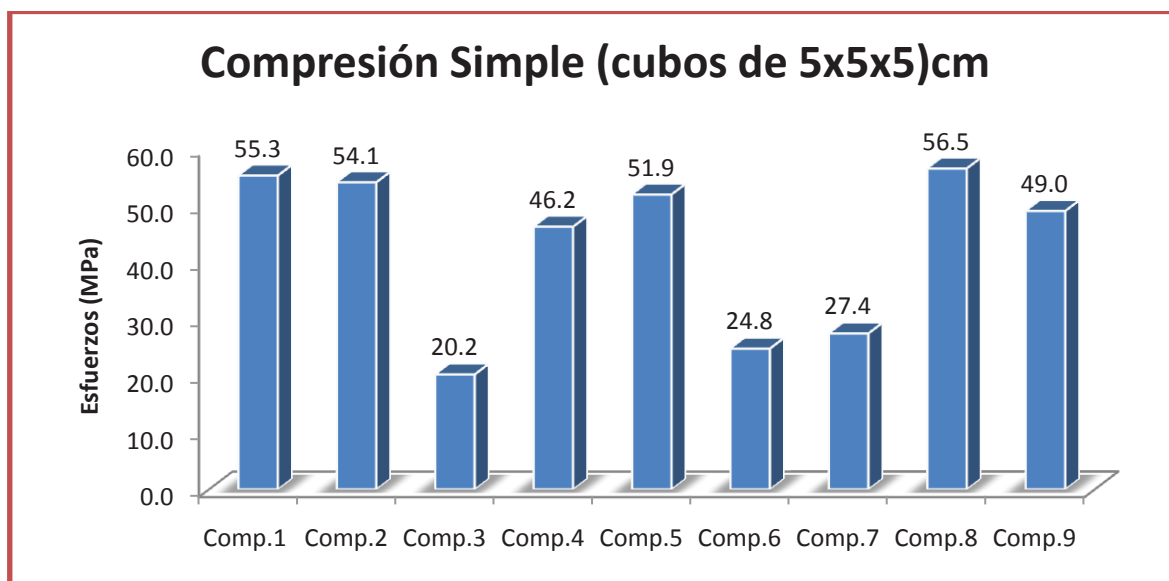
En la grafica 6.7 podemos observar que los morteros híbridos mantienen el mismo comportamiento que los de la tabla 6.6, sin embargo se observa que bajo un poco el esfuerzo, por lo tanto podemos concluir que el Carbonato de Potasio está afectando de manera positiva en nuestros morteros híbridos.

6.2.2. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN (SEGUNDA ETAPA).

En esta segunda etapa se realizaron nuevas composiciones tomando como referencia los resultados obtenidos en la primera etapa, dando como resultado a nueve composiciones de las cuales se presentan su comportamiento a compresión en la gráfica 6.8.

Estas nueve composiciones fueron probadas a temprana edad (28 días) y a edad tardía (5 meses) con especímenes de (5x5x5) cm y (10x10x10)cm respectivamente.

COMPRESIÓN EN CUBOS DE (5 X 5 X 5) CM.

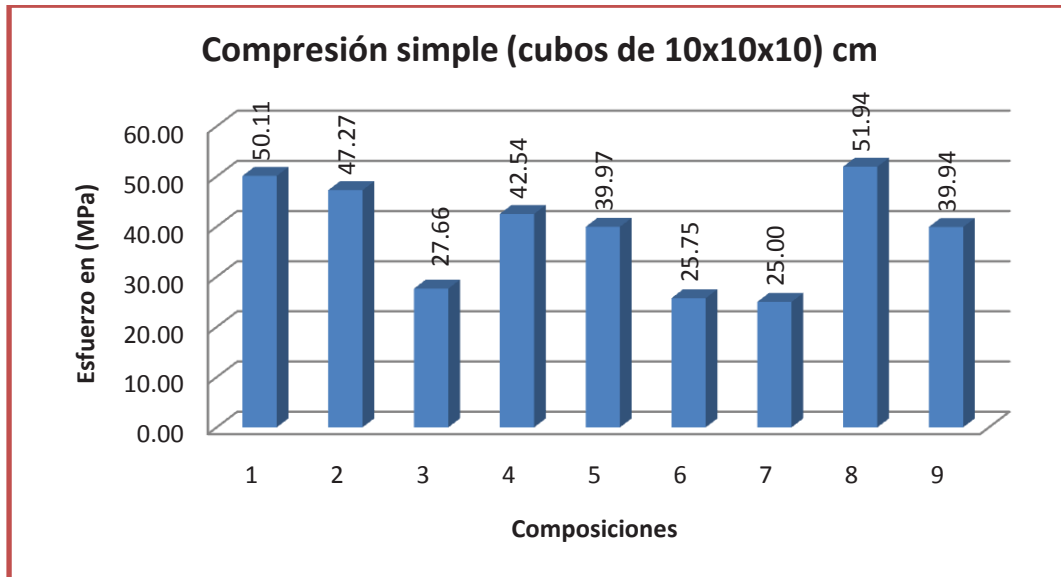


Grafica 6.8. Comparación de especímenes probados a compresión a edad de 28 días

De la grafica 6.8 se puede analizar que las mejores composiciones sometidas a compresión son la 1 y la 8.

COMPRESIÓN EN CUBOS DE (10 X 10 X 10) CM.

Se le dio seguimiento a estas nueve composiciones para obtener resultados a compresión a 5 meses de edad, para ver el comportamiento de resistencia a edad tardía, lo resultados se presentan a continuación:



Grafica 6.9. Comparación de especímenes probados a compresión a edad de 5 meses

Se concluye en esta segunda etapa que las composiciones 1 y 8 de mortero híbrido fueron las de mayor resistencia a compresión teniendo el mismo comportamiento de resistencia a edad temprana y a edad tardía, tal como se mostraron los resultados en las tablas 6.8 y 6.9 respectivamente, por lo tanto si las comparamos con la composición 6 (estándar) podemos ver que tenemos una resistencia mayor del 100%, siendo este un excelente resultado.

6.2.3. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN (TERCERA ETAPA).

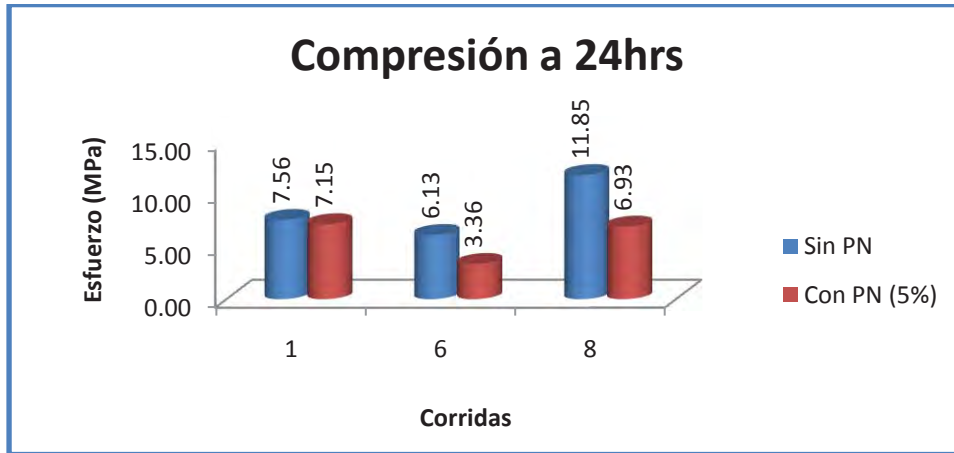
De los resultados obtenidos en la segunda etapa se tomarán tres muestras para el seguimiento de esta investigación, estas muestras serán tres de las mayores resistencias a compresión de los morteros híbridos (composiciones: 1 y 8) y la composición 6 ya que es nuestro concreto convencional con el cual se han venido comparando los resultados.

A estas tres composiciones se les agregará un nuevo material teniendo así 6 composiciones, este material es Polvo de Neumático del N° 80, por lo tanto por el tipo de material nuevo y por los problemas que este genera al medio ambiente, le daremos un plus a esta investigación y llamaremos a nuestro mortero híbrido (mortero híbrido ecológico).

En las siguientes tablas y graficas se muestran las comparaciones de las 6 composiciones entre las que tienen polvo de neumático y las que no tiene, estas comparaciones se harán como ya se ha venido manejando por su resistencia a compresión a diferentes edades.

Tabla 6.1. Esfuerzos a 24 horas con y sin polvo de neumático

Esfuerzo (MPa) Probados a 24 hrs					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (5%)		
1	6	8	1	6	8
7.45	5.69	11.81	7.37	4.02	7.06
8.34	5.39	11.47	6.86	4.06	6.43
7.45	6.35	11.77	7.14	3.26	7.36
7.30	6.96	11.96	7.47	2.86	7.02
7.26	6.20	12.43	6.67	2.82	6.86
7.57	6.18	11.65	7.39	3.14	6.86
7.6	6.1	11.8	7.2	3.4	6.9
PROMEDIO					

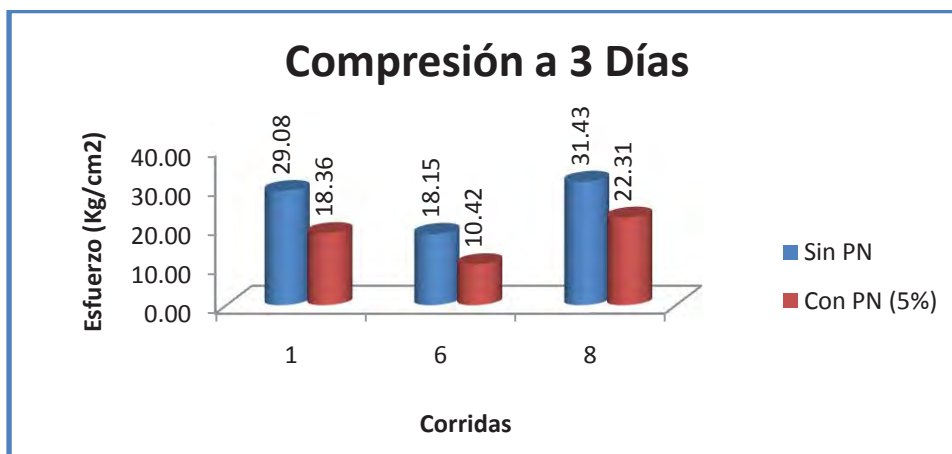


Grafica 6.10. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 24 horas

A temprana edad se tiene un buen comportamiento como se puede ver en la grafía 6.10, como era de esperarse los especímenes con polvo de neumático bajaron su resistencia.

Tabla 6.2. Esfuerzos a 3 días con y sin polvo de neumático

Esfuerzo (MPa) Probados a 3 Días					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (5%)		
1	6	8	1	6	8
32.75	17.34	31.77	18.91	11.40	22.75
29.62	16.48	37.07	17.73	9.63	22.36
32.36	18.08	37.56	17.77	12.45	24.52
26.48	19.12	37.36	17.18	8.92	21.48
26.38	17.46	37.07	20.22	10.10	22.56
26.87	20.40	34.81	18.38	10.04	20.20
29.1	18.1	31.4	18.4	10.4	22.3
PROMEDIO					

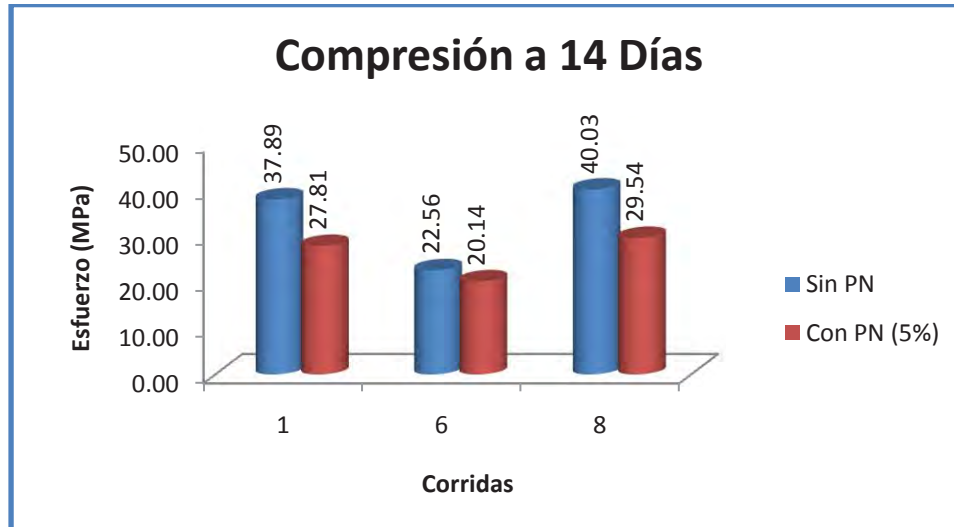


Grafica 6.11. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 3 días

A 3 días se sigue teniendo el mismo comportamiento, los especímenes bajan su resistencia y los morteros híbridos tienen mayor resistencia que el estándar.

Tabla 6.3. Esfuerzos a 14 días con y sin polvo de neumático

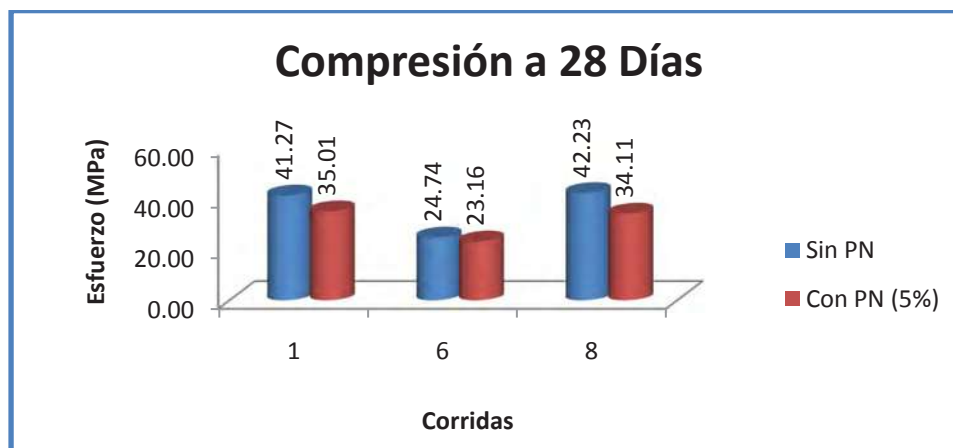
Esfuerzo (MPa) Probados a 14 Días					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (5%)		
1	6	8	1	6	8
40.01	21.28	43.54	26.52	20.20	29.69
33.17	25.79	39.23	24.77	20.40	31.38
33.15	21.18	40.11	25.67	25.50	29.30
42.66	20.99	39.76	31.42	25.30	32.17
38.64	21.87	40.09	30.20	2.59	28.64
39.70	24.22	37.46	28.24	26.87	26.09
37.9	22.6	40.0	27.8	20.1	29.5
PROMEDIO					



Grafica 6.12. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 14 días

Tabla 6.4. Esfuerzos a 28 días con y sin polvo de neumático

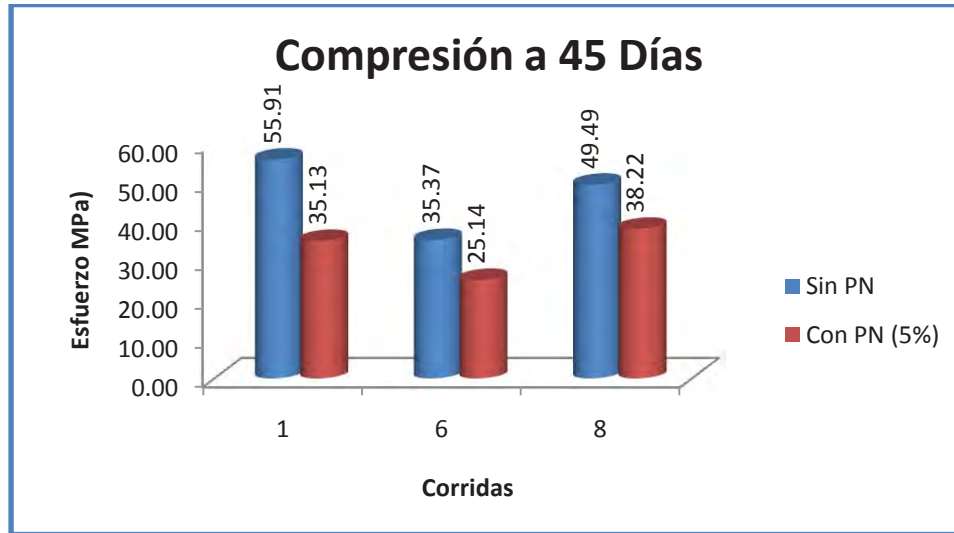
Esfuerzo (MPa) Probados a 28 Días					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (5%)		
1	6	8	1	6	8
39.62	27.38	44.48	31.58	25.30	33.15
47.46	22.61	41.60	38.83	20.40	34.13
50.11	25.50	42.56	39.62	24.32	35.50
42.17	23.14	36.38	33.93	21.18	33.54
41.19	25.60	44.01	32.75	24.42	32.56
42.36	24.22	45.31	33.34	23.34	35.81
41.3	24.7	42.2	35.0	23.2	34.1
PROMEDIO					



Grafica 6.13. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 28 días

Tabla 6.5. Esfuerzos a 45 días con y sin polvo de neumático

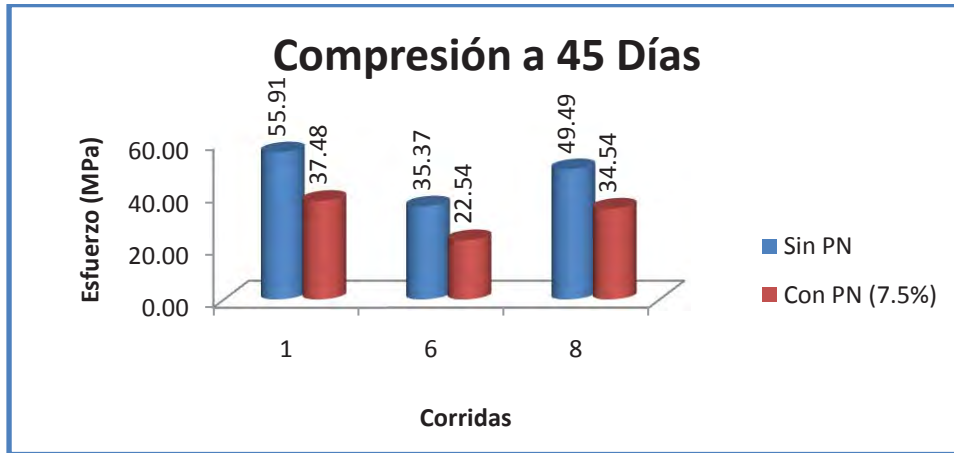
Esfuerzo (MPa) Probados a 45 Días					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (5%)		
1	6	8	1	6	8
55.70	38.44	50.80	38.54	27.42	37.07
44.23	29.81	39.13	38.05	27.46	44.62
55.31	32.46	60.61	31.68	23.05	37.09
61.98	35.21	51.58	32.38	26.28	37.17
60.21	34.13	43.44	36.48	23.10	36.09
58.06	42.17	51.39	33.64	23.54	37.27
55.9	35.4	49.5	35.1	25.1	38.2
PROMEDIO					



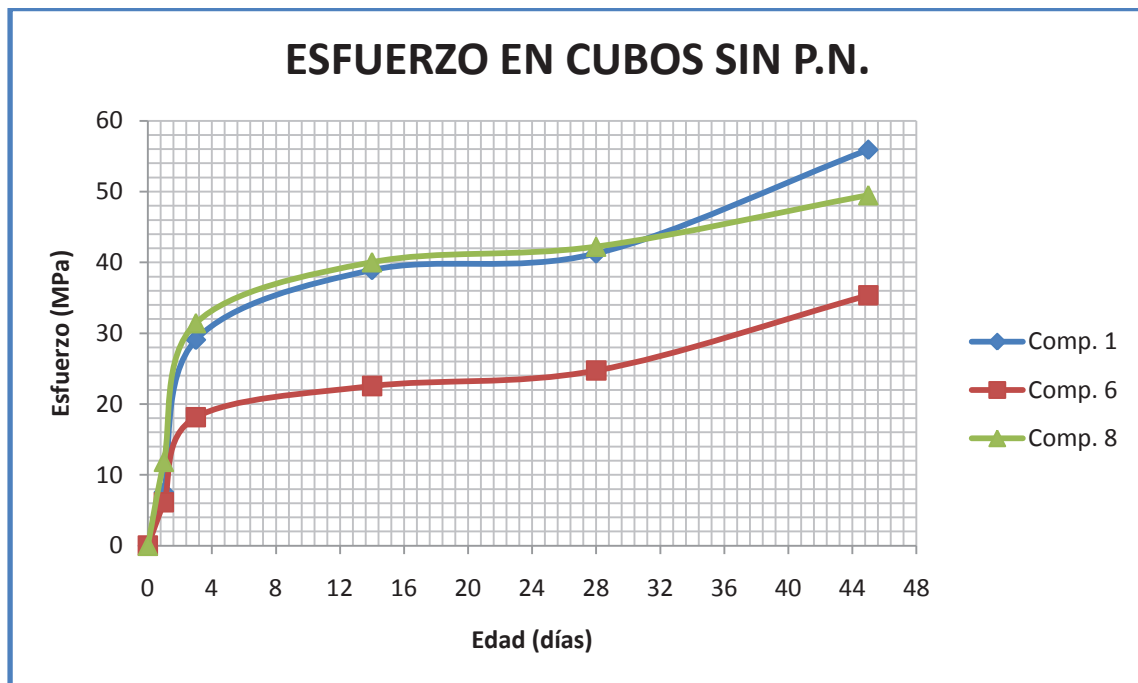
Grafica 6.14. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 45 días

Tabla 6.6. Esfuerzos a 45 días con y sin polvo de neumático

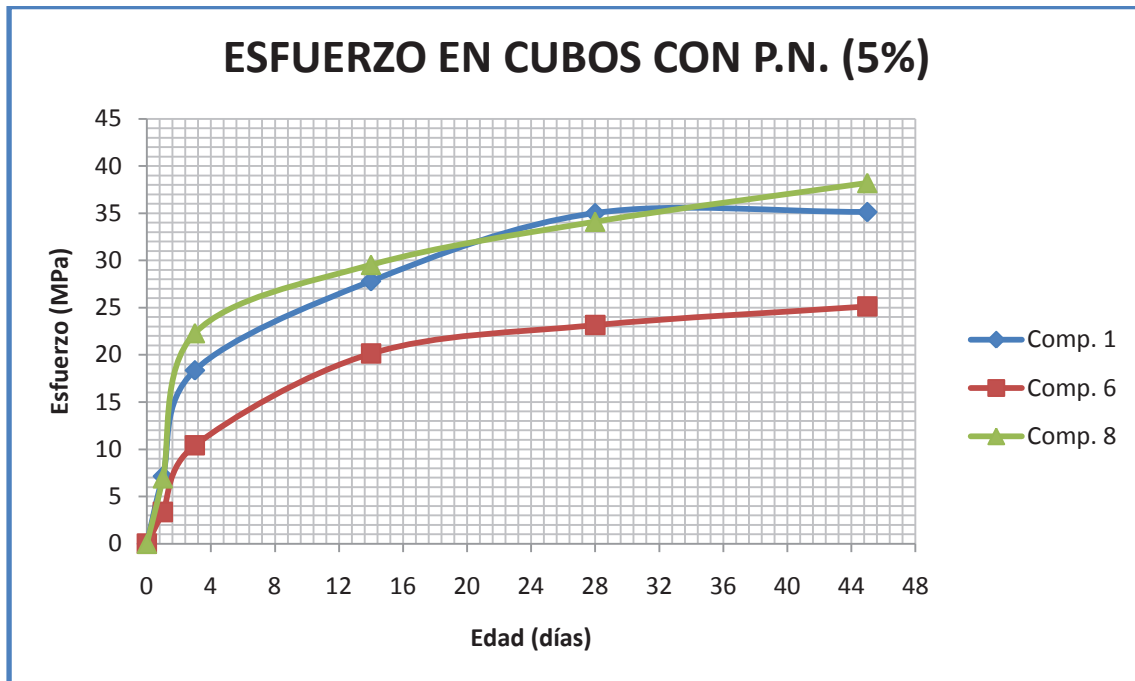
Esfuerzo (MPa) Probados a 45 Días					
Sin Polvo de neumático			Con Polvo de neumático (7.5%)		
1	6	8	1	6	8
55.70	38.44	50.80	42.95	22.95	37.85
44.23	29.81	39.13	37.66	20.01	32.56
55.31	32.46	60.61	35.89	22.75	34.81
61.98	35.21	51.58	36.58	21.97	33.24
60.21	34.13	43.44	31.77	25.01	34.91
58.06	42.17	51.39	40.01	22.56	33.87
55.9	35.4	49.5	37.5	22.5	34.5
PROMEDIO					



Grafica 6.15. Comparación de especímenes con y sin polvo de neumático probados a compresión a edad de 45 días



Grafica 6.16. Comportamiento de los especímenes a compresión a diferentes edades sin polvo de neumático



Gráfica 6.17. Comportamiento de los especímenes a compresión a diferentes edades con polvo de neumático

Después de analizar cada uno de los especímenes a diferentes edades se puede concluir que la resistencia fue aumentando como era de esperarse y sin ningún problema, los especímenes que no tiene polvo de neumático tuvieron mejor resistencia que los que tenía polvo de neumático, aumentaron en porcentajes de la siguiente manera:

- La composición 1 sin polvo de neumático comparada con la composición 1 que no lo tenía aumento en un 50% su resistencia a compresión.
- La composición 6 sin polvo de neumático comparada con la composición 6 que no lo tenía aumento en un 56% su resistencia a compresión.
- La composición 8 sin polvo de neumático comparada con la composición 8 que no lo tenía aumento en un 43% su resistencia a compresión.

Por lo tanto y como se había venido presentando los morteros híbridos con y sin polvo de neumático tuvieron mejores resistencia en todas las edades.

6.2.4. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A COMPRESIÓN (CUARTA ETAPA).

A continuación se presenta una memoria fotográfica de algunos especímenes probados a compresión y a flexión (Modulo de Ruptura), todos ellos probados a 60 días de edad.



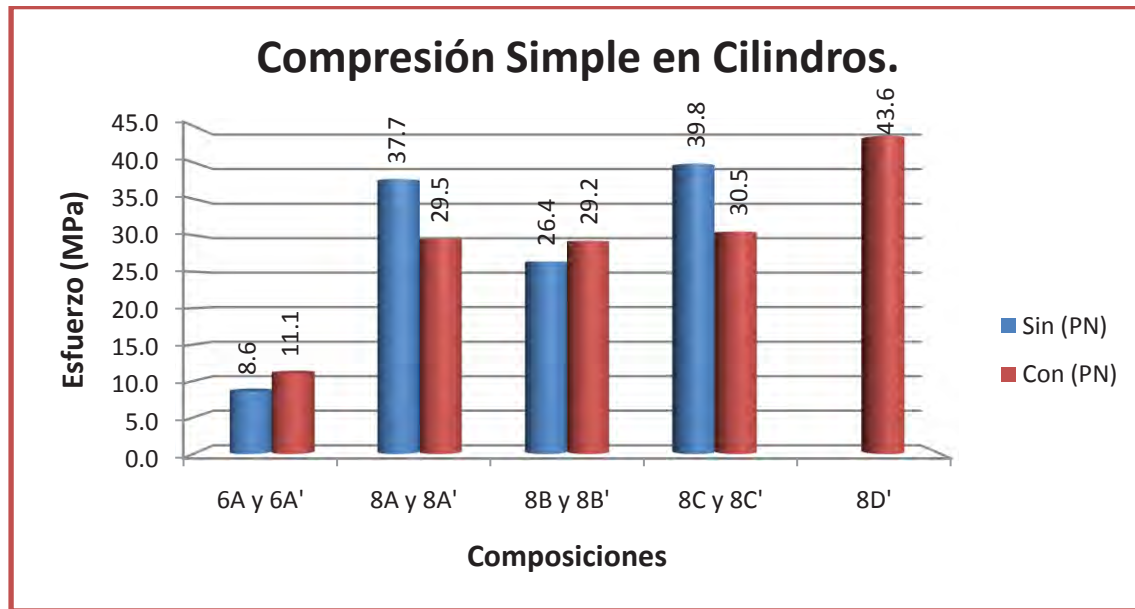


Figura 6.1. Prueba a compresión en cilindro, se observa su tipo de falla

En la tabla 6.7. se presentan las composiciones de la cuarta etapa, estas composiciones fueron obtenidas de los resultados de la tercer etapa, las cuales fueron la composición 6 (estándar de comparación) y la composición 6 (híbrido), a estas composiciones se les agregaron nuevos materiales los cuales se presentan en la tabla 6.7, para mejorar sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

Tabla 6.7. Composiciones con y sin polvo de neumático variando algunos otros materiales

Materiales	% respecto al peso del cemento	Comp. 6A	Comp. 8A	Comp. 8B	Comp. 8C	Comp. 6A'	Comp. 8A'	Comp. 8B'	Comp. 8C'	Comp. 8D'
Cemento Portland	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Relación A/C	65	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Alúmina	20		*	*	*		*	*	*	*
Microsílica	20									
Carbonato de Potasio	1.5									
Carbonato de Sodio	1.5		*		*		*		*	*
Hiperfluidificante	1.5	*	*	*	*		*		*	*
Polvo de neumático (Nº 80)	5					*	*	*	*	*
Fibra de Acero	10				*				*	20%
Mezcla de concreto	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Otros agregados										*



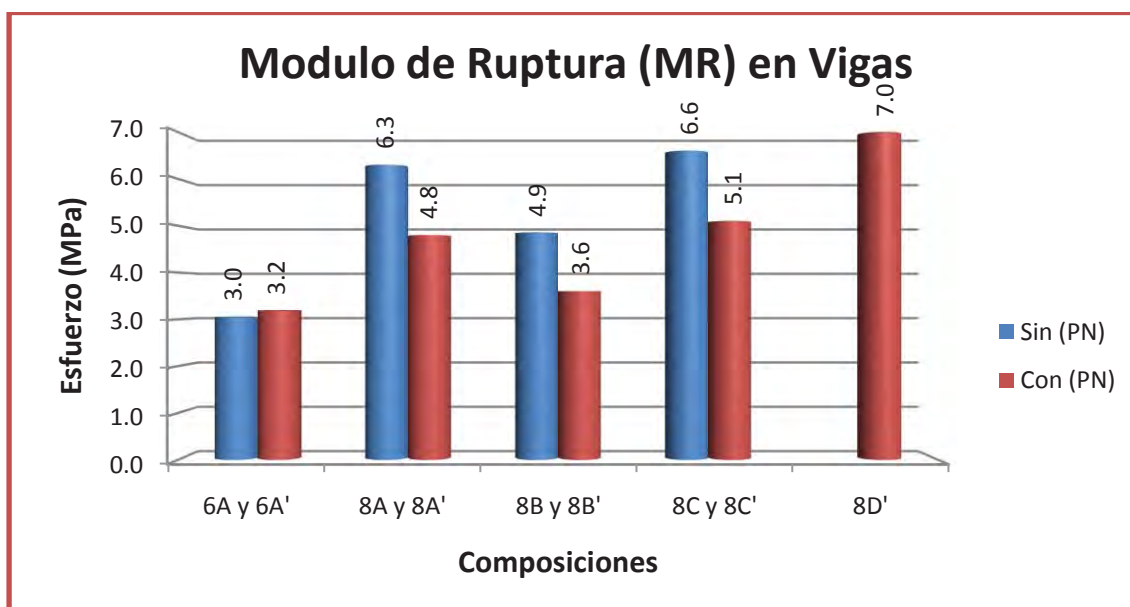
Grafica 6.18. Comportamiento de los especímenes a compresión a diferentes edades (cuarta etapa)

En esta cuarta etapa se tuvieron muchas variaciones en las resistencia esto debido a que no existe un proporcionamiento para nuestro concreto híbrido por lo tanto los comportamientos fueron muy variados en comparación a los resultados que veníamos teniendo, sin embargo se tienen buenos resultados ya que nuestros especímenes de concreto híbrido tuvieron mejor resistencia que el concreto estándar.

6.2.5. MODULO DE RUPTURA EN VIGAS DE (15X15X60)CM (CUARTA ETAPA).

Tabla 6.8. Composiciones con y sin polvo de neumático variando algunos otros materiales (cuarta etapa)

Materiales	% respecto al peso del cemento	Comp. 6A	Comp. 8A	Comp. 8B	Comp. 8C	Comp. 6A'	Comp. 8A'	Comp. 8B'	Comp. 8C'	Comp. 8D'
Cemento Portland	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Relación A/C	65	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Alúmina	20		*	*	*		*	*	*	*
Microsílica	20									
Carbonato de Potasio	1.5									
Carbonato de Sodio	1.5		*		*		*		*	*
Hiperfluidificante	1.5	*	*	*	*		*		*	*
Polvo de neumático (Nº 80)	5					*	*	*	*	*
Fibra de Acero	10				*				*	20%
Mezcla de concreto	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Otros agregados										*



Grafica 6.19. Comportamiento de los especímenes a Modulo de Ruptura (cuarta etapa)

6.3. RESULTADOS MICRO ESTRUCTURALES

6.3.1. SEM

En los siguientes resultados de SEM se muestran imágenes de la superficie de cada uno de nuestros materiales.

6.3.1.1. COMPOSICIÓN 1

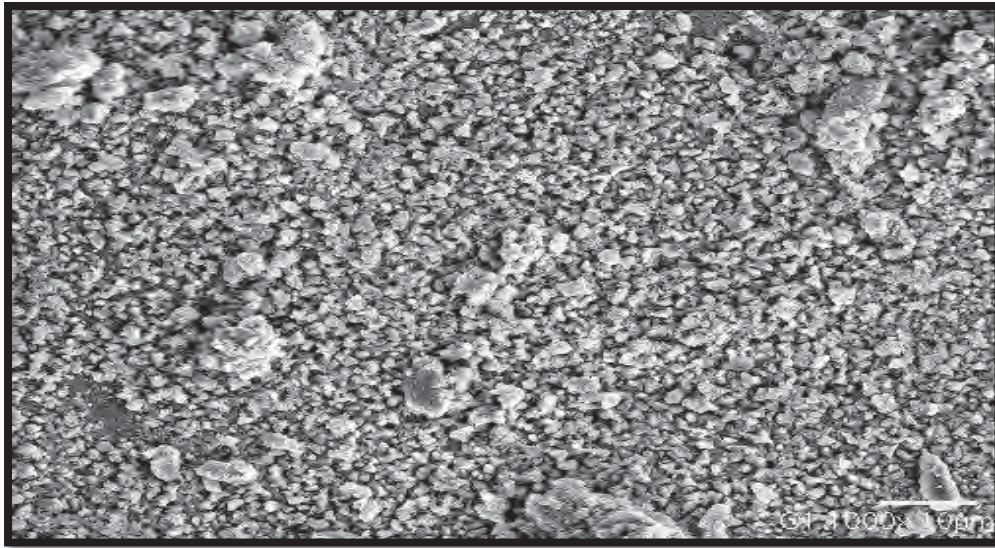


Figura 6.2. Micrografía por SEM a 1000X de un cemento híbrido en la superficie vista general

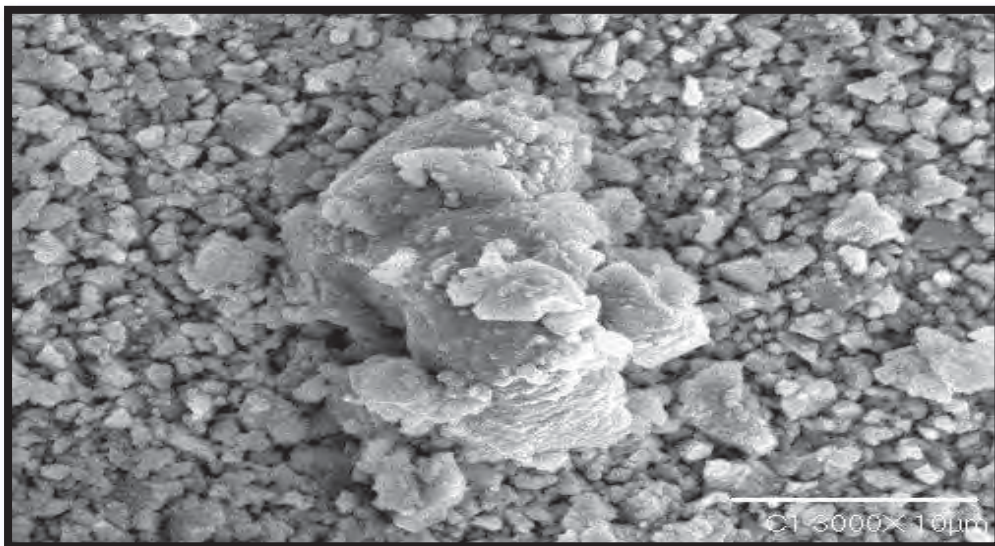


Figura 6.3. Formación de portlandita en la superficie del nanocemento.

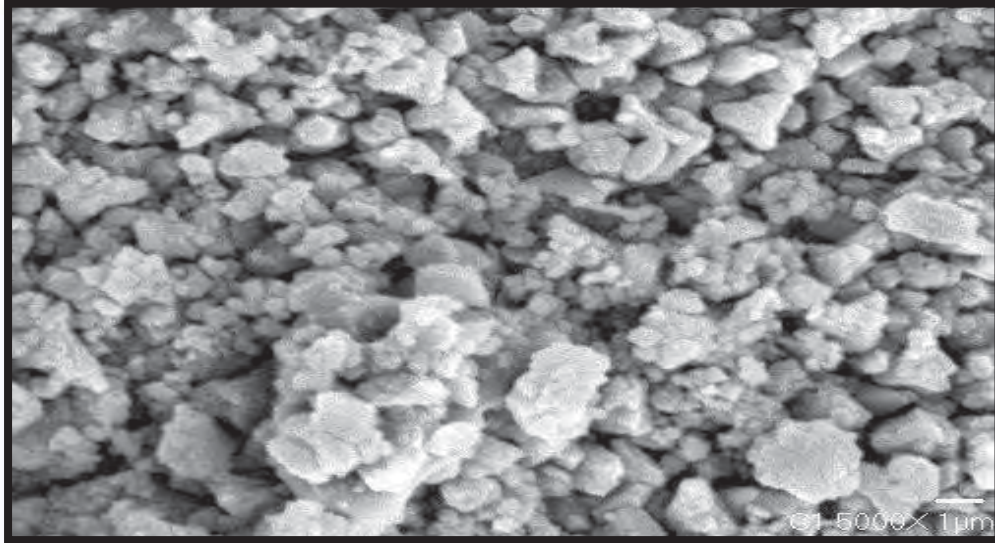


Figura 6.4. Formación de precipitados sin identificar como subproducto de la reacción del cemento portland y el nanocemento geopolimérico.

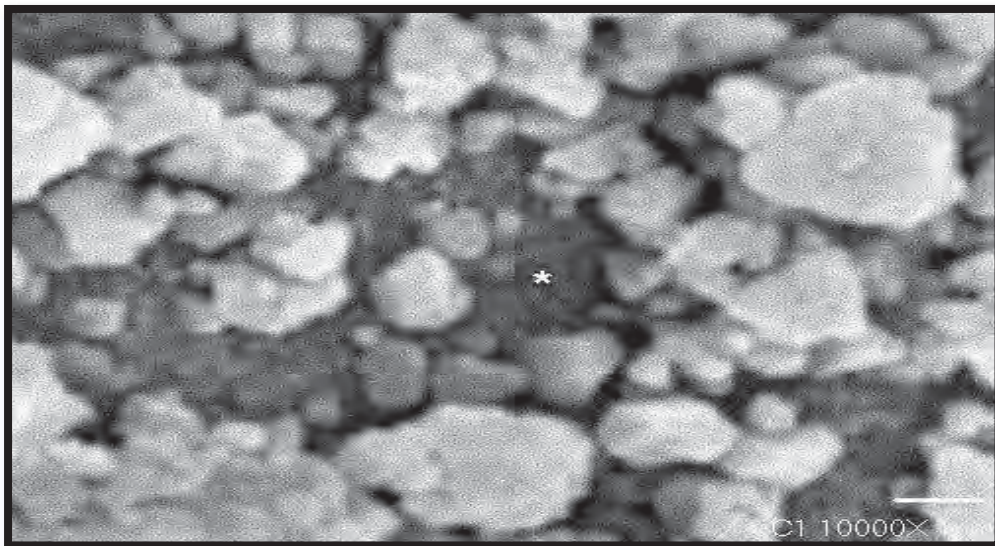
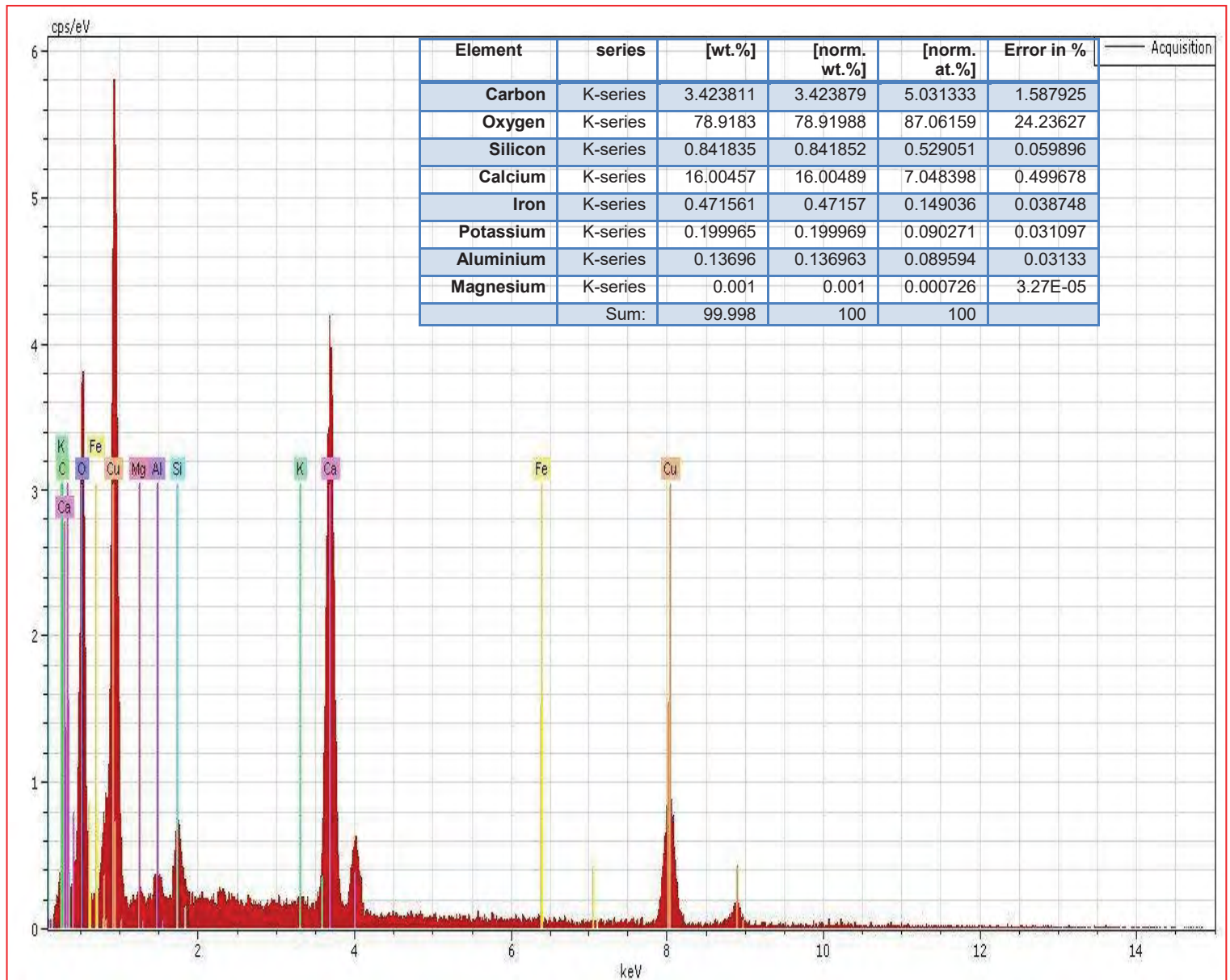


Figura 6.5. Una aproximación de los precipitados a 10000X.



Grafica 6.20. EDS del cemento Híbrido utilizando microsílca, análisis de sus elementos químicos.

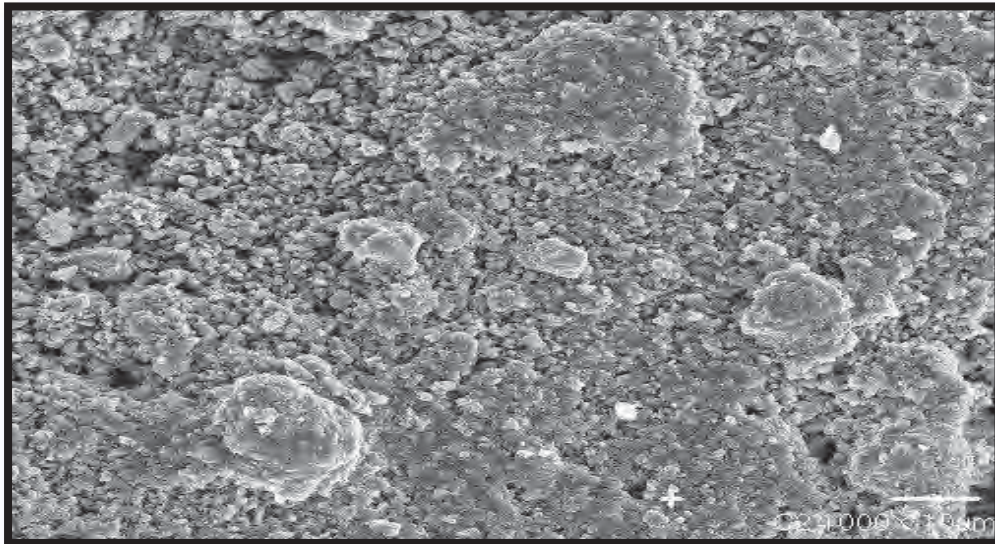
6.3.1.2. COMPOSICIÓN 2

Figura 6.6. Vista general a 1000X de un cemento híbrido utilizando alúmina.

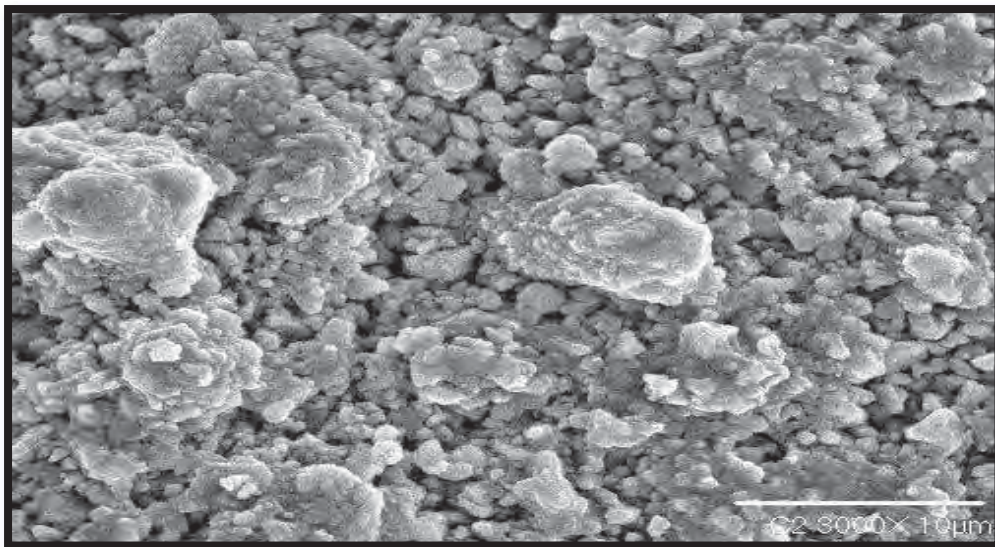


Figura 6.7. Cemento híbrido aproximación de su superficie a 3000X.

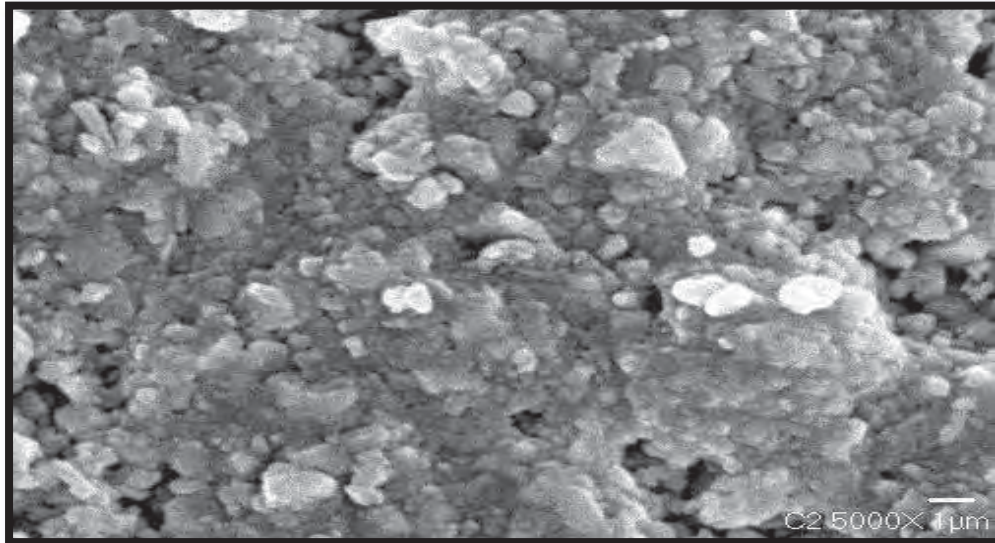


Figura 6.8. Micrografía mostrando precipitados como subproductos de reacción sin identificar.

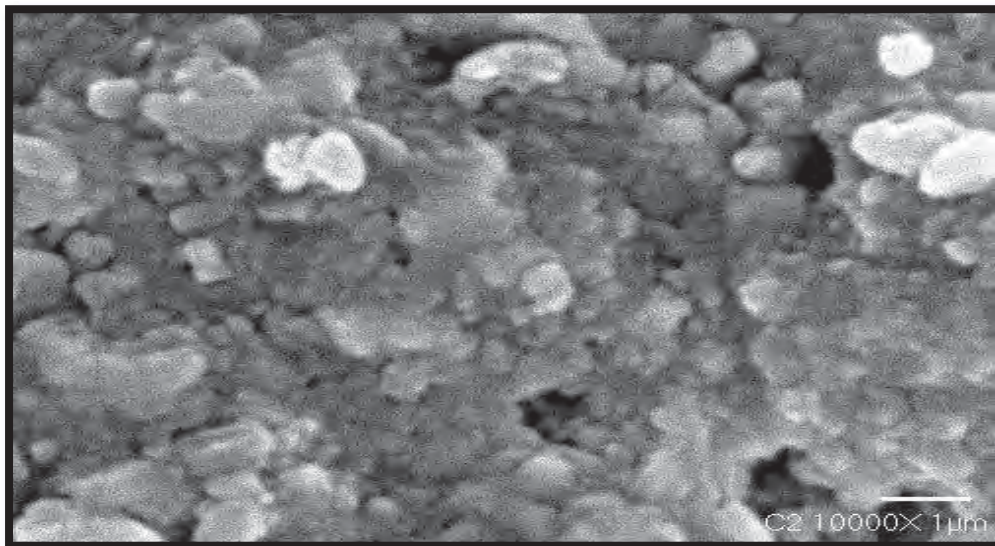
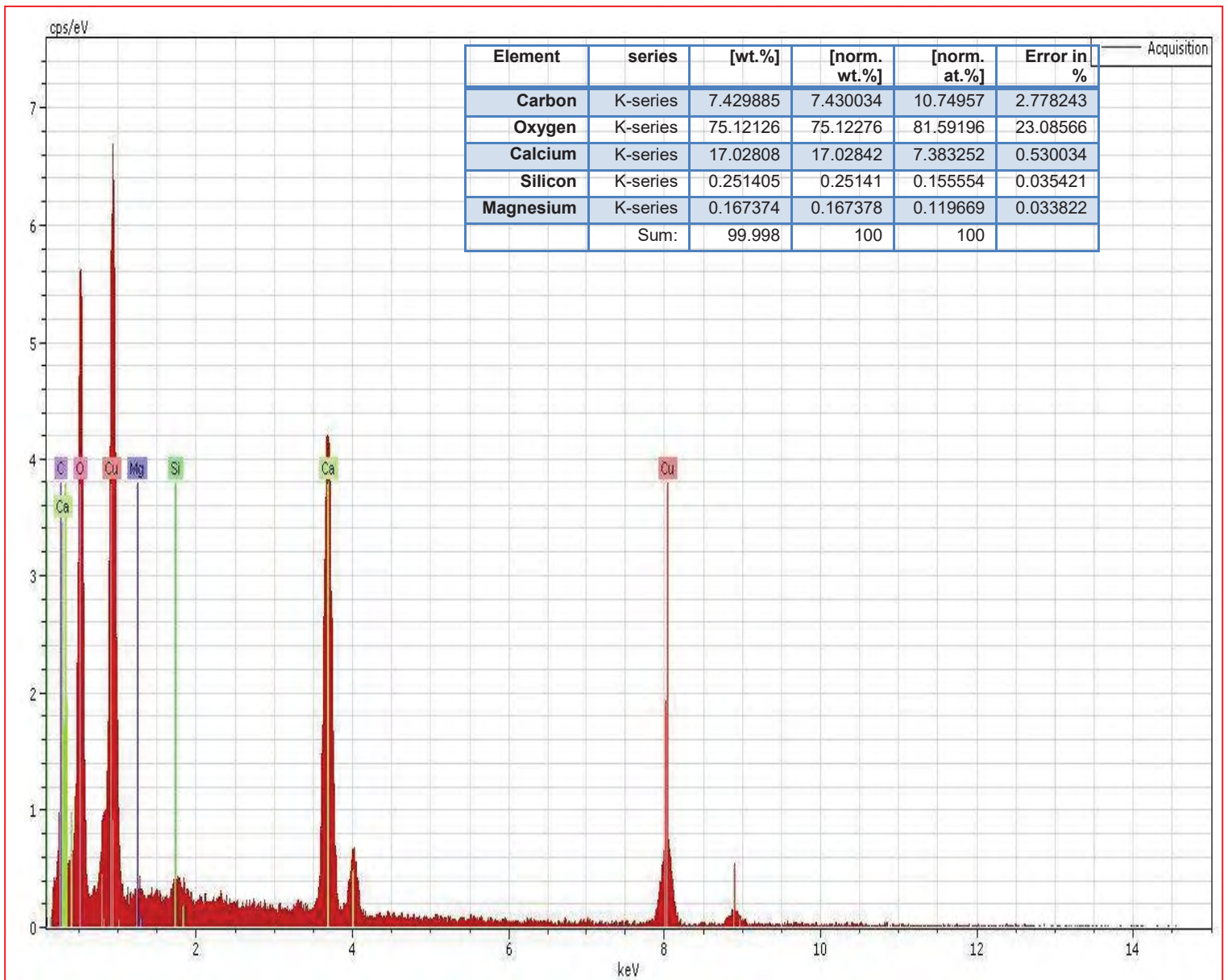


Figura 6.9. Micrografía a 10000X del nanocemento utilizando alúmina formación de precipitados.



Grafica 6.21. EDS de elementos químicos del cemento híbrido con alúmina.

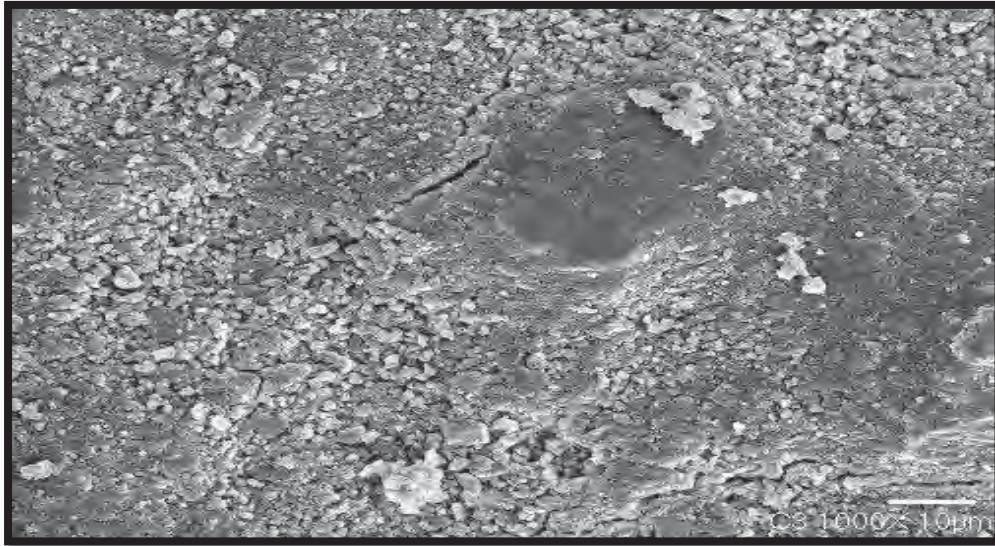
6.3.1.3. COMPOSICIÓN 3

Figura 6.10. Vista general a 1000X cemento portland con presencia de K^+ como activador geopolimérico.

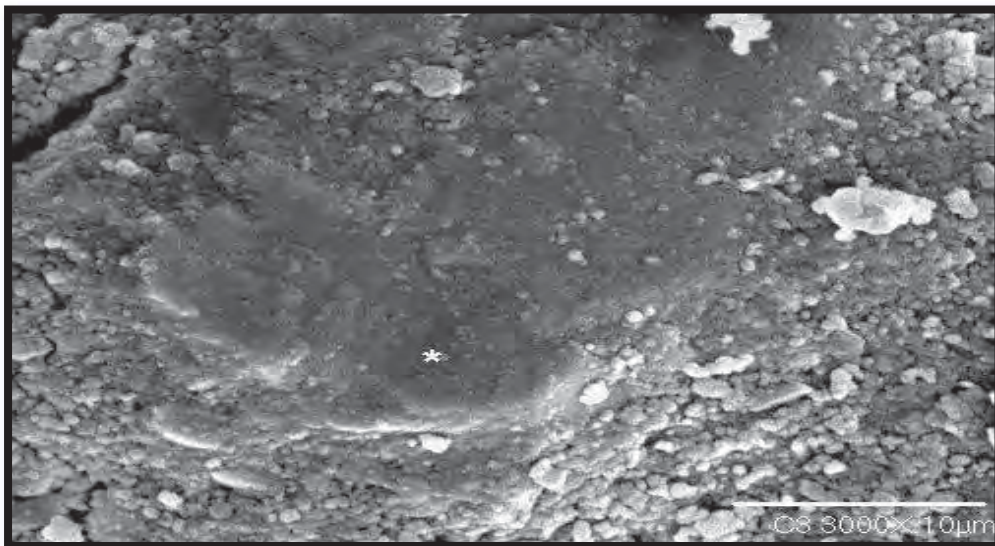


Figura 6.11. Acercamiento a 3000X en donde se muestra la presencia de un gel amorfo.

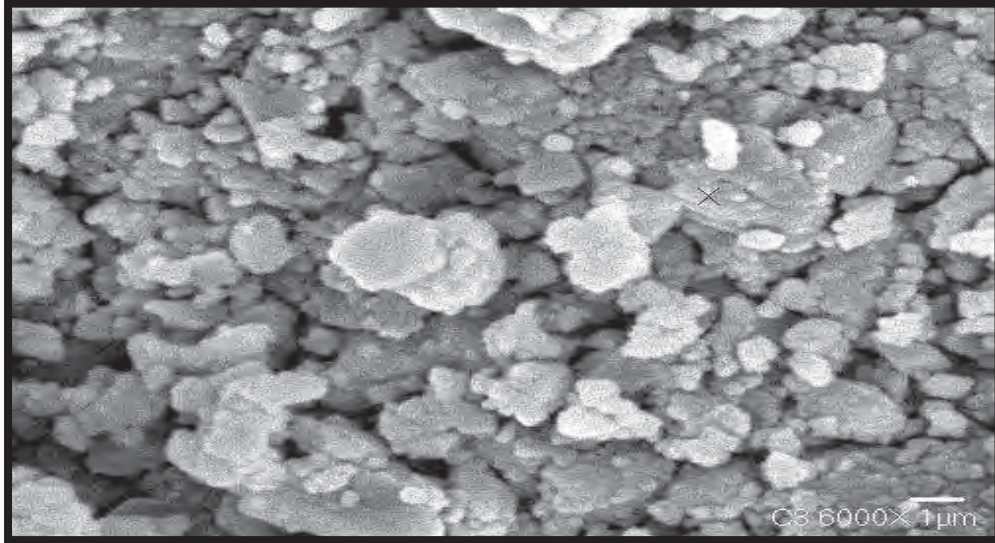


Figura 6.12. Precipitados de los productos de reacción sin identificar.

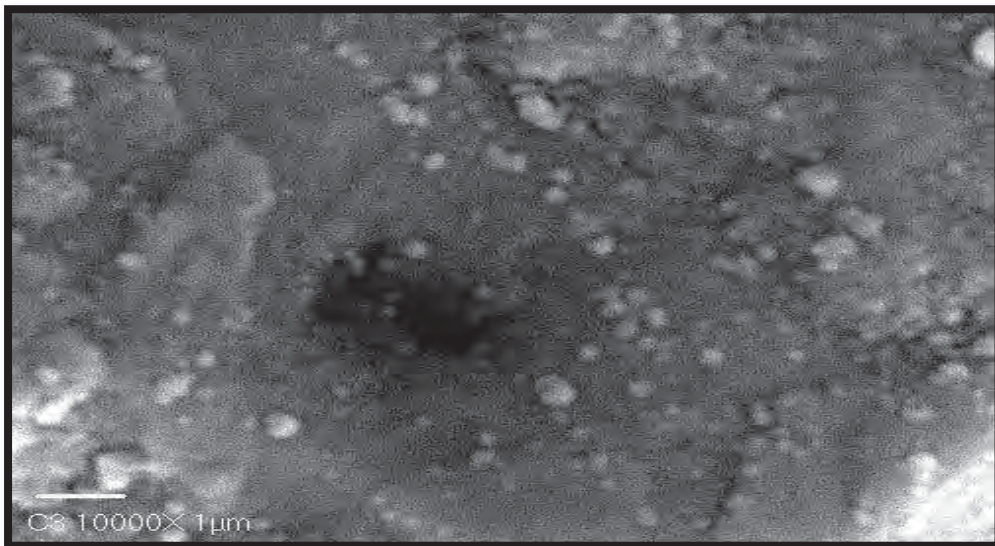
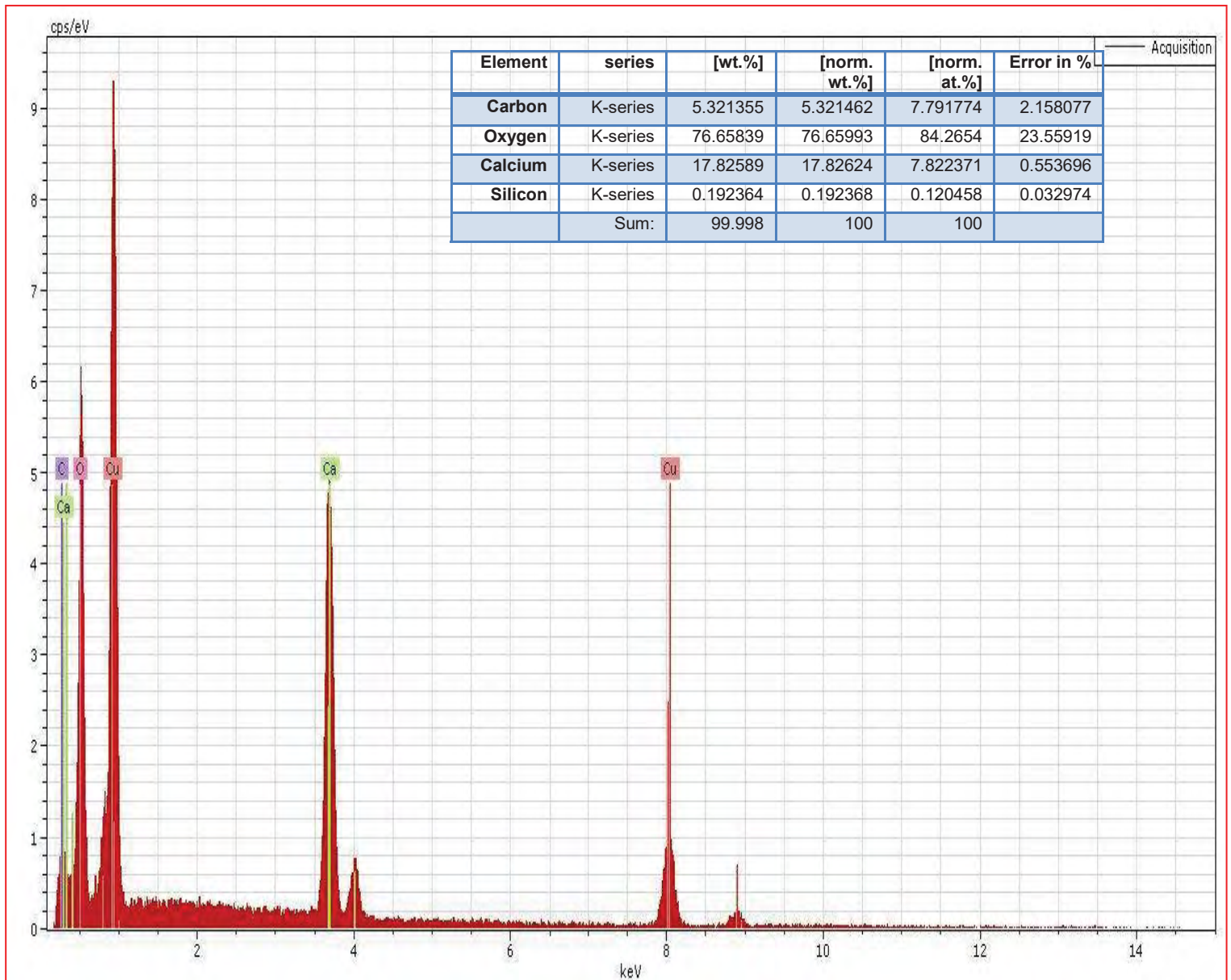


Figura 6.13. Acercamiento a 10000X en donde se muestra el gel desarrollado.



Grafica 6.22.EDS del cemento híbrido con K⁺ como activador alcalino.

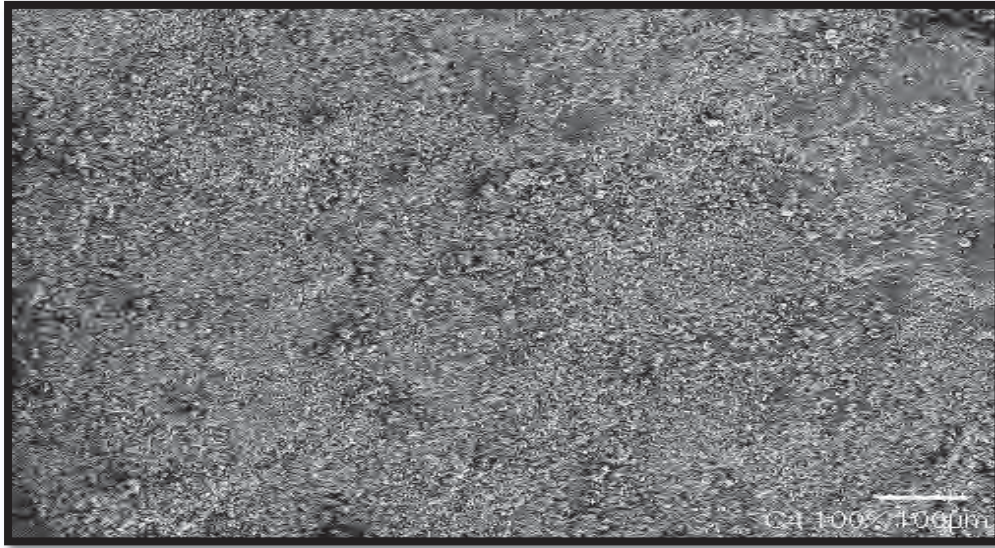
6.3.1.4. COMPOSICIÓN 4

Figura 6.14. Vista general a 100X de un cemento con microsilica.

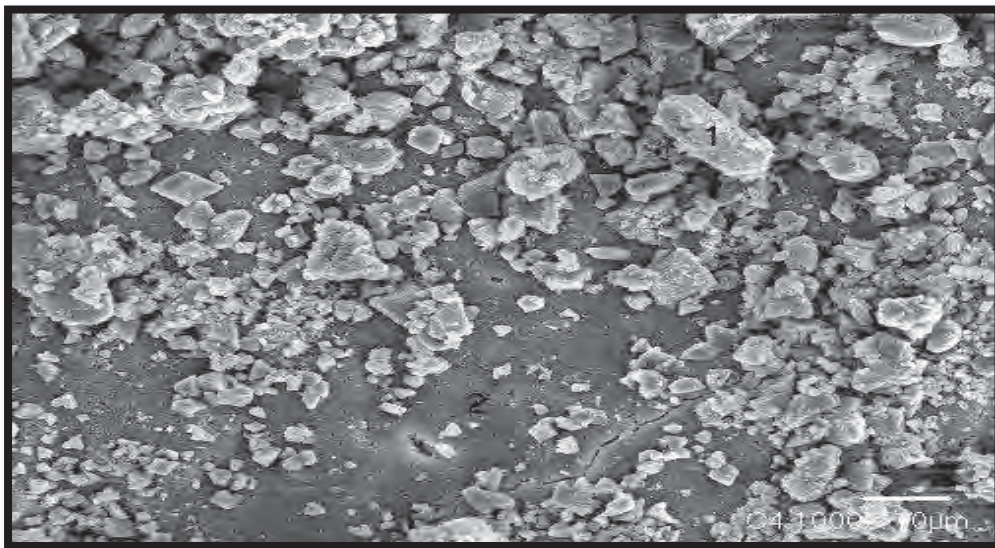


Figura 6.15. Formación de matriz de gel con precipitados a 1000X.

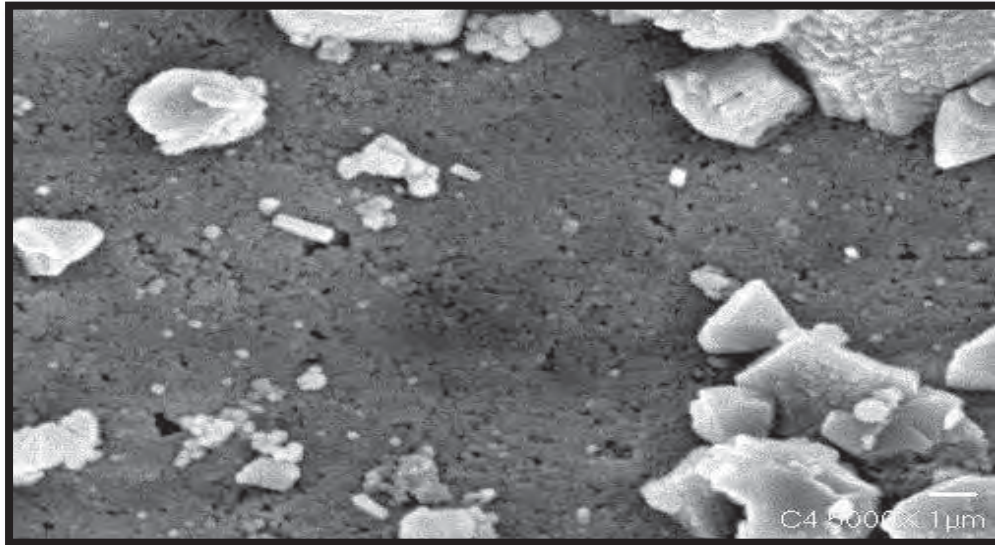


Figura 6.16. Gel cementante con presencia de cristales de portlandita.

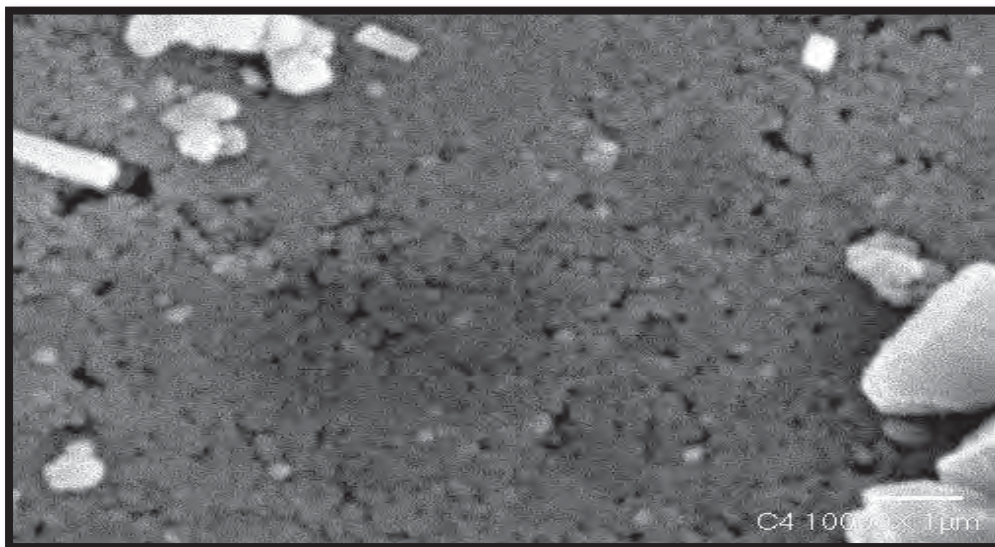
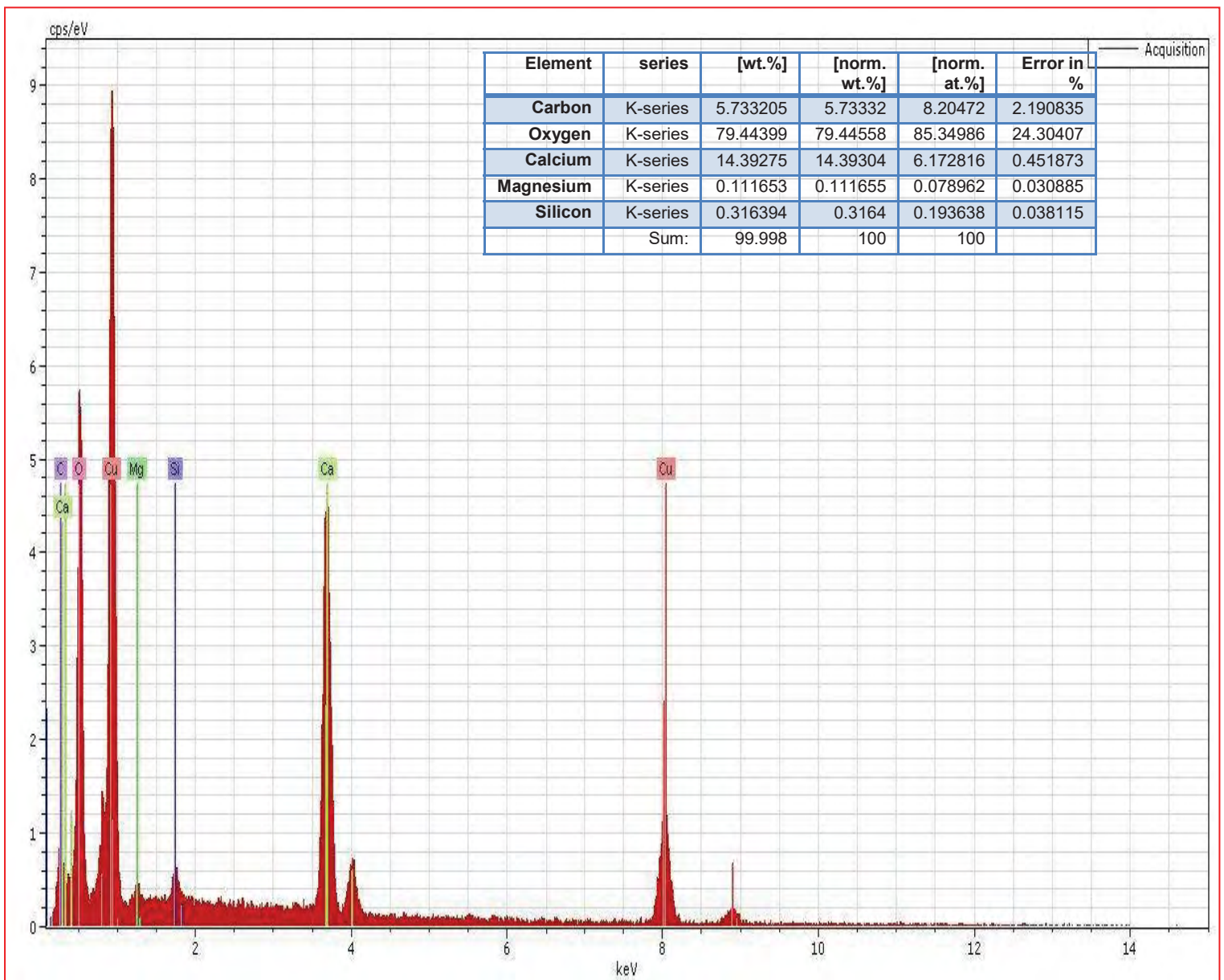


Figura 6.17. Acercamiento a 10000X de la matriz de cemento.



Grafica 6.23. EDS mostrando los elementos básicos del gel de tobermorita.

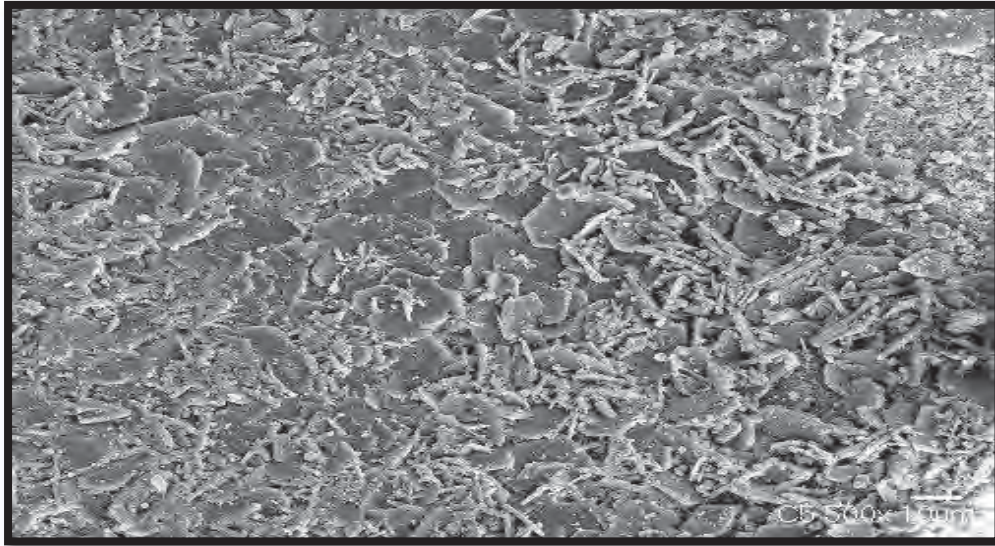
6.3.1.5. COMPOSICIÓN 5

Figura 6.18. Vista general de un nanocemento híbrido con formación cristalina.

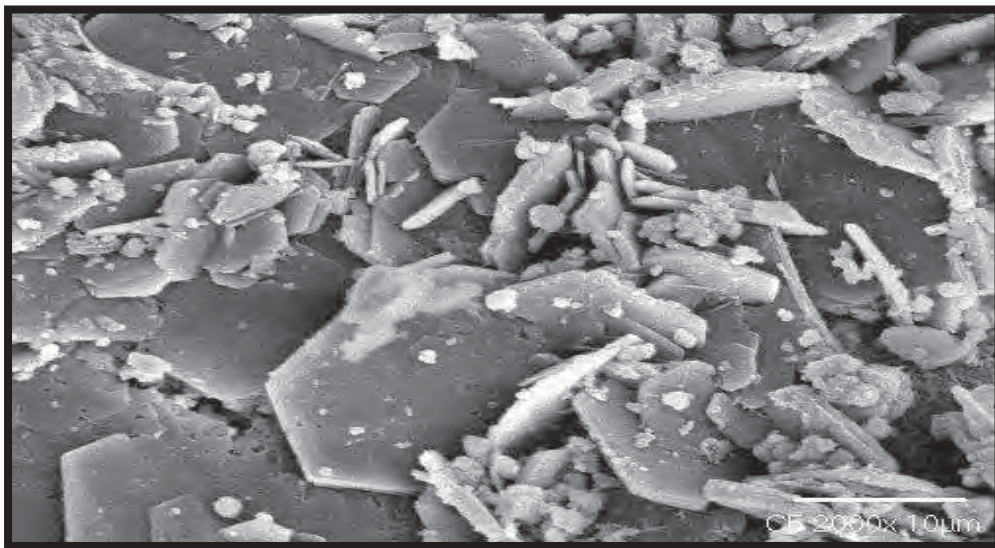


Figura 6.19. Hojuelas de portlandita.



Figura 6.20. Acercamiento de la efluorescencia de los cristales de portlandita, observe su morfología hexagonal.

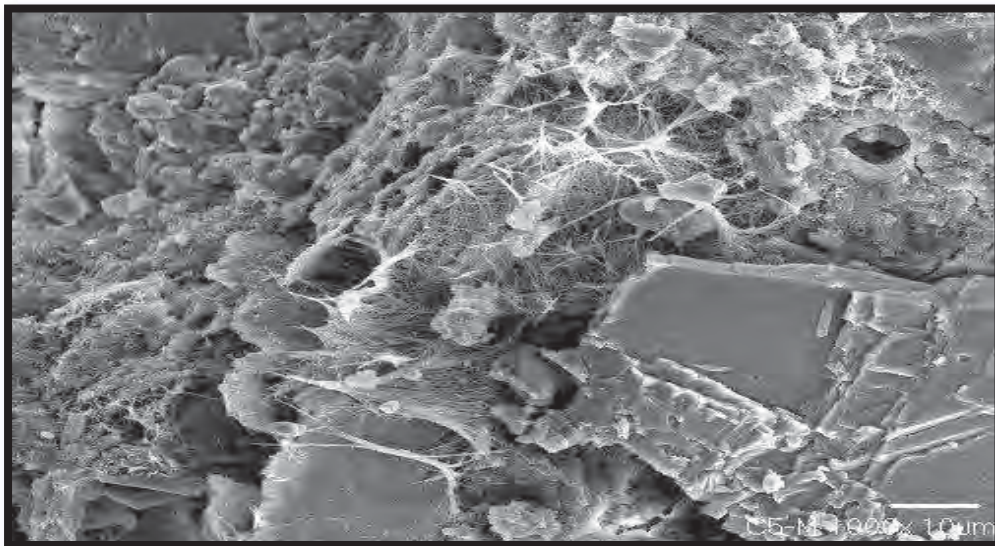
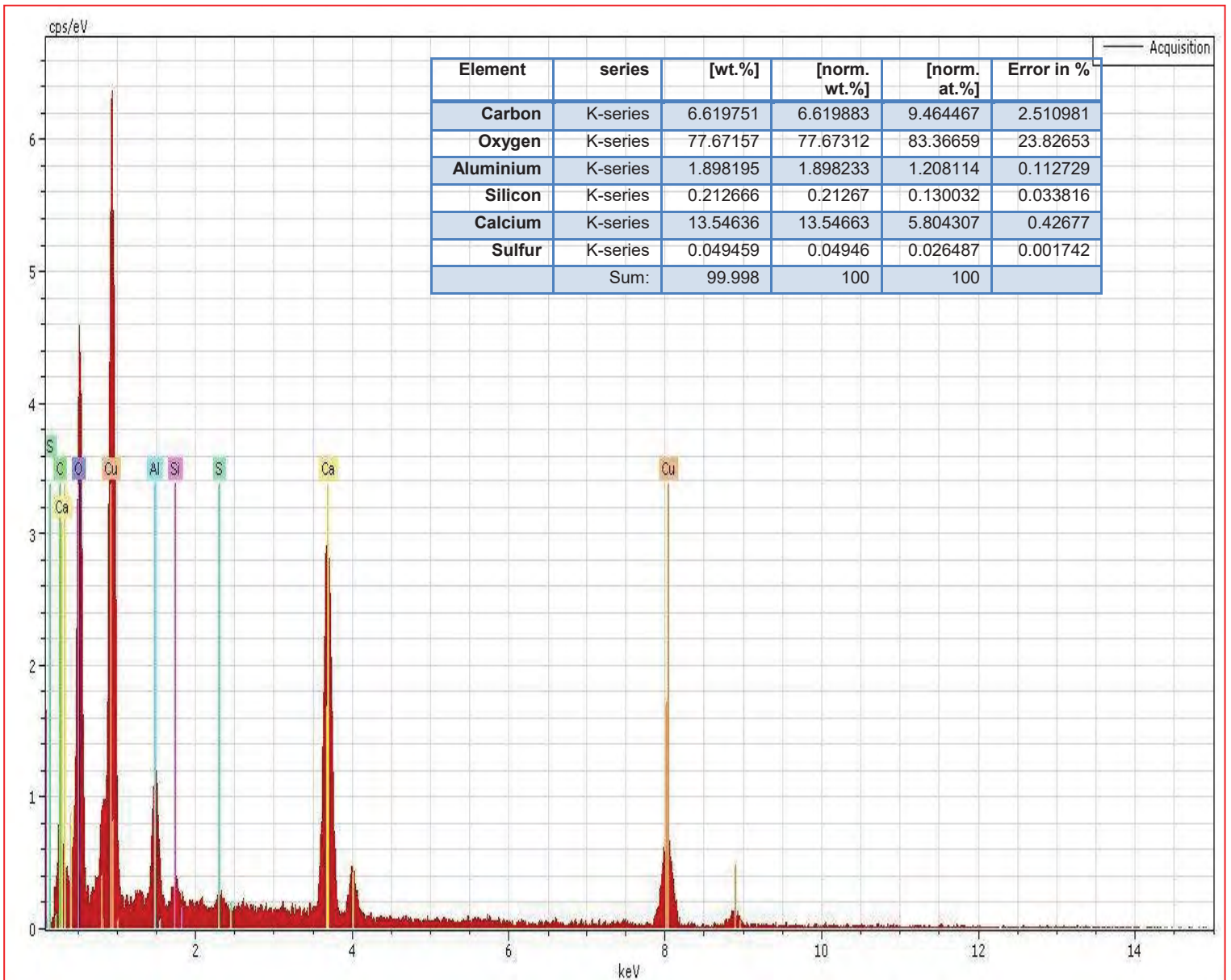


Figura 6.21. Matriz de cemento en donde se muestra el gel de tobermorita, agujas de etringita y precipitados sin identificar.



Grafica 6.24. EDS que muestra la presencia de aluminio y azufre elementos componentes de los sulfoaluminatos cálcicos.

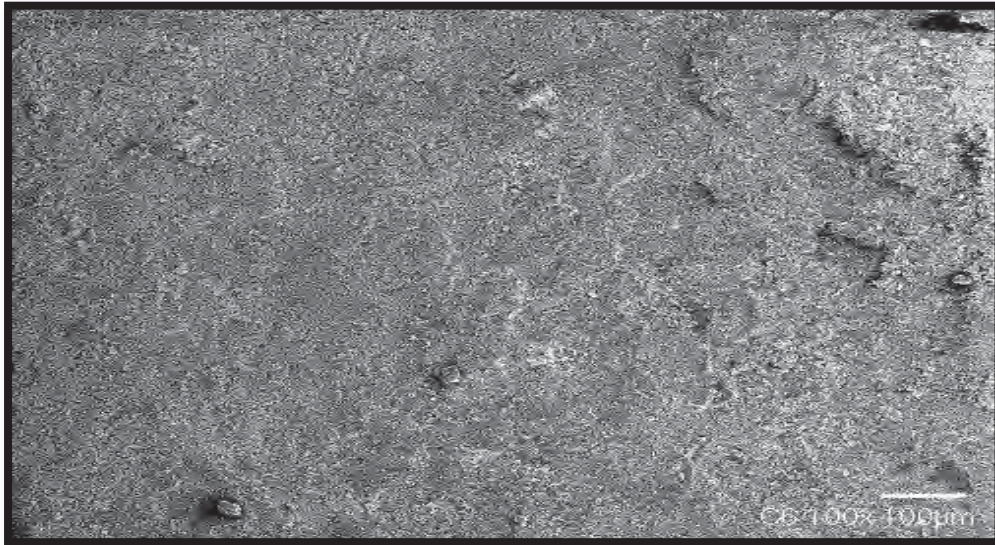
6.3.1.6. COMPOSICIÓN 6

Figura 6.22. Microestructura general de un cemento estándar a 100X con hiperfluidificante.

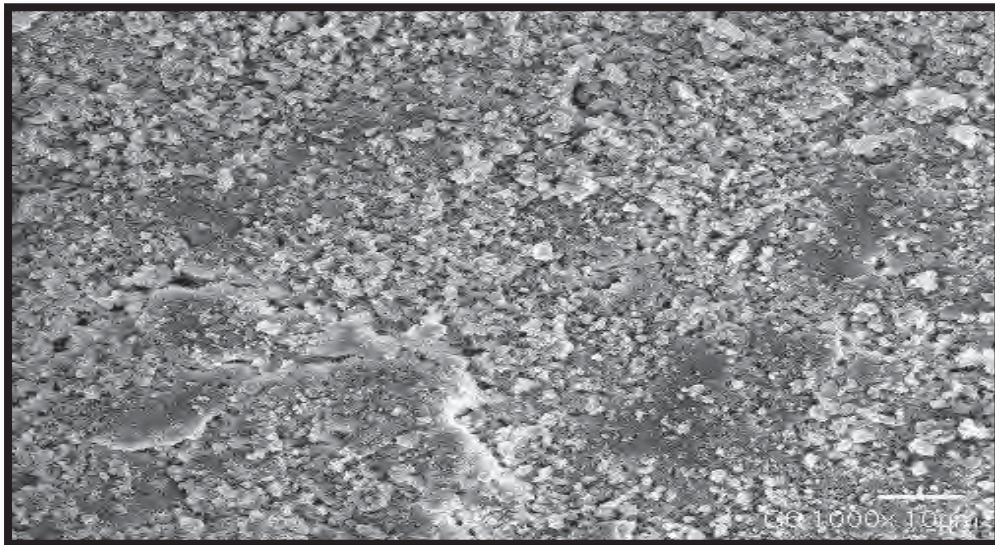


Figura 6.22'. Acercamiento a 1000X de un cemento estándar.

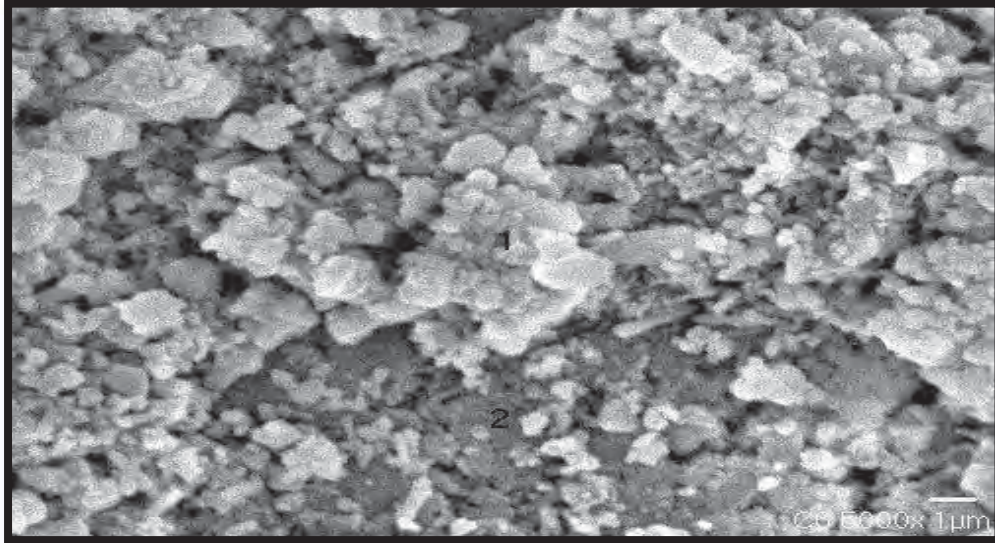


Figura 6.23. Precipitados sin identificar sobre la superficie del cemento estándar.

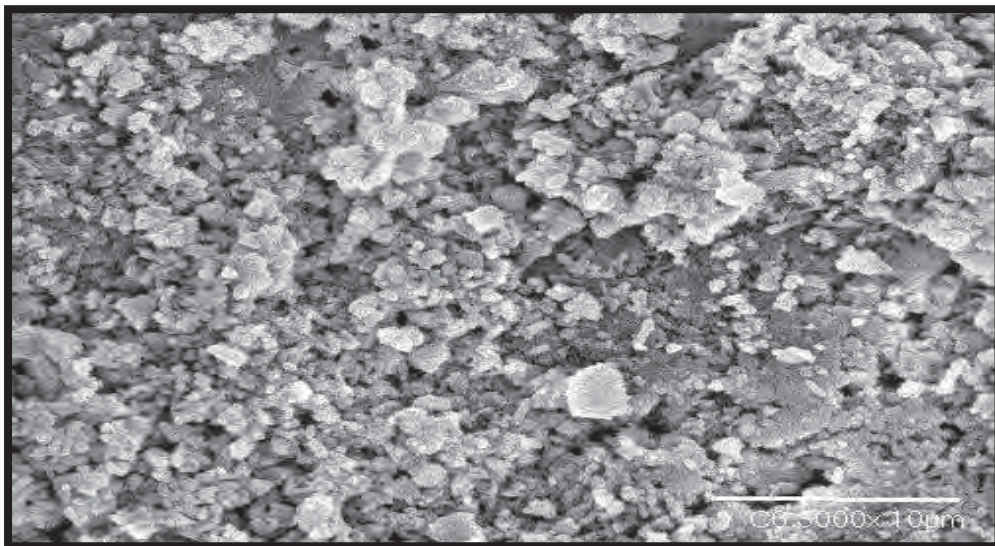
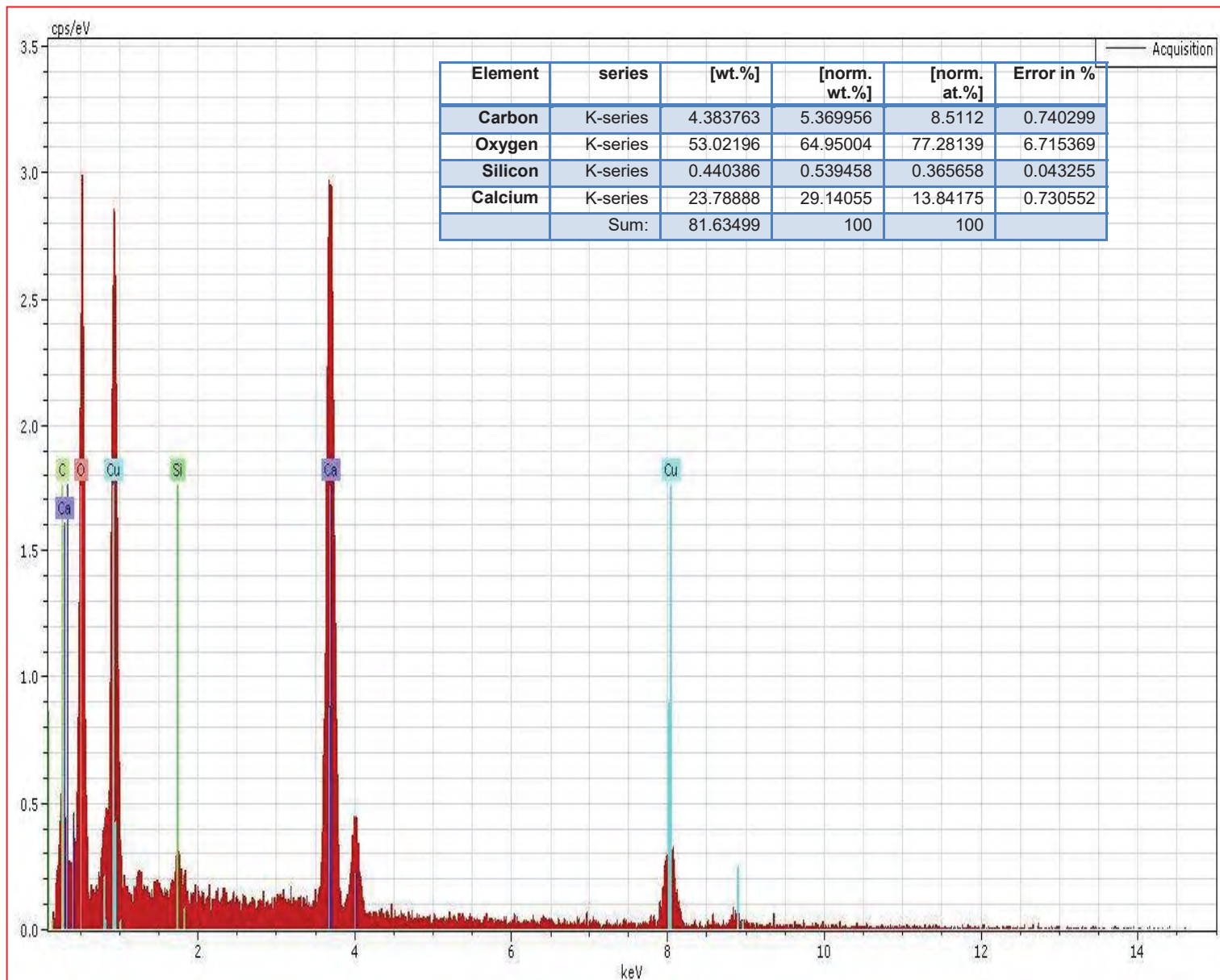


Figura 6.24. Vista a 5000X de cemento estándar en donde se muestra el gel de tobermorita y precipitados.



Grafica 6.25. EDS de un cemento estándar donde se muestran los elementos químicos presentes.

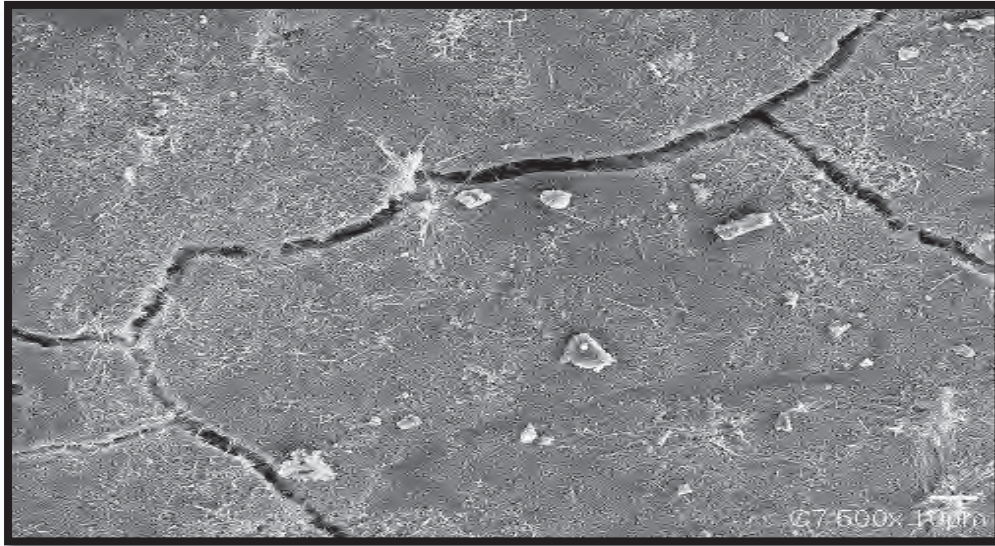
6.3.1.7. COMPOSICIÓN 7

Figura 6.25. Vista general de un cemento activado con Na⁺.

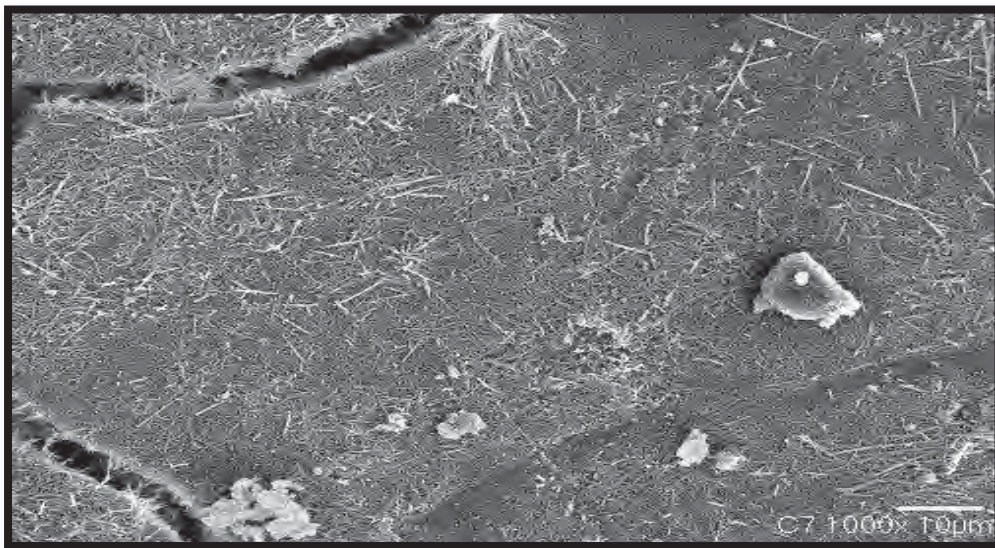


Figura 6.26. Acercamiento de la superficie de un nanocemento activado con Na⁺ e hiperfluidificante observe las fracturas del gel y la formación de agujas cristalinas.

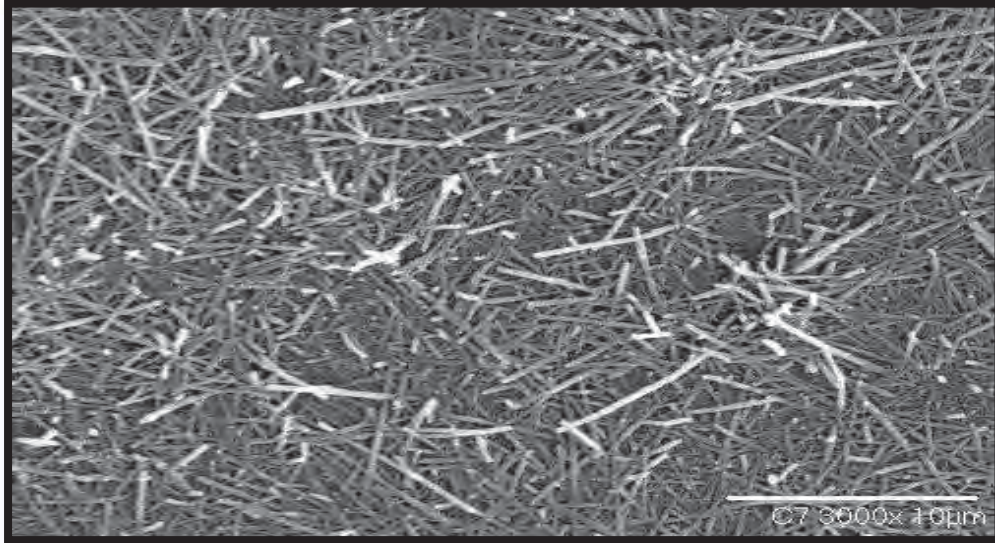


Figura 6.27. Acercamiento a 3000X de las agujas cristalinas observe que su diámetro es nanométrico.

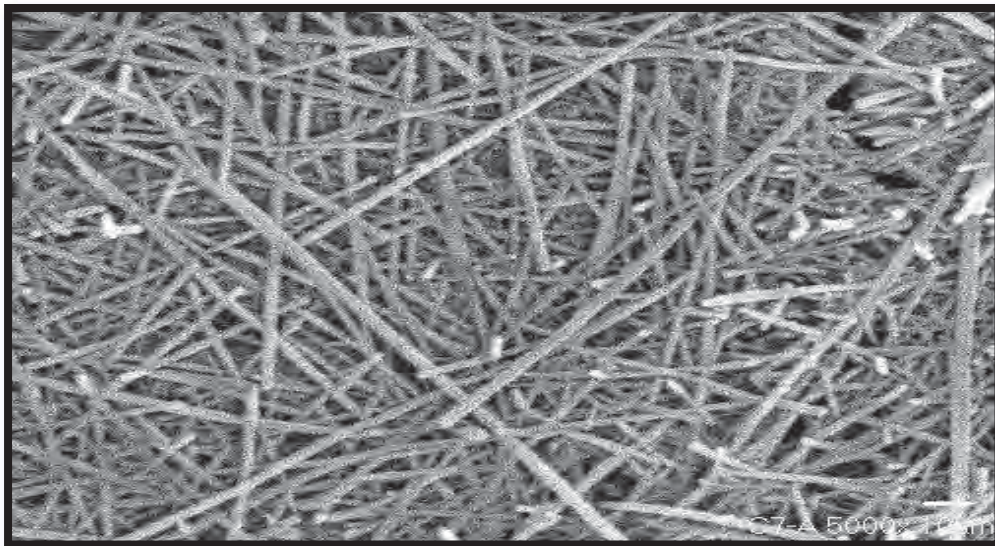
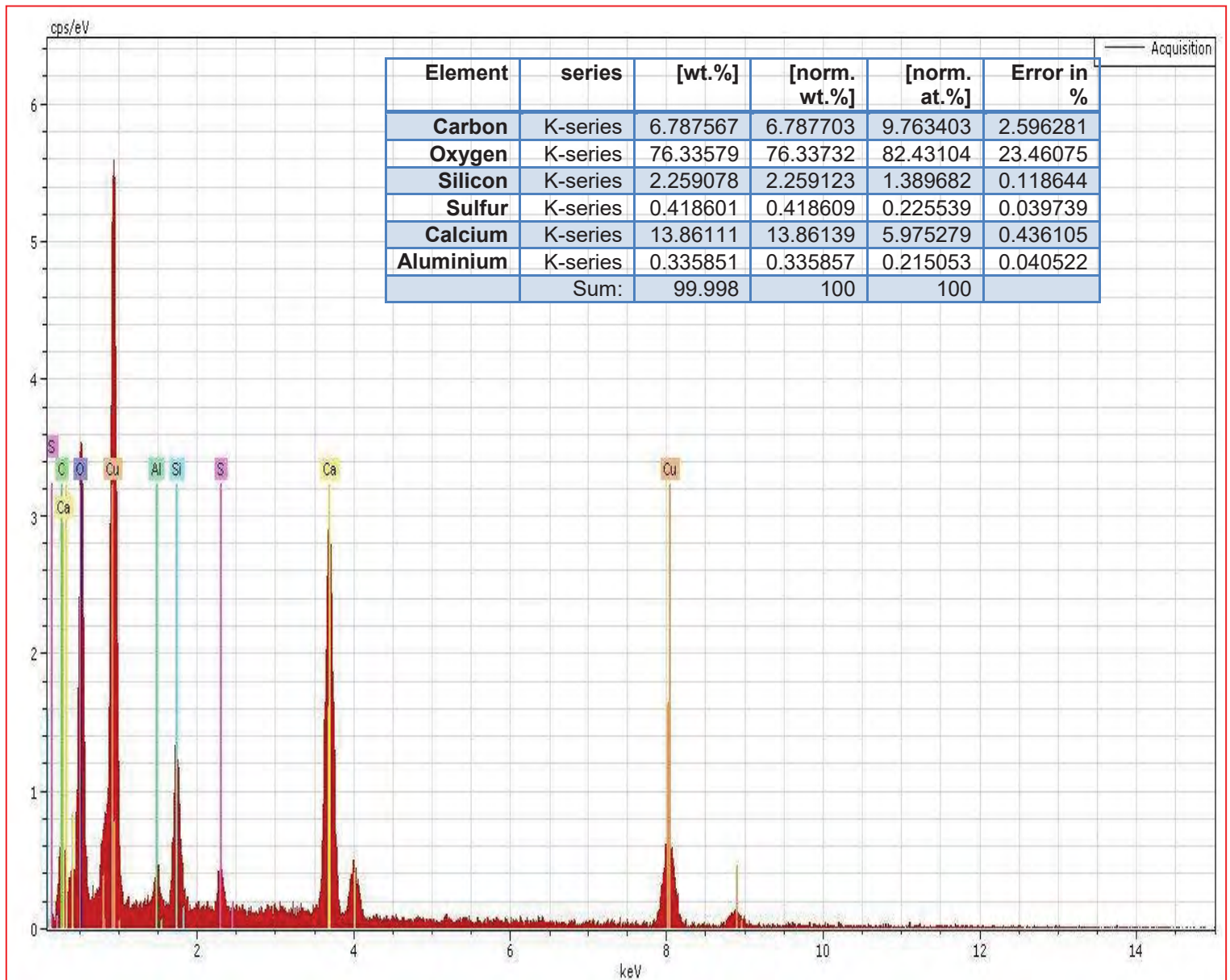


Figura 6.28. Dispersión de agujas sobre la superficie del cemento.



Grafica 6.26. EDS que muestra una alta concentración de azufre elemento presente en las agujas de sulfoaluminatos.

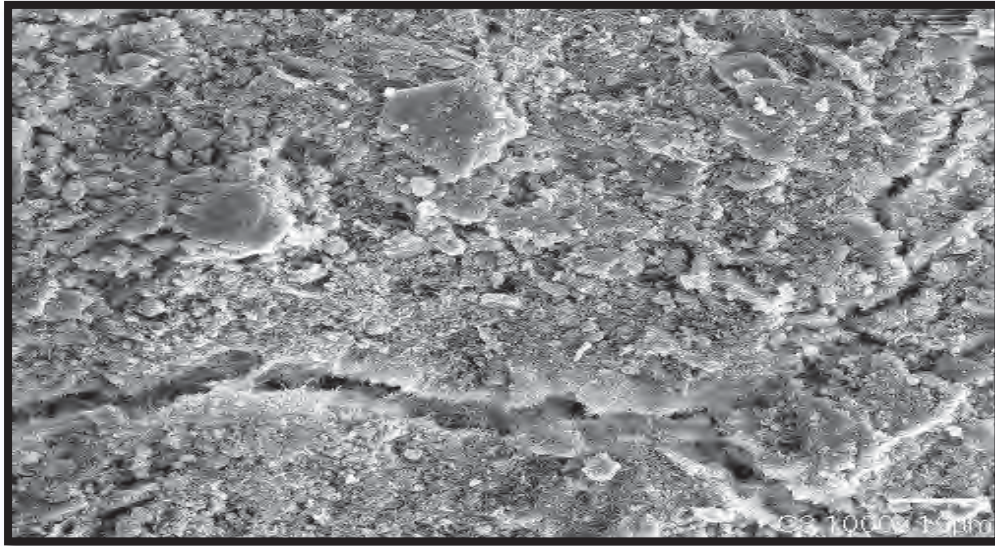
6.3.1.8. COMPOSICIÓN B

Figura 6.29. Vista general de un cemento híbrido conteniendo Na^+ como activador alcalino y Alúmina.

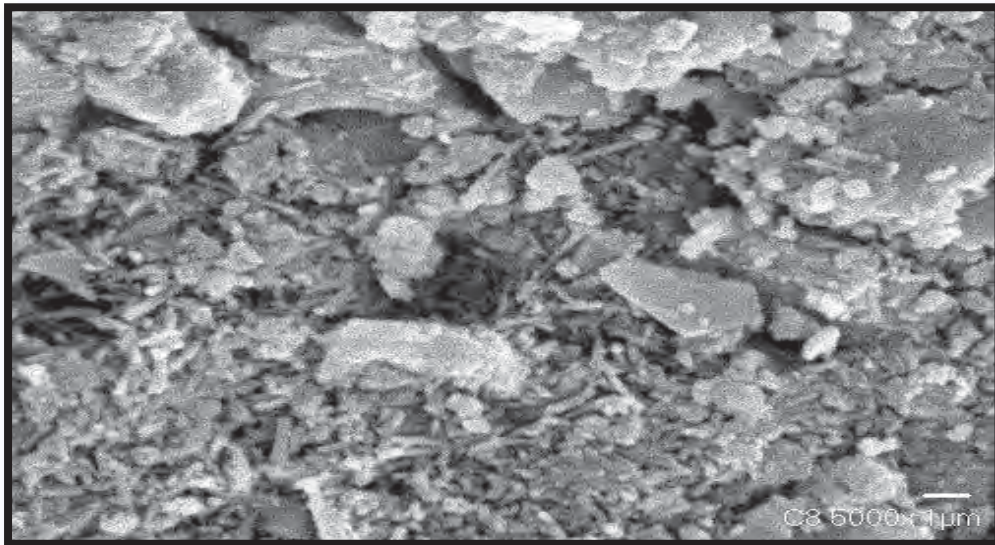


Figura 6.29' Acercamiento a 5000X del cemento con partículas cristalinas sobre la superficie.

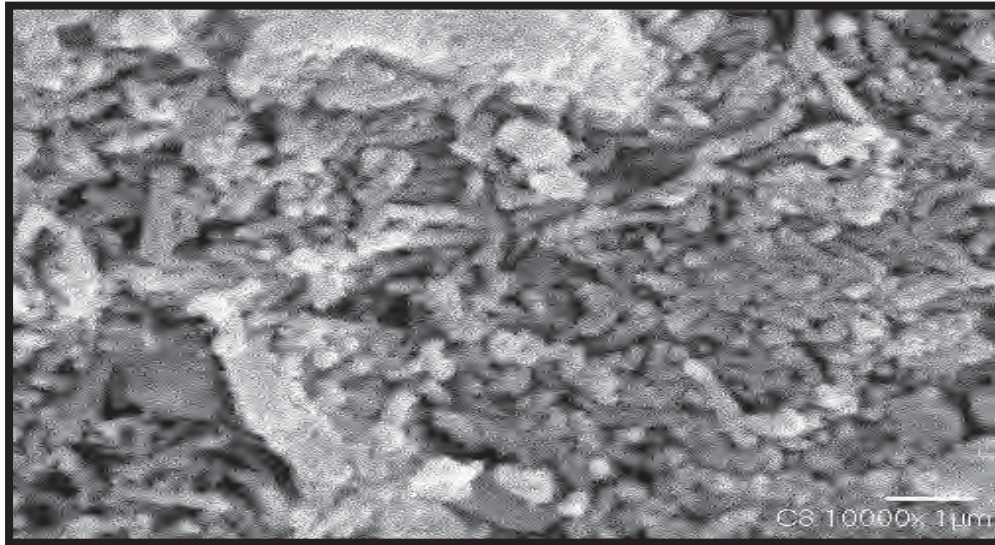


Figura 6.30. Precipitados sobre la superficie de concreto híbrido si identificar, se muestra la presencia de agujas dentro del gel de tobermorita.

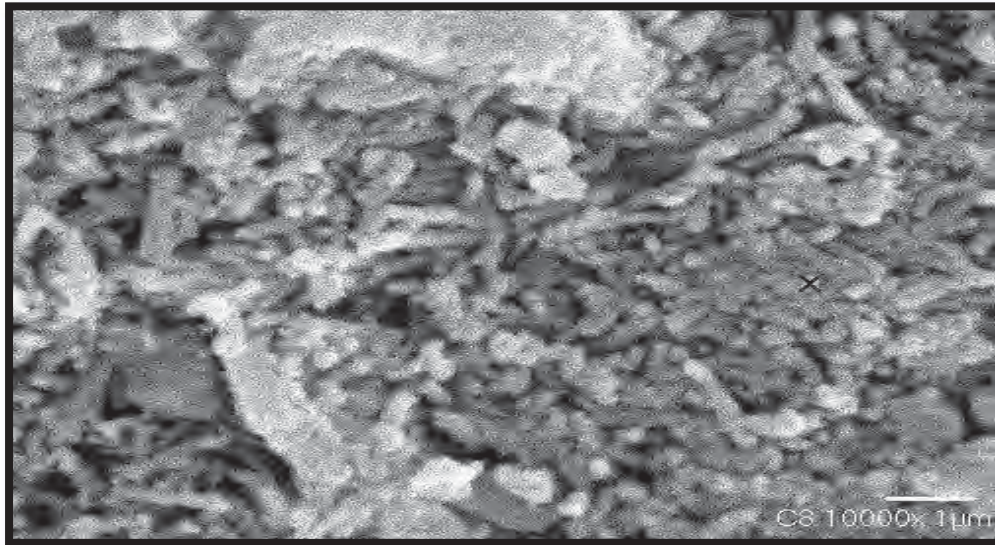
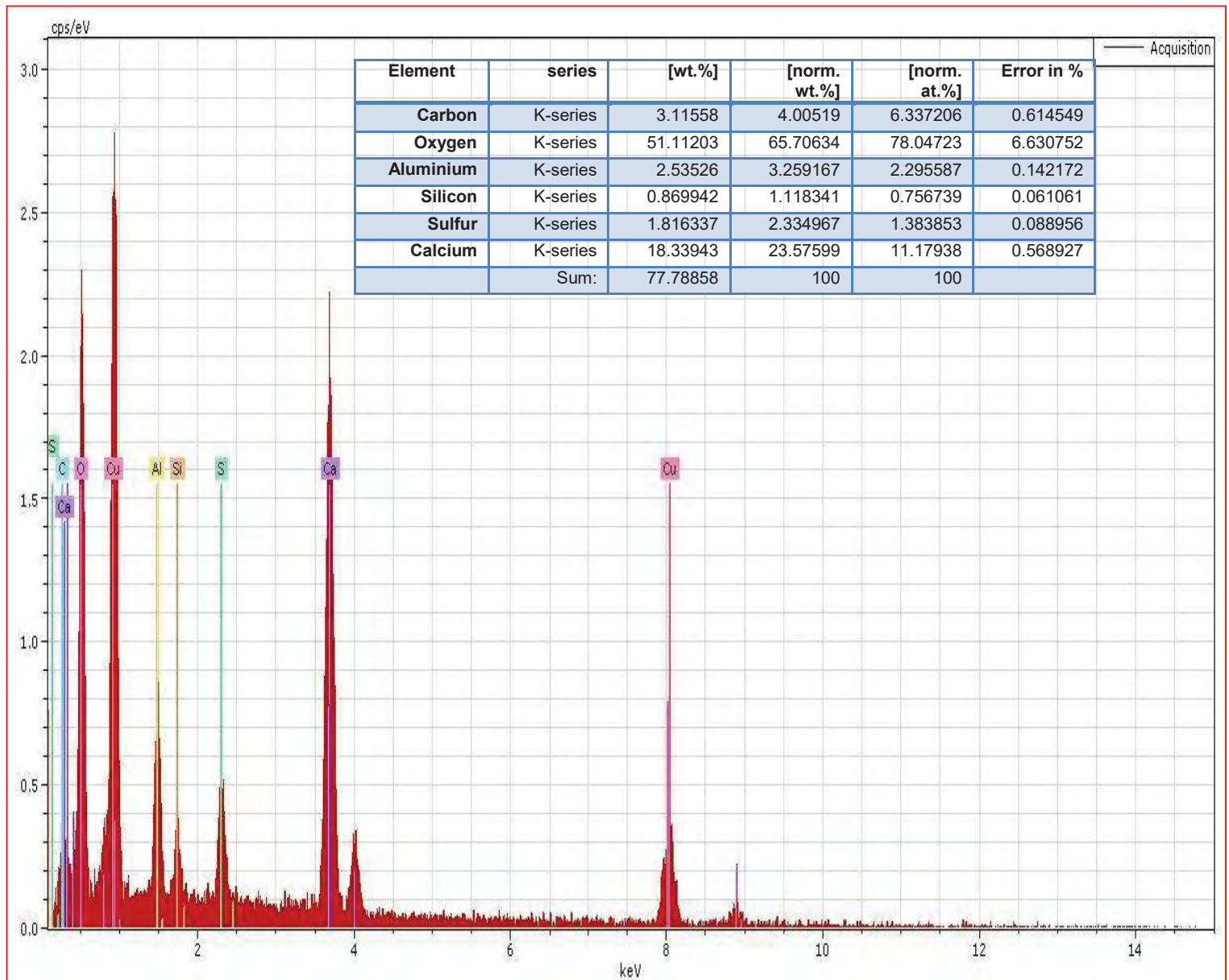


Figura 6.31. Acercamiento a 10000X en donde se aprecia el gel de tobermorita y sus precipitados.



Grafica 6.27. EDS en donde se muestran los elementos químicos constituyentes de la tobermorita, la etringita y los carbonatos cálcicos de la marmolina utilizada como agregado pétreo.

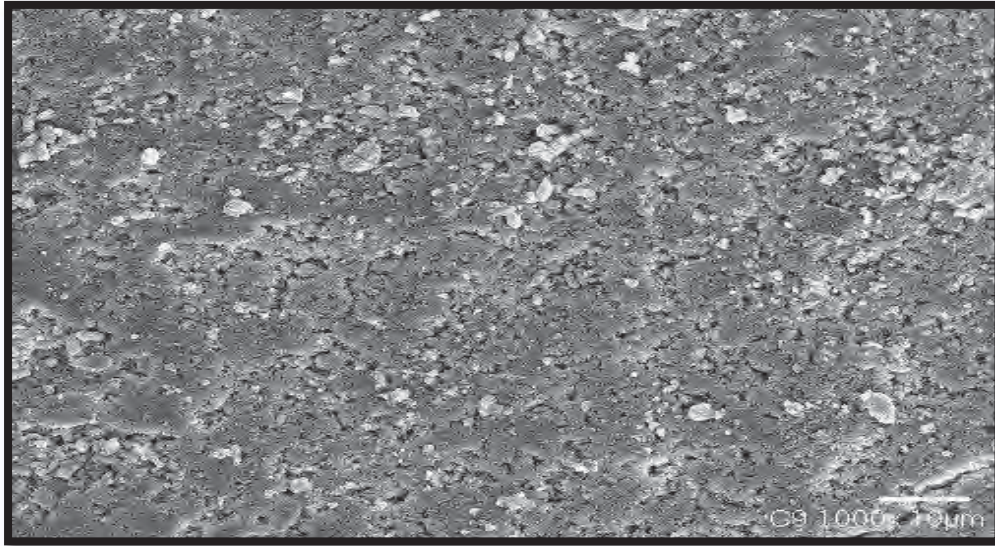
6.3.1.9. COMPOSICIÓN 9

Figura 6.32. Vista general de un cemento conteniendo Na⁺ como activador alcalino y microsilica.

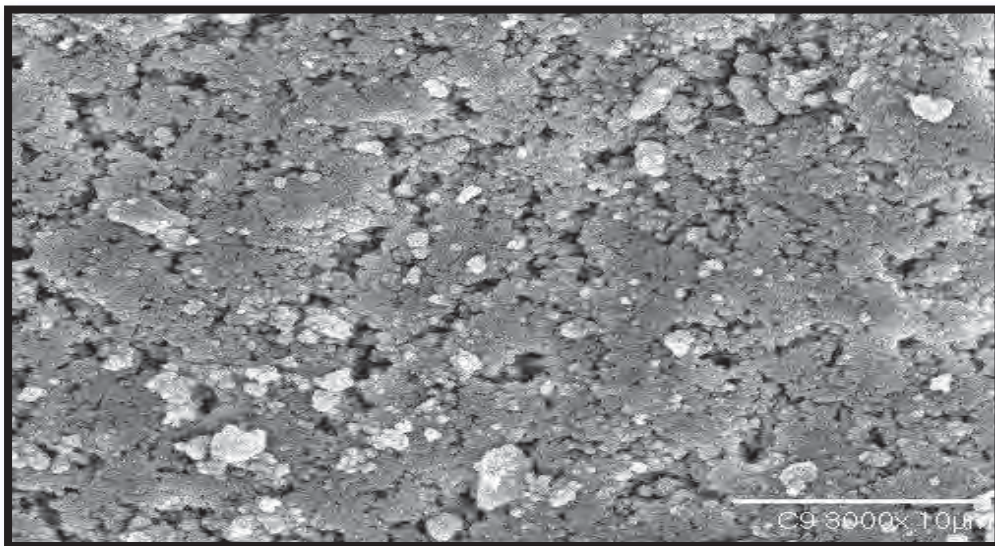


Figura 6.33. Gel de tobermorita a 3000X.

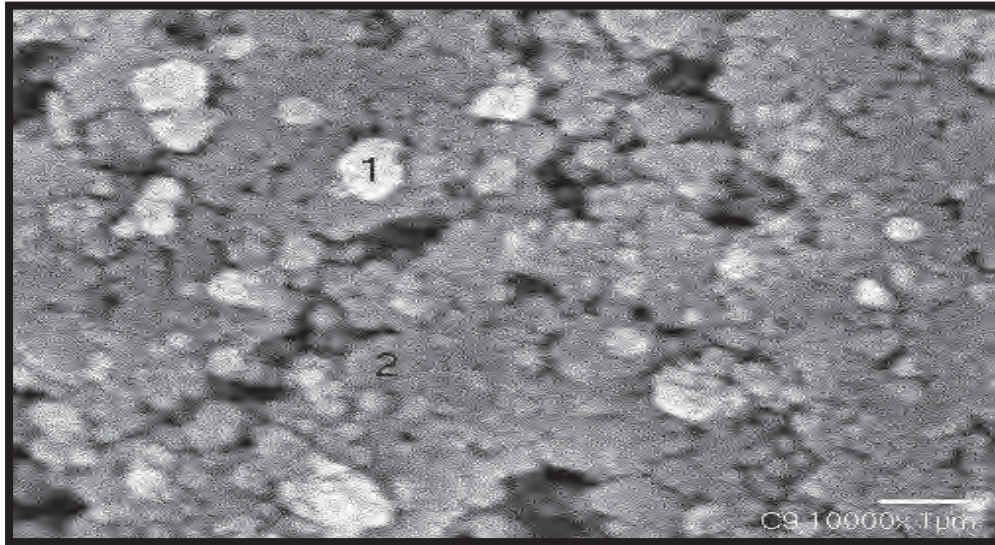


Figura 6.34. Precipitados sobre el gel de tobermorita.

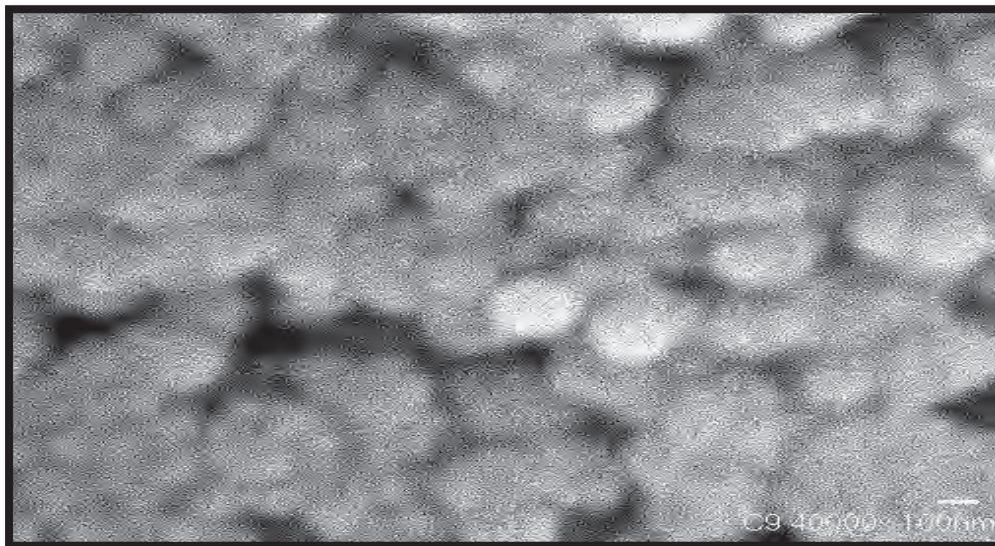
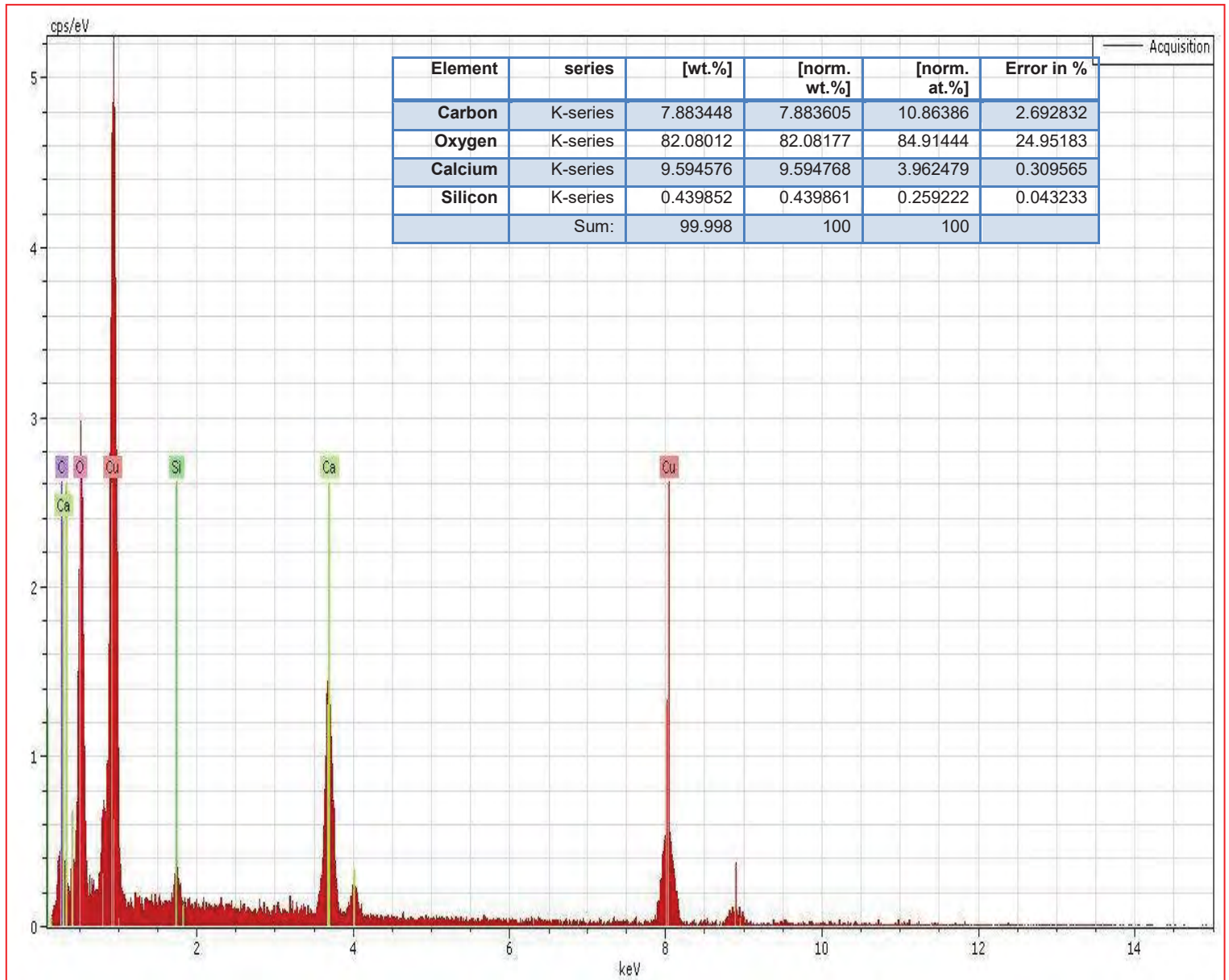
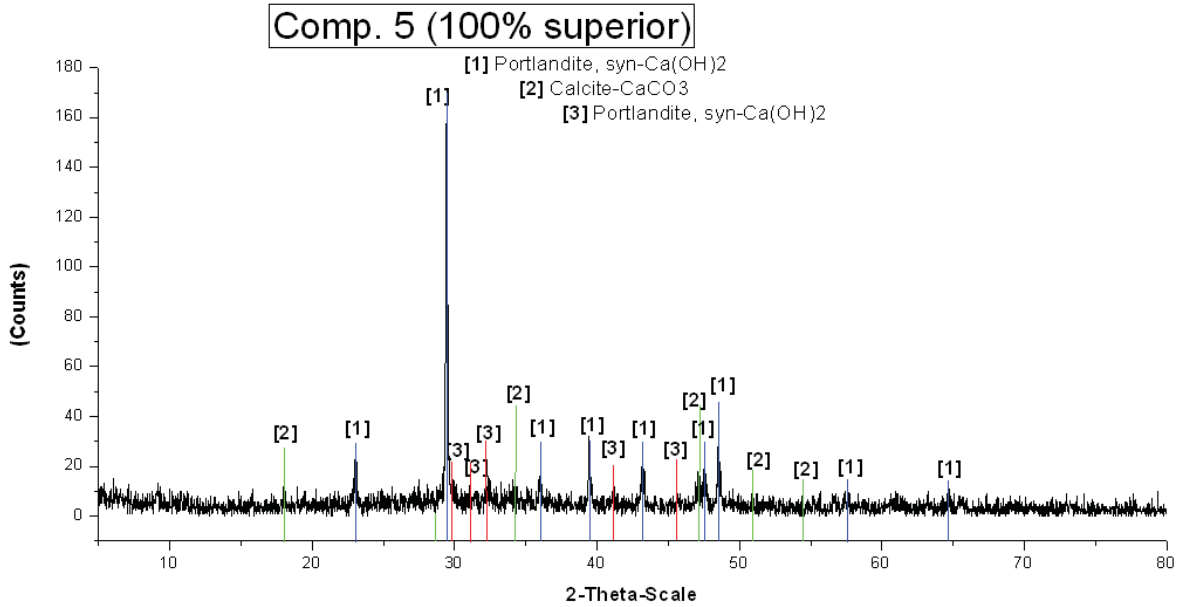


Figura 6.35. Acercamiento a 40000X de los precipitados nanométricos de la pasta cementante.

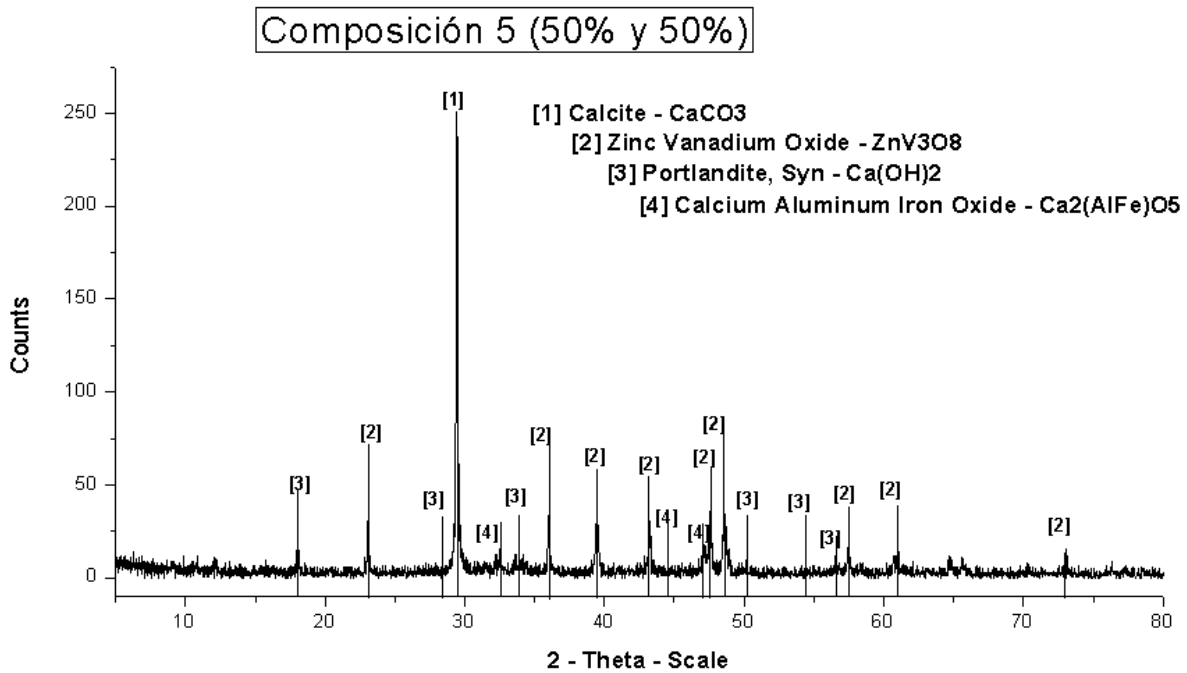


Grafica 6.28. EDS del gel de tobermorita (Silicato de calcio hidratado) y carbonato de calcio del agregado pétreo.

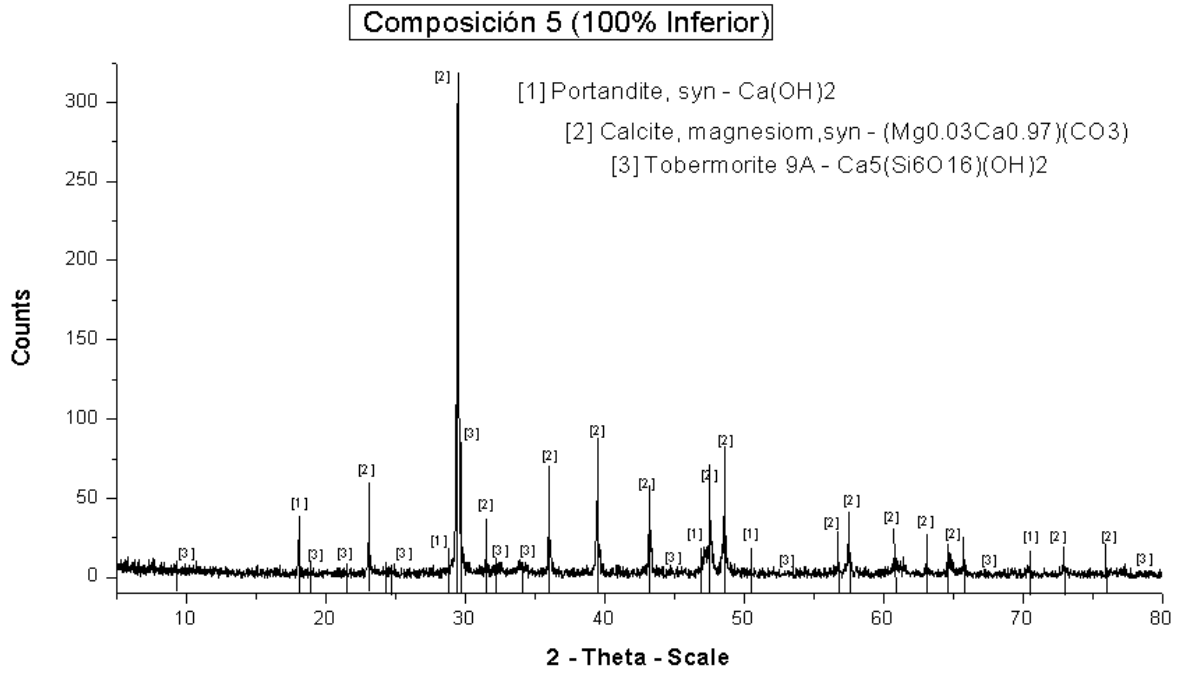
6.3.2. DRX



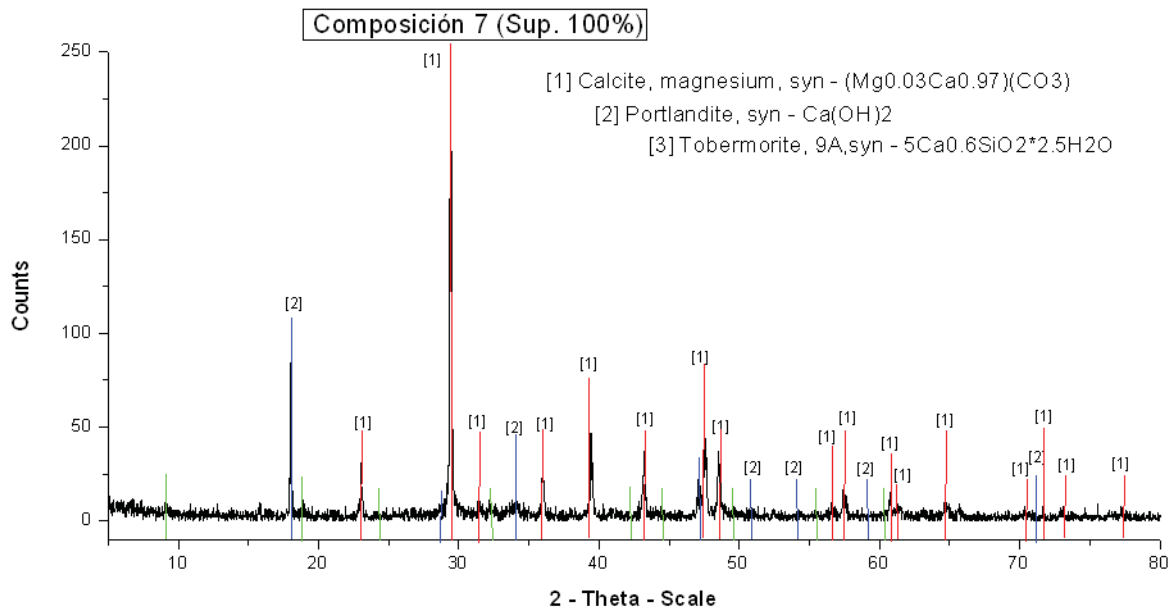
Grafica 6.29. Análisis por DRX de la parte superior de la composición 5.



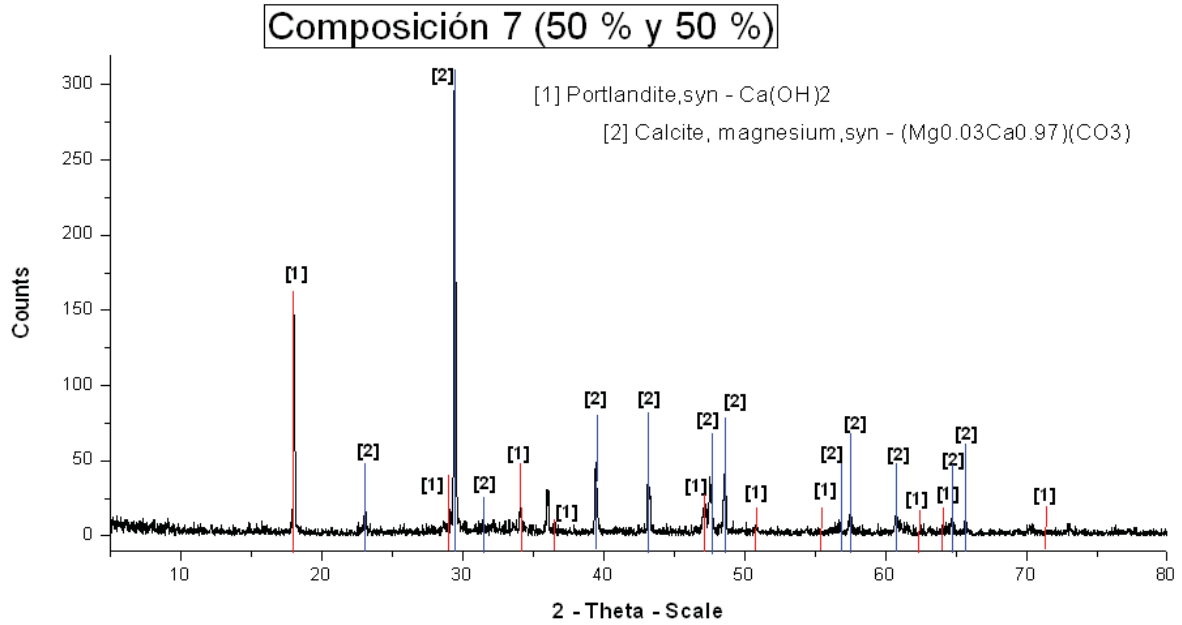
Grafica 6.30. Análisis por DRX de la sección transversal central de la composición 5.



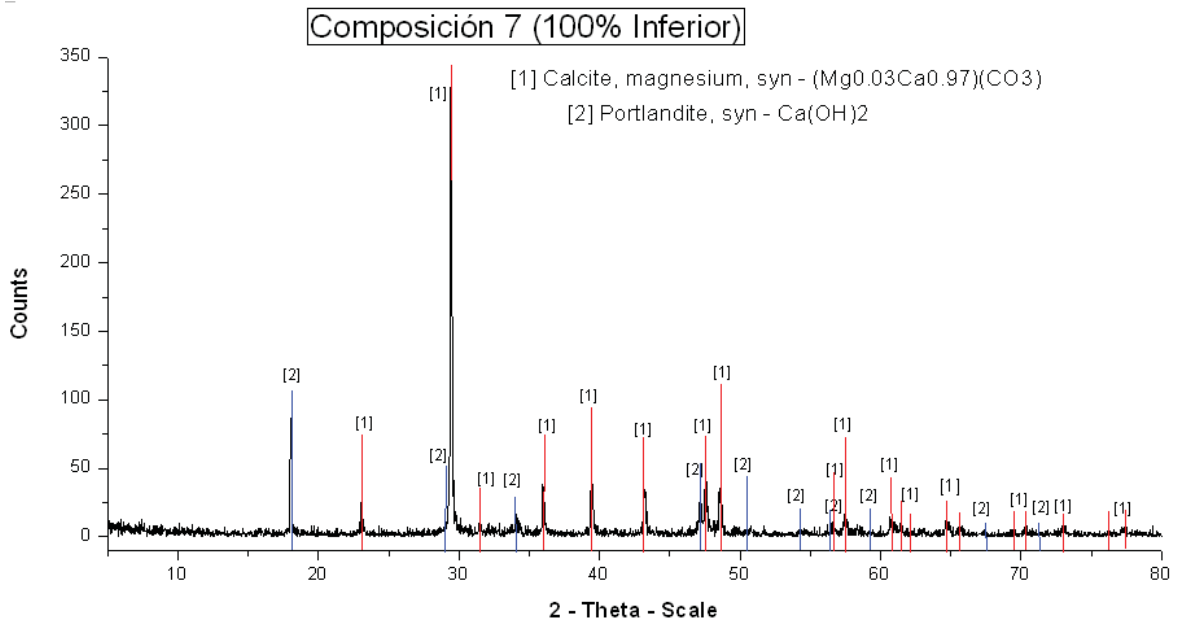
Grafica 6.31. Análisis por DRX de la parte inferior de la composición 5.



Grafica 6.32. Análisis por DRX de la parte superior de la composición 7.

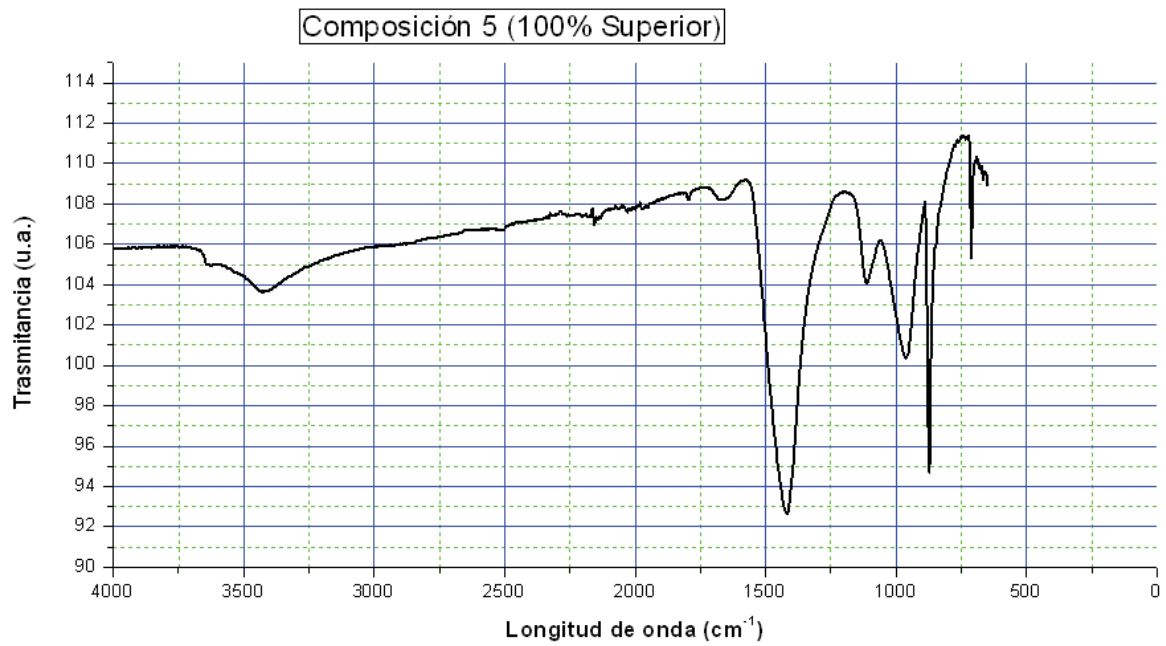


Grafica 6.33. Análisis por DRX de la sección transversal central de la composición 7.

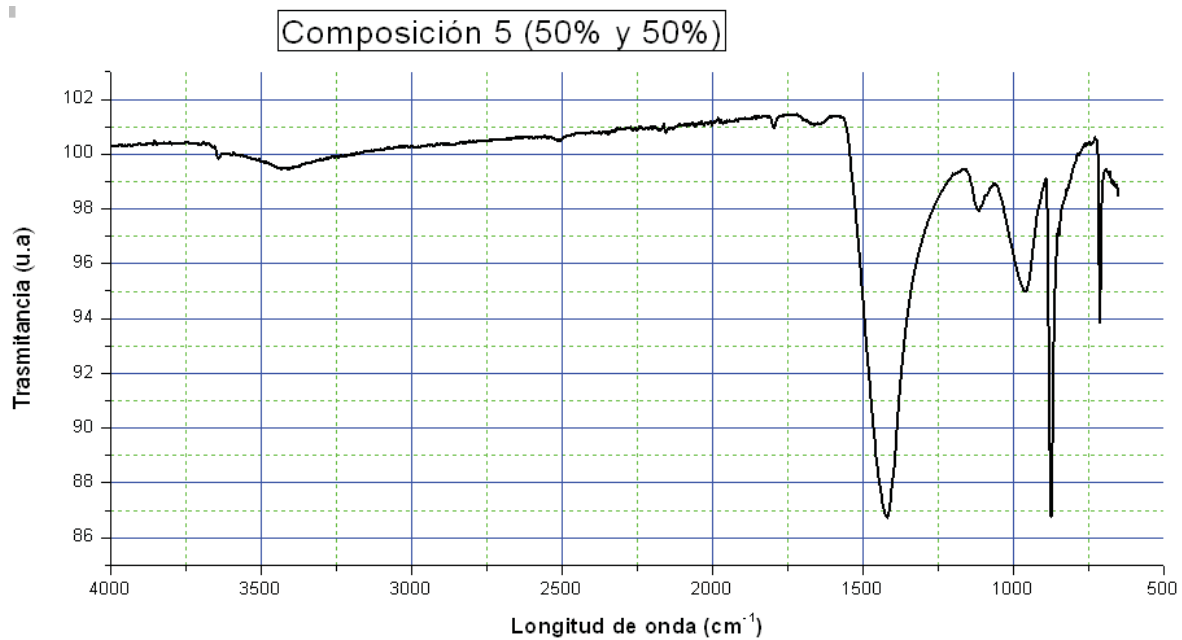


Grafica 6.34. Análisis por DRX de la parte inferior de la composición 7.

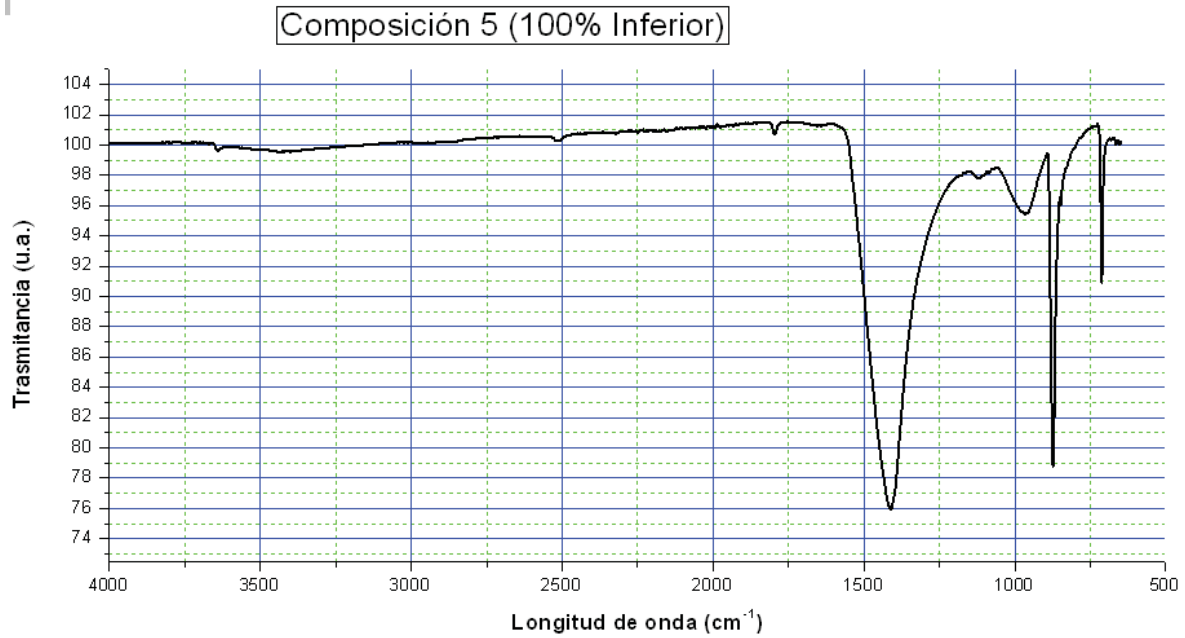
6.3.3. FTIR



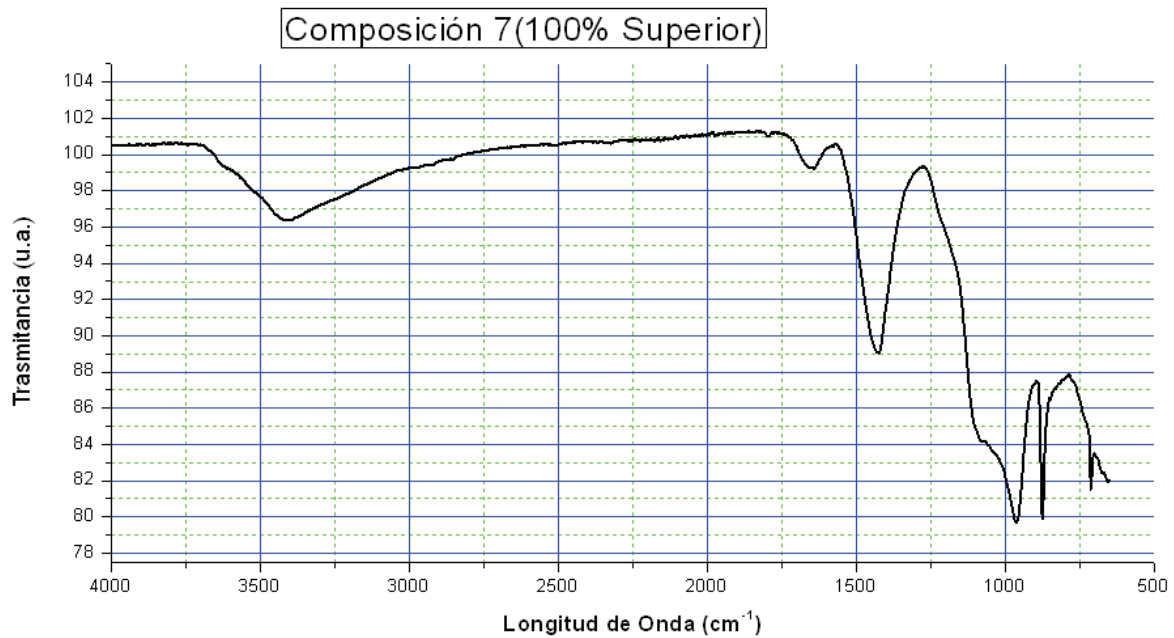
Grafica 6.35. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 5 parte superior.



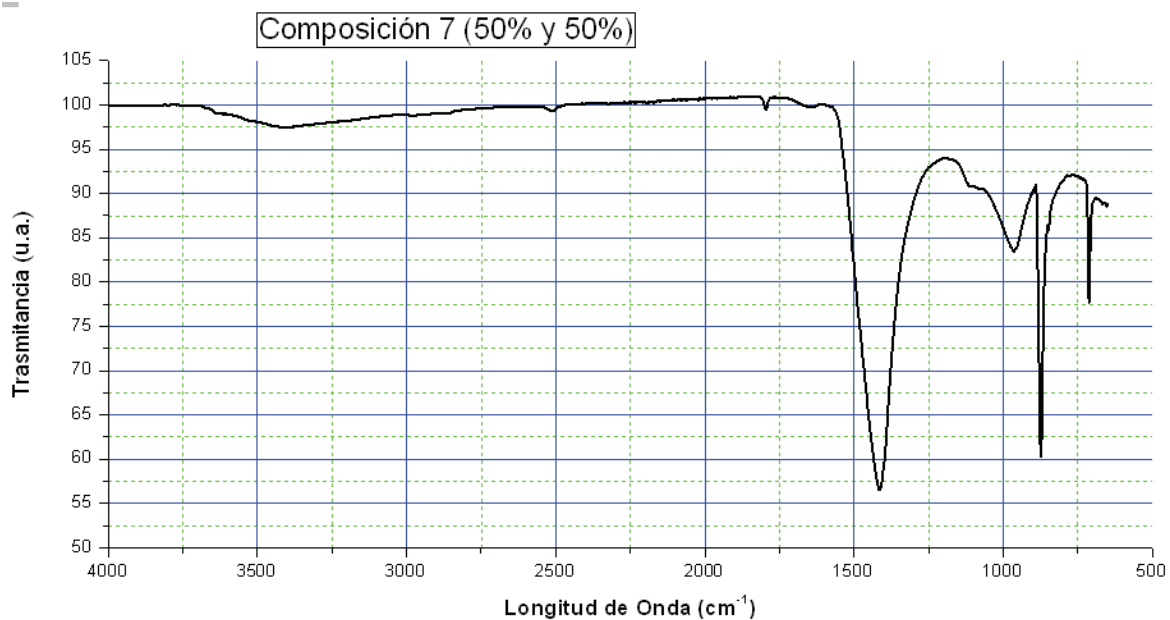
Grafica 6.36. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 5 sección transversal central.



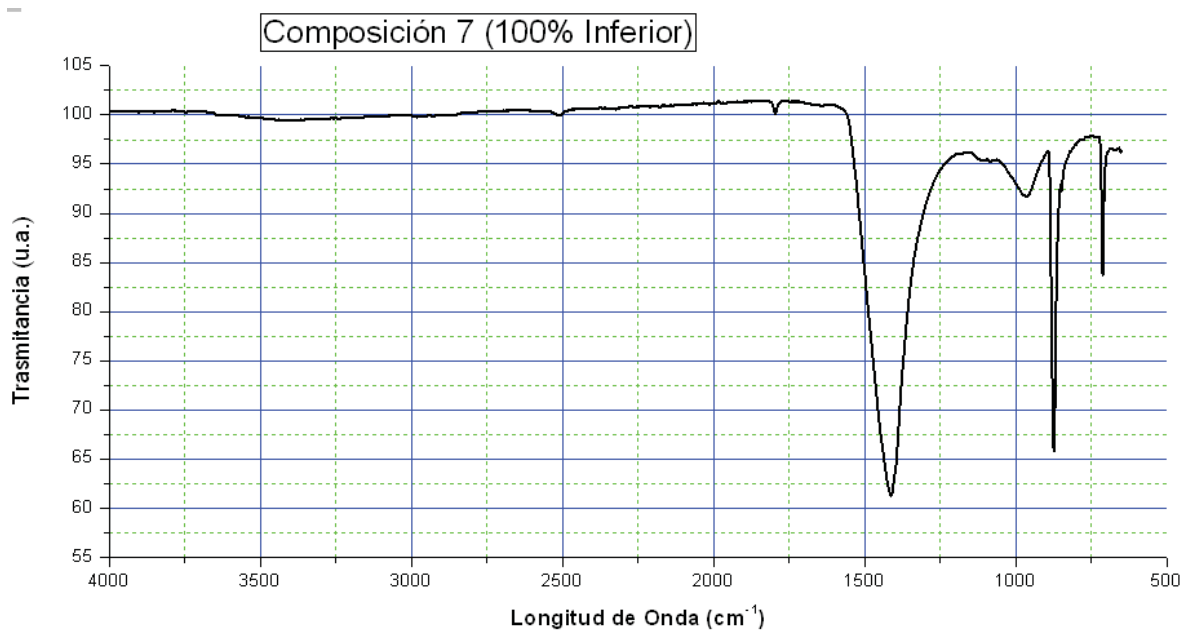
Grafica 6.37. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 5 parte inferior.



Grafica 6.38. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 7 parte superior.



Grafica 6.39. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 7 sección transversal central.



Grafica 6.40. Análisis por espectroscopia de FTIR de la composición 7 parte inferior.

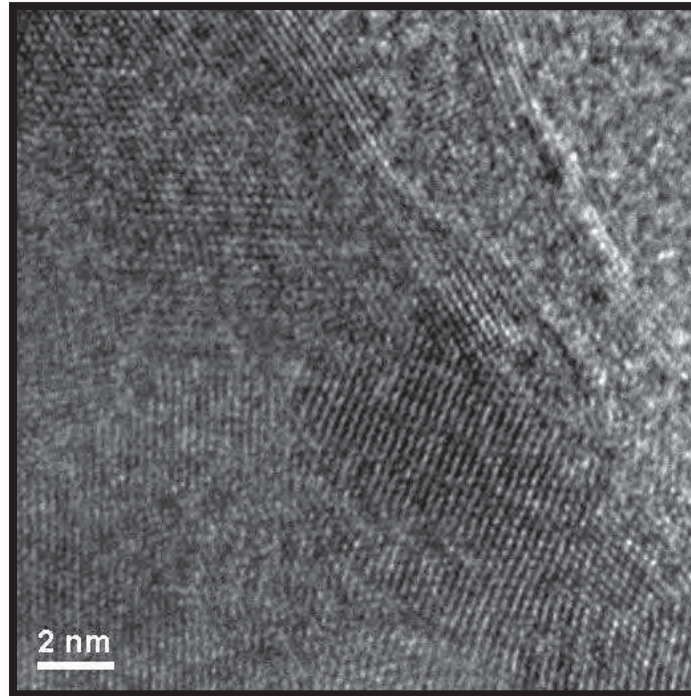
6.3.4. TEM

Figura 6.36. Acercamiento a 2nm.

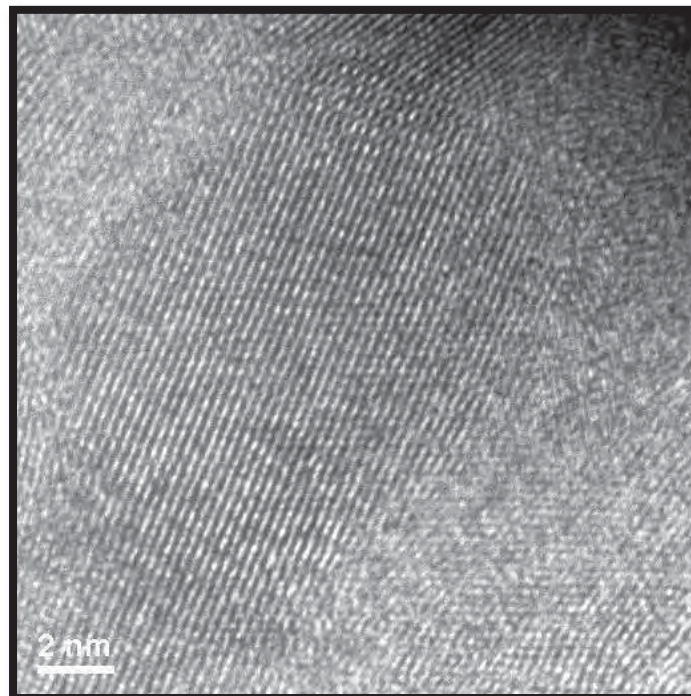


Figura 6.37. Acercamiento a 2nm.

7. DISEÑO TEÓRICO DE PAVIMENTO RÍGIDO

A continuación se presenta el diseño de un kilómetro de pavimento rígido que se encontrará en Terraplén con un espesor de cuatro metros el cual se diseñará empleando el método ASSHTO, el diseño se realizara con cinco tipos de concretos cambiando su Modulo de Ruptura (MR), esto con la finalidad de ver el comportamiento de los diferentes concretos en estudio.

7.1. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO DE DISEÑO

El tramo de diseño seleccionado se encuentra localizado en el kilómetro 23 + 900 al 24 + 900 de la carretera Morelia – Quiroga, la cual está constituida de un cuerpo con un carril por sentido; de los cuales se tomara el carril que va en dirección a Quiroga por considerarse el de mayor tráfico pesado puesto que de los bancos de materiales aledaños salen vehículos cargados hacia esa dirección.

7.1.1. MACROLOCALIZACIÓN



Figura 7.1. Macrolocalización del tramo en estudio

7.1.2. MICROLOCALIZACIÓN



Figura 7.2. Microlocalización del tramo en estudio

7.2. TRÁFICO

Para el análisis del tráfico, se encontró una estación de aforo cercana al tramo en estudio con el nombre de “Lagunillas”, contando con aforos que van desde el año 2003 al 2008 proporcionados por la SCT y se presenta en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Clasificación Vehicular en Porcentaje (%)

AÑO	LUGAR	ESTACIÓN			CLASIFICACIÓN VEHICULAR EN PORCENTAJE								
		KM	TE	SC	TDPA	A	B	C-2	C-3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	OTROS
2003	T. IZQ. LAGUNILLAS	24.90	1	0	5,260	77.50	4.40	8.40	3.50	2.10	2.40	0.10	1.60
2004					5,477	78.20	3.50	8.40	3.70	2.00	1.80	0.00	2.40
2005					5,607	82.90	4.20	5.70	3.20	1.20	1.60	0.10	1.10
2006					5,902	82.10	4.50	5.50	3.20	1.20	1.60	0.00	1.90
2007					5,343	82.20	4.60	5.50	3.00	1.40	1.80	0.20	1.30
2008					6,050	73.60	4.40	6.20	3.20	4.70	2.90	2.10	2.90



CENTRO SCT MICHOACÁN
UNIDAD GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

MICHUO

INVENTARIO DE BANCOS DE MATERIALES 2008

CARRETERA: MORELIA - JIQUILPAN

BOC. NÚM.	NOMBRE	KILOMETRO	DESVIACION	FECHA ESTUDIO	FECHA DE ACT.	TIPO PROP.	TIPO MATERIAL	TRATAMIENTO	VOLUMEN X 1000 m ³	ESPESOR DESPALME (m)	USOS PROB.	USO EXPL.	RESTRICC. ECOLÓG.	ASPEC. ECONÓM.
0002	JOYITAS	014+000	D 0000	ENE-96	MAY-04	PART	TEZONTLE	TPC	0075	00.5	1,2,5,10	NR	NO EXISTEN	ACEP
0003	CERRITOS	016+000	D 0000	FEB-95	AGO-06	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5,10	NR	NO EXISTEN	REC
0004	EL TIGRE	022+000	I 0200	JUN-95	AGO-06	PART	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE
0005	SANTA FE	047+000	D 0000	ABR-95	AGO-06	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	REC
0006	COMALIA	064+000	D 0000	ABR-95	AGO-06	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	REC
0007	LAS CABRAS	094+000	D 0200	MAR-95	ABR-05	EJD	TEZONTLE	TPC	0020	00.8	1,2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE
0008	LOS NÓGALES	122+700	I 0300	JUL-95	MAY-07	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE
0009	CERRO COLORADO	177+000	I 0100	AGO-95	AGO-06	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE
0043	LA BEATILLA	133+100	D 0000	MAY-94	MAY-07	PART	BASALTO	TTC	0050	00.5	6,8,10	NR	NO EXISTEN	CONVE
0053	SAN LORENZO	007+100	I 0300	MAY-94	MAY-04	PART	BASALTO	TTC	0050	00.5	6,8,10	NR	NO EXISTEN	CONVE
0054	TOTALAN	189+000	I 0200	FEB-96	MAY-07	PART	TEZONTLE	TPC	0080	01.0	1,2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE
0059	LA MOJONERA	074+000	I 0500	OCT-95	ABR-05	PART	TEZONTLE	TPC	0080	00.5	1,2,5	NR	NO EXISTEN	ACEP
0103	EL PUEBLITO	005+000	D 0000	JUN-91	MAY-07	EJD	TEZONTLE	TPC	0080	02.0	2,5	NR	NO EXISTEN	CONVE

Figura 7.4. Inventario de Bancos de Materiales 2008 (Fuente www.sct.com)

A continuación se presenta la descripción de las características de ambos bancos de materiales:

Banco de materiales no. 03 “cerritos”

Dicho banco se localiza en el kilómetro **16 + 000** de la carretera Morelia – Quiroga su origen es de tipo volcánico **Tezontle** el cual podemos utilizar para (1,2,5,10) revestimiento, sub-base, base, concreto hidráulico. La distancia de acarreo a nuestro tramo en estudio será de **8.4** km.

Banco de materiales no. 053 “San Lorenzo”

Dicho banco se localiza en el kilómetro **07 + 100** de la carretera Morelia – Quiroga su origen es de tipo **Basáltico** el cual podemos utilizar para (6,8,10) concreto asfáltico, sello, concreto hidráulico. La distancia de acarreo a nuestro tramo en estudio será de **17.3** km.

7.4. CÁLCULO DE LA CATEGORÍA DE TRÁFICO

Debido a que este método nos permite diseñar la estructura del pavimento, con factores como, la acción prevista del tráfico, fundamentalmente con el vehículo más pesado, durante la vida útil del pavimento. Para esto se procedió a calcular con los datos obtenidos de los aforos la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se espera en el carril de proyecto en el primer año de puesta en servicio.

Con los datos de los aforos antes mencionados y mediante la clasificación vehicular, y el TDPA se hizo la transformación de porcentaje de vehículos pesados a número de vehículos pesados y con esto se calculo posteriormente la tasa de crecimiento anual, que es de vital importancia para la elección de la categoría de tráfico; y con esto se estimo el tránsito de vehículos pesados que la carretera tendrá en el primer año de puesta en servicio que se desarrollo con la tasa de crecimiento promedio de los últimos 5 años de acuerdo a lo indicada en el Catalogo Español. A continuación se muestran los datos obtenidos:

Tabla 7.2. Datos estadísticos del TDPA

AÑO	LUGAR	TDPA	% DE VEHÍCULOS PESADOS	TASA CRECIMIENTO VEHÍCULOS PESADOS	TRÁFICO PESADO
2003	T. IZQ. LAGUNILLAS	5,260	23	0	1,183.500
2004		5,477	22	0.8860	1,193.986
2005		5,607	17	-19.6978	958.797
2006		5,902	18	10.1858	1,056.458
2007		5,343	18	-9.9771	951.054
2008		6,050	26	67.9400	1,597.200
Para el año 2009				9.867375	1,754.80

Se evaluó la tasa de crecimiento de acuerdo a los datos que se tienen registrados y obtenemos el promedio, dándonos como resultado: **3.104**

7.5. DISEÑO POR EL MÉTODO DE ASSHTO.

Se empezara a describir a continuación el procedimiento utilizado para la alimentación del programa de pavimentos rígidos en donde el primer paso es insertar el parámetro de confiabilidad.

La confiabilidad está definida como "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación".

Otra manera de entender la confiabilidad, por ejemplo es: si se considera una confiabilidad "R" del 80% estaríamos permitiendo que el 20% de las losas del pavimento alcancen al final de su vida útil una serviciabilidad igual a la serviciabilidad final seleccionada en el diseño.

7.5.1. CONFIABILIDAD RECOMENDADA POR AASHTO *

Clasificación Funcional	Urbano	Rural
Autopistas	85% - 99.9%	80% - 99.9%
Arterias Principales	80% - 99%	75% - 99%
Colectoras	80% - 95%	75% - 95%
Locales	50% - 80%	50% - 80%

Figura 7.5. Clasificación Funcional (Fuente software de Cemex)

7.5.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR RECOMENDADA POR AASHTO

La desviación estándar es la cantidad de error estadístico presente en la ecuación de diseño de AASHTO resultando de la variación en los diferentes parámetros que intervienen en la formulación, tales como: materiales, calidad de construcción, cuantificación del tráfico, variaciones del soporte en el suelo, etc. Para nuestro caso, al tratarse de un pavimento nuevo se eligió el **valor de 0.35**.

Pavimento	So
<u>Nuevo</u>	<u>0.35</u>
Whitetopping	0.39

Figura 7.6. Desviación Estándar recomendada por ASSHTO (Fuente software de Cemex)

Resulta razonable pensar que la desviación estándar "So" sea mayor para el caso de la rehabilitación de un pavimento con una sobre carpeta de concreto hidráulico que cuando se considera un pavimento nuevo.

Esto debido a que la variabilidad de los materiales que forman el cuerpo de soporte seguramente en mayor dado que ya han estado sometidos a condiciones de trabajo y las posibilidades de modelarlo precisamente sin menores.

La desviación estándar está muy relacionada con la confiabilidad "R", dado que entre ambos valores componen el Factor de Seguridad utilizado en la formulación. Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión (S_c) o Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la tensión (aproximadamente 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.

ESPECIFICACIÓN DEL MÓDULO DE RUPTURA RECOMENDADO.

Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener.

En seguida se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio, en donde nosotros optamos por elegir el valor que corresponde a las carreteras de 682.7

Pavimento	Módulo de Rupt	Kg./Cm ²
Autopistas	48.0C	682.7
Carreteras	48.0C	682.7
Zonas industriales	45.0C	640.1
Urbanas principales	45.0C	640.1
Urbanas secundarias	42.0C	597.4

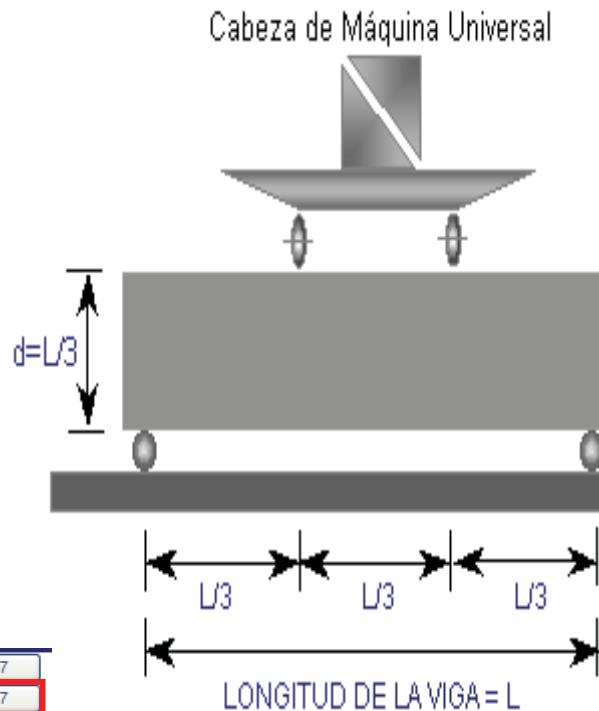


Figura 7.7. Modulo de Ruptura en Vigas (Fuente software de Cemex)

7.5.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El Módulo de Elasticidad del concreto está relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469.

El Módulo de Elasticidad del concreto está relacionado con su Módulo de Ruptura, existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura.

7.5.4. CRITERIOS PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE RUPTURA

$E_c = 6750 * MR$

$E_c = 26454 * MR^{0.77}$

$E_c = a * MR^b$

$E_c = x$

a = 26454

b = 0.770

x = 4000000

Módulo de Elasticidad a utilizar (psi)

4608225

Figura 7.8. Criterios para estimar el MR (Fuente software de Cemex)

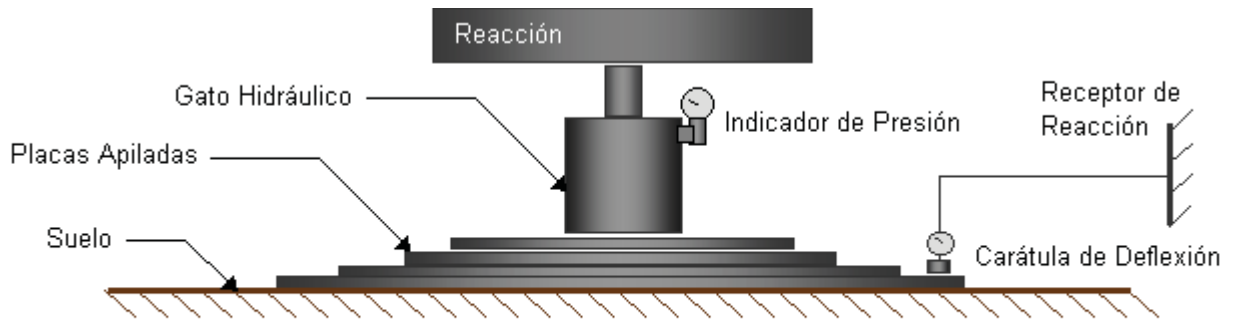
7.5.5. MÓDULO DE REACCIÓN

El módulo de reacción de suelo corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del módulo de reacción (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196.

El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la subbase.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tengan diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, el método AASHTO recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño estructural.

7.5.5.1. PRUEBA DE PLACA



$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

Figura 7.9. Prueba de Placa (Fuente software de Cemex)

7.5.5.2. ESTIMACIONES Y CORRELACIONES DE K

En base a un gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades.

7.5.6. VALORES RECOMENDABLES PARA EL COEFICIENTE DE DRENAJE

Porcentaje del Tiempo que la Estructura del Pavimento esta Expuesta a Niveles de Humedad Cercanos a la Saturación				
Calidad del Drenaje	Menos de 1 %	1 - 5 %	5 - 25 %	Más de 25 %
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.10	1.05	1.00
Regular	1.10	1.05	1.00	0.90
Pobre	1.05	1.00	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	1.00	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Figura 7.10. Valores recomendables para el Coeficiente de Drenaje (Fuente software de Cemex)

7.5.7. SERVICIABILIDAD INICIAL

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente.

La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como los son: el

índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

Índice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

La serviciabilidad inicial es la calificación que tendrá el pavimento inmediatamente después de terminar su construcción.

SERVICIABILIDAD INICIAL RECOMENDADA POR AASHTO

Caso	P _o
Normal	4.5
Mínimo	4.3

Figura 7.11. Serviciabilidad Inicial (Fuente software de Cemex)

En nuestro caso tomaremos el valor mínimo para estar del lado de la seguridad.

7.5.8. SERVICIABILIDAD FINAL.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como los son: el índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

Índice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil.

SERVICIABILIDAD FINAL RECOMENDADA POR AASHTO

Pavimento	Pt
Autopistas	2.5
Carreteras	2.0
Zona Industrial	1.8
Urbana Principal	1.8
Urbana Secundaria	1.5

Figura 7.12. Serviciabilidad Final (Fuente software de Cemex)

De la misma manera en que determino la serviciabilidad inicial se tomara la final por lo tanto tomaremos el valor de 2.0.

7.5.9. DATOS DEL TRÁFICO

Los pavimentos de concreto se diseñan por fatiga (AASHTO) y por fatiga - erosión (PCA). La fatiga la podemos entender como el número de repeticiones ó ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento. En realidad al establecer una vida útil de diseño, en realidad lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un período de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

Es práctica común el determinar o estimar el tráfico que circulará por la vía en el período de un año, siguiendo las recomendaciones para el TPDA. El tráfico estimado para el primer año de servicio se le multiplica por el número de años de vida útil más algunos años adicionales correspondientes a la tasa de crecimiento de la vía.

$$T_{vu} = T_{pa} * FCT$$

donde:

Tvu = Tráfico en la vida útil

Tpa = Tráfico durante el primer año

FCT = Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la Vida Útil.

El período mínimo de vida útil que se debe considerar para un pavimento de concreto es de 20 años.

7.5.9.1. PERÍODOS DE VIDA ÚTIL COMUNES

País ó Región	Vida Útil (años)
México	20 a 25
Estados Unidos	30 a 40
Europa	40 a más de 50

Figura 7.13. Periodos de Vida Útil Comunes (Fuente software de Cemex)

7.5.10. FACTOR DE SENTIDO

El factor de Sentido es un coeficiente que nos sirve para discriminar que porcentaje del TPDA se considera en el sentido de diseño.

Normalmente el valor del TPDA considera la suma del tráfico en ambas direcciones de la vía, excepto para vías que obviamente son de un solo sentido. Es muy importante verificar que al realizarse el estudio de tráfico estas consideraciones se hayan tomado en cuenta, de lo contrario conocer los criterios adoptados para poder estimar adecuadamente el tráfico de diseño.

De acuerdo con el comportamiento general se puede suponer que el 50% del tráfico en vías de dos sentidos circula en cada dirección.

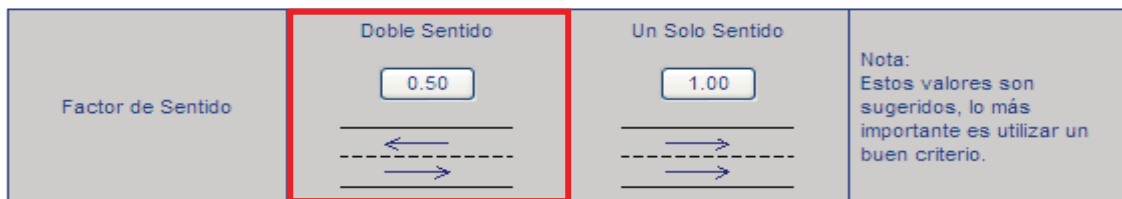


Figura 7.14. Factor de Sentido (Fuente software de Cemex)

7.5.10.1. VALORES COMUNES DE TASAS DE CRECIMIENTO

El programa nos recomienda las siguientes tasas de crecimiento, de los cuales no se utilizara ninguno dado que en un principio se calculo dicha **tasa para el trafico** de nuestro proyecto y que **fue de 3.1%**.

Caso	Tasa de Crecimiento en %
Crecimiento Normal	1% a 3%
Vías Completamente Saturadas	0% a 1%
Con tráfico inducido *	4% a 5%
Alto crecimiento *	mayor al 5%

Figura 7.15. Tasa de Crecimiento (Fuente software de Cemex)

7.5.10.2. FACTOR DE CARRIL

El factor de Carril es un coeficiente que nos permite estimar que tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño.

En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril de diseño.

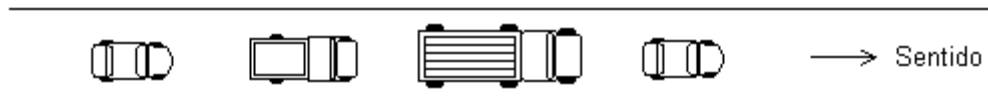


Figura 7.16. Factor de Carril 1 (Fuente software de Cemex)

Una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino: carretero ó urbano, y de que tan saturada esté la vía, pueda ser que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido.

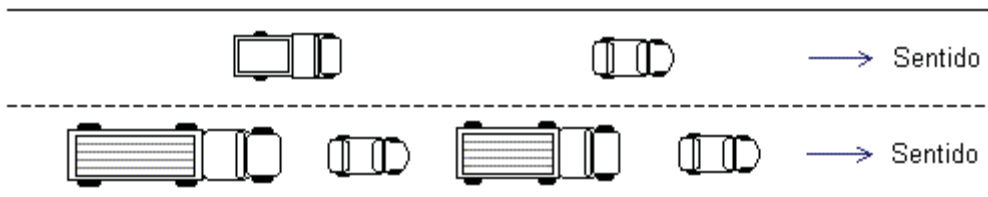


Figura 7.17. Factor de Carril 2 (Fuente software de Cemex)

De manera análoga se comportan los caminos con más de dos carriles de circulación.

El AASHTO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

Número de Carriles	Factor de Carril
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75



Si no contamos con información

Lo más conveniente es contar con información que nos permita establecer con criterio el Factor de Carril. En el caso de que no se tenga la información suficiente para determinar el valor del Factor de Carril, se recomienda utilizar los siguientes valores:

Número de Carriles	Factor de Carril	
1	1.00	Nota: Estos valores son sugeridos, lo más importante es utilizar un buen criterio.
2	0.80	
3	0.70	
4	0.60	

Figura 7.18. Factor de Carril 3 (Fuente software de Cemex) ®

7.5.10.3. DATOS DEL TRÁFICO

TPDA Años %

Factor de Sentido

	Imagen	Descripción	Cargados (Tons)	Vacios (Tons)	%	Cargados %	Vacios %	Total Diario
A2		Automóvil	2	1.6	79.4	100	0	2475.69
B2		Autobús de dos ejes	15.5	10.5	4.3	80	20	134.073
C2		Camión de dos ejes	15.5	6.5	6.6	80	20	205.787
C3		Camión de tres ejes	23.5	8.5	3.3	80	20	102.893
T3-S2		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	41.5	12	2.1	80	20	65.4780
T3-S3		Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes	46	13	2	80	20	62.36
C2-R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	35.5	10.5	1.9	80	20	59.242
T3-S2-R4		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes	77.5	18	.4	80	20	12.4720

Figura 7.19. Datos del Tráfico (Fuente software de Cemex)

7.5.10.4. REPETICIONES DE CARGA

	Imagen	Descripción	Ejes Cargados					Ejes Vacíos				
			Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
A2		Automóvil	451813.79	451813.79				0	0			
A'2		Camión Ligero										
B2		Autobús de dos ejes	19574.804	19574.804				4893.701	4893.701			
B3		Autobús de tres ejes										
B4		Autobús de cuatro ejes										
C2		Camión de dos ejes	30045.048	30045.048				7511.262	7511.262			
C3		Camión de tres ejes	15022.524	15022.524				3755.631	3755.631			
C4		Camión de cuatro ejes										
T2-S1		Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje										
T2-S2		Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes										
T3-S2		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	9559.788	9559.788	9559.788			2389.947	2389.947	2389.947		
T2-S2-R2		Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes										
T3-S1-R2		Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes										
T3-S2-R2		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes										
T3-S2-R3		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes										
T3-S3		Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes	9104.56	9104.56	9104.56			2276.14	2276.14	2276.14		






C2-R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	8649.332	8649.332	8649.332	8649.332		2162.333	2162.333	2162.333	2162.333
C3-R2		Camión de tres ejes con remolque de dos ejes									
C3-R3		Camión de tres ejes con remolque de tres ejes									
T2-S1-R2		Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes									
T3-S2-R4		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes	1820.912	1820.912	1820.912	1820.912	1820.912	455.228	455.228	455.228	455.228

Figura 7.20. Repeticiones de Carga (Fuente software de Cemex)

7.5.1.1. RESULTADOS DEL PROGRAMA PARA DIFERENTES TIPOS DE CONCRETO

Los reportes serán de cada uno de los concretos, obteniendo como objetivo principal el espesor del pavimento rígido, los parámetros que se cambiarán en cada diseño serán Modulo de Ruptura (MR) Y Modulo de Elasticidad (E).

7.5.1.1.1. CONCRETO PARA LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS DE PROYECTO

Este concreto fue diseñado específicamente para las condiciones de diseño para el tipo de carrete requeridas para este proyecto. A continuación se presenta los datos utilizados y el espesor del pavimento rígido.

Datos Generales
Método AASHTO

Confiability	R	<input type="text" value="85"/>	%	<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	
Desviación Estándar	So	<input type="text" value="0.35"/>		<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	ESALS
Módulo de Ruptura	MR	<input type="text" value="682.7"/>	psi	<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	<input checked="" type="radio"/> Calcular a partir del tráfico <input type="button" value="Tráfico"/>
Módulo de Elasticidad	Ec	<input type="text" value="4608225"/>	psi	<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	<input type="radio"/> Introducir ESALS
Módulo de Reacción	K	<input type="text" value="150"/>	pci	<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	
Coefficiente de Drenaje	Cd	<input type="text" value="1.05"/>		<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	
Serviciabilidad Inicial	Po	<input type="text" value="4.3"/>		<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	
Serviciabilidad Final	Pt	<input type="text" value="2"/>		<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	
Coefficiente de Trans. Carga	J	<input type="text" value="2.7"/>		<input style="border: 1px solid gray;" type="button" value="?"/>	

TRANSFERENCIA DE CARGA

Pasajuntas Si No Apoyo Lateral Si No

ESPESOR

Calcular 0 8.81 in. 22.38 cm. ESALS 15316682 ESALS Calculados

Guardar datos del proyecto Reporte

Figura 7.21. Datos generales y Resultados (Fuente software de Cemex)

RESULTADO:

Espesor de Pavimento: **22.38 cm.**

7.5.11.2. DISEÑO ELABORADO CON LA COMPOSICIÓN 6 A

Datos Generales Método AASHTO

Confiability	R	88	%	?
Desviación Estándar	So	0.35		?
Módulo de Ruptura	MR	435.09	psi	?
Módulo de Elasticidad	Ec	29389.66	psi	?
Módulo de Reacción	K	15.0	pci	?
Coefficiente de Drenaje	Cd	1.05		?
Serviciabilidad Inicial	Pi	4.3		?
Serviciabilidad Final	Pf	2		?
Coefficiente de Trans. Carga	J	2.7		?

ESALS

Calcular a partir del tráfico Introducir ESALS

Tráfico

TRANSFERENCIA DE CARGA

Pasajuntas No Sí

Apoyo Lateral No Sí

ESPESOR

Calcular 0 11.14 28.3 ESALS 15810550 ESALS Calculados

Guardar datos del proyecto Reporte

Figura 7.22. Datos generales y Resultados (Fuente software de Cemex)

RESULTADO:

Espesor de Pavimento: **28.3 cm.**

7.5.11.3. DISEÑO ELABORADO CON LA COMPOSICIÓN 6 A'

Datos Generales Método AASHTO

Confiability	R	<input type="text" value="85"/>	%	<input type="button" value="?"/>	ESALS	
Desviación Estándar	So	<input type="text" value="0.35"/>		<input type="button" value="?"/>	<input checked="" type="radio"/> <u>Calcular a partir del tráfico</u>	<input type="button" value="Tráfico"/>
Módulo de Ruptura	MR	<input type="text" value="464.1"/>	psi	<input type="button" value="?"/>	<input type="radio"/> <u>Introducir ESALS</u>	
Módulo de Elasticidad	Ec	<input type="text" value="3132875"/>	psi	<input type="button" value="?"/>		
Módulo de Reacción	K	<input type="text" value="15.0"/>	pci	<input type="button" value="?"/>		
Coefficiente de Drenaje	Cd	<input type="text" value="1.05"/>		<input type="button" value="?"/>	TRANSFERENCIA DE CARGA	
Serviciabilidad Inicial	Po	<input type="text" value="4.3"/>		<input type="button" value="?"/>	Pasajuntas	Apoyo Lateral
Serviciabilidad Final	Pt	<input type="text" value="2"/>		<input type="button" value="?"/>	<input checked="" type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> No
Coefficiente de Trans. Carga	J	<input type="text" value="2.7"/>		<input type="button" value="?"/>		

ESPESOR

Figura 7.23. Datos generales y Resultados (Fuente software de Cemex)

RESULTADO:

Espesor de Pavimento: **27.36 cm.**

7.5.11.4. DISEÑO ELABORADO CON LA COMPOSICIÓN 6 B

Datos Generales Método AASHTO

Confiability	R	<input type="text" value="85"/>	%	<input type="button" value="?"/>	ESALS	
Desviación Estándar	So	<input type="text" value="0.35"/>		<input type="button" value="?"/>	<input checked="" type="radio"/> <u>Calcular a partir del tráfico</u>	<input type="button" value="Tráfico"/>
Módulo de Ruptura	MR	<input type="text" value="913.14"/>	psi	<input type="button" value="?"/>	<input type="radio"/> <u>Introducir ESALS</u>	
Módulo de Elasticidad	Ec	<input type="text" value="2163866"/>	psi	<input type="button" value="?"/>		
Módulo de Reacción	K	<input type="text" value="15.0"/>	pci	<input type="button" value="?"/>		
Coefficiente de Drenaje	Cd	<input type="text" value="1.05"/>		<input type="button" value="?"/>	TRANSFERENCIA DE CARGA	
Serviciabilidad Inicial	Po	<input type="text" value="4.3"/>		<input type="button" value="?"/>	Pasajuntas	Apoyo Lateral
Serviciabilidad Final	Pt	<input type="text" value="2"/>		<input type="button" value="?"/>	<input checked="" type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> No
Coefficiente de Trans. Carga	J	<input type="text" value="2.7"/>		<input type="button" value="?"/>		

ESPESOR

Figura 7.24. Datos generales y Resultados (Fuente software de Cemex)

RESULTADO:

Espesor de Pavimento: **19.13 cm.**

7.5.1 1.5. DISEÑO ELABORADO CON LA COMPOSICIÓN 6 B'

Figura 7.25. Datos generales y Resultados (Fuente software de Cemex)

RESULTADO:

Espesor de Pavimento: **22.15 cm.**

Tabla 7.3. Espesor de Pavimentos con diferentes Concretos

Tipo de concreto		Unidades (MR)			Espesor del Pavimento (cm)
		Mpa	Kg/cm ²	Psi (Lbs/pulg ²)	
Composición 6 (Estándar)	Sin Polvo de Neumático (6 A)	3	30.59	435.09	28.3
	Con polvo de Neumático (6 A')	3.2	32.63	464.1	27.36
Concreto utilizado de acuerdo al tipo de tráfico y a MR propuesto por el diseño ASSHTO					22.38
Composición 8 (Híbrido)	Sin Polvo de Neumático (8 A)	6.3	64.2	913.14	19.13
	Con polvo de Neumático (8 A')	4.8	48.95	696.18	22.15

Como se puede observar en los resultados de la tabla 7.3 con la composición 8 A tenemos un espesor menor en losa de pavimento, tomando en cuenta que es un kilómetro de construcción tendríamos un ahorro de $1,400.3 \text{ m}^3$ si consideramos un ancho efectivo de carriles de 3.66 m c/u, esta comparación se está haciendo con la losa de 22.38 cm diseñada de acuerdo a las especificaciones del tipo de carretera.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se logró realizar la síntesis de cementos híbridos: nano-cemento geopolimérico – cemento portland.
2. Se realizó la caracterización nano, micro y macroestructural de los cementos híbridos obtenidos, logrando observar de manera cualitativa la formación de su nano y micro estructura.
3. A través de los estudios de DRX y FTIR no se logra detectar cambio alguno en las fases cristalinas desarrolladas y en los tipos de enlaces entre sus elementos.

Por Microscopia electrónica de transmisión TEM se logra observar la red nano cristalina de los cementos, sin embargo, se requiere continuar con la caracterización más detallada a nivel nano y micro estructural así como continuar con el desarrollo y evaluación de nuevos nano concretos utilizando nuevas metodologías de diseño que permitan el uso de nanocementos geopoliméricos dentro del cemento portland y de esta manera obtener resultados más precisos y confiables los cuales puedan ser utilizados para diseños de estructuras de concreto hidráulico.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Hurtado S.R., (2008), “*Síntesis y caracterización de recubrimientos con nanocementos para concretos reforzados de alta resistencia*”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, UMSNH.
- [2]. Navarro S. L. M. Martínez M.W y Espinoza M.A., (2009) *Análisis de Materiales segunda edición, Ingeniería civil, UMSNH.*
- [3]. Martínez M.F., (2008), “*Síntesis y caracterización de recubrimientos con nanocementos para concretos reforzados de baja resistencia*”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, UMSNH.
- [4]. Aguilar M.P.R., (2007), “*Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad. Tesis para obtener el título de ingeniero civil en obras civiles, UAC, facultad de ciencias de la ingeniería.*
- [5]. Del Valle Moreno A. Pérez López T. Martínez Madrid M., —*El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*//. IMT, Publicación Técnica No.182, Sanfandila, Qro, 2001
- [6]. Gageda M.Z y Montesinos S., (2004) “*Aplicaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de fractura de una aleación de Cu-10 Al. Estudiantes del programa de doctorado en ciencias de la ingeniería, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile.*
- [7]. Martínez H.E.A., (2011), “**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN NANO, MICRO Y MACRO ESTRUCTURAL DE GEOPOLÍMEROS MULTIFUNCIONALES PARA SU USO EN ULTRA-THIN COMPOSITE PAVEMENTS (ETAPA CERO).**”, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, UMSNH.

10. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

[1 E]. <http://www.monografias.com>

[2 E]. <http://www.craigburton.com>

[3 E]. http://en.wikipedia.org/wiki/Top-down_and_bottom-up_design

[4 E]. http://www.cemexmexico.com/co/co_pa_md.html

[5 E]. <http://www.quiminet.com>