



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

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

**DISEÑO Y ANÁLISIS NANO-ESTRUCTURAL DE MICRO-
CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES MULTIFUNCIONALES BASE
CPC30R-RS Y SU CORRELACIÓN CON SUS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y FÍSICAS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. PEDRO GÓMEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ CARLOS RUBIO AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN; NOVIEMBRE DE 2011



DEDICATORIA

A **mis padres Jerónimo Gómez Pérez y Jerónima Hernández Gómez**, que son los principales integrantes en mi vida, porque ellos me brindaron su cariño, comprensión y educación; además depositaron su confianza en mí, sabían que no les podía fallar. A mis padres les estoy muy agradecido por siempre y no tendría forma de cómo pagarles por todo lo que han hecho por mí.

A **mis hermanos** por su apoyo incondicional

A **mi compañero y amigo Sergio Medina Olvera** por su apoyo y amistad ofrecido el cual lo respeto y lo admiro. También por haberme abierto las puertas de su casa y además estoy agradecido con su familia por ser tan generosos y amables conmigo.

A **mis compañeros y profesores del posgrado**, por su amistad y conocimiento brindado, el cual me fortaleció más mis conocimientos.

A **mi novia Reyna Martínez Nogales** por haberme acompañado a lo largo de estos años y ha sido parte fundamental en mi vida, además de ser una gran persona la cual quiero y admiro demasiado, le estaré eternamente agradecido.

A mis compañeros de **la sección de innovación de materiales para la construcción** del laboratorio de la facultad de ingeniería civil.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido lograr una meta más en mi vida y por la buena salud que me ha dado, que es lo más fundamental en la vida de todos los seres vivos.

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y al **posgrado de la facultad de Ingeniería Civil**, a través del laboratorio de materiales, y en especial a la **sección de investigación e innovación tecnológica en materiales de construcción** por sus instalaciones disponibles para la realización de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico (BECA) brindado a lo largo del curso en el posgrado, el cual fue fundamental para poder concluirlo.

Al Instituto de Física y Matemáticas (IFM) por sus instalaciones y equipo brindado para desarrollar parte de la investigación.

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM) por su infraestructura y equipo ofrecido para desarrollar gran parte de esta investigación.

Al Dr. José Carlos Rubio Avalos, por sus asesorías a lo largo del desarrollo de esta investigación, siendo él la parte medular. Además con el aporte de sus conocimientos como investigador se pudo desarrollar con éxito esta investigación.

Al Dr. Salomón Eduardo Borjas García por sus asesorías y apoyo técnico para utilizar el equipo brindado en las instalaciones del Instituto de Física y Matemáticas.

Al Dr. Ariosto Medina Flores por su apoyo en la interpretación de datos en la parte nano-estructural.

A **SIALATO S. A. de C. V.** por facilitarnos el acceso a sus instalaciones e infraestructura brindado para las evaluaciones complementarias y parte fundamental de la investigación.

A la **Dr. Angélica del Valle Moreno** por su apoyo incondicional brindado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	19
2. ESTADO DEL ARTE	21
2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.2. CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	21
2.2.1. ANTECEDENTES	21
2.2.2. DEFINICIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	22
2.2.3. MÉTODOS DE DISEÑO	24
2.2.3.1. MÉTODO DE OKAMURA	27
2.2.3.2. MODIFICACIONES Y ADAPTACIONES DEL MÉTODO DE OKAMURA ET AL	28
2.2.3.3. MÉTODO DEL JSCE	29
2.2.3.4. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN UPC	29
2.2.3.5. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN ACI	31
2.2.4. MATERIALES CONSTITUYENTES	32
2.2.4.1. CEMENTO	32
2.2.4.2. AGUA	36
2.2.4.3. AGREGADOS	37
2.2.4.3.1. TIPOS DE AGREGADOS	38
2.2.4.4. MATERIA PRIMA	40
2.2.4.5. ADITIVOS PARA CONCRETO	55
2.2.5. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	60
2.2.5.1. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO (Slump Flow) y T50	61
2.2.5.2. RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN	64
2.2.5.3. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO CON EL ANILLO JAPONÉS	66
2.2.5.4. ENSAYO DE LA CAJA EN L	67
2.2.5.5. ENSAYO DEL EMBUDO EN V	69
2.2.6. DESIGNACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	71
2.2.7. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	73

2.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	76
2.3.1. DENSIDAD Y ABSORCIÓN.....	76
2.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	79
2.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	81
2.3.4. RELACIÓN DE POISSON	88
2.3.5. INDENTACIÓN VICKERS.....	90
2.4. TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE LA MICRO Y NANO-ESTRUCTURA DEL MAC.....	95
2.4.1. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, MEB (SEM).....	95
2.4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX	100
2.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, TEM.....	104
2.4.4. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, EIS, RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA	107
3. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA INNOVACIÓN DE LOS MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	114
3.1. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC.....	115
3.2. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (PRIMERA ETAPA).....	115
3.2.1. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (SEGUNDA ETAPA).....	120
3.2.2. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (TERCERA ETAPA).....	121
4. DISEÑO DE MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES	125
4.1. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO	125
4.2. DISEÑO FINAL DEL MORTERO AUTOCOMPACTABLE CON GRANULOMETRÍA SELECCIONADA.....	133
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.....	136
5.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.....	136
5.2. DENSIDAD Y ABSORCIÓN.....	139
5.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD... ..	143
5.4. INDENTACIÓN VICKERS.....	154
5.5. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL MAC.....	193
5.5.1. SEM.....	193

5.6. CARACTERIZACIÓN NANO-ESTRUCTURAL DEL MAC	231
5.6.1. TEM	231
5.7. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL MAC	242
5.7.1. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA (IES)	242
6. CONCLUSIONES	267
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	269
8. ANEXOS	274
8.1. Ficha técnica del aditivo hiperfluidificante PLASTOL 4000	274
8.2. DISEÑO DE PAVIMENTO CON EL MÉTODO DE LA PCA (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION).....	276
8.2.1. UBICACIÓN DEL TRAMO	276
8.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO	277
8.2.3. MÉTODO PCA	277
8.2.3.1. DISEÑO CON UN CONCRETO NORMAL	281
8.2.3.2. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-1	285
8.2.3.3. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-6	289
8.2.3.4. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-7	292
8.2.3.5. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-8	296

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2. 1. Mecanismo de bloqueo. (Núñez, 2009).....	23
Figura 2.2. 2 Metodología general para la obtención de un concreto autocompactable. (Fava, Agosto 2003).....	25
Figura 2.2. 3. Esquema del método de dosificación UPC. (Núñez, 2009)	30
Figura 2.2. 4. Progreso de la hidratación de una partícula de cemento, Brian Marroquin, 2008). ...	34
Figura 2.2. 5. Clasificación de la marmolina	41
Figura 2.2. 6. Oxido de hierro y su estructura, (http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xidos_de_hierro , fecha de consulta 24/10/2011).	42
Figura 2.2. 7. a) Carbón activado; nanoporos de un carbón activado vistas en un microscopio electrónico de barrido, (http://es.wikipedia.org/wiki/Carb%C3%B3n_activado)	46
Figura 2.2. 8. Abandono de neumáticos usados, denominado Panteón de llantas, (http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/ fecha de consulta 23/10/2011)..	47
Figura 2.2. 9. Tratamiento inadecuado de los neumáticos, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)	48
Figura 2.2. 10. Grafico del destino final de los neumáticos usados en México, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)	48
Figura 2.2. 11. Estructura de un neumático, (http://vehiculosautomoviles.blogspot.com/2010/02/estructura-de-un-neumatico.html .).....	49
Figura 2.2. 12. a) Estructura del caucho natural; b) Segmento de cadena de polímero de caucho natural.....	50
Figura 2.2. 13. Ilustración esquemática del vulcanizado del caucho; a) Cadena de cis poli (1.4-isopreno) antes del entrecruzamiento, b) Después del entrecruzamiento con azufre.....	50
Figura 2.2. 14. Proceso de trituración del neumático usado.....	52
Figura 2.2. 15. Tipos de perlitas.....	54
Figura 2.2. 16. a) Efecto de adsorción sobre las partículas de cemento; b) Crecimiento de las cadenas haciendo efecto de separación en las partículas de cemento. (http://www.youtube.com/watch?v=CSZxjQwDKF0&feature=related).....	59
Figura 2.2. 17. Dimensiones y montaje del ensayo de escurrimiento, (Fava, Agosto 2003)	61
Figura 2.2. 18. Aspecto de un concreto autocompactable donde se ha producido segregación del agregado grueso en el centro y de pérdida de agua en el frente de avance del ensayo, (Fava, Agosto 2003)	62
Figura 2.2. 19. a) Concreto autocompactable estable (VSI=0); b) Concreto autocompactable inestable (VSI=3), (Fava, Agosto 2003)	63
Figura 2.2. 20. Columna de segregación (ASTM C1610) y su plato recolector, (Parapinski dos Santos, Junio 2010).	64
Figura 2.2. 21. Dimensiones básicas y montaje del ensayo de escurrimiento con anillo japonés, (Núñez, 2009).....	66
Figura 2.2. 22. Configuración de la caja en L: a) Vista general del molde; b) Vista en planta; c) Disposición de las barras para un tamaño máximo de agregados ≤ 20 mm; y d) Disposición de las barras para un tamaño máximo de agregado > 20 mm, (Núñez, 2009).	68
Figura 2.2. 23. Determinación de las alturas H1 y H2	68
Figura 2.2. 24. Dimensiones del embudo en V, (Fava, Agosto 2009).	69
Figura 2.2. 25. Clasificación propuesta por Walraven, (Núñez, 2009)	72
Figura 2.2. 26. Puente colgante Akashi Kaikyo, Japón, (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/Akashi_Bridge.JPG , fecha de consulta 09/08/2011).	73

Figura 2.2. 27. Estanque pretensado para Gas licuado de Osaka Gas Company en Japón, (http://inciarco.com/foros//showthread.php?p=22358&page=2 fecha de consulta 09/08/2011).	74
Figura 2.2. 28. a) Almacenamiento de las losas prefabricadas con concreto autocompactable para su uso en la construcción del puente de Nebraska Skyline. b) Vigas prefabricadas con concreto autocompactable, (Federal highway administration 2005, fecha de consulta 09/08/2011).	75
Figura 2.2. 29. Puente Skyline hecha con concreto autocompactable, (U:S Department of transportation. Federal Highway Administration. Publication number FHWA-HRT-06-020, fecha de consulta 09/08/2011)	76
Figura 2.3. 1. a) Probeta graduada de 1000 ml; b) Picnómetro con sifón de 15cm de diámetro con 30cm de alto y de 10cm de diámetro con 30cm de alto (http://www.elvec.com.mx/pages/agregados.html , fecha de consulta 08/09/2011).	77
Figura 2.3. 2. Tipos de fallas en un concreto cilíndrico.	80
Figura 2.3. 3. Relaciones de curva esfuerzo-deformación de: pasta de cemento, agregado grueso y un concreto, (Brown, Tia & Liu, May 2001).	81
Figura 2.3. 4. Falla en compresión de un cilindro de concreto, (González Cuevas, 1996).	82
Figura 2.3. 5. Esquema de un cilindro sujeto a carga axial, (González Cuevas, 1996).	83
Figura 2.3. 6. Curva esfuerzo-deformación en compresión axial de un espécimen sujeto a carga de corta duración, (González Cuevas, 1996).	83
Figura 2.3. 7. Efecto de la edad en las curvas carga-deformación, (González Cuevas, 1996).	84
Figura 2.3. 8. Variación de la resistencia con la edad utilizando cementos diferentes, (González Cuevas, 1996).	85
Figura 2.3. 9. Variación de la resistencia con diferentes relaciones de A/C, (González Cuevas, 1996).	85
Figura 2.3. 10. Forma esquemática de la relación de Poisson. (http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson , fecha de consulta 28/07/2011).	88
Figura 2.3. 11. Adecuado montaje de las bandas extensométricas (9)	89
Figura 2.3. 12. Geometría del indentador esférico, (Botero, Diciembre 2005)	91
Figura 2.3. 13. Geometría del indentador afilado, (Botero, Diciembre 2005)	91
Figura 2.3. 14. Ensayo de indentación Vickers, (Meza, Chávez, & Vélez, Diciembre 2005).	92
Figura 2.3. 15. Fenómenos de a) Apilamiento b) Hundimiento, en materiales indentados, con el indentador Vickers, (Dambaziki, Febrero 2005).	93
Figura 2.3. 16. Sistema de grietas creado por un indentador Vickers, (Caño, 1993).	93
Figura 2.3. 17. Esquema de la indentación de un material completamente elástico con un indentador Vickers, a) curva de carga y descarga y b) efectos de carga y descarga sobre el material, (Botero, Diciembre 2005).	94
Figura 2.3. 18. Esquema de la indentación de un material completamente plástico con un indentador Vickers, a) curva de carga y descarga y b) efectos de carga y descarga sobre el material.	94
Figura 2.3. 19. Esquema de indentación de un material elasto-plástico, a) curva de carga descarga, b) efectos de carga y descarga sobre el material.	95
Figura 2.4. 1. Incidencia y efectos del haz de electrones.	97
Figura 2.4. 2. a) Diagrama de un microscopio electrónico de barrido cortesía de la universidad de Iowa, USA. b) Microscopio electrónica de barrido, (http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm , fecha de consulta 20/08/2011).	98
Figura 2.4. 3. Micrografías en la pasta de cemento mostrando la forma hexagonal del hidróxido de calcio y las agujas de etringita, (Stutzman, Noviembre 2000).	99

Figura 2.4. 4. Micrografía en una pasta de cemento a edades tempranas de hidratación. (Stutzman, Noviembre 2000).	100
Figura 2.4. 5. Diagrama esquemático de la sección transversal de un tubo de rayos X de filamento sellado, (Smith, 1992).	100
Figura 2.4. 6. Emisión del espectro de rayos X cuando el metal molibdeno se utiliza como metal diana en un tubo de rayos X operado a 35 kV, (Smith, 1992).	101
Figura 2.4. 7. Niveles de energía de los electrones en el molibdeno mostrando el origen de la radiación K_{α} y K_{β} , (Smith, 1992).	101
Figura 2.4. 8. Reflexión de un haz de rayos X por los planos (hkl) del cristal. (a) Para ángulos arbitrarios de incidencia no se produce haz reflejado alguno. (b) Para el ángulo de Bragg, θ , los rayos reflejados están en fase y se refuerzan mutuamente. (c) Similar a (b) con la excepción de que la representación de la onda ha sido suprimida, (Smith, 1992).	102
Figura 2.4. 9. Difractómetro de polvo con geometría de Bragg-Brentano (11), (http://investigacion.us.es/scisi/sgi/servicios/area-de-rayosx/equipamiento , fecha de consulta 03/08/2011).	104
Figura 2.4. 10. a) Esquema de un microscopio electrónico de transmisión (http://imagenologia-siram607.blogspot.com/2011/04/microscopia-electronica-de-transmision.html , fecha de consulta 03/10/2011). b) Microscopio electrónico de transmisión Samsung TECNAI.	105
Figura 2.4. 11. Esquema del método de las propiedades dieléctricas de un material.	107
Figura 2.4. 12. Espectroscopia de impedancia de un cemento portland ordinario en función de su tiempo de hidratación.	110
Figura 2.4. 13. Modelo de circuito equivalente para las pastas de cemento.	111
Figura 2.4. 14. Respuesta de impedancia de una pasta de cemento a un rango de 1Hz-65kHz.	113
Figura 3.2. 1. Pesado de todos los agregados.	116
Figura 3.2. 2. Proceso de mezclado de todos los agregados.	116
Figura 3.2. 3. Proceso de colocación del concreto en los moldes metálicos de 5x5x5 cm.	117
Figura 3.2. 4. Desmoldado de los cubos y curado de los mismos.	117
Figura 3.2. 5. Imágenes del proceso de ensaye en un cubo de 5x5x5 en la maquina Tinius Olsen.	117
Figura 3.2. 6. Grafica de los resultados a compresión	119
Figura 3.2. 7. Grafica de resultados a compresión.	121
Figura 3.2. 8. Grafica comparativa de resistencias a compresión a diferentes edades.	123
Figura 3.2. 9. Grafica de resistencia máxima a compresión en cada composición.	124
Figura 4.1. 1. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo I.	125
Figura 4.1. 2. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo II.	126
Figura 4.1. 3. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo especial.	127
Figura 4.1. 4. Grafica de la granulometría de la marmolina del tipo Grano 1	127
Figura 4.1. 5. Grafica de la granulometría de la marmolina del tipo Grano 2.	128
Figura 4.1. 6. Grafica de la granulometría final junto con la granulometría especificada por la norma ASTM C33-03.	129
Figura 4.1. 7. Analizador de partículas láser COULTER modelo LS100Q	130
Figura 4.1. 8. Distribución del tamaño de partícula del CPC30R-RS.	130
Figura 4.1. 9. Distribución de tamaño de partícula del oxido de hierro.	131
Figura 4.1. 10. Distribución del tamaño de partícula del Carbón.	132
Figura 4.2. 1. Engrasado de los moldes a utilizar	134

Figura 4.2. 2. Pesado de los agregados a utilizar, dependiendo del tipo de composición	134
Figura 4.2. 3. Proceso de mezclado de cada agregado	135
Figura 4.2. 4. Proceso de ensayo de extensibilidad con el J-Ring	135
Figura 4.2. 5. Proceso de colado del concreto a los moldes.	135
Figura 4.2. 6. Desmoldado y curado de los especímenes.	135
Figura 5.1. 1. Colocación de la placa metálica y su nivelado.	136
Figura 5.1. 2. Colocación del anillo japonés y del cono de Abrams en la parte central de la placa.	137
Figura 5.1. 3. Llenado del cono de Abrams.	137
Figura 5.1. 4. Enrasado del concreto con la varilla punta de bala liso.....	137
Figura 5.1. 5. Vaciado del cono de Abrams.	137
Figura 5.1. 6. Medición de la extensibilidad.	138
Figura 5.2. 1. Retiro de las muestras de la tina de curado y su secado superficial.....	140
Figura 5.2. 2. Pesado de la muestra saturada, secado superficialmente, y la colocación de la probeta graduada a la salida del sifón del picnómetro	140
Figura 5.2. 3. Colocación de la muestra en el picnómetro.....	140
Figura 5.2. 4. Registro de la cantidad de agua desalojada y la colocación de las muestras al horno para su secado.....	140
Figura 5.2. 5. Grafica de las densidades de cada composición.	141
Figura 5.2. 6. Grafica de los porcentajes de absorción de cada composición.	142
Figura 5.3. 1. Máquina para ensayo a compresión.....	143
Figura 5.3. 2. Imágenes de la muestra M-1 antes y después del ensayo a compresión.....	144
Figura 5.3. 3. Imágenes de la muestra M-2 antes y después del ensayo a compresión.....	145
Figura 5.3. 4. Imágenes de la muestra M-3 antes y después del ensayo a compresión.....	146
Figura 5.3. 5. Imágenes de la muestra M-4 antes y después del ensayo a compresión.....	147
Figura 5.3. 6. Imágenes de la muestra M-5 antes y después del ensayo a compresión.....	148
Figura 5.3. 7. Imágenes de la muestra M-6 antes y después del ensayo a compresión.....	149
Figura 5.3. 8. Imágenes de la muestra M-7 antes y después del ensayo a compresión.....	150
Figura 5.3. 9. Imágenes de la muestra M-8 antes y después del ensayo a compresión.....	151
Figura 5.3. 10. Grafico de las resistencias a compresión de las muestras	152
Figura 5.4. 1. Lijado de las muestras para un acabado espejo.	154
Figura 5.4. 2. Indentador Vickers.	154
Figura 5.4. 3. a) y b) Imágenes de la muestra M-1 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-1.....	157
Figura 5.4. 4. a) y b) Imágenes de la muestra M-2 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-2.....	159
Figura 5.4. 5. a) y b) Imágenes de la muestra M-3 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-3.....	161
Figura 5.4. 6. a) y b) Imágenes de la muestra M-4 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-4.....	163
Figura 5.4. 7. a) y b) Imágenes de la muestra M-5 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-5.....	165
Figura 5.4. 8. a) y b) Imágenes de la muestra M-6 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-6.....	167

Figura 5.4. 9. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-1.....	168
Figura 5.4. 10. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-2.	168
Figura 5.4. 11. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-3.	169
Figura 5.4. 12. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-4.	170
Figura 5.4. 13. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-5.	170
Figura 5.4. 14. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-6.	171
Figura 5.4. 15. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en el agregado de la M-6.	171
Figura 5.4. 16. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 10kgf (98.07N) en el agregado de la M-6.	171
Figura 5.4. 17. Grafica comparativa de durezas Vickers en el agregado de cada una de las muestras a diferentes cargas.	172
Figura 5.4. 18. a) y b) Imágenes de la muestra M-7 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-7.....	180
Figura 5.4. 19. a) y b) Imágenes de la muestra M-8 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-8.....	182
Figura 5.4. 20. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-1.....	183
Figura 5.4. 21. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-2.....	183
Figura 5.4. 22. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-3.....	184
Figura 5.4. 23. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-4.....	185
Figura 5.4. 24. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-5.....	185
Figura 5.4. 25. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-6.....	186
Figura 5.4. 26. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-6.....	186
Figura 5.4. 27. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 10kgf (98.07N) en la matriz de la M-6.....	186
Figura 5.4. 28. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-7.....	187
Figura 5.4. 29. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-8.....	188
Figura 5.4. 30. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-8.....	188
Figura 5.4. 31. Grafica comparativa de las durezas Vickers en la matriz de cada una de las muestras a diferentes cargas.	188
Figura 5.4. 32. Cristal de 9mm de espesor y piso cerámico de 5mm de espesor.	189

Figura 5.4. 33. Imagen de las huellas del indentador sobre el vidrio, con cargas de 1kgf (9.897N) y 5kgf (49.03N).....	190
Figura 5.4. 34. Imagen de las indentaciones sobre el cristal con 10kgf (98.07N).	190
Figura 5.4. 35. Imagen de las huellas sobre el piso cerámico a una carga de 1kgf (9.807N).....	190
Figura 5.4. 36. Imagen de las huellas sobre el piso cerámico a una carga de 5kgf (49.03N).....	191
Figura 5.4. 37. Grafica comparativa de los resultados de las indentaciones sobre la matriz del MAC con los del cristal y del piso cerámico.	191
Figura 5.4. 38. Grafica comparativa de los resultados de las indentaciones sobre el agregado del MAC con los del cristal y del piso cerámico.	192
Figura 5.4. 39. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-8 a una magnificación de 100X	230
Figura 5.5. 1. Elaboración de las muestras en cajas de petri.	193
Figura 5.5. 2. Colocación de las muestras en el horno para su secado.	193
Figura 5.5. 3. Labrado de los cubitos y la selección de la mejor muestra.	193
Figura 5.5. 4. Saturación de las muestras en alcohol.	194
Figura 5.5. 5. Imagen del equipo metalizador DENTON VACUUM modelo DESK II y la colocación de las muestras en el metalizador.....	194
Figura 5.5. 6. Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6400.....	195
Figura 5.5. 7. Unidad de microanálisis BRUCKER X FLASH-4010, resolución 133eV.....	195
Figura 5.5. 8. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 20X.	196
Figura 5.5. 9. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 100X.	197
Figura 5.5. 10. Micrografía de la muestra M-1 a 500X de magnificación.	197
Figura 5.5. 11. Mapeo químico de la zona de interface Matriz-Agregado de la muestra M-1 a una magnificación de 100X; a), b), c), d) y e).	198
Figura 5.5. 12. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-1 a una magnificación de 500X.	199
Figura 5.5. 13. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 2500X.	200
Figura 5.5. 14. Micrografías de la muestra M-1 sobre cristales de gel de Tobermorita tomadas a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).	201
Figura 5.5. 15. Micrografía de la muestra M-2 a 20X de magnificación.	202
Figura 5.5. 16. Micrografía de la muestra M-2 a una magnificación de 100X.	202
Figura 5.5. 17. Mapeo químico de la muestra M-2 a una magnificación de 100X; a) b), c) d), e) y f).	203
Figura 5.5. 18. Mapeo químico de la muestra M-2, a una magnificación de 500X; a), b), c), d), e) y f).	204
Figura 5.5. 19. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-2 a una magnificación de 500X.	205
Figura 5.5. 20. Micrografía de la muestra M-3 a una magnificación de 20X.	206
Figura 5.5. 21. Micrografía de un poro en la muestra M-3.....	207
Figura 5.5. 22. Mapeo de la muestra M-3 a una magnificación de 20X; a), b), c), d), e) y f).	208
Figura 5.5. 23. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-3 a una magnificación de 100X	209
Figura 5.5. 24. Micrografía sobre la partícula de carbón a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).	210
Figura 5.5. 25. Micrografía de los poros de la partícula de carbón a diferentes magnificaciones; a) y b).	210
Figura 5.5. 26. Micrografía de la muestra M-4 a una magnificación de 20X.	211

Figura 5.5. 27. Micrografías sobre una partícula de carbón en la muestra M-4 a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).	212
Figura 5.5. 28. Micrografías sobre la muestra M-5 a diferentes magnificaciones; a) y b)	213
Figura 5.5. 29. Micrografías sobre la muestra M-5 en la zona de interface y en una partícula de neumático; a), b), c) y d).	214
Figura 5.5. 30. Mapeo químico sobre la muestra M-5 a una magnificación de 500X, a), b), c), d), e) y f).....	216
Figura 5.5. 31. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-5 a una magnificación de 500X	217
Figura 5.5. 32. Micrografía sobre la muestra M-6 a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).	218
Figura 5.5. 33. Mapeo químico sobre la muestra M-6 a una magnificación de 500X, a), b), c), d), e), f) y g).	220
Figura 5.5. 34. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-6 a una magnificación de 500X	221
Figura 5.5. 35. Micrografía sobre la muestra M-7 a diferentes magnificaciones; a), b), c), d) y e). 222	
Figura 5.5. 36. Mapeo químico sobre la muestra M-7 a una magnificación de 100X, a), b), c), d), e), f) y g).	224
Figura 5.5. 37. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-7 a una magnificación de 100X	225
Figura 5.5. 38. Micrografia sobre la muestra M-8 a diferentes magnificaciones; a), b), c), d), e), f), g), h), i).	227
Figura 5.5. 39. Mapeo químico sobre la muestra M-8 a una magnificación de 100X, a), b), c), d), e), f), g), h), i).	229
Figura 5.6. 1. Microscopio TEM PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20.	231
Figura 5.6. 2. Pastillas de cemento hidratado fresco colocado en cajas de petri.	232
Figura 5.6. 3. Colocación de las pastillas en el horno para su secado.	232
Figura 5.6. 4. Molido del cemento hidratado hasta convertirlo en polvo.....	232
Figura 5.6. 5. Transformada Rápida de Fourier del cemento anhidro zona 1	233
Figura 5.6. 6. Imágenes obtenidas a una amplificación de 5nm en campo claro; a) y b).....	233
Figura 5.6. 7. Grafica del análisis químico realizado en el cemento anhidro	234
Figura 5.6. 8. Transformada Rápida de Fourier del cemento anhidro zona 2	235
Figura 5.6. 9. Imágenes tomadas del cemento anhidro en la zona 2 a diferentes amplificaciones en campo claro; a), b), c) y d).	236
Figura 5.6. 10. Grafica del análisis químico realizado en el cemento anhidro en la zona 2.	236
Figura 5.6. 11. Transformada Rápida de Fourier del cemento hidratado	237
Figura 5.6. 12. Imágenes tomadas del cemento hidratado en la zona 1 a diferentes amplificaciones en campo claro y oscuro; a), b), c) y d).....	238
Figura 5.6. 13. Grafica del análisis químico realizado en el cemento hidratado.	239
Figura 5.6. 14. Transformada rápida de Fourier del cemento hidratado en la zona 2.....	240
Figura 5.6. 15. Imagen tomada en el cemento hidratado a diferentes amplificaciones; a) y b)	240
Figura 5.6. 16. Grafica del análisis químico realizado en el cemento hidratado.	241
Figura 5.7. 1. Pastillas circulares elaboradas para la caracterización eléctrica.	242
Figura 5.7. 2. Preparación y acabado final de las muestras antes del ensayo.	243
Figura 5.7. 3. Equipo utilizado para la caracterización eléctrica de las muestras.	243
Figura 5.7. 4. Porta muestras modelo 1296-2A para especímenes sólidos	244
Figura 5.7. 5. Arreglo de los electrodos en el porta muestras 1296-2A.....	244

Figura 5.7. 6. Nyquist plot de la muestra M-1L	247
Figura 5.7. 7. Nyquist plot de la muestra M-1.	249
Figura 5.7. 8. Nyquist plot de la muestra M-2.	251
Figura 5.7. 9. Nyquist plot de la muestra M-2L.	253
Figura 5.7. 10. Nyquist plot de la muestra M-3L.	255
Figura 5.7. 11. Nyquist plot de la muestra M-4.	257
Figura 5.7. 12. Nyquist plot de la muestra M-4L.	259
Figura 5.7. 13. Nyquist plot de la muestra M-7.	261
Figura 5.7. 14. Nyquist plot de la muestra M-7.	263
Figura 5.7. 15. Comparación de resistencias de las muestras M-1, M-1L, M-2L, M-3 y M-4L, en el Nyquist plot.....	265
Figura 5.7. 16. Comparación de resistencias de las muestras M-1, M-2, M-4, M-7 y M-8, en el Nyquist plot.....	266
Figura 8.1. 1. Ficha técnica del Aditivo	274
Figura 8.1. 2. Ficha técnica del aditivo, continuación	275
Figura 8.2. 1. Macro localización del tramo en estudio. Fuente Google EARTH	276
Figura 8.2. 2. Micro localización del tramo en estudio.	276
Figura 8.2. 3. Análisis de fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con ó sin apoyo lateral) (13).....	279
Figura 8.2. 4. Análisis de erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión con apoyo lateral.	280
Figura 8.2. 5. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.	282
Figura 8.2. 6. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.	283
Figura 8.2. 7. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.	283
Figura 8.2. 8. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.	284
Figura 8.2. 9. Sección calculada para un concreto estándar.	285
Figura 8.2. 10. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.	286
Figura 8.2. 11. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.	286
Figura 8.2. 12. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.	287
Figura 8.2. 13. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.	287
Figura 8.2. 14. Sección calculada para un MAC M-1.....	288
Figura 8.2. 15. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.	289
Figura 8.2. 16. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.	290
Figura 8.2. 17. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.	290
Figura 8.2. 18. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.	291
Figura 8.2. 19. Sección calculada para un MAC M-6.....	292
Figura 8.2. 20. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.	293
Figura 8.2. 21. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.	293
Figura 8.2. 22. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.	294
Figura 8.2. 23. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.	294
Figura 8.2. 24. Sección calculada para un MAC M-7.....	295
Figura 8.2. 25. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.	296
Figura 8.2. 26. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.	297
Figura 8.2. 27. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.	297
Figura 8.2. 28. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.	298
Figura 8.2. 29. Sección calculada para un MAC M-8.....	299

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2. 1. Tabla de resumen de los métodos de dosificación propuestos. (Santos, Junio 2010).	29
Tabla 2.2. 2. Sugerencias del contenido de finos de la ACI para 1m ³ de concreto. (Núñez, 2009).	31
Tabla 2.2. 3. Valores recomendados para la dosificación de un concreto autocompactable según la ACI, (Núñez, 2009).	31
Tabla 2.2. 4. Componentes básicos del cemento portland, (Smith, 1992).	32
Tabla 2.2. 5. Composiciones de compuestos típicos de cemento portland, (Smith, 1992)	33
Tabla 2.2. 6. Niveles tolerables de concentración de impurezas en el agua para mezclas, (Sidney & Young).	36
Tabla 2.2. 7. Granulometría del filler mineral, (Núñez, 2009)	40
Tabla 2.2. 8. Composición química de la Marmolina, (Imeco, S.A. Canteras, 2009).	40
Tabla 2.2. 9. Tipos de elastómeros, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)	49
Tabla 2.2. 10. Recomendación sobre contenido de aire en el concreto	57
Tabla 2.2. 11. Clasificación del tipo de concreto autocompactable según la extensibilidad alcanzada, (The European Guidelines for Self Compacting Concrete, May 2005)	64
Tabla 2.2. 12. Clasificación del concreto autocompactable según el porcentaje de segregación, (The European Guidelines for Self Compacting concrete Specification, May 2005)	65
Tabla 2.2. 13. Clases de habilidad de paso, (Núñez, 2009)	69
Tabla 2.2. 14. Clases de viscosidad medida con el embudo, (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, May 2005).	70
Tabla 2.2. 15. Clasificación de autocompactabilidad en función del ensayo de escurrimiento (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009).	71
Tabla 2.2. 16. Clasificación de autocompactabilidad en función del ensayo del embudo V (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009)	71
Tabla 2.2. 17. Clasificación de autocompactabilidad en función de la resistencia al bloqueo (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009).	72
Tabla 2.3. 1. Clasificación de densidades de los agregados en los concretos y sus aplicaciones típicas.	77
Tabla 2.3. 2. Clasificación del tipo de absorción, (Navarro Sánchez, Martínez Molina, 2000)	78
Tabla 3.2. 1. Composiciones utilizadas para la elaboración de los cubos de 5x5x5cm en la primera etapa.	118
Tabla 3.2. 2. Resumen de resistencias a compresión axial con la maquina Tinius Olsen.	118
Tabla 3.2. 3. Nomenclatura y composición de cada una de las muestras.	119
Tabla 3.2. 4. Resumen de resistencias a compresión.	120
Tabla 3.2. 5. Composiciones para la tercera etapa.	122
Tabla 3.2. 6. Resistencia a compresión de la composición M-1.	122
Tabla 3.2. 7. Resistencia a compresión de la composición M-2.	122
Tabla 3.2. 8. Resistencia a compresión de la composición M-3.	122
Tabla 3.2. 9. Resistencia a compresión de la composición M-4.	122
Tabla 3.2. 10. Resistencia a compresión de la composición M-5.	123
Tabla 3.2. 11. Resistencia a compresión de la composición M-6.	123
Tabla 3.2. 12. Resistencia a compresión de la composición M-7.	123
Tabla 3.2. 13. Resistencia a compresión de la composición M-8.	123
Tabla 3.2. 14. Tabla de resistencias máximas en cada composición.	124

Tabla 4.1. 1. Granulometría de la marmolina tipo I.....	125
Tabla 4.1. 2. Granulometría de la marmolina tipo II.....	126
Tabla 4.1. 3. Granulometría de la marmolina tipo especial	126
Tabla 4.1. 4. Granulometría de la marmolina del tipo Grano 1	127
Tabla 4.1. 5. Granulometría de la marmolina del tipo Grano 2	128
Tabla 4.1. 6. Granulometría para el mortero autocompactable	129
Tabla 4.2. 1. Composición final con granulometría seleccionada.....	133
Tabla 5.1. 1. Diámetros de extensibilidad y clasificación obtenida por el ensayo J-Ring (anillo japonés).....	138
Tabla 5.1. 2. Clasificación del mortero autocompactable	138
Tabla 5.2. 1. Resumen de densidades de las diferentes composiciones.....	141
Tabla 5.2. 2. Resumen de los porcentajes de absorción de las diferentes composiciones.....	142
Tabla 5.3. 1. Dosificación del MAC M-1 (estándar)	143
Tabla 5.3. 2. Dosificación del MAC M-2.....	144
Tabla 5.3. 3. Dosificación del MAC M-3.....	145
Tabla 5.3. 4. Dosificación del MAC M-4.....	146
Tabla 5.3. 5. Dosificación del MAC M-5.....	147
Tabla 5.3. 6. Dosificación del MAC M-6.....	148
Tabla 5.3. 7. Dosificación del MAC M-7.....	149
Tabla 5.3. 8. Dosificación del MAC M-8.....	150
Tabla 5.3. 9. Resumen de resistencias a compresión de las muestras.....	151
Tabla 5.3. 10. Módulo de elasticidad de los MAC.....	153
Tabla 5.4. 1. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-1.....	156
Tabla 5.4. 2. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-2.....	158
Tabla 5.4. 3. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-3.....	160
Tabla 5.4. 4. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-4.....	162
Tabla 5.4. 5. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-5.....	164
Tabla 5.4. 6. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-6.....	166
Tabla 5.4. 7. Resumen del promedio de indentaciones en M-1.....	167
Tabla 5.4. 8. Resumen del promedio de indentaciones en M-2.....	168
Tabla 5.4. 9. Resumen del promedio de indentaciones en M-3.....	169
Tabla 5.4. 10. Resumen del promedio de indentaciones en M-4.....	169
Tabla 5.4. 11. Resumen del promedio de indentaciones en M-5.....	170
Tabla 5.4. 12. Resumen del promedio de indentaciones en M-6.....	170
Tabla 5.4. 13. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-1.....	173
Tabla 5.4. 14. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-2.....	174
Tabla 5.4. 15. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-3.....	175
Tabla 5.4. 16. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-4.....	176
Tabla 5.4. 17. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-5.....	177
Tabla 5.4. 18. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-6.....	178
Tabla 5.4. 19. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-7.....	179
Tabla 5.4. 20. Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-8.....	181

Tabla 5.4. 21. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-1.....	182
Tabla 5.4. 22. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-2.....	183
Tabla 5.4. 23. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-3.....	184
Tabla 5.4. 24. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-4.....	184
Tabla 5.4. 25. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-5.....	185
Tabla 5.4. 26. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-6.....	185
Tabla 5.4. 27. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-7.....	186
Tabla 5.4. 28. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-7.....	187
Tabla 5.4. 29. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-8.....	187
Tabla 5.4. 30. Resumen de las indentaciones sobre el vidrio de 10x10x0.9 cm.....	189
Tabla 5.4. 31. Resumen de las indentaciones sobre el piso cerámico de 10x10x0.5cm.....	190
Tabla 5.5. 1. Dosificación del MAC M-1 (estándar).....	196
Tabla 5.5. 2. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	199
Tabla 5.5. 3. Dosificación del MAC M-2.....	201
Tabla 5.5. 4. Cuantificación de los elementos en porcentaje, obtenidos del microanálisis (EDS).....	205
Tabla 5.5. 5. Dosificación del MAC M-3.....	206
Tabla 5.5. 6. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	208
Tabla 5.5. 7. Dosificación del MAC M-4.....	211
Tabla 5.5. 8. Dosificación del MAC M-5.....	213
Tabla 5.5. 9. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	216
Tabla 5.5. 10. Dosificación del MAC M-6.....	217
Tabla 5.5. 11. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	220
Tabla 5.5. 12. Dosificación del MAC M-7.....	221
Tabla 5.5. 13. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	224
Tabla 5.5. 14. Dosificación del MAC M-8.....	225
Tabla 5.5. 15. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).....	229
Tabla 5.6. 1. Cuantificación de los elementos químicos por EDS.....	234
Tabla 5.6. 2. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.....	236
Tabla 5.6. 3. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.....	239
Tabla 5.6. 4. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.....	240
Tabla 5.7. 1. Composiciones utilizadas para la elaboración de las pastillas.....	245
Tabla 5.7. 2. Datos de la medición en la muestra M-1L.....	246
Tabla 5.7. 3. Datos de la medición en la muestra M-1.....	248
Tabla 5.7. 4. Datos de la medición en la muestra M-2.....	250
Tabla 5.7. 5. Datos de la medición en la muestra M-2L.....	252
Tabla 5.7. 6. Datos de la medición en la muestra M-3L.....	254
Tabla 5.7. 7. Datos de la medición en la muestra M-4.....	256
Tabla 5.7. 8. Datos de la medición en la muestra M-4L.....	258
Tabla 5.7. 9. Resumen de valores de R y C de la muestra M-4L.....	259
Tabla 5.7. 10. Datos de la medición en la muestra M-7.....	260
Tabla 5.7. 11. Datos de la medición en la muestra M-8.....	262
Tabla 5.7. 12. Resistencias y capacitancias de las muestras.....	264

Tabla 8.2. 1. Composición del tráfico	277
Tabla 8.2. 2. Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral. (13)	278
Tabla 8.2. 3. Factores de erosión, para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral	280
Tabla 8.2. 4. Datos del proyecto, tomando un MR=48kg/cm2 (682.7 PSI)	281
Tabla 8.2. 5. Aforo vehicular	281
Tabla 8.2. 6. Número de repeticiones esperadas durante la vida útil y sus respectivos ESAL'S ..	281
Tabla 8.2. 7. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga	282
Tabla 8.2. 8. Valores de factor de erosión.	283
Tabla 8.2. 9. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión.....	284
Tabla 8.2. 10. Datos del proyecto, tomando un MR=147.98 kg/cm2 (2104.69 PSI)	285
Tabla 8.2. 11. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga	286
Tabla 8.2. 12. Valores de factor de erosión.	287
Tabla 8.2. 13. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión.....	288
Tabla 8.2. 14. Datos del proyecto, tomando un MR=42.29 kg/cm2 (601.43 PSI)	289
Tabla 8.2. 15. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga	290
Tabla 8.2. 16. Valores de factor de erosión.	291
Tabla 8.2. 17. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión.....	291
Tabla 8.2. 18. Datos del proyecto, tomando un MR=18.54 kg/cm2 (263.7 PSI)	292
Tabla 8.2. 19. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga	293
Tabla 8.2. 20. Valores de factor de erosión.	294
Tabla 8.2. 21. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión.....	295
Tabla 8.2. 22. Datos del proyecto, tomando un MR=18.54 kg/cm2 (263.7 PSI)	296
Tabla 8.2. 23. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga	297
Tabla 8.2. 24. Valores de factor de erosión.	298
Tabla 8.2. 25. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión.....	298

OBJETIVO GENERAL

Sintetizar en el laboratorio composiciones de cementos inorgánicos utilizando principalmente como reactivo el cemento portland y micro-agregados o fillers. Dichas composiciones se caracterizarán micro, macro y nano-estructuralmente, física y mecánicamente. Buscando con los resultados obtenidos el desarrollo de un nuevo producto llamado “**MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES MULTIFUNCIONALES BASE CPC30R-RS**”. El cual pueda tener aplicación en obras de infraestructura del transporte con alto congestionamiento de refuerzo o lugares de difícil acceso y que se requiera un alto comportamiento mecánico sin necesitar vibración y asegurar una alta compacidad en el elemento de construcción desarrollado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar un micro-concreto autocompactable utilizando diferentes tipos de fillers.
- Obtener un micro-concreto autocompactable de cementos híbridos.
- Caracterizar física y mecánicamente, así como micro, macro y nano-estructural el micro-concreto obtenido.
- Que el micro-concreto desarrollado presente un alto comportamiento mecánico y sea comercialmente viable para aplicaciones especializadas en obras de ingeniería.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico es un material que se ha venido utilizando desde hace siglos. Una de las principales obras de los romanos, el Coliseo, es un gran anfiteatro de la época del imperio, edificado con concreto.

En aquel entonces, la principal exigencia que se le daba era su resistencia a la compresión. En la actualidad se le han implementado nuevas exigencias, entre ellas, la **durabilidad**.^[1]

El concreto es un material durable y resistente. Dado que se le trabaja en su forma líquida, puede adquirir casi cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal de ser el material de construcción más popular. El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales: *cemento*, *agua* y *agregados*, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que, por lo general, se conoce como *aditivo*. Al mezclar estos componentes se introduce de manera simultánea un quinto participante: *el aire*.^[2]

Dicha mezcla produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que, al cabo de algunas horas, se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

En cuanto el concreto queda en reposo, después de colocarlo y compactarlo dentro del espacio cimbrado, se inicia un proceso natural mediante el cual los componentes más pesados (cemento y agregados) tienden a descender, en tanto que el agua, componente menos denso, tiende a subir. A estos fenómenos simultáneos se les llama respectivamente *asentamiento* y *sangrado*. Cuando se producen en exceso se les considera indeseables porque provocan cierta estratificación en la masa de concreto, se forma en la parte superior una capa menos resistente y durable por su mayor concentración de agua. Esta circunstancia resulta particularmente inconveniente en el caso de pavimentos de concreto y de algunas estructuras hidráulicas cuya capa superior debe ser apta para resistir los efectos de la abrasión mecánica e hidráulica.

El concreto hidráulico es el material más utilizado para la construcción de cualquier obra civil, ya sean casas, puentes, carreteras, presas, etc. Pero para poder emplear este material y que sea capaz de resistir las grandes cargas mecánicas a las que se ve sometido (flexión, compresión y cortante) debe de estar reforzado interiormente con varillas de acero.

Para obras de gran magnitud, se tiene —como ejemplo— el armado de zapatas en puentes, donde se utiliza acero en cantidad considerable. Esto genera un problema a la hora del colado del concreto, se generan poros de gran magnitud, ya que el concreto presentará problemas para fluir y cubrir las áreas más alejadas y saturadas de acero. Los poros generados por el colado, más los poros que presenta el concreto debido a su propia constitución, devendrán en un material muy poroso. El cual es muy susceptible a presentar problemas de corrosión, ya que permite el paso de líquidos y gases. Por esta razón, en zonas costeras se tienen mayores problemas de corrosión, debido a las condiciones del medio ambiente y a la calidad del concreto.

El proyecto a desarrollar tiene como objetivo la elaboración y análisis nano, micro y macro-estructural de micro-concretos auto-compactables multi-funcionales que sea útil para su uso en las obras de infraestructura del transporte, que ofrezca mejores propiedades y comportamiento que el convencional. Lo que permitirá un incremento en durabilidad y resistencia. Disminuir los problemas por asentamiento y sangrado, así como la corrosión (ya que disminuirémos la porosidad en el concreto). Esto se logrará utilizando bajas relaciones de A/C (agua/cemento) mediante el uso de un aditivo reductor de agua conocido normalmente como *hiperfluidificante*.

Los aditivos hiperfluidificantes son ampliamente usados por su efectiva acción para aumentar la maleabilidad de la mezcla y reducir el contenido de agua del concreto manteniendo la misma consistencia. Ambos efectos se traducen en una estructura de poros más cerrada, lo que permitirá un incremento en la resistencia y durabilidad del concreto. Su acción como reductor de agua involucra adsorción del aditivo sobre las partículas de cemento y su consecuente dispersión en el sistema cemento-agua.

El concreto autocompactable se define como “aquel que tiene la propiedad de consolidarse bajo su propio peso sin necesidad de vibrado, aun en elementos estrechos y densamente armados”. Este material pertenece a la familia de los concretos de alto desempeño y tiene la propiedad de fluir sin segregación, autocompactándose por sí solo, lo que asegura la continuidad del concreto endurecido.

Una de las principales pruebas que se le realizan a este tipo de concretos, es el ensayo de extensibilidad con el anillo J-RING. Las barras de acero que se encuentran alrededor del anillo simulan las barras de acero de refuerzo del concreto. Esto permitirá poder clasificar nuestro concreto autocompactable ayudándonos en clasificaciones ya establecidas por diversas normas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En esta parte del documento se hará una amplia recopilación de información sobre el conocimiento de los concretos autocompactables. Cabe mencionar que el desarrollo de los concretos autocompactables ya tiene varios años en otros países, caso contrario, en nuestro país el conocimiento sobre este tipo de concretos es muy poco.

Muchos investigadores han querido formular sus propios concretos autocompactables, haciendo cambios en las dosificaciones, esto con el fin de poder obtener un producto más resistente y presentar buenas propiedades en su estado fresco, dependiendo del tipo de aplicación que se le vaya a implementar.

Además se hará mención de los tipos de dosificaciones que se tiene en la actualidad sobre los concretos autocompactables, ya que estos presentan un método de dosificación muy diferente a los de un concreto convencional. Los métodos de ensayo en el estado fresco para estos tipos de concretos son muy diferentes a los de un concreto convencional, por lo general a los concretos autocompactables se les mide su extensibilidad, capacidad de paso y su resistencia a la segregación. Para poder conocer estas propiedades, en la actualidad ya se tienen normas que permiten realizar diferentes ensayos y con equipos ya diseñados para cada una de ellas.

2.2. CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

2.2.1. ANTECEDENTES

Durante la década de los años 80 en Japón, los problemas asociados a la falta de homogeneidad y, consecuente pérdida de durabilidad del concreto, tuvieron una gran importancia diversas estructuras. La principal causa de este problema fue asociada con una mala compactación del concreto. La solución para el problema de durabilidad fue desvincular, en la etapa de vibración, la calidad del concreto de posibles errores humanos.^[2]

En un principio parecía fácil implementarlo, ya que se habían utilizado concretos sin compactar en concretos sumergidos, pero, eran concretos sin refuerzo, lo que nada impedía su movimiento. En cambio, en estructuras armadas se presentaban problemas y era necesario vibrar el concreto. Con la introducción de los aditivos superfluidificantes fue posible el diseño de mezclas fluidas en estado fresco.

Se desarrolló el concepto de Concretos Autocompactables (CAC), inicialmente en Japón en el año de 1988 tal como se ha dicho por Okamura (1999) y representó uno de los avances más significativos en la tecnología del concreto en las últimas dos décadas. A partir de este periodo, numerosas investigaciones se han llevado a cabo en diferentes países, con el objeto de encontrar una dosificación óptima y económica, que garantice un buen comportamiento del concreto fresco, así como sus propiedades mecánicas.

El concreto autocompactable fue desarrollado con el fin de presentar propiedades de poder fluir por su propio peso y, así, cubrir aquellos lugares del cimbrado donde se presente un congestionamiento de refuerzo significativo sin la necesidad de vibrado externo e interno.

Recién a mediados de los años 90 comenzó el proceso de expansión hacia algunos países árticos (especialmente Suecia) y, a fines de esa misma década, surge con impulso en los Estados Unidos de América con el nombre de Self-Consolidating Concrete (se desecha el término de *compacting* ya que es utilizado en temas relacionados con la mecánica de suelos y sus aplicaciones en la ingeniería vial).

2.2.2. DEFINICIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

El concreto autocompactable se puede definir como: *aquel concreto que es capaz de fluir en el espacio del cimbrado, llenándola de forma natural, pasando sobre las barras de armadura o refuerzo y, consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso, sin presentar segregación de los agregados gruesos.*

Estas prestaciones son consecuencias de la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de los concretos y, que dan lugar a las tres propiedades básicas del concreto autocompactable: *capacidad de llenado, capacidad de paso entre las pequeñas aberturas y resistencia a la segregación.* Estas propiedades no son independientes y se relacionan entre sí en mayor o menor grado.

Atendiendo a la definición anterior, se pueden describir las características que definen a un concreto autocompactable:

- La capacidad de llenado o fluidez no limitada, se refiere a la capacidad del concreto autocompactable de fluir y rellenar completamente todos los espacios del cimbrado, por su propio peso sin vibración. Para obtener una capacidad de llenado adecuado, es necesario reducir la fricción entre las partículas sólidas y mejorar la deformabilidad de la pasta.

La fricción entre las partículas sólidas de la mezcla reduce la deformabilidad del concreto. Para reducir la fricción es necesario reducir el contacto entre las partículas, disminuyendo el volumen de los agregados y, por lo tanto, aumentando el volumen de la pasta, optimizando de esta forma el esqueleto granular. En los concretos autocompactables se da, principalmente, con el aumento de los finos y el uso de aditivos superfluidificantes. Los aditivos superfluidificantes reducen la tensión de inicio de flujo del concreto y mejoran su fluidez sin perjudicar la viscosidad. La utilización de agua para mejorar el flujo del concreto tiene el inconveniente de que también reduce la viscosidad de la mezcla, aumentando el riesgo de segregación. ^[3]

- La capacidad de paso, es la posibilidad del concreto autocompactable de fluir a través del armado sin segregación o bloqueos. El grado necesario de esta característica depende de la cantidad de armadura o refuerzo, la separación entre las barras y de los obstáculos que tiene que atravesar el concreto. El bloqueo del concreto se produce cuando el tamaño máximo del agregado grueso es demasiado grande y/o el contenido del agregado grueso es demasiado elevado. En la figura 2.2.1 se puede ver como se presenta el mecanismo de bloque de las partículas gruesas de la mezcla.

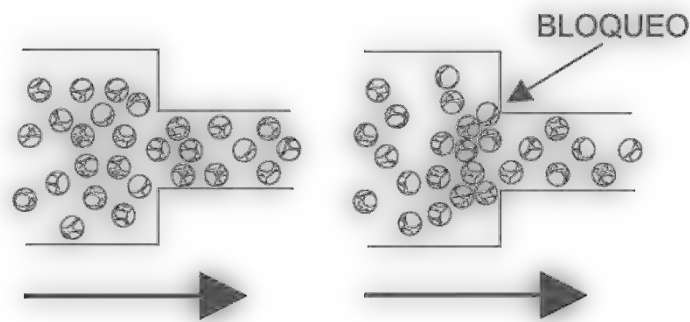


Figura 2.2. 1. Mecanismo de bloqueo. (Núñez, 2009).

Una forma de mejorar la capacidad de paso es aumentar la viscosidad de mezcla reduciendo el riesgo de segregación. Esto se obtiene disminuyendo la relación agua/finos y/o utilizando aditivos modificadores de viscosidad. Otra forma es disminuir el tamaño del agregado grueso y la cantidad.

- La resistencia a la segregación o estabilidad, es la capacidad de mantener homogénea su composición, durante el transporte y la puesta en obra. La segregación del concreto ocurre cuando los componentes del concreto se separan y su distribución no es homogénea. La segregación se puede manifestar de diferentes maneras como: *exudación*, *separación del agregado grueso*, o *una distribución no uniforme de los poros de aire*. El concreto

autocompactable al ser más fluido está más propenso a la sufrir segregación que un concreto convencional.^[3]

Todas estas características básicas deben mantener un equilibrio entre ellas a pesar de que algunas como fluidez y cohesión (resistencia a la segregación) presenten cierta oposición. Una adecuada formulación del concreto autocompactable, implica que todas las propiedades citadas se mantengan en un equilibrio estable y óptimo durante todo el tiempo que implique el transporte y su colocación en obra.

En el año 2000, Okamura et al. (2000), definen como “concreto autocompactable de altas prestaciones” aquél concreto, que además de lo anterior, también satisface a los dos requisitos citados a continuación. Primero, *los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimo y; Segundo, la permeabilidad del concreto frente a agentes externos, cloruros, Oxígeno y agua, debe ser mínima.*

Dicha definición se da en el contexto de la primera década de investigación de los concretos autocompactables (1989-1999), cuando los primeros diseños de concretos de este tipo, dieron como resultados concretos de altas prestaciones, debido a los cambios necesarios en la dosificación para obtener la autocompactabilidad.

Actualmente, la definición del concreto autocompactable se da únicamente en función de su estado fresco.

2.2.3. MÉTODOS DE DISEÑO

El concreto autocompactable en su estado fresco debe de cumplir tres requerimientos:

- Capacidad de llenado
- Resistencia a la segregación (en movimiento y en la condición estática)
- Capacidad de evadir obstáculos.

Tales requisitos de trabajabilidad traen como consecuencia el diseño de mezclas con un alto volumen de pasta que puede promover cambios de volumen en el estado endurecido tales como la contracción por secado y la fluencia lenta (creep). Por otro lado la diversidad de componentes que están disponibles en el mercado, hacen complicado el procedimiento de diseño (agregados partidos o redondeados, cementos compuestos, adiciones minerales, aditivos superfluidificantes de diferentes tipos, aditivo modificador de viscosidad, etc.). La Figura. 2.2.2 muestra una aproximación para la obtención de los citados

requerimientos. El contenido limitado de agregado grueso reduce la cantidad de colisiones entre partículas de tal modo proveer capacidad para evadir obstáculos con el consecuente incremento del volumen de pasta. Baja relación a/c y el aditivo superfluidificante aportan resistencia a la segregación y fluidez, respectivamente. En este caso no se considera la utilización de un aditivo agente modulador de viscosidad.^[4]

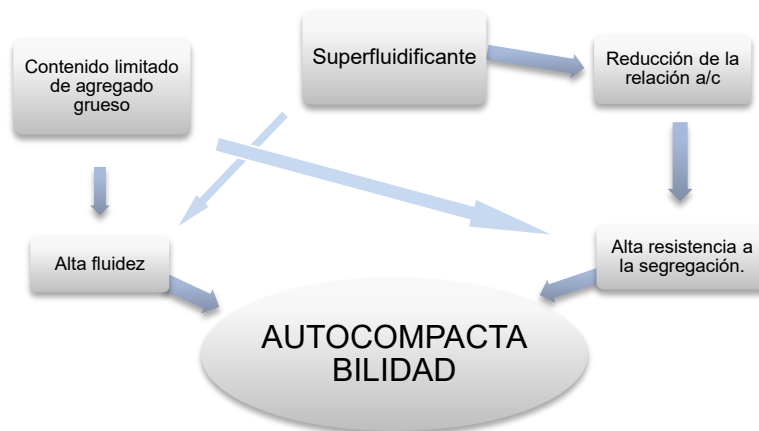


Figura 2.2. 2 Metodología general para la obtención de un concreto autocompactable. (Fava, Agosto 2003)

Al dosificar un concreto autocompactable se deben tener en cuenta las siguientes exigencias con el proyecto:

- **Estructurales**, como el espaciado entre barras de armadura, dimensiones del elemento, caras vistas o la complejidad arquitectónica del cimbrado, entre otras.
- **Operativas**, como la modalidad de llenado, velocidad y duración del mismo, características del cimbrado o la accesibilidad al camión, entre otras.
- **Ambientales**, como el clima y la temperatura en el momento del llenado, temperatura de los materiales o la duración del transporte, entre otras.
- **De prestaciones**, como la clase de exposición ambiental, resistencia característica entre otros requisitos del proyecto.

Actualmente, no existe una metodología única para dosificar un concreto autocompactable a nivel mundial. Diversos son los investigadores que se destacan en la literatura a este nivel, con propuestas de metodologías para la obtención de mezclas estables. La diferencia de estos métodos con respecto a los métodos

tradicionales, es que los métodos para dosificar un concreto autocompactable, se fundamentan en una base esencialmente empírica.

En el concreto autocompactable, la dosificación tiene como objetivo principal atender las principales propiedades en su estado fresco ya antes mencionados. Para obtener estas propiedades, se limita el volumen de agregado grueso, para mejorar la capacidad de paso entre el armado. Consecuentemente, se incrementa el volumen de la pasta, asociado a una baja relación agua /finos, y con un aditivo superplastificante se obtiene la fluidez y la resistencia a la segregación.

Variados tipos de materiales han sido utilizados de modo satisfactorios en el concreto autocompactable, dependiendo del tipo de aplicación, de las características necesarias (ciclos de hielo–deshielo, resistencia a agentes químicos, resistencia inicial, etc.), y del origen de los distintos componentes. Es por ello, que es muy difícil concebir una dosificación universal del concreto autocompactable.

Los modelos de dosificación se desarrollan en base a diferentes necesidades, pero se puede identificar dos diferencias principales en el proceso de diseño de las mezclas de un concreto autocompactable con un concreto vibrado o convencional.

- La primera consideración para un concreto autocompactable, es que obtenga propiedades de autocompactabilidad satisfactorias. Estas características están gobernadas normalmente por el contenido de pasta, y a veces por la relación agua/finos. La resistencia a compresión es controlada por la combinación de los diferentes finos (cemento portland, cenizas volantes, escoria, polvo de piedra, etc.)
- El número de posibles combinaciones de materiales para un concreto autocompactable, representa que debe conciliarse un gran número de variables, y sus interacciones normalmente dificultan una previsión con suficiente seguridad. Después de conocidas las propiedades de cada componente, se requiere una segunda etapa de ensayos, a veces intensivos, de combinaciones viables.^[5]

Los métodos de diseño se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- Aquellos donde la estabilidad se ajusta por medio del contenido de polvo, es decir, alto contenido de pasta.
- Aquellos donde la estabilidad se consigue por medio del agente modificador de viscosidad, y por lo tanto, bajo contenido de pasta.
- Aquellos del tipo combinado, donde la estabilidad resulta de un ajuste del contenido de polvo y del agente modificador de viscosidad.

En general tienen limitaciones que se relacionan con los materiales para los cuales se pueden aplicar o la clase (resistencia) de concretos que se pueden diseñar. Algunos proponen un procedimiento paso a paso, y otros en cambio proponen límites a parámetros característicos de la mezcla (contenido de agregados, contenido de agua, etc.).^[4] En los apartados siguientes, se presentan algunos métodos de dosificación presentados hasta la fecha.

2.2.3.1. MÉTODO DE OKAMURA

Fue desarrollado en la Universidad de Tokio y se lo conoce como el Método General. Corresponde a un método de los llamados “paso a paso” y es relativamente simple su aplicación.^[4]

Este método de dosificación propuesto fue resultado de los extensivos trabajos realizados en la Universidad de Tokio por Okamura, Ozama y sus coautores. Este método se aplica a un número limitado de componentes, incluyendo el agregado grueso (5–20 mm), agregado fino con tamaño máximo de 5 mm y cemento con un bajo calor de hidratación. El uso de agentes modificadores de viscosidad no fue contemplado. Normalmente, se añade a la mezcla un aditivo incorporador de aire, para garantizar la resistencia a los ciclos de hielo y deshielo y, también, para reducir el contenido de cemento.

El método considera que el concreto está dividido en dos fases: agregado grueso y mortero. El volumen del agregado grueso, se fija en un 50% del volumen sólido del concreto, mientras que el volumen de agregado fino, se fija en un 50% del volumen del mortero (considerando como agregado grueso las partículas más grandes que 0.09 mm, y como finos las partículas inferiores a este valor). La relación final agua/finos y el contenido de superplastificantes, se ajustan a través de ensayos en morteros, (escurrimiento y embudo–V) para garantizar algunos parámetros de autocompactabilidad propuestos.

En este método se adopta un escurrimiento de 650 mm (65 cm) como criterio de aceptación, ajustándose el contenido de superplastificante hasta obtenerla. La autocompactabilidad se consideraba satisfactoria, si el tiempo de escurrimiento en el ensayo de Embudo-V se situaba entre 10 y 20 segundos. También se empleó el ensayo de la caja en U, fijándose el criterio de una altura final mínima de 300 mm (30 cm). No hay mención de la resistencia a compresión del concreto en este método, pero como el cemento es el único material fino utilizado, y las relaciones agua/cemento resultantes son bajas, la resistencia final obtenida es adecuada para numerosas aplicaciones estructurales. Asimismo, este método no considera la influencia del sistema de la puesta en obra.^[5]

2.2.3.2. MODIFICACIONES Y ADAPTACIONES DEL MÉTODO DE OKAMURA ET AL.

Con el objetivo de hacer las mezclas más eficientes en relación a la cantidad de pasta, y ampliar la gama de materiales utilizados, varios investigadores propusieron modificaciones al método de Okamura et al, de las cuales se mencionan algunas a continuación:

- **Universidad Tecnológica de Kochi/ Universidad de Tokio**

Edamatsu, Nishida y Ouchi (1999), ajustaron el método de determinación de la cantidad necesaria de los agregados finos en la pasta (propusieron que el valor sea fijado en un 40% del volumen), en base a las diferencias entre las propiedades de forma y distribución granulométrica, y a los diferentes tipo de materiales utilizados como finos, entre ellos: cemento portland, escoria de alto horno, cenizas volantes y filler calizo.

Ouchi, Hibino, Okamura y Ozawa, ajustaron la relación agua/finos y la dosificación del superplastificante, determinando cada uno de estos parámetros independientemente, con lo que disminuyeron los ensayos necesarios. Por otro lado, no se hace referencia a aplicación de aditivos modificadores de viscosidad.

- **Universidad de Delft**

En los trabajos de la Universidad de Delft, emplearon el método de Okamura aplicándolo con materiales holandeses, utilizando un tamaño máximo del agregado grueso de 16 mm. Concluyeron que el contenido de este material, puede aumentarse a un 60% del volumen de los sólidos, correspondiendo al punto de máximo empaquetamiento. Con este contenido de agregado grueso, se necesita un 10% menos de pasta, resultando en una mezcla más eficiente. El método también se hizo aplicable a los otros materiales holandeses ensayados, como el humo de sílice, las cenizas volantes de la gasificación del carbón y cenizas volantes micronizadas.

- **University College London**

En este método se definen algunos límites para las dosificaciones del concreto autocompactable en base a los resultados de un extensivo programa de ensayos de laboratorio, tal como se muestra en la Tabla 2.2.1. Cabe resaltar que no se considera el empleo de agentes de viscosidad. ^[5]

En ella se puede observar que la principal diferencia con el método de Okamura et al, es el rango del contenido de arena (variable entre 30% y 50% del

volumen del mortero), y diferentes rangos de valores para cada componente en función del tamaño del agregado (agregado 5–20 mm o agregado 5–10 mm).^[5]

Tabla 2.2. 1. Tabla de resumen de los métodos de dosificación propuestos.
(Santos, Junio 2010).

	Agregado 5 a 20 mm		Agregado de 5 a 10 mm	
Contenido de agregado grueso (kg/m ³)	0.5 x PA*		0.5 a 0.5 x PA*	
Contenido máximo de agua (kg/m ³)	200		200	
Relación agua/finos en peso	0.28 a 0.4		0.28 a 0.5	
Relación agua/(finos + agregado fino)	0.12 a 0.14		0.12 a 0.17	
Volumen de pasta (l/m ³)	0.38 a 0.42		0.38 a 0.42	
Volumen de arena/Volumen de mortero (Va/Vm)	Agua/finos	Va/Vm	Agua/finos	Va/Vm
	<0.3	0.4	<0.3	0.4
	0.3-0.34	0.4-0.45	0.3-0.34	0.4-0.45
	0.34-0.4	0.45-0.47	0.34-0.4	0.45-0.47
	0.4-0.5	No usar	0.4-0.5	>0.47

*PA-peso unitario del agregado compactado en estado saturado con superficie seca.

2.2.3.3. MÉTODO DEL JSCE

La sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE), propusieron en 1998, un procedimiento de dosificación, que hace una distinción entre los concretos que obtienen la autocompactabilidad, basados únicamente en *el aporte de finos, la adición de un aditivo modificador de viscosidad, y de los que tienen ambos*.

En el primero de ellos especifica que el contenido de agregado grueso, cuyo tamaño máximo se sitúa en 20 ó 25 mm, depende del grado de compactabilidad que se desee obtener y, el contenido de finos del concreto está comprendido entre el 16 y el 19% del total. En el segundo, se utiliza un agente modificador de viscosidad; el método únicamente fija el contenido de árido grueso. Y, por último, si se emplean finos y agente modificador de viscosidad se especifica el contenido de áridos y una mínima cantidad de finos.

2.2.3.4. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN UPC

El método de dosificación de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) fue propuesto por Gomes et al. (2001). Inicialmente se desarrolló para concretos autocompactables de alta resistencia, pero actualmente se ha generalizado para

concretos de resistencias medias. Se basa en la optimización de la composición de la pasta (formada por cemento, adición, agua y superplastificante) y el esqueleto granular (formado por agregado fino y grueso por separado, para posteriormente combinar ambas optimizaciones como se puede ver en la figura 2.2.3. ^[3]

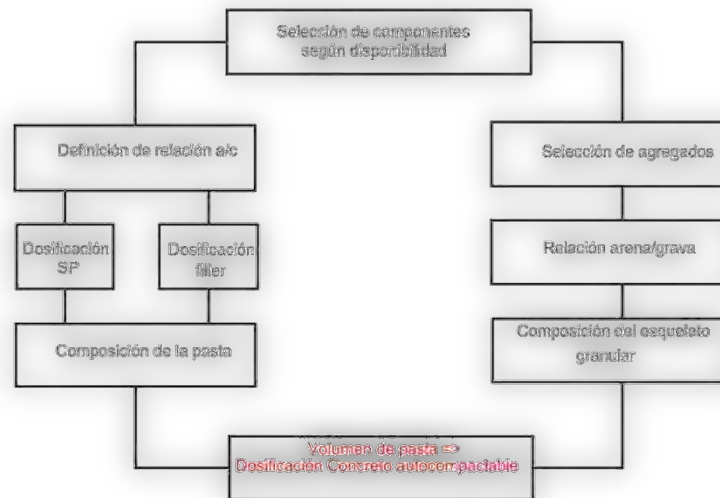


Figura 2.2. 3. Esquema del método de dosificación UPC. (Núñez, 2009)

Lo primero que se realiza, es la selección de los materiales y se fijan las relaciones agua/cemento y humo de sílice/cemento, si es el caso. Mediante el cono de Marsh, se determina la dosificación de superplastificante a fin de buscar el punto de saturación que es la relación entre el superplastificante y el cemento. El punto de saturación es aquel que un incremento de aditivo no mejora la fluidez de la mezcla. Como el punto de saturación depende de la relación filler/cemento, se debería de realizar el ensayo para los distintos valores de dicha relación, se puede adoptar como orden de magnitud de 0.1 a 0.5 la relación filler/cemento. ^[3]

Una vez fijado el punto de saturación del superplastificante, se determina la dosificación óptima del filler mediante el ensayo de mini-cono de Kantro. Se recomienda que el diámetro de extensión de flujo esté en el rango de $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, que para el caso de concretos autocompactables de altas resistencia se sitúa el parámetro T115 en un rango de 2 a 3.5 s.

La composición del esqueleto granular (arena y grava) se determina experimentalmente mediante el criterio de máxima compacidad en seco según la norma ASTM C29/CM29. El objetivo es obtener el mínimo contenido de huecos. Posteriormente se determina el mínimo volumen de pasta necesario para satisfacer los requisitos de resistencia y autocompactabilidad del concreto

requerido. Se fabrican diversos concretos en los que el contenido de pasta se va incrementando hasta alcanzar el mínimo volumen de pasta que satisfaga con los requerimientos de autocompactabilidad que se evalúa a través de ensayos de caracterización en su estado fresco.^[3]

2.2.3.5. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN ACI

El método de dosificación de la ACI, parte del resultado del ensayo de escurrimiento. A partir de este resultado se ajustan las proporciones de los materiales siguiendo las recomendaciones de las Tablas 2.2.2 y 2.2.3. Una vez fijada la dosificación, se fabrica el concreto y se realizan los ensayos de caracterización en estado fresco. En base a esos resultados se ajusta la dosificación hasta que se alcancen las propiedades de autocompactabilidad.^[3]

Tabla 2.2. 2. Sugerencias del contenido de finos de la ACI para 1m³ de concreto. (Núñez, 2009).

Ensayo de escurrimiento (mm)	<550	550 – 600	>650
Contenido de finos (kg)	355 - 385	385 – 445	>458

Tabla 2.2. 3. Valores recomendados para la dosificación de un concreto autocompactable según la ACI, (Núñez, 2009).

PARÁMETRO	RECOMENDACIÓN
% Grava (< 12mm)	28 – 32
%Pasta	34 – 40
% Mortero	68 – 72
Agua / Cemento	0.32 – 0.45
Contenido de cemento (kg)	386 – 475

En la actualidad se tiene una gran gama de diseños que pueden producir concretos autocompactables de comportamiento satisfactorio, pero en general hay una serie de factores claves que varían dentro de ciertos límites, esto depende del tipo de aplicación que se tenga contemplado.

2.2.4. MATERIALES CONSTITUYENTES

2.2.4.1. CEMENTO

En la fabricación del cemento Portland se emplean distintas materias primas: calizas, creta, margas y materiales con alto contenido de sílice como areniscas, arcillas, esquistos arcillosos (rocas de composición poco definida representadas por hojas o láminas delgadas). Los materiales crudos (harina cruda) deben mezclarse entre sí de modo que las proporciones de óxido de calcio, sílice, aluminio, y óxido férrico deben mantenerse cerca de ciertos límites definidos, y otros constituyentes, como el magnesio, y los álcalis, no deben exceder ciertos límites.^[6]

Las materia primas básicas del cemento portland son: caliza (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), y óxido de hierro (Fe₂O₃). Estos componentes se combinan apropiadamente para producir los diversos tipos de cemento portland. Las materias primas seleccionadas son molidas, y se mezclan en proporciones adecuadas para conseguir la composición adecuada. La mezcla se mantiene después en un horno rotatorio donde se calienta a temperaturas de 1400 a 1650 C (2600 a 2900 F). El calentamiento primero libera agua y dióxido de carbono (CO₂) y luego causa otras reacciones entre los sólidos, entre éstas la fundición parcial de los minerales, en este mismo proceso, la mezcla se convierte químicamente en un cemento endurecido llamado **CLINKER**, que seguidamente se hace enfriar y se pulveriza. Una pequeña cantidad de yeso (CaSO₄-1/2H₂O) es adicionada al cemento para controlar el tiempo de preparación del concreto.^[6] El clinker Portland es el principal componente del cemento Portland y presenta los siguientes compuestos básicos presentados en la tabla 2.2.4.

Tabla 2.2. 4. Componentes básicos del cemento portland, (Smith, 1992).

COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	ABREVIACIÓN
Silicato tricálcico	3CaO-SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO-SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO-Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrita de tetracalcio	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Los silicatos (C₃S y C₂S) son los componentes principales, ya que suman alrededor del 80 % de los compuestos y son los responsables del desarrollo de resistencia del cemento Portland. Donde el C₃S actúa sobre el desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días y el C₂S presenta una hidratación algo

diferida y actúa sobre la resistencia final. El C_3A que se encuentra en pequeñas cantidades actúa sobre el tiempo de fraguado, la resistencia a primeras horas del concreto y su presencia hace vulnerable al concreto a la acción de los sulfatos. El C_4AF se considera casi un subproducto de la fabricación de clinker y actúa principalmente sobre la coloración del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos.^[6] Se tiene diferentes tipos de cemento portland, estos pueden ser producidos variando las cantidades de los componentes químicos mencionados anteriormente. En general hay cuatro tipos fundamentales, cuyas composiciones químicas básicas se muestran en la tabla 2.2.5.^[6]

Tabla 2.2. 5. Composiciones de compuestos típicos de cemento portland, (Smith, 1992)

Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones, % peso			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Ordinario	I	55	20	12	9
Moderado calor de hidratación y moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Endurecimiento rápido	III	65	10	12	8
Bajo calor de hidratación	IV	25	50	5	13
Resistente al sulfato	V	40	35	3	14

Tipo I. Es el cemento portland normal para usos generales. Se utiliza donde el concreto no está expuesto a un gran ataque por sulfatos de agua o del suelo, o donde no va producirse un incremento de temperatura importante debido al calor generado por la hidratación del cemento. Aplicaciones típicas del concreto del tipo I son aceras, edificios, puentes, alcantarillas, y tanques y embalses de concreto reforzado.

Tipo II. Se utiliza donde un moderado ataque por sulfato es importante, como las estructuras de desagüe donde las concentraciones de sulfato en aguas residuales son mayores de las normales. El cemento del tipo II se utiliza normalmente en los meses de verano para estructuras anchas como pilares y gruesas paredes de retención ya que este cemento tiene un moderado calor de hidratación.

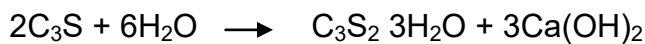
Tipo III. Es una clase de cemento de resistencia prematura que desarrolla grandes resistencias en un periodo de tiempo corto. Se emplea cuando las formás del concreto van a ser eliminadas rápidamente de una estructura que debe ponerse prontamente en uso.

Tipo IV. Es un cemento portland de bajo calor de hidratación que se utiliza cuando la cantidad de calor debe ser minimizada. El tipo IV de cemento portland

se reserva para estructuras macizas de concreto tales como presas de gran pesantez donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico.

Tipo V. Es un cemento sulfatoresistente usado cuando el concreto está expuesto a severos ataques a sulfato como el concreto expuesto a suelos y aguas residuales con un alto contenido de sulfatos. ^[6]

El endurecimiento del cemento portland empieza mediante las reacciones que ejerce al estar en contacto con el agua, a estas reacciones se le conoce con el nombre de *reacciones de hidratación*. Cuando los componentes principales del cemento (C_3S y C_2S) reaccionan con el agua durante el endurecimiento del cemento, el producto principal de hidratación es el *silicato tricálcico hidratado*. Este material está formado por partículas extremadamente pequeñas (menos de $1\ \mu\text{m}$) y es un gel coloidal. El hidróxido de calcio es también producido por la hidratación de los silicatos y es un material cristalino. ^[6] Estas reacciones son:



A continuación en la figura 2.2.4 se esquematiza la hidratación de los silicatos.

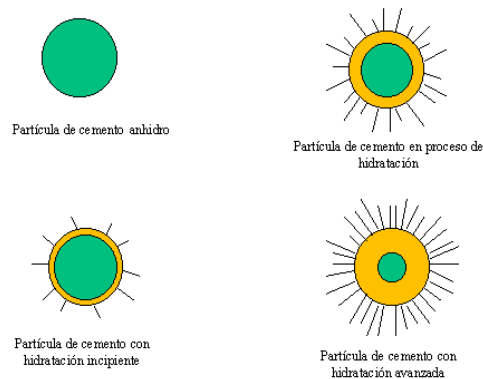


Figura 2.2. 4. Progreso de la hidratación de una partícula de cemento, Brian Marroquin, (2008).

Como puede observarse en la figura anterior, existe un crecimiento de los cristales S-C-H (compuestos silicatos cálcicos hidratados). Como se mencionó anteriormente, estos compuestos S-C-H son los responsables de la evolución de resistencia de la pasta de cemento y, consecuentemente, del concreto. Los silicatos cálcicos hidratados formado por una “masa” sin estructura cristalina muy desarrollada, constituyendo del 50 al 60% del volumen de los sólidos de una pasta

de cemento portland completamente hidratada, siendo el más importante de todos los compuestos formados.^[1]

Además de los S-C-H, tenemos el hidróxido de calcio C-H, conocido como portlandita, que cristaliza con cristales hexagonales bien definidos, constituye del 20 al 15% del volumen de la pasta hidratada.^[1] Aparece en los primeros estadios de hidratación de los silicatos tricálcico y dicálcico. Al ser un compuesto muy soluble en concretos o pastas por encima de los 28 días puede lixiviarse y facilitar vías de penetración a agentes externos.^[1]

En contraste con el S-C-H, el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es un compuesto con una estequiometría bien definida. Comparado con el S-C-H, el potencial de contribución a la resistencia del hidróxido de calcio debido a las fuerzas Van der Waals es limitado, como resultado de un área superficial considerablemente menor. Es importante conocer que una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el cemento portland hidratado tiene un efecto adverso a la durabilidad química frente a las soluciones ácidas, debido a que es mayor la solubilidad del hidróxido de calcio, que la del S-C-H.^[1]

En el cemento hidratado, también hay presencia del sulfoaluminato de calcio, mejor conocido como Ettringita, el cual está presente en la masa de la pasta hidratada en un 15 al 20% y se manifiesta en forma de cristales planos hexagonales y juegan un papel menor en las relaciones estructura-propiedades. La Ettringita se produce por la hidratación del yeso, la portlandita y el hidróxido de aluminio. Aparece en el momento del fraguado (Ettringita primaria). Cuando hay un excedente de aniones en el sulfato, y una vez hidratado el producto, puede combinarse con la portlandita (que pasa a la solución como iones OH) al variar su pH, dando lugar a un producto expansivo que desarrolla presiones destructivas por encima de los 6MPa (61.18 kg/cm²).^[1]

La presencia del hidrato de monosulfato $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, en el concreto de cemento portland, lo hace más vulnerable al ataque de los sulfatos.

Es posible, que en cierta cantidad de granos de cemento sin hidratar quede en la microestructura de la pasta de cemento hidratada un largo tiempo después de la hidratación.

La estructura de los productos hidratados de la pasta de cemento como se ha presentado no permanece, ni estática, ni constante, a lo largo del tiempo.

2.2.4.2. AGUA

A pesar de que el agua es un ingrediente importante del concreto, poco tiene que ser escrito sobre ella. La regla de larga tradición para la calidad del agua es: “si puedes tomarla, tu puedes hacer concreto con ella”. La gran mayoría de concreto se realiza mediante suministros municipales de agua. Para concretos de buena calidad no necesariamente el agua debe de cumplir con las normas especificadas para agua potable. No hay una norma de la ASTM sobre la calidad del agua, pero BS 3148 aborda sobre esta cuestión.

Al hacer mezclas de concreto con agua con una cierta cantidad de impurezas tiene un efecto perjudicial en la calidad del concreto. Aunque el desarrollo de la fuerza satisfactoria es la preocupación principal, las impurezas contenidas en el agua de la mezcla también pueden afectar los tiempos de fraguado, la contracción por secado o la durabilidad, o la causa de eflorescencia. En este caso el agua debe tener grandes cantidades de sólidos en suspensión, una cantidad excesiva de sólidos disueltos, o cantidades apreciables de materiales orgánicos. En la tabla 2.2.6 se muestra los límites de concentración de diversas impurezas.

Tabla 2.2. 6. Niveles tolerables de concentración de impurezas en el agua para mezclas, (Sidney & Young).

Impureza	Máxima concentración (ppm)	Observaciones
Material suspendido	2000	Limo, arcilla, materia orgánica
Algas	500-1000	
Carbonatos	1000	
Bicarbonatos	400-1000	400 ppm de bicarbonatos de Ca, Mg.
Sulfato de sodio	10,000	Puede aumentar la resistencia inicial, pero más tarde reducirá la fuerza.
Sulfato de magnesio	40000	
Cloruro de sodio	20000	Disminuye los tiempos de fraguado, aumenta la resistencia inicial, y reduce la resistencia final.
Cloruro de calcio	50000	
Cloruro de magnesio	40000	
Sales de hierro	40000	
Fosfatos, arseniatos, boratos	500	
Sales de Zn, Cu, Pb, Mn, Sn	500	
Ácidos inorgánicos	10000	pH no deber ser menor a 3.0
Hidróxido de sodio	500	
Sulfuro de sodio	100	Debe someterse a prueba el concreto
Azúcar	500	Afecta el comportamiento

De estas impurezas mostradas en la tabla anterior, los podemos encontrar suspendidas o disueltas en el agua. Los sólidos suspendidos por lo general hasta aproximadamente 2000 ppm de arcilla en suspensión o sedimentos se puede tolerar. Una cantidad más alta puede aumentar la demanda de agua, aumento de la contracción por secado o la causa de eflorescencia. El agua turbia puede ser tratada antes de su uso. La presencia de algas o de cualquier otra materia orgánica suspendida puede causar problemas, ya que estos no se asientan fácilmente, como en el desarrollo de la resistencia al material por interferir en el proceso de hidratación del cemento. Además, estas impurezas pueden ayudar a la entrada excesiva de aire, reduciendo así la resistencia del material, o por el contrario pueden interferir con la acción de la entrada de los agentes aireantes.

De los sólidos disueltos, cuando se tengan en el agua menos de 2000 ppm en la mayoría de los casos puede ser utilizado con seguridad, aunque esto depende, por supuesto, de la naturaleza de la materia disuelta. Así como un poco de 100 ppm de sulfuro de sodio puede causar problemas. En el otro extremo, agua de mar [el cual contiene acerca de 34000 ppm (3.4%) de sal disuelta] se puede utilizar para hacer un concreto satisfactorio si se toman ciertas precauciones.^[8]

2.2.4.3. AGREGADOS

Los agregados generalmente ocupan aproximadamente del 70 al 80% en el volumen del concreto y por lo tanto puede esperarse que tenga una influencia importante en las propiedades del concreto. Hay materiales granulares, derivados en la mayor parte de las rocas naturales, de rocas trituradas, gravas naturales o arenas. Aunque algunos materiales como por ejemplo, escorias sintéticas y de arcilla expandida o pizarras, han sido utilizados hasta cierto punto para elaborar concretos ligeros. Además de su uso como relleno económico, provee al concreto una mejor estabilidad dimensional y resistencia al desgaste.

En otras instancias, un cierto tipo de roca puede ser requerido para obtener o alcanzar ciertas propiedades del concreto. Pero en la ausencia de requerimientos especiales, la mayoría de los tipos de rocas producidos pueden ser aceptados cumpliendo con los estándares de clasificación que rige la norma ASTM C33. Así, los agregados no son clasificados generalmente por su mineralogía; la clasificación más simple y más útil es en función de su gravedad específica. Los agregados pueden ser clasificados por su: peso pesado, peso normal, y de bajo peso.

Los agregados deben de tener la propiedad de ser duros y fuertes, además deben de estar libres de impurezas como limos, arcillas, tierra o de alguna materia orgánica. Además, rocas blandas y porosas pueden bajar su fuerza y su

resistencia al desgaste. Si en el agregado se tienen muchas partículas finas, se puede incrementar el contenido de agua requerida y, si hay presencia de materia orgánica puede interferir en el proceso de hidratación del cemento.^[8]

2.2.4.3.1. TIPOS DE AGREGADOS.

Los materiales utilizados en los concretos autocompactables, son los mismos tipos que los empleados en los concretos convencionales. En este tipo de concreto, la regularidad y el control, tienen una importancia especial, pues las propiedades de los concretos autocompactables se muestran más sensibles a pequeñas variaciones que las de un concreto convencional. Los concretos autocompactables requieren un mayor aporte de finos para garantizar la trabajabilidad y consecuentemente la autocompactabilidad, considerándose como finos, todos aquellos materiales con diámetro menor a 0.125 mm, incluyendo la fracción correspondiente de la arena. Además, es imprescindible el uso de un aditivo superfluidificante.^[5] Existen una amplia diversidad de agregados, pero comúnmente son clasificados como: Gruesos, finos, fragmentos de roca, ligero.

- **AGREGADO GRUESO**

El agregado grueso puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una combinación de dichos materiales, con partículas de tamaño máximo, generalmente comprendido entre 19 milímetros ($\frac{3}{4}$ " y 75 milímetros (3"), pudiendo contener fragmentos de roca y arena.

Los criterios empleados para los agregados en la fabricación de un concreto convencional, sirven para el concreto autocompactable. El tamaño máximo del agregado grueso, normalmente no sobrepasa los 20 mm, estando usualmente comprendidos entre 12 y 16 mm. Esta limitación se impone por dos motivos:

- Para poder obtener mayor uniformidad en el movimiento, y menor riesgo de bloqueo en el flujo.
- Asociada a los criterios de proyecto para garantizar el relleno en zonas con una alta cantidad de armadura, donde los espacios entre barras son pequeños.

Sin embargo, se puede utilizar un tamaño máximo superior, siempre y cuando se garantice la uniformidad del flujo, sin bloqueo ni segregación.

No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de las arenas empleadas. Se recomienda emplear arenas con granulometrías continuas, y preferiblemente, sin formas lajosas (típico de las arenas silíceas machacadas). Generalmente, el

contenido de arena puede representar el 60–50 % de la cantidad de agregado total. Esta cantidad está en función de la naturaleza y cantidad de la adición empleada, de cemento y de las características de la grava. Si la arena presenta un cierto aporte de finos ($\phi < 0.125\text{mm}$), se puede reducir la demanda de adición y de cemento, para obtener la cantidad de finos demandados. Asimismo se puede emplear arenas correctoras para satisfacer la demanda de finos.^[5]

- **AGREGADO FINO**

En el caso del agregado fino es arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros (malla N 200) y 4.75 milímetros (malla N 4), pudiendo contener finos de menor tamaño. El elevado aporte de finos en el concreto autocompactable garantiza la apropiada cohesión a la mezcla, necesaria para evitar la segregación de los agregados gruesos y la exudación de agua.^[5]

- **FRAGMENTOS DE ROCA**

Los fragmentos de roca son los agregados con tamaño mayor de 75 milímetros (3") y una masa máxima de 30 kilogramos, como los boleos y la piedra braza, entre otros, que se utilizan comúnmente para fabricar concreto ciclópeo.^[9]

- **AGREGADO LIGERO**

El agregado ligero son los agregados finos o gruesos que, por su baja densidad, se utilizan en la fabricación de concreto estructural ligero, de baja masa volumétrica y resistencia limitada a la compresión, constituidos predominantemente por materiales inorgánicos de estructura celular, preparados por expansión, calcinación o fusión incipiente de productos tales como escorias de altos hornos, arcillas comunes, diatomitas, cenizas volantes, lutitas y pizarras, o bien, mediante otros tratamientos de materiales naturales tales como piedra pómez, perlitas, tezontles, escorias y tobas.^[9]

- **FILLER MINERAL**

El filler mineral es un agregado que se emplea en el concreto autocompactable con el objetivo de dar cohesión y trabajabilidad a la mezcla. Como consecuencia de ello se evita la segregación de los agregados gruesos y la exudación del agua. Las propiedades del filler mineral (finura, granulometría y naturaleza) influyen en el comportamiento del concreto porque de acuerdo con éstas demandará más o menos agua y/o aditivo superplastificante.

La granulometría de este tipo de material se define en la Tabla 2.2.7 de acuerdo con la norma UNE-EN 12620:2002. La tendencia general fija que las partículas cuyo diámetro sea inferior a 0,125 mm se consideren como material fino incluyéndose en ellas el cemento, el filler mineral y las adiciones (ceniza volante, humo de sílice, escoria granulada de alto horno, etc.).

Tabla 2.2. 7. Granulometría del filler mineral, (Núñez, 2009)

Tamaño del tamiz (mm)	% en masa que pasa
2	100
0.125	85 – 100
0.063	70 – 100

Entre los distintos tipos de fillers existentes destacan: el filler calizo, el filler dolomítico y la puzolana natural, siendo el más común el primero. La puzolana natural a diferencia de las otras dos es una adición activa, es decir, que reacciona con la portlandita formada durante la hidratación del cemento y contribuye al desarrollo de resistencias a largo plazo.^[3]

2.2.4.4. MATERIA PRIMA

- **MARMOLINA**

La marmolina es un polvo mineral que resulta de la trituración del mármol, el cual está compuesto principalmente por carbonato de calcio CO_3Ca , acompañado de una gran diversidad de otros minerales (mica, silicatos magnésicos, grafito, óxidos de hierro, etc.).^[10] De acuerdo a un análisis químico realizado a la marmolina se tiene su composición química presentada en la tabla 2.2.8.

Tabla 2.2. 8. Composición química de la Marmolina, (Imeco, S.A. Canteras, 2009).

ANALISIS QUIMICO			
PARAMETRO	RESULTADO	PARAMETRO	RESULTADO
Carbonato de Calcio CaCO_3	> 98,1 %	Oxido de Hierro Fe_2O_3	0,07 %
Carbonato de Magnesio MgCO_3	0,95 %	Oxido de Calcio CaO	55,0 %
Oxido de Silicio SiO_2	< 0,1 %	Oxido de Magnesio MgO	0,45 %
Oxido de Aluminio Al_2O_3	0,14 %		

Estos pueden ser presentados en diferentes granulometrías, que va desde los más finos hasta los más gruesos. A continuación en la figura 2.2.5 se presentan unas imágenes de la marmolina.

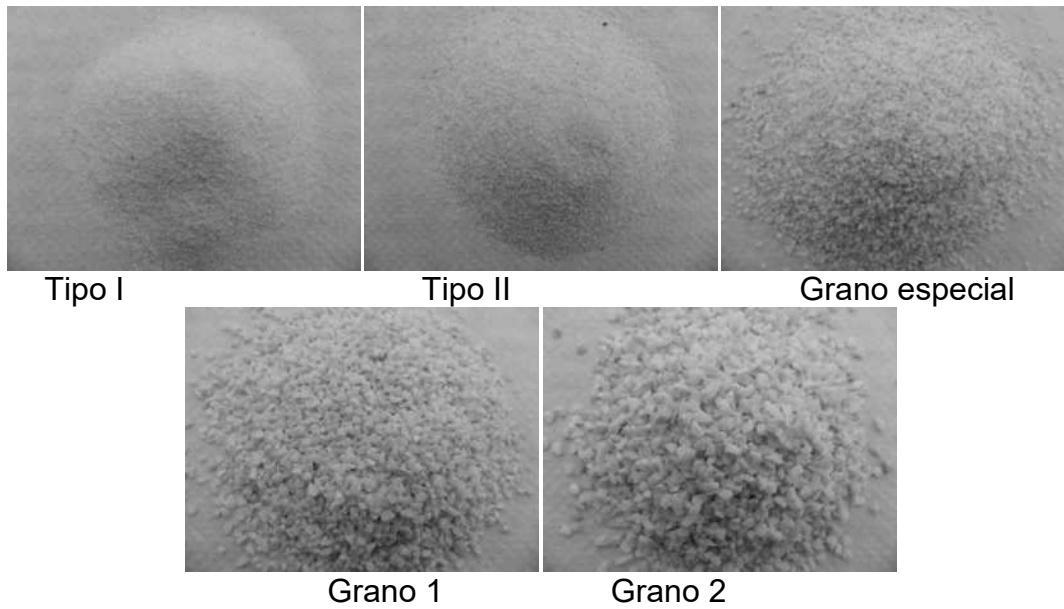


Figura 2.2. 5. Clasificación de la marmolina

La aparición de la marmolina va de la mano de la baldosa hidráulica y está fechada en el siglo XIX pero no fue hasta principios del XX que adquirió preponderancia, sobretodo en la zona mediterránea.

En los años 60 y 70, los grandes crecimientos urbanísticos con la aparición de nuevos materiales para hacer frente la gran demanda, provocó la decadencia de este producto artesano. Ahora su belleza y su carácter especial, ha hecho que se recupere para aquellos que tienen como prioridad la calidad y la distinción, tanto para obras de restauración y arquitectura tradicional como para la arquitectura contemporánea.^[2E]

El uso de la marmolina en nuestros tiempos ha sido muy diverso. Los productos de marmolina se caracterizan por su fabricación artesanal y por ofrecer ilimitadas posibilidades decorativas. Productos con mucho carácter y calidad, destacan por su acabado superficial limpio y brillante, por su excelente envejecimiento y por la su elegancia y nobleza.

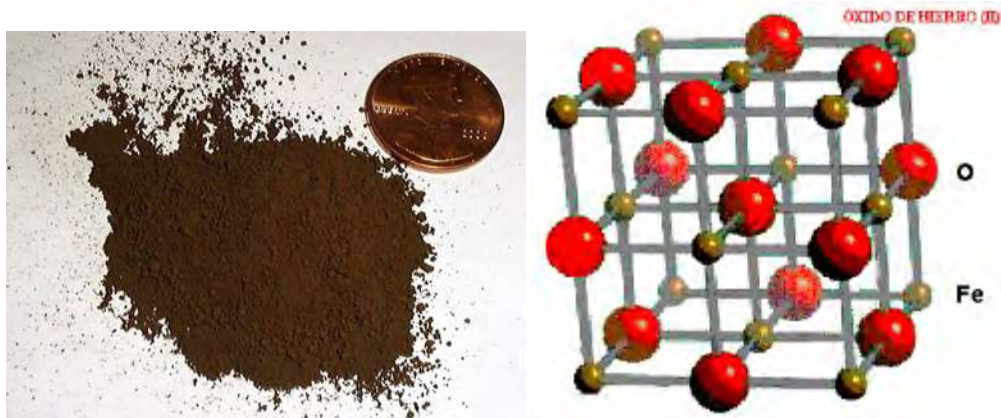
El carbonato cálcico compite ventajosamente con otros minerales utilizados para cargas, por su precio mucho más bajo que la sílice micronizadas, el talco, el caolín, la mica y la wollastonita. Constantemente se le abren nuevos campos de aplicación.^[3E]

Las empresas marmoleras se encuentran concentrados en el centro de nuestro país, algunas de ellas son principalmente Querétaro, Estado de México, y Durango, siendo ahora Durango el que tiene el primer lugar en la producción del mármol. La extracción anual de mármol en Durango alcanza más de un millón 800

mil toneladas, de los cuales, según Carlos Romo Ramírez, director de Minería del Estado, un 80 por ciento de la materia prima es procesado por la industria local. El posicionamiento de los marmoleros de Durango es fuerte en el país; supera a la producción de Puebla. Y aun cuando en Torreón, Coahuila, operan dos grandes plantas como Intermármol y Mármol El Paso, el mayor número de las empresas se encuentran en la parte de Gómez Palacio y Lerdo. ^[4E]

- **OXIDO DE HIERRO**

Los óxidos de hierro son compuestos químicos formados por hierro (Fe) y oxígeno (O). Se conocen 16 óxidos de hierro. ^[5E] Químicamente, el óxido de hierro consiste de simples compuestos en la forma pura de Fe, O e H únicamente. El hierro es una estructura octaédrica en el cual seis átomos de Oxígeno y/o grupos oxidrilos se arreglan en paquetes compactos hexagonales o cúbicos, con pequeños intersticios entre ellos, mostrado en la figura 2.2.6. ^[6E]



Pigmento de Oxido de hierro

Estructura del oxido de hierro

Figura 2.2. 6. Oxido de hierro y su estructura,
(http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xidos_de_hierro, fecha de consulta
24/10/2011).

Los dos principales grupos de óxidos de hierro son: los óxidos (Fe_2O_3), los oxihidróxidos (FeOOH) y los trihidróxidos [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] no existen.

El hierro es el segundo metal más abundante y el cuarto de todos los elementos, superado únicamente por el oxígeno, el silicio y el aluminio. Los minerales de hierro más comunes son: la hematita o mineral de hierro rojo (Fe_2O_3), que contiene un 70 % de hierro; la limonita o mineral de hierro marrón ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), con un 42 % de hierro; la magnetita o mineral de hierro magnético (Fe_3O_4), con un alto contenido de hierro; la siderita o mineral de hierro espático (FeCO_3); la pirita (FeS_2), el mineral azufrado más común; y la pirrotita o

pirita magnética (FeS). El hierro se utiliza para la fabricación de piezas de hierro y acero fundidos y en aleaciones con otros metales. También se emplea para aumentar la densidad de los líquidos en las perforaciones petrolíferas.^[12]

El hierro por sí mismo no es especialmente fuerte, pero su resistencia aumenta de forma notable cuando se alea con carbono y se enfría rápidamente para formar acero, lo que explica su importancia como metal industrial. Se utilizan en diversas combinaciones y proporciones en la producción de aleaciones de acero. Los más importantes son el manganeso (ferromanganeso y spiegeleisen), el silicio (ferrosilicio) y el cromo. Desde el punto de vista industrial, los compuestos de hierro más importantes son los óxidos y el carbonato, que constituyen los minerales más importantes de los que se obtiene el metal. Los cianuros, nitruros, fosfuros, fosfatos y el hierro carbonilo tienen una importancia industrial menor.

La hematita, conocida también como óxido de hierro(III), especularita u oligisto, cuya fórmula química es $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, tiene una masa de 70 % Fe y 30 % O; es trigonal, del tipo del Al_2O_3 , con parámetros de red $a_0 = 5.038 \text{ \AA}$ y $c_0 = 12.272 \text{ \AA}$. Es paramagnética y aislante eléctrica, y las partículas tienen forma de plaquetas hexagonales u octogonales, variando su color de marrón rojizo (rojo sangre) a negra. Se halla en depósitos independientes a veces de gran espesor y extensión, como mineral asociado en rocas ígneas, como inclusión en muchos minerales, en forma de producto de sublimación de lavas o como resultado de metamorfismo de contacto, y por alteración de siderita o magnetita.^[13]

La utilización de algunos óxidos de hierro en la preparación de fluidos magnéticos ha traído nuevas aplicaciones de estos, entre las que se puede mencionar su empleo como tintas magnéticas, sellos magnéticos en motores, instrumentos para memoria óptica, giroscopios, unidades de refrigeración magnética, marcado y separación celular, medios de contraste en imaginología clínica, medio de transporte y liberación de medicinas e hipertermia con fluidos magnéticos.

• CARBÓN

El carbón o carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono, utilizada como combustible fósil. Suele localizarse bajo una capa de pizarra y sobre una capa de arena y arcilla. Se cree que la mayor parte del carbón se formó durante el período carbonífero (hace 280 a 345 millones de años). Existen diferentes tipos de carbones minerales en función del grado de carbonificación que haya experimentado la materia vegetal que originó el carbón. Estos van desde la turba, que es el menos evolucionado y en que la materia vegetal muestra poca alteración, hasta la antracita que es el carbón mineral con

una mayor evolución. Esta evolución depende de la edad del carbón, así como de la profundidad y condiciones de presión, temperatura, entorno, etc., en las que la materia vegetal evolucionó hasta formar el carbón mineral.^[6E]

El carbón suministra el 25% de la energía primaria consumida en el mundo, sólo por detrás del petróleo. Además es de las primeras fuentes de energía eléctrica, con 40% de la producción mundial (datos de 2006). Las aplicaciones principales del carbón son:

- 1- Generación de energía eléctrica. Las centrales térmicas de carbón pulverizado constituyen la principal fuente mundial de energía eléctrica. En los últimos años se han desarrollado otros tipos de centrales que tratan de aumentar el rendimiento y reducir las emisiones contaminantes, entre ellas las centrales de lecho fluido a presión. Otra tecnología en auge es la de los ciclos combinados que utilizan como combustible gas de síntesis obtenido mediante la gasificación del carbón.
- 2- Coque. El coque es el producto de la pirolisis del carbón en ausencia de aire. Es utilizado como combustible y reductor en distintas industrias, principalmente en los altos hornos (coque siderúrgico). Dos tercios del acero mundial se producen utilizando coque de carbón, consumiendo en ello 12% de la producción mundial de carbón (cifras de 2003).
- 3- Siderurgia. Mezclando minerales de hierro con carbón se obtiene una aleación en la que el hierro se enriquece en carbono, obteniendo mayor resistencia y elasticidad. Dependiendo de la cantidad de carbono, se obtiene: Hierro dulce: menos del 0,2 % de carbono; Acero: entre 0,2% y 1,2% de carbono; fundición: más del 1,2% de carbono. Se utiliza en las fábricas que necesitan mucha energía en sus procesos, como las fábricas de cemento y de ladrillos.
- 4- Uso doméstico. Históricamente el primer uso del carbón fue como combustible doméstico. Aún hoy sigue siendo usado para calefacción, principalmente en los países en vías de desarrollo, mientras que en los países desarrollados ha sido desplazados por otras fuentes más limpias de calor (gas natural, propano, butano, energía eléctrica) para rebajar el índice de contaminación.
- 5- Carboquímica. La carboquímica es practicada principalmente en África del Sur y China. Mediante el proceso de gasificación se obtiene del carbón un gas llamado gas de síntesis, compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. El gas de síntesis es una materia prima básica que puede transformarse en numerosos productos químicos de interés como, por ejemplo: Amoniaco, Metanol; y la Gasolina y gasóleo de automoción a

través del proceso Fischer-Tropsch (proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, CO y H₂)

6. Petróleo sintético. Mediante el proceso de licuefacción directa, el carbón puede ser transformado en un crudo similar al petróleo. La licuefacción directa fue practicada ampliamente en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial pero en la actualidad no existe ninguna planta de escala industrial en el mundo.

Estas dos últimas aplicaciones antiguas son muy contaminantes y requieren mucha energía, desperdiciando así un tercio del balance energético global. Debido a la crisis del petróleo se han vuelto a utilizar.^[6E]

Por lo que se refiere a las cifras de producción para 2007, cuatro países producen un poco menos de 70% del carbón duro y café del mundo, siendo el último de menor importancia en la producción de estos países. China, el mayor productor (39.3%) es seguida por los EU (16.2%) y luego por la India (7.5%) y Australia (6.1%). Otros países productores de carbón son, en orden de importancia, Rusia, África del Sur, Indonesia, Polonia, Kazajistán y Colombia. El resto del mundo sólo produjo 13.6% del total del carbón duro y café en 2007.

La producción del carbón en México se encuentra en numerosos estados de la República, sólo hay tres regiones carboníferas importantes. Con mucho, la más importante es la cuenca de Sabinas y Fuentes-Río Escondido en el centro-norte de Coahuila, incluyendo un área contigua pequeña de Nuevo León, que cubre aproximadamente 12 000 km² la mayor parte del período Cretácico y de la época Eocena del período Terciario. La cuenca de Sabinas (la fuente básicamente de carbón coquizable, de contenido de ceniza más bajo que el de carbón térmico) y Fuentes-Río Escondido (la mayor parte de carbón térmico) producen más de 90% del carbón mexicano.

La siguiente región más importante, aunque muy inferior, se encuentra en la porción noroeste de Oaxaca, donde las vetas, variando de un espesor de unos cuantos centímetros a 3 metros, contienen poco más que 30m. La tercera cuenca, ubicada al sur de Hermosillo en Sonora y del período Triásico, también tiene reservas estimadas reducidas (85m). La formación llamada Barranca con vetas de carbón también contiene grafito, el cual es la forma metamorfoseada última del carbón, o sea, el elemento carbono puro. Tanto los yacimientos pequeños de Oaxaca como los de Sonora, del Triásico y Jurásico, están en estratos fuertemente plegados y con fallas geológicas que hacen que su explotación sea difícil y, por tanto, costosa.^[14]

Dentro del grupo de los carbones se encuentra el carbón activado, en sus diferentes formas, juega un papel importante en muchas industrias. La mayoría de los carbones activados industriales son producidos a partir de materiales carbonáceos que se obtienen de la naturaleza, tales como la turba y la madera, mediante procesos térmicos. En general, los carbones activos se obtienen como un residuo sólido, después de eliminar los componentes volátiles de un material carbonáceo. Generalmente la estructura de los materiales carbonáceos de partida es solo ligeramente porosa. Una vez aplicado un procedimiento adecuado de activación, se obtiene un producto que se denomina carbón activado, lo que denota un material con una estructura de poros interna accesible y bien desarrollada, mostrado en la figura 2.2.7. ^[15]

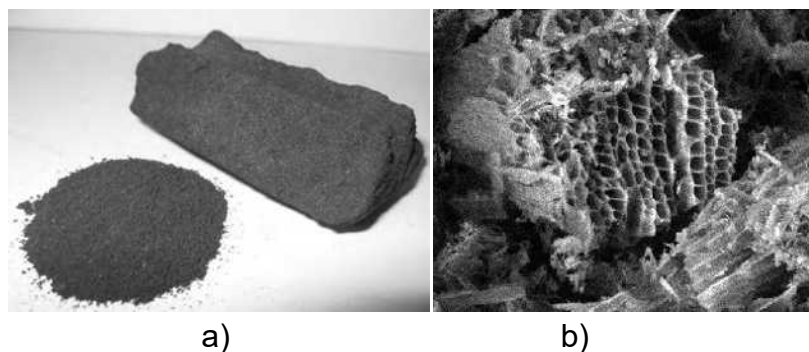


Figura 2.2. 7. a) Carbón activado; nanoporos de un carbón activado vistas en un microscopio electrónico de barrido, (http://es.wikipedia.org/wiki/Carb%C3%B3n_activado)

Generalmente se produce por dos métodos diferentes:

- Activación química: una sustancia deshidratante, que puede ser un ácido, se mezcla con la materia prima y se somete a un tratamiento a temperaturas moderadas. Esta técnica puede ser problemática porque, por ejemplo, al usar como agente deshidratante cloruro de zinc los residuos del cinc pueden permanecer en el producto final, aun después de lavado.
- Activación física o del vapor: el material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a una alta temperatura para que se active.

Como material de partida se usan varios materiales carbonosos, como cáscaras de nuez, madera, carbón mineral, coco. ^[7E]

- **NEUMÁTICO**

Uno de los residuos que más caracterizan a las sociedades desarrolladas modernas, tan dependientes del automóvil, son los neumáticos fuera de uso. Aunque se trata de un residuo no peligroso, presenta una alta capacidad calorífica –que dificulta su extinción en caso de incendios y no es degradable. Estas y otras características, constituyen factores que aconsejan la adopción de una norma que los regule teniendo en cuenta esas particularidades propias.^[16]



Figura 2.2. 8. Abandono de neumáticos usados, denominado Panteón de llantas, (<http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/> fecha de consulta 23/10/2011)

Es cierto que en principio los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el medioambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos, ver figura 2.2.9. No en vano, los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas duras - son resistentes al ozono, la luz y las bacterias- lo que les hace prácticamente indestructibles por el paso del tiempo. Su almacenamiento en el vertedero no permite recuperar ni energía ni materia. Los neumáticos enteros son flexibles y por su forma y tamaño limitan la rehabilitación del vertedero al ser difícilmente compactables, además son refugio ideal de insectos y roedores, y acumulan gases y lixiviados, frecuentes en los basureros.



Figura 2.2. 9. Tratamiento inadecuado de los neumáticos, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)

Según el estado del neumático después de su utilización, estos se pueden clasificar en:

- Neumáticos reutilizables
- Recauchutados (pueden ser recauchutados y las especificaciones técnicas determinantes son fijadas por las empresas especializadas.
- Neumáticos no reutilizables.

En países Europeos como Alemania, Francia, Austria reciclan hasta el 60% por ciento de sus llantas usadas, en México prácticamente no existe tal reciclado, debido a la escasa conciencia ambiental y a un casi inexistente sistema de control y de mecanismos necesarios para el correcto tratamiento/recuperación de llantas fuera de uso (N.F.U), de los 28.5 millones de llantas que se desechan anualmente en México el 91% de los NFU terminan en lotes baldíos ríos, carreteras, dicha situación no solo arruina nuestros paisajes sino que se convierte en un factor generador de incendios, como se muestra en la siguiente figura 2.2.10.



Figura 2.2. 10. Grafico del destino final de los neumáticos usados en México, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)

Este último es el problema más serio ya que ocasiona severos daños a nuestra salud, pues como se ha verificado, varios estudios técnicos han demostrado que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, tales como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo, los efectos dañinos que estos pueden ocasionar a nuestra salud son irreversibles. [8E]



Figura 2.2. 11. Estructura de un neumático,
(<http://vehiculosautomoviles.blogspot.com/2010/02/estructura-de-un-neumatico.html>.)

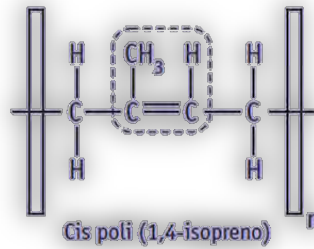
Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar mucho si son sometidos a tensiones mecánicas, volviendo a sus dimensiones originales (o casi) cuando las tensiones cesan. A continuación, se esquematizan los diferentes tipos de cauchos en la tabla 2.2.9.

Tabla 2.2. 9. Tipos de elastómeros, (Cano serrano, et al, valorización material y energética de neumáticos fuera de uso)

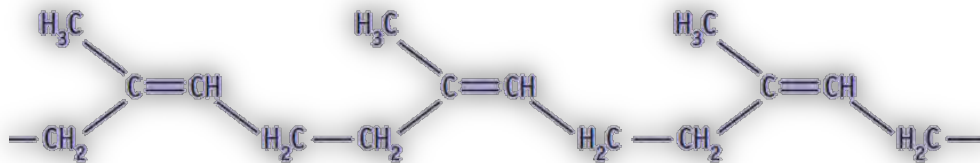
TIPOS DE ELASTÓMEROS	
ELASTÓMEROS	Cuchos naturales
	Estireno- Butadieno (SBR)
	Polibutadieno (BR)
	Isopreno
	Etileno-propileno (EPM-EPDM)
	Isobutadieno-isopreno (IIR)
	Cuchos de nitrilo (NBR)
	Policloropreno (neopreno)
	Cuchos fluorados (CFM-FKM)
	Cuchos de silicona (Q)
	Termoplásticos

El **Caucho natural (cis-poliisopreno)**, se extrae comercialmente a partir del látex del árbol *Hevea brasiliensis*, que se cultiva en plantaciones de regiones tropicales del sudeste asiático. La materia prima del caucho natural es un líquido lechoso denominado látex. La estructura de la goma natural es principalmente cis-

poli(1.4-isopreno), un polímero de cadena larga, mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, sales inorgánicas además de otros componentes.



a) Unidad estructural repetitiva del caucho natural



b) Segmento de una cadena de polímero de caucho natural

Figura 2.2. 12. a) Estructura del caucho natural; b) Segmento de cadena de polímero de caucho natural

La vulcanización es el proceso químico por el cual las moléculas del polímero se unen unas con otras con enlaces químicos para dar una estructura tridimensional en la que la difusión molecular se encuentra restringida. En 1839 Charles Goodyear descubrió un proceso de vulcanización para el caucho natural utilizando azufre y carbonato de plomo como agentes químicos. Goodyear descubrió que cuando se calentaba una mezcla de caucho natural, azufre y carbonato de plomo el caucho pasaba de ser un material gomoso y blando a elastomérico. Este proceso fue patentado por Goodyear en el año 1844. En la siguiente figura se puede ver que en ese proceso los átomos de azufre se entrecruzan con las cadenas de cis poli (1.4-isopreno).^[16]

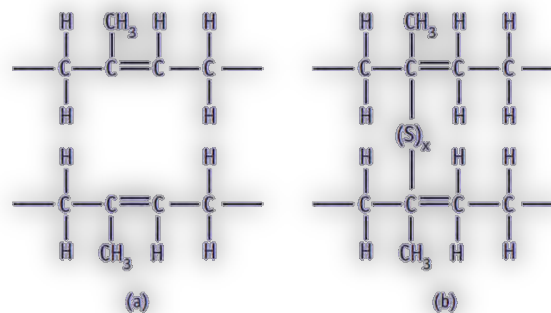


Figura 2.2. 13. Ilustración esquemática del vulcanizado del caucho; a) Cadena de cis poli (1.4-isopreno) antes del entrecruzamiento, b) Después del entrecruzamiento con azufre

Un neumático está compuesto, en términos porcentuales, por: Caucho 45%, Humo negro 21%, Metal 20%, Textiles 4%, Aditivos 8%, Oxido de zinc 8% y Azufre 1%.^[10E]

Un neumático, también denominado cubierta en algunas regiones, es una pieza toroidal de caucho que se coloca en las ruedas de diversos vehículos y máquinas. Su función principal es permitir un contacto adecuado por adherencia y fricción con el pavimento, posibilitando el arranque, el frenado y la guía. Los neumáticos generalmente tienen hilos que los refuerzan. Dependiendo de la orientación de estos hilos, se clasifican en diagonales o radiales. Los de tipo radial son el estándar para casi todos los automóviles modernos.^[11E]

Los neumáticos usados son causa de grandes problemas ambientales hoy en día. Una forma de aprovecharlos y de disminuir su problema en el medio ambiente es utilizarlos como agregado en el concreto. Con el uso de este agregado se obtiene un concreto de características distintas, con algunas propiedades especiales, entre las cuales se puede destacar su baja densidad.

Existen muchas maneras de obtenerse los residuos en forma granular, pero casi todas consisten en distintos procesos para moler los neumáticos, ver figura 2.2.14. La granulometría y la geometría de los granos dependen de estos procesos. Puede optarse por la utilización del residuo con o sin la red metálica del neumático, pero en el último caso, se debe hacer una separación después de moler, que puede ser una separación magnética. En los procesos de recauchutaje, en que se rehacen las rallas en los neumáticos, se obtiene “naturalmente” un residuo granular, sin la red metálica, en la forma de pequeñas tiras, de aproximadamente 1mm por 5mm, además de un polvo fino. Con la utilización del residuo de goma se consigue también una reducción del costo del concreto, pues el costo del residuo consiste básicamente en el transporte y en el proceso de trituración.



Figura 2.2. 14. Proceso de trituración del neumático usado

La densidad aparente del agregado varía de 0.27g/cm^3 a 0.34g/cm^3 , que es una densidad mucho menor a la de los agregados tradicionales, y por lo tanto, se puede esperar una reducción de la densidad del concreto. Para un buen desempeño de un concreto, es fundamental que el agregado tenga adecuadas propiedades mecánicas, y que sea durable, por lo tanto, su durabilidad es tan importante como su resistencia. Se encontró en la literatura estudios sobre la estabilidad química de la goma sujeta a ambientes altamente alcalinos, como es el caso del concreto. En ensayos de pérdida de masa, resistencia a tracción, análisis de microestructura y determinación de variación de pH de soluciones con goma en inmersión, no se encontró variaciones significativas. Otros estudios fueron hechos en el análisis de la durabilidad de la pasta de cemento con residuos de goma. Fueron realizados ensayos de absorción por inmersión y capilaridad, resistencia al ataque ácido y resistencia a abrasión. La absorción de agua por la pasta tuvo un pequeño aumento con la adición de la goma. La resistencia al ataque ácido a su vez mejoró, debido a la alta resistencia química de la goma. La resistencia al desgaste tuvo cierta disminución, pero el efecto puede ser disminuido con un tratamiento de los residuos con NaOH. El principal problema con la adición de goma al concreto es la *perdida de resistencia mecánica*.

Los residuos pueden ser adicionados tanto en sustitución al agregado fino cuanto al grueso, pero el aumento de la cantidad de goma siempre trae reducción

de la resistencia. Una sustitución de 60% del agregado lleva a reducciones de más de 80% en la resistencia a compresión, de modo que los concretos con grandes cantidades de goma no son aplicables para fines estructurales. Además, se puede observar que la sustitución por el agregado fino, trae menor reducción de la resistencia. Cuanto al tamaño del agregado, se puede decir que los residuos más finos mejoran la resistencia mecánica del concreto, siendo que tamaños mayores que 4mm no son recomendados. En algunos casos, se puede decir que partículas con geometría alargada mejoran las propiedades mecánicas, pero el asunto no fue muy estudiado. La mayoría de los autores considera que las causas de la disminución de la resistencia mecánica son básicamente dos:

- La baja resistencia de la goma; y
- La baja adhesión entre la goma y la pasta de cemento.

Varios estudios intentaron mejorar la adhesión de los residuos con la pasta, básicamente tratando superficialmente la goma. Tratamientos con NaOH (Hidróxido de sodio) o con CCl₄ (Tetra cloruro de carbono) fueron satisfactorios, trayendo aumentos de hasta 57% en la resistencia a compresión. La presencia de impurezas pareció ser una de las causas de la baja adhesión, pues con un sencillo tratamiento con agua se obtuvo un aumento de 16% de la resistencia. Además de la reducción de la resistencia a compresión, los residuos de goma traen también un efecto benéfico a las propiedades mecánicas del concreto: un aumento de su capacidad de absorber energía, o sea, de su tenacidad y de su resistencia al impacto. Como la goma tiene un módulo de elasticidad mucho menor que la pasta de cemento, el concreto puede trabajar más su deformación cuando está sometido a una carga. En un concreto tradicional, el agregado es uno de los principales elementos que impiden su desplazamiento. La inclusión de los residuos atenúa esa restricción, dando al concreto una mayor movilidad. Estudios realizados en este sentido mostraron que una adición de 10% de goma al concreto (con relación al volumen total) aumenta su tenacidad en cerca de 23%, a pesar de disminuir su resistencia a compresión en 65%. Por su expresiva capacidad de absorber energía, el concreto con goma es recomendado para aplicaciones en que el material está sujeto a efectos de impacto y en que no se exigen altas resistencias mecánicas, como barreras de protección, pavimentos, revestimientos. Algunas propiedades del concreto fresco también fueron estudiadas. La cantidad de aire incorporada incrementa con el aumento de la adición de residuos y con la disminución de su tamaño. La trabajabilidad fue estudiada con el método del asentamiento de cono (slump test), verificándose disminución de la trabajabilidad con el aumento de la cantidad de sustitución. En ensayos de conductividad térmica realizados con placas de mortero conteniendo residuos de goma, las placas presentaron características de aislamiento, con valores de conductividad

inferiores al permitido por la norma C208–95 ASTM, “Standard Specification for cellulosic Fiber Insulating Board”. En otros estudios, placas de concreto con goma también presentaron propiedades de aislamiento acústico. Casi no se tiene información sobre verdaderas utilizaciones comerciales del concreto con adición de residuos de goma y las informaciones obtenidas son casi todas provenientes de trabajos técnico-científicos. Un caso que puede ser citado fue el estudio realizado por Jorge Luis Akasaki, que junto con la empresa “Concretic de Nipoã – Artefactos de Cimento Ltda.”, produjo bloques ranurados de concreto de tamaño comercial 14cm x 39cm x 19cm. Trabajando con distintas composiciones obtuvo bloques conteniendo 13% (en volumen) de residuos de goma, con resistencias medias de 4.54MPa (46.3kg/cm²), que fueron consideradas suficientes para comercialización.

• PERLITA

Material obtenido como consecuencia de un tratamiento térmico a unos 1,000-1,200°C de una roca silíceo volcánica del grupo de las riolitas. Se presenta en partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1.5 y 6 mm, con una densidad baja, en general inferior a los 100 kg/m³. Posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad. ^[12E]



a) Perlita tipo C-2



b) Perlita tipo A

Figura 2.2. 15. Tipos de perlitas

La composición química típica de la perlita es:

- 70-75% dióxido de silicio: SiO₂
- 12-15% óxido de aluminio: Al₂O₃
- 3-4% óxido de sodio: Na₂O
- 3-5% óxido de potasio: K₂O
- 0.5-2% óxido de hierro: Fe₂O₃
- 0.2-0.7% óxido de magnesio: MgO
- 0.5-1.5% óxido de calcio: CaO
- 3-5% pérdida en el horno (agua químicamente combinada) ^[13E]

Las perlitas son de forma esférica, por lo general se tienen dos tipos: perlita fina (esta perlita es generalmente más dura y resistente) y la gruesa (se considera

menos dura y más dúctil).^[14E] La superficie de la perlita es casi perfectamente lisa lo que afecta considerablemente la adherencia de la pasta de cemento y agua, a la misma, a la hora de mezclar los componentes del concreto. Esto sumado a la baja densidad de la perlita hacen que alguna de ellas “floten” en la mezcla íntima, generando así un esqueleto granular defectuoso.^[17]

La perlita es producto de la expansión de un mineral crudo, su estructura está conformada por celdas de aire que lo convierte en un excelente aislante térmico y acústico. Las mezclas con perlitas son incombustibles, dado su origen inorgánico, no se descomponen y son inalterables ante agentes químicos y físicos. Su empleo en la construcción permite ambientes climáticamente bien protegidos y sin condensaciones en paredes y techos brindando un importante ahorro de energía en calefacción y refrigeración. A continuación se presentan algunas de los usos que tiene este producto mineral.

- Industria de la construcción: la perlita es mezclada con argamasa, concreto y estuco para impartir propiedades acústicas y térmicas, liviandad en el peso, y resistencia al fuego. Se aplica en: concretos de liviano peso utilizados en la cubierta de techos, suelos y tejas y componentes de prevaciado.
- Productos terminados en losas de cielo raso acústicas, aislamiento de tuberías, tablas de techo aislantes.
- Pérdidas de carga aislante en pisos y cavidades de pared.
- Horticultura: la perlita, es usada para modificar los suelos reduciendo su firmeza y facilitando el drenaje de agua y la retención de humedad. La perlita es usada también como un medio de propagación para plantas de semilla y en el embalaje y almacenamiento de bulbos y plantas.^[15E]

2.2.4.5. ADITIVOS PARA CONCRETO

Los aditivos son sustancias químicas naturales o manufacturadas que se adicionan al concreto antes o durante el mezclado del mismo. Los aditivos más frecuentemente utilizados son: *agentes incorporadores de aire, los reductores de agua, los retardantes y los acelerantes*. Los aditivos se emplean para aportar propiedades especiales al concreto fresco o endurecido. Los aditivos pueden mejorar las características de durabilidad, trabajabilidad o resistencia de una mezcla dada de concreto. Los aditivos son utilizados para vencer difíciles situaciones de construcción, como son los vaciados (colados) en clima caliente o frío, los requerimientos del bombeado, los requerimientos de resistencias tempranas o las especificaciones de una relación agua/cemento muy baja. A continuación se describirán de manera muy general la función de los aditivos.

Según ASTM aditivo es el material, además del cemento, agua y áridos, que se añade al concreto o mortero inmediatamente antes o durante el mezclado. El objeto de añadir aditivos es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee, y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido. Se presenta en forma de polvo o líquido. Los aditivos líquidos se emplean diluidos en agua y los aditivos en polvo se prefiere sean agregados directamente al cemento. Se aplican en dosis pequeñísimas que varían de entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento y su efecto es de índole físico, químico o físico-químico. Esta dosis empleada tiene directa relación con la magnitud del efecto, debiéndose en todo caso respetar los límites recomendados por el fabricante y el aporte de sustancias dañinas en el concreto. ^[18]

Los aditivos se pueden clasificar como:

- Tipo A: Reductor de agua.
- Tipo B: Retardador de fraguado.
- Tipo C: Acelerador de fraguado.
- Tipo D: Reductor de agua y retardador.
- Tipo E: Reductor de agua y acelerador.
- Tipo F: Reductor de agua y alto efecto.
- Tipo G: Reductor de agua de alto efecto y retardador.

Los aditivos Incorporadores de aire se encuentran separados de este grupo, e incluidos en la norma ASTM C 260 “Especifications for Air Entraining Admixtures for Concrete”. ^[19]

• AGENTES INCORPORADORES DE AIRE.

Son sustancias químicas líquidas que se adicionan durante el mezclado para producir burbujas microscópicas en el concreto, llamado *aire incorporado*. Estas burbujas mejoran la resistencia del concreto a los daños ocasionados por la congelación y el deshielo, así como a las sales de deshielo. ^[10] En el concreto en estado plástico, los agentes incorporadores de aire mejoran la laborabilidad y pueden reducir la exudación (sangrado) y la segregación. Para trabajos exteriores (estacionamientos, pavimentos, aceras, pisos de piscinas, patios) que están sujetos a ciclos de hielo y deshielo, o, en donde se utilizan sales de deshielo, se especifica un contenido de aire de un 5 a un 7% del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso, en la tabla 2.2.10 se puede apreciar el contenido de aire dependiendo del tamaño del agregado grueso.

Tabla 2.2. 10. Recomendación sobre contenido de aire en el concreto

Tamaño máximo nominal de agregados		Contenido de aire en porcentaje	
mm	plg	Exposición severa*	Exposición moderada**
9.5	3/8	7.5	6
12.5	1/2	7	5.5
19	3/4	6	5
25	1	6	4.5
37.5	1 1/2	5.5	4.5
50	2	5	4
75	3	4.5	3.5

***Exposición severa.** Concreto en clima frío que estará en contacto permanente con agua antes de que ocurra congelación o en donde sales de deshielo sean utilizadas.

****Exposición moderada.** Concreto en clima frío que estará solo ocasionalmente expuesto a humedad antes de que ocurra congelación y que no está expuesto a la aplicación de sales de deshielo.

El aire incorporado no es necesario para concreto estructural en interiores que no estén sujetos a la congelación y deshielo. No debe ser utilizado en pisos o losas que tienen un acabado muy liso. En concretos con elevado contenido de cemento, la incorporación de aire reducirá la resistencia alrededor de un 5% por cada 1% de aire incorporado; pero en concretos con un bajo contenido de cemento, la incorporación de aire afectará menos y puede incrementar la resistencia debido a la reducción del agua para lograr un cierto asentamiento. Los agentes incorporadores de aire para su uso en el concreto deben cumplir con los requerimientos de ASTM C250 "*Especificación para adiciones de incorporadores de aire*".

• REDUCTORES DE AGUA

Son utilizados con dos propósitos diferentes: (1) disminuir el contenido de agua e incrementar la resistencia, (2) para obtener revenimientos más altos utilizando el mismo contenido de agua. Los reductores de agua generalmente reducirán el contenido de agua requerido para lograr un cierto asentamiento. Estos aditivos dispersan las partículas de cemento en el concreto y hacen más eficiente el uso de cemento. Esto, incrementa la resistencia y permite que se reduzca el contenido de cemento manteniendo la misma relación agua/cemento. Los reductores de agua son utilizados para incrementar el asentamiento para el concreto bombeado y se emplean en clima caliente para contrarrestar la creciente demanda de agua. Los reductores de agua deben cumplir con los requerimientos de aditivos químicos tipo A de acuerdo a la ASTM C494 "*Especificaciones para adiciones químicas en el concreto*".

Los reductores de agua de rango medio son comúnmente utilizados y tienen una gran habilidad para reducir el contenido de agua. Estos aditivos son populares y mejoran la trabajabilidad del concreto para los acabados en losas.

- **RETARDANTES**

Son sustancias químicas que retardan el fraguado inicial del concreto por una hora o más. Los retardantes se emplean con frecuencia en clima caliente para contrarrestar el fraguado rápido causado por las altas temperaturas. Para grandes trabajos, o en clima caliente, se especifican concretos con retardantes para permitir un tiempo mayor para el colado y el acabado. La mayoría de los retardantes actúan también como reductores de agua. Los retardantes deben cumplir con el requerimiento de la ASTM C494 para los tipos B y D.

- **ACELERANTES**

Estos aditivos reducen el tiempo de fraguado inicial del concreto y ayuda a obtener una resistencia temprana más alta. Los acelerantes no son anticongelantes; sin embargo, ellos aceleran la velocidad de su asentamiento y el desarrollo de resistencia, haciéndolo más resistente a los daños producidos por el congelamiento en clima frío. Los acelerantes también se utilizan en las construcciones de gran velocidad que requieren una temprana remoción de moldes (formaletas, cimbras), apertura al tráfico o aplicación de cargas estructurales. Los acelerantes líquidos deben cumplir con las especificaciones para los tipos C y E de la ASTM C494 y se adicionan al concreto en la planta. Hay dos tipos de acelerantes: las basadas en cloruros y los libres de cloruros. Uno de los aditivos más efectivos y económicos es el cloruro de calcio, el cual está disponible de forma líquida o en escamas y debe cumplir con los requerimientos de ASTM D98. Para concreto no reforzado, el cloruro de calcio se especifica en cantidad no mayor al 2% en peso del cemento. Debido a la corrosión inducida en el acero de refuerzo por cloruros, los límites de cloruros aplicados al concreto reforzado son menores.

- **REDUCTORES DE AGUA (HRWR)**

Son una clase especial de aditivos reductores de agua. Frecuentemente denominados superplastificantes o superfluidificantes, los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua en el concreto dado entre el 12 y el 25%. Por tal motivo, los HRWR se utilizan para incrementar la resistencia y reducir la permeabilidad del concreto reduciendo el contenido de agua en la mezcla; o para incrementar el gran medida el asentamiento y producir un concreto fluido sin adición de agua. Estos aditivos son esenciales para concretos de alta resistencia que tienen altos contenidos de materiales cementantes y mezclas que contengan

humo de sílice. Estos aditivos están cubiertos por las especificaciones de la ASTM C494, según los tipos F y G, y por la C1097 *“Especificación para aditivos químicos para uso en la producción de concreto fluido”* según los tipos 1 y 2

- **ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE/REDUCIDOR DE AGUA DE ALTA ACTIVIDAD**

El aditivo súper superfluidificante es imprescindible para la producción del concreto autocompactable. No todos los tipos son utilizables. Los aditivos basados en naftalen-sulfonatos o los condensados de melamina, no ofrecen suficiente poder reductor de agua y, en consecuencia, los tipos utilizables son los basados en éter policarboxílico modificado capaces de reducir agua en valores superiores al 35% a 40%.^[2]

Los policarboxilatos, son los aditivos más utilizados en los concretos autocompactables, por presentar una eficiencia efectiva. Este tipo de aditivo, crea una capa de adsorción de gran volumen alrededor de las partículas de cemento esto es debido a sus grandes cadenas laterales que impide floculación, y facilita la alta fluidez de la pasta de cemento, en la figura 2.2.16 se puede apreciar cómo crecen las cadenas del aditivo y como separan las partículas del cemento.

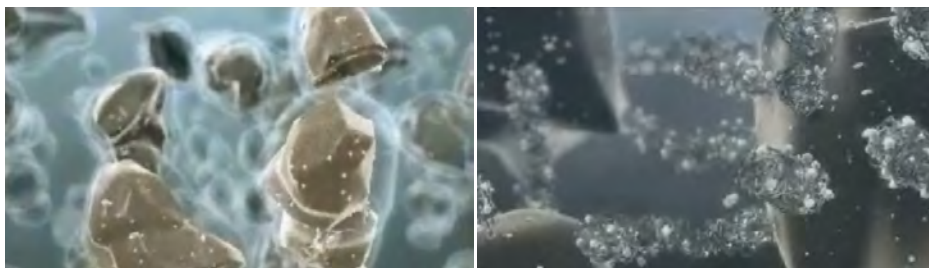


Figura 2.2. 16. a) Efecto de adsorción sobre las partículas de cemento; b) Crecimiento de las cadenas haciendo efecto de separación en las partículas de cemento. (<http://www.youtube.com/watch?v=CSZxjQwDKF0&feature=related>)

Independientemente del poder reductor de agua, las características del aditivo deben ajustarse a cada tipo aplicación (elevada resistencia inicial, prolongado mantenimiento de la consistencia, etc.) y en correspondencia al tipo de cemento, adición y agregados empleados. En este aspecto, si se emplean las adiciones más adecuadas para cada aplicación el efecto del aditivo sobre el desarrollo de resistencias o sobre el fraguado no es tan acusado, especialmente en el caso de emplear cenizas, donde éstas colaboran de forma muy importante en el mantenimiento de la consistencia y dejan las particularidades del aditivo en segundo plano. Este razonamiento no es válido en los casos donde se demanda elevada resistencia inicial. Ante estas situaciones las particularidades del aditivo en el desarrollo de resistencia si son muy trascendentes.^[2]

2.2.5. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

Por definición, los concretos autocompactables deben cumplir con tres parámetros en estado fresco: **capacidad de relleno**, **capacidad de paso** y **resistencia a la segregación**.^[4]

La capacidad de relleno está relacionada con la movilidad y fluidez del concreto. El concreto tiene que deformarse y moldearse al espacio del cimbrado únicamente bajo la acción de su propio peso y sin la ayuda de medios mecánicos externos. Para obtener una capacidad de relleno adecuada es necesario reducir la fricción entre las partículas sólidas y mejorar la deformabilidad de la pasta.^[5]

La fricción entre las partículas sólidas de la mezcla (agregado grueso y fino) reduce la deformabilidad del concreto. Para reducir la fricción es necesario reducir el contacto entre las partículas, disminuyendo el volumen de agregados, y por lo tanto aumentado el volumen de la pasta cementante, optimizando de esta forma el esqueleto granular. En los concretos autocompactables ello se da, principalmente, con el aumento de finos y con el uso de aditivos superplastificantes o superfluidificantes. Los superplastificantes y/o superfluidificantes reducen la tensión de inicio de flujo del concreto y mejoran su fluidez sin perjudicar la viscosidad. La utilización de agua para mejorar el flujo del concreto tiene el inconveniente de que también reduce la viscosidad de la mezcla, aumentando el riesgo de segregación.^{[4][5]}

El segundo parámetro es **la capacidad de paso**. Esto se refiere a la capacidad del concreto para atravesar las capas de armaduras u otros objetos que se quiere dejar embebidos en el concreto. El grado necesario de esta característica depende de: *la cantidad de armadura, la separación entre barras, y de los otros obstáculos que tiene que atravesar el concreto*. El bloqueo del concreto se produce cuando el tamaño máximo del agregado es demasiado grande y/o cuando el contenido del agregado grueso es demasiado elevado.

El tercer parámetro es **la resistencia a la segregación**. La segregación del concreto ocurre cuando los componentes del concreto se separan y su distribución no es homogénea. La segregación del concreto se puede manifestar de varias formas, como exudación, separación del agregado grueso, o distribución no uniforme de los poros de aire. El concreto autocompactable, al ser más fluido, está más propenso a la segregación que un concreto convencional. La resistencia a la segregación está relacionada con la viscosidad de la mezcla.

El concreto tiene que tener un nivel adecuado de viscosidad para mantener la composición homogénea de la mezcla. Una mezcla altamente viscosa tampoco es buena, porque reduce demasiado la velocidad de deformación, y el concreto fluiría muy despacio.

Para los concretos autocompactables se requieren de métodos de ensayos diferentes a los tradicionales. La utilización del Cono de Abrams daría resultados próximos a los 30 cm y no discriminaría distintos comportamientos. Por ello, la caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos de la fluidez.

2.2.5.1. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO (Slump Flow) y T50

El ensayo de escurrimiento, slump-flow en inglés, evalúa la capacidad de relleno del concreto autocompactable sin la presencia de obstáculos. Es el ensayo más utilizado tanto por su sencillez como por el equipo que precisa y se puede realizar tanto en obra como en laboratorio. Además se puede observar si hay segregación y/o exudación y nos da una medida indirecta de la tensión umbral de flujo. Está normalizado por la norma UNE 83361:2007.

Para la realización del ensayo se necesita el cono de Abrams, según norma UNE 83313:1990, y una placa de acero plana cuyas dimensiones aproximadas son 850 x 850 mm y 2 mm de espesor. En esta placa se encuentran grabadas dos circunferencias concéntricas marcadas, una de 200 mm de diámetro y otra de 500 mm de diámetro, como se puede observar en la Figura 2.2.17.

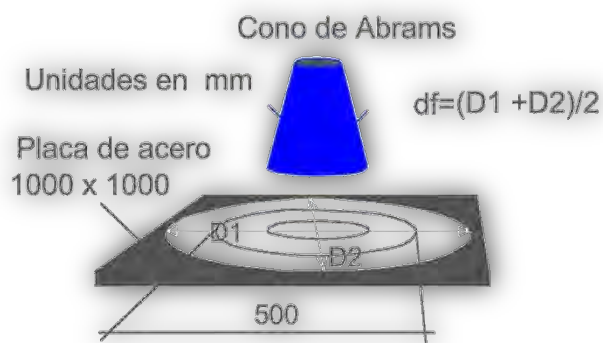


Figura 2.2. 17. Dimensiones y montaje del ensayo de escurrimiento, (Fava, Agosto 2003)

El procedimiento de este ensayo es el siguiente. Se coloca el cono, ayudándose de la marca circular de 200 mm, en el centro de la bandeja. Se llena el cono sin compactar de concreto, se enrasa y se levanta el cono.

Los resultados que se obtienen son T50, que es el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar la circunferencia de 500 mm de diámetro, y d_F que es el diámetro final alcanzado por el concreto una vez cesa completamente el movimiento, expresado como la media de dos medidas en direcciones perpendiculares.^[21]

El aspecto final del concreto debe ser homogéneo presentando una buena distribución de los agregados. Como ya se ha mencionado previamente, se puede observar una posible segregación del agregado grueso y/o exudación, como se puede observar en la Figura 2.2.18. La primera ocurre cuando hay una mayor concentración del agregado grueso en la zona central. La exudación se observa en la zona perimetral de la pasta.^[4]



Figura 2.2. 18. Aspecto de un concreto autocompactable donde se ha producido segregación del agregado grueso en el centro y de pérdida de agua en el frente de avance del ensayo, (Fava, Agosto 2003)

Una propuesta muy interesante para seleccionar el concreto autocompactable más apropiado según el tipo de estructura a llenar, plantea la posibilidad de contar con 3 niveles de extendido posibilitando la obtención del concreto autocompactable fuera del rango mencionado:

Tipo 1: Extendido menor a 56 cm

Tipo 2: Extendido entre 56 cm y 66 cm

Tipo 3: Extendido mayor a 66 cm

Así mismo y como parte del mismo ensayo de extendido, se mide el tiempo que tarda el concreto, una vez que se levanta el cono, en alcanzar los 500 mm de extendido. Este valor permite evaluar cualitativamente la viscosidad plástica de la mezcla, recomendándose valores entre 2 y 5 segundos. De acuerdo al antecedente mencionado, pueden plantearse 3 niveles de T50:

Tipo A: T50 menor que 2 segundos (entiéndase una baja viscosidad)

Tipo B: T50 mayor que 2 segundos y menor que 4 segundos

Tipo C: T50 mayor que 4 segundos

Desde este punto de vista, existirán estructuras que por su nivel de complejidad necesiten ser coladas con un concreto autocompactable que se adapte a la combinación 3-A (es decir un concreto autocompactable que tenga mucha fluidez y baja viscosidad) y otras para las cuales sea suficiente la combinación 1-C (concreto autocompactable con menor fluidez y con mayor viscosidad plástica).^[4]

Adicionalmente, es muy importante también la inspección visual de la mezcla extendida puesto que esto permite observar la distribución del agregado grueso y la tendencia a la segregación de la pasta o mortero en el borde de ataque. La propuesta de varios autores es definir un índice visual de estabilidad (en inglés VSI, Visual Stability Index) que asigna valores de 0 a 3. A las mezclas completamente estables se les asigna el valor 0 y las claramente inestables 3, siendo 1 y 2 valores intermedios. En la figura 2.2.19 se muestran los dos casos extremos de estabilidad.^[4]

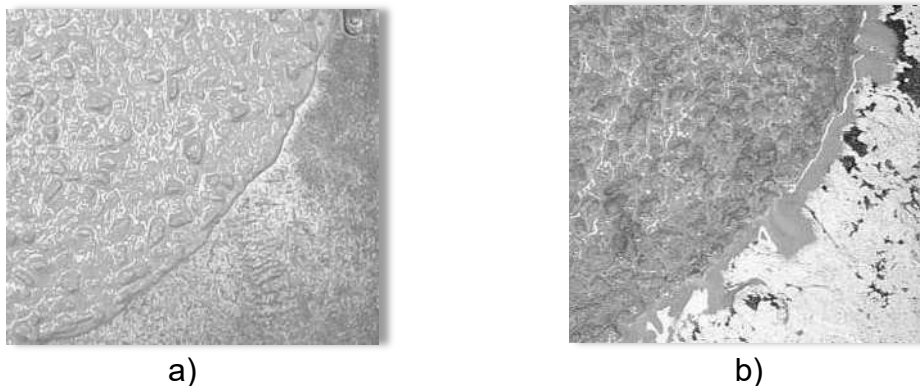


Figura 2.2. 19. a) Concreto autocompactable estable (VSI=0); b) Concreto autocompactable inestable (VSI=3), (Fava, Agosto 2003)

Según otras normativas, estos se pueden clasificar de la siguiente manera, mostrada en la tabla 2.2.11, que es en base al diámetro de la extensibilidad final alcanzada.

Tabla 2.2. 11. Clasificación del tipo de concreto autocompactable según la extensibilidad alcanzada, (The European Guidelines for Self Compacting Concrete, May 2005)

CLASE	EXTENSIBILIDAD EN MILÍMETROS
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Especificaciones de la norma EN 206-1:200, 5.4.2 a 5.4.4; o en la norma de productos y/o EN 13369:2004 clausula 4.2.2.

2.2.5.2. RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN

La resistencia a la segregación en los concretos autocompactables es fundamental, ya que si presenta una buena resistencia, por ende una buena homogeneidad y calidad. Los concretos autocompactables pueden sufrir segregación durante o después de su colocación, pero antes de la rigidez. La segregación que se produce después de su colocación es más perjudicial en los elementos largos, pero incluso en losas delgadas, puede conducir a defectos superficiales tales como grietas o una superficie débil. ^[22]

El ensayo de la columna de segregación (ASTM C1610) consiste en comparar la cantidad de agregado localizada en los extremos superior e inferior de una probeta cilíndrica de 660 mm de altura y 200 mm de diámetro, tal como se muestra en la Figura 2.2.20. Ello responde a que si hay segregación los agregados gruesos tienden a concentrarse en la parte inferior.

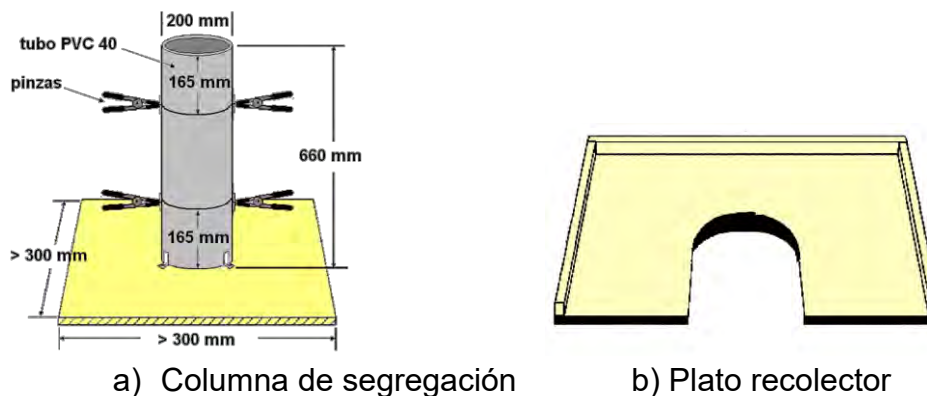


Figura 2.2. 20. Columna de segregación (ASTM C1610) y su plato recolector, (Parapinski dos Santos, Junio 2010).

El procedimiento es llenar la columna cilíndrica y dejar el concreto reposar por 15 minutos. A continuación se toma las muestras de las partes superior e inferior, lavándolas en un tamiz de 5 mm de abertura. Para tomar las muestras se utiliza un plato colector. Se acopla el plato en la columna y se desplaza la parte superior para ello. ^[5]

La resistencia a segregación se expresa a través de la relación entre el peso de agregados de la parte superior y de la parte inferior como se muestra en la siguiente fórmula: ^[23]

$$S = \frac{CA_{superior} - CA_{inferior}}{\frac{CA_{superior} + CA_{inferior}}{2}}$$

Donde:

$CA_{superior}$ = Contenido de agregado grueso en la parte superior.

$CA_{inferior}$ = Contenido de agregado grueso de la parte inferior.

Si $S < 0$ deberá informarse, $S = 0\%$.^[23]

Una relación baja indica que los agregados están concentrados en la parte inferior y que existe la posibilidad de segregación.

Según la norma EN 206-1: 2000, clasifica la segregación en dos grupos, la cual se muestra en la tabla 2.2.12.

Tabla 2.2. 12. Clasificación del concreto autocompactable según el porcentaje de segregación, (The European Guidelines for Self Compacting concrete Specification, May 2005)

CLASE	RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN, %
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Especificaciones de la norma EN 206-1:200, 5.4.2 a 5.4.4; o en la norma de productos y/o EN 13369:2004 clausula 4.2.2.

2.2.5.3. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO CON EL ANILLO JAPONÉS

El ensayo de escurrimiento con el anillo japonés, J-Ring en inglés, evalúa la resistencia al bloqueo del concreto autocompactable a través de barras de armadura, en condiciones de flujo libre. Además se puede observar si hay segregación, exudación, o si se produce una mayor concentración de agregado grueso en la zona central. ^[4] La configuración del anillo japonés varía de acuerdo con el tamaño máximo del agregado. Se tienen dos casos particulares. Una es cuando el tamaño máximo de la partícula del agregado sea superior a los 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el concreto este comprendido entre 80 y 100 mm, se empleará en este caso un anillo con 12 barras. La otra es cuando el tamaño máximo de la partícula del agregado sea inferior a los 20 mm o el espesor de los huecos por donde pase el concreto este comprendido entre 60 y 80 mm, se empleará un anillo conformado por 20 barras. ^[24]

En la figura 2.2.21 se presentan las dimensiones básicas y montaje del ensayo del anillo japonés o J-RING.

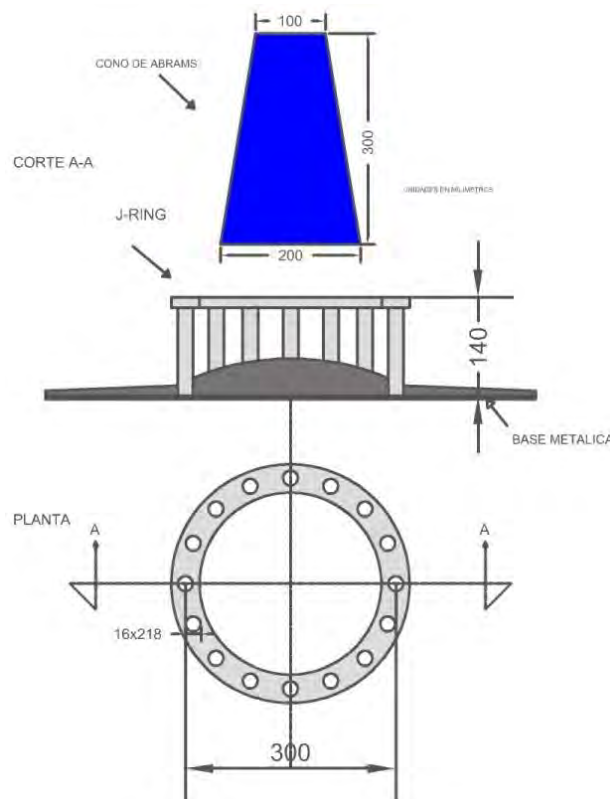


Figura 2.2. 21. Dimensiones básicas y montaje del ensayo de escurrimiento con anillo japonés, (Nuñez, 2009)

Los parámetros que se obtienen son d_{JF} que es el diámetro final, T_{J50} que es el tiempo que tarda el concreto en alcanzar el diámetro de 500 mm. El rango admisible para la prueba con el anillo japonés es que el diámetro final registrado menos el diámetro final con el anillo registra sea menor o igual a 50 mm.

Para la realización del ensayo se necesitan los mismos equipos que para el ensayo de escurrimiento más un anillo de 30 cm de diámetro y 14 cm de altura, como se puede ver en la figura anterior. Este anillo consta de unas barras perimetrales cuya configuración varía dependiendo del tamaño máximo del agregado como se ha mencionado anteriormente.^[3]

Es un ensayo de mayor simplicidad para ser aplicado en obra respecto de las cajas “L” y “U”. La capacidad de pasaje está asociada a la diferencia con el extendido libre. Para ello, la norma plantea 3 límites:^[13]

- Diferencia < 25 mm: Óptimo.
- Diferencia > 25 < 50 mm: Aceptable.
- Diferencia > 50 mm: Inaceptable.^[23]

Donde la diferencia se calcula de la siguiente manera:

$$d_F - d_{FJ} \leq 50 \text{ mm}$$

d_F ; Diámetro total medido con el ensayo de escurrimiento

d_{FJ} ; Diámetro final medido con el ensayo J-Ring (anillo japonés)

2.2.5.4. ENSAYO DE LA CAJA EN L

El ensayo de la caja en L, *L-Box* en inglés, mide la capacidad de paso del concreto autocompactable a través de barras de armaduras con flujo confinado. Además permite conocer la fluidez del concreto y, además, si existe o no bloqueo del mismo. Está normalizado por la norma UNE 83363:2007. Para la realización del ensayo se emplea un molde que se denomina caja en L cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2.2.22 donde se puede observar que la caja puede tener 2 ó 3 barras dependiendo del tamaño máximo del agregado.^[3]

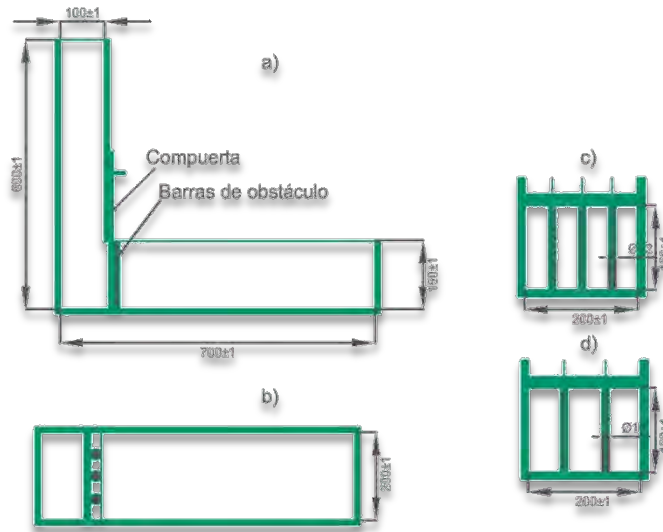


Figura 2.2. 22. Configuración de la caja en L: a) Vista general del molde; b) Vista en planta; c) Disposición de las barras para un tamaño máximo de agregados ≤ 20 mm; y d) Disposición de las barras para un tamaño máximo de agregado > 20 mm, (Nuñez, 2009).

El ensayo se realiza del siguiente modo. Se llena de una sola vez y sin compactar la parte vertical de la caja, con la compuerta cerrada. Una vez llena, se enrasa el concreto y se abre la compuerta. Cuando ha terminado el movimiento del concreto, se determinan las alturas de la masa de concreto en reposo en el lado de la compuerta (interiormente) y en el extremo horizontal de la caja, H1 y H2 respectivamente (ver Figura 2.2.23).^[3]

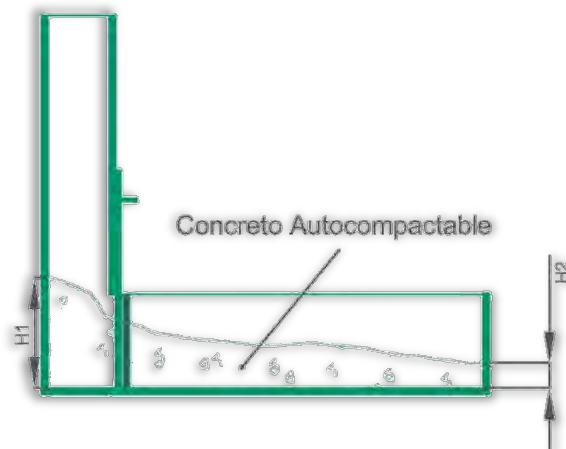


Figura 2.2. 23. Determinación de las alturas H1 y H2

Los parámetros que se obtienen son T600 que es el tiempo que tarda el concreto en salir y llegar al extremo de la caja en L cuya distancia, desde el

extremo de la compuerta es de 600 mm y, el coeficiente de bloqueo se define según la expresión siguiente.

$$C_{bL} = 100x \frac{H2}{H1}$$

El valor del rango admisible es de que tiene que ser mayor o igual a 0.75, pero menor o igual a 1.00.

En seguida se presenta en la tabla 2.2.13 la clasificación de los concretos de acuerdo a la habilidad de paso en la caja en L. ^[3]

Tabla 2.2. 13. Clases de habilidad de paso, (Núñez, 2009)

CLASE	HABILIDAD DE PASO
PA1	≥ 0.80 CON 2 BARRAS
PA2	≥ 0.80 CON 3 BARRAS

2.2.5.5. ENSAYO DEL EMBUDO EN V

Desarrollado por Okamura et al., consta de un contenedor metálico en forma de V con una abertura con tapa en su parte inferior. El ensayo del embudo en V, *V-funnel* en inglés, evalúa la capacidad de relleno y la capacidad de paso por aberturas estrechas del concreto autocompactable. Además mide indirectamente la viscosidad plástica del material. Está normalizado por la norma UNE83364:2007. Para la realización del ensayo se emplea un embudo cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2.2.24.

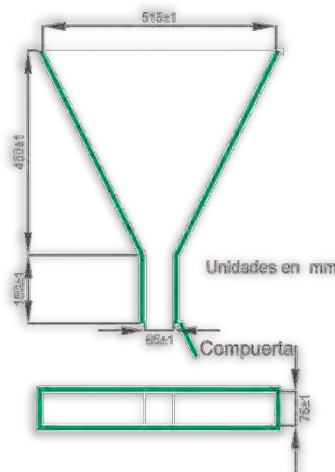


Figura 2.2. 24. Dimensiones del embudo en V, (Fava, Agosto 2009).

Antes de realizar el ensayo, hay que colocar el embudo sobre un soporte con un recipiente debajo que contenga el concreto. Se llena el embudo de una sola vez sin compactar, se enrasa el concreto y se abre la compuerta inferior después de haber esperado 10 segundos. Se mide el parámetro T_v que es el tiempo que tarda en salir todo el concreto del embudo, considerando ese momento el instante en que, observando el flujo desde la parte superior, se percibe luz a través de la boca inferior.

Si el tamaño y cantidad de agregado grueso de la mezcla son suficientemente pequeños en relación con la abertura del equipo, la interacción y encuentro entre las partículas más grandes será despreciable. En tal caso el tiempo de pasaje es un indicador de la viscosidad de la mezcla. Un tiempo de pasaje largo representa una mayor viscosidad de la mezcla (mayor resistencia a la segregación).^[4]

Por otro lado, si la cantidad y tamaño del agregado grueso es grande en relación al tamaño de la abertura, la interacción y choque entre partículas será dominante en las características de fluidez de la mezcla. En estas condiciones, el ensayo de V-Funnel es útil para evaluar la capacidad de pasaje de la mezcla a través de pequeñas aberturas. Con estas características, una mezcla con baja viscosidad puede tener, ocasionalmente, un mayor tiempo de pasaje debido al predominio de la interacción entre las partículas grandes de agregado (bloqueo).^[5]

Así mismo una viscosidad elevada también provoca un tiempo de pasaje elevado. Con esta condición de agregado dominante se requiere una viscosidad moderada para minimizar el problema. Para el caso de concretos se recomiendan valores de tiempos de escurrimiento que oscilen entre 5 y 10 segundos.^[5]

El rango admisible es la siguiente: $4 \text{ seg} \leq T_v \leq 0.20 \text{ seg}$.

En seguida se presenta en la tabla 2.2.14 la clasificación de los concretos de acuerdo a la viscosidad medida en el embudo V.

Tabla 2.2. 14. Clases de viscosidad medida con el embudo, (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, May 2005).

CLASE	T_{500}, seg	V- funnel tiempo en seg
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	9 a 25

2.2.6. DESIGNACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

La designación del concreto autocompactable es similar a la del concreto convencional con la excepción de usar las siglas AC como indicativo de la consistencia, según se especifica en el Artículo 39.2 del Anexo 17 de la Instrucción EHE-08. Pero dentro de esta categoría se puede clasificar el concreto autocompactable en función de su grado de autocompactabilidad expresándose a través de los valores específicos que deben de cumplir en los diferentes ensayos.
[3]

Según lo anterior, se establecen tres clasificaciones de autocompactabilidad según: el diámetro final T50 del ensayo de escurrimiento (Tabla 2.2.15); el tiempo TV del ensayo del embudo en V (Tabla 2.2.16); y la resistencia al bloqueo (Tabla 2.2.17).

Tabla 2.2. 15. Clasificación de autocompactabilidad en función del ensayo de escurrimiento (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009).

CLASE	RANGO
AC-E1	$550\text{mm} \leq d_f \leq 650\text{mm}$
AC-E2	$650\text{mm} \leq d_f \leq 750\text{mm}$
AC-E3	$750\text{mm} \leq d_f \leq 850\text{mm}$

Tabla 2.2. 16. Clasificación de autocompactabilidad en función del ensayo del embudo V (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009)

CLASE	RANGO
AC-V1	$10 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$
AC-V2	$6 \text{ seg} \leq T_v \leq 10 \text{ seg}$
AC-V3	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 6 \text{ seg}$

Tabla 2.2. 17. Clasificación de autocompactabilidad en función de la resistencia al bloqueo (Instrucción EHE-08), (Núñez, 2009).

CLASE	EXIGENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS	CRITERIO POR EL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO CON ANILLO JAPONÉS	CRITERIO POR EL ENSAYO DE LA CAJA EN L
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño del agregado sea superior a 20mm o el espesor de los huecos por los que pase el concreto esté comprendido entre 80 y 100mm	$d_{JF} \geq d_r - 50$ mm con un anillo de 12 barras.	≥ 0.80 con dos barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del agregado sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por los que pase el concreto esté comprendido entre 60 y 80 mm.	$d_{JF} \geq d_r - 50$ mm con un anillo de 20 barras.	≥ 0.80 con tres barras

Existen otras clasificaciones citadas en la bibliografía y entre ellas no existe unanimidad en cuanto a las diferentes clases que puede haber en un concreto autocompactable respecto a su grado de autocompactabilidad. A continuación, se va a describir la clasificación encontrada en las referencias. La primera es la clasificación propuesta por Walraven (2003) donde relaciona las clases de autocompactabilidad con el tipo de aplicación como se puede observar en la Figura 2.2.25. En dicha Figura, SF y VF/VS equivalen respectivamente a AC-E y AC-V según la clasificación de la Instrucción EHE-08.

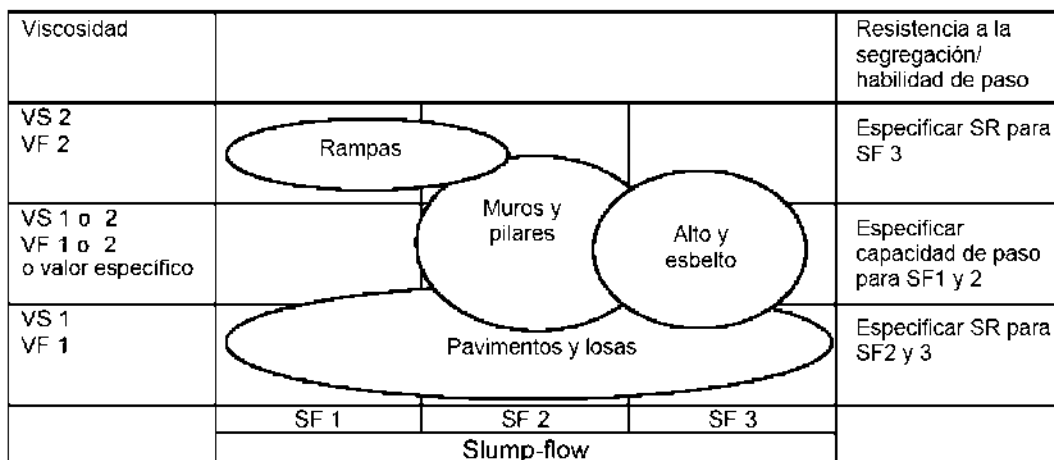


Figura 2.2. 25. Clasificación propuesta por Walraven, (Núñez, 2009)

2.2.7. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

Actualmente la producción del concreto autocompactable es relativamente baja en comparación con el concreto convencional. Se puede emplear tanto en obras in situ o en elementos prefabricados, en obra civil o edificación.

En la actualidad, en otros países como en Europa, el uso de los concretos autocompactables está más extendido y desarrollado en el sector de la prefabricación que en el sector de las obras in situ. Esto se debe a que las condiciones de trabajo y producción son más favorables para el concreto autocompactable. En el año 2005, en algunos países europeos, el concreto autocompactable representaba hasta el 20% del concreto empleado; en cambio, en Estados Unidos suponía aproximadamente el 75% del concreto prefabricado, ya que su uso está aceptado en carreteras y puentes. ^[3]

Los concretos autocompactables tiene aplicaciones en obras de todo tipo: ya sea para elementos prefabricados, muros y losas de edificios, pisos industriales, estanques, presas, túneles, etc. A continuación se hará mención de algunas aplicaciones que ha tenido los concretos autocompactables.

Las primeras obras in situ de concretos autocompactables se encuentran en Japón. Una de las más destacadas es el anclaje del puente colgante Akashi Kaikyo, mostrada en la figura 2.2.26, de 1,991 metros de luz. Se utilizaron 290,000 m³ de concreto autocompactable obteniéndose un rendimiento de 1,900 m³/día, con lo que se redujo el plazo de ejecución en 6 meses (6).^{[25][3]}



Figura 2.2. 26. Puente colgante Akashi Kaikyo, Japón,
(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/Akashi_Bridge.JPG, fecha de consulta 09/08/2011).

Estanque pretensado para gas. Con el uso del concreto autocompactable en la construcción del muro pretensado (de 0.8 m de espesor) de un gran estanque pretensado para gas licuado, de 38.4 m de altura y de 84.2 m de diámetro perteneciente a Osaka Gas Company, mostrada en la figura 2.2.27, se logro reducir un tercio de la mano de obra y de 22 a 18 meses el plazo de construcción. Se utilizo concreto autocompactable para asegurar la impermeabilidad, durabilidad y rapidez del colado, con una fluidez de 65 cm de escurrimiento de cono y con un tamaño máximo de agregado de 20 mm. ^[26]



Figura 2.2. 27. Estanque pretensado para Gas licuado de Osaka Gas Company en Japón, (<http://inciarco.com/foros//showthread.php?p=22358&page=2> fecha de consulta 09/08/2011).

En Europa, también existen diversos tipos de aplicaciones del concreto autocompactable desde 1998 como en Suecia, Francia, Reino Unido u Holanda tanto en obras civiles nuevas como en reparaciones de obras antiguas. Por ejemplo, en Suecia, hasta el año 1999, se construyeron tres puentes y varios edificios con concreto autocompactable o en Francia se emplearon al menos 50,000 m³ de concreto autocompactable en numerosos proyectos de edificación y obra civil entre los años 1997 y 2000.

En España, la primera aplicación (2001), en obra civil, del concreto autocompactable consistió en el relleno del arco parabólico del puente de la Ronda de la Hispanidad sobre el río Ebro, en Zaragoza. Se emplearon 300 m³ de concreto autocompactable en 5 horas. Posteriormente se han realizado diversas obras entre las que destacan las siguientes:

- En el año 2003, se fabricaron en España 312 vigas cajón con 17,500 m³ de concreto autocompactable pretensado para los viaductos en la autopista Scuto Norte Litoral, en Portugal.

- En el año 2004 se repararon los Túneles de Montblanc y Lilla de la línea AVE Madrid-Zaragoza-Barcelona donde se emplearon 124,000 m³ de concreto autocompactable.
- El Puente del Milenio de la EXPO 2008 en Zaragoza se realizó con concreto autocompactable blanco de alta resistencia.
- Una obra reciente es la Torre de Cristal en Madrid en la que se emplearon dos tipos de concretos autocompactables para su ejecución. Es un edificio cuya altura es de 249 m sobre rasante (nivel Plaza Castilla) y dispone de seis sótanos bajo rasante (19.30 m de altura). Se empleó un HAC-100 para el arranque de las pilas y un HAC-45 para los pilares mixtos y el núcleo. ^[3]

Mathew Royce del estado de Nueva York han estado utilizando de manera sustancial los concretos autocompactables. En sus proyectos actuales incluye el uso de concretos autocompactables en concretos pretensados, de alto rendimiento. A continuación se mencionaran algunas de las aplicaciones que han implementado con este tipo de concretos.

- Uso de vigas de alto rendimiento en el puente de la autopista Brooklyn Queens de la calle 61 de Broadway en Nueva York. En la figura 2.2.28 se muestra una de las vigas y el almacenamiento de las losas prefabricadas para el puente de Nebraska Skyline. ^[18E]



Figura 2.2. 28. a) Almacenamiento de las losas prefabricadas con concreto autocompactable para su uso en la construcción del puente de Nebraska Skyline.

b) Vigas prefabricadas con concreto autocompactable, (Federal highway administration 2005, fecha de consulta 09/08/2011).

- Concreto autocompactable utilizado en la reconstrucción del puente de la avenida East Tremont en el Cross Bronx Expressway. En la figura 2.2.29 se muestra el puente construido con concreto autocompactable (7). ^[18E]



Figura 2.2. 29. Puente Skyline hecha con concreto autocompactable, (U:S Department of transportation. Federal Highway Administration. Publication number FHWA-HRT-06-020, fecha de consulta 09/08/2011)

2.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

2.3.1. DENSIDAD Y ABSORCIÓN

- **DENSIDAD**

La densidad de un cuerpo se define como *la masa por unidad de volumen*. Similarmente, el peso específico se define como el peso por unidad de volumen.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{mása}}{\text{volumen}}$$

La medición de la densidad en el concreto, nos permite conocer qué tipo de concreto es con el que estamos trabajando, ya que podemos tener concretos ligeros o pesados. Esto depende principalmente del tipo de agregado que se esté utilizando para la elaboración del concreto. Para la medición de la densidad se tienen diferentes formas, una de ellas es utilizando un picnómetro y la otra es conociendo el volumen total de la masa. Para conocer el volumen total de la masa, tendría que tener una forma regular ya que esto nos permitirá medir las distancias de las caras del sólido y así poder calcular el volumen. Muchas veces esto es imposible realizarlo y se tendría que utilizar el mecanismo con el picnómetro.

El mecanismo del picnómetro funciona de la siguiente manera. El sólido a sumergir tendría que estar completamente saturado, y antes de sumergir el sólido

se tiene que llenar el picnómetro con agua hasta la altura del sifón. A la salida del sifón se debe de colocar una probeta graduada para almacenar el agua desalojada al momento de sumergir el sólido. En la figura 2.3.1 se muestra el tipo de picnómetro y la probeta graduada.

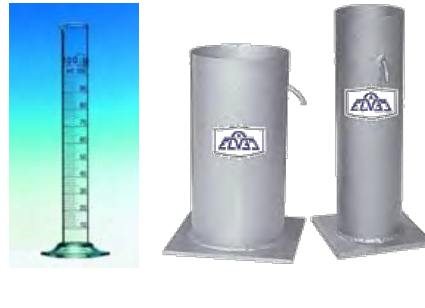


Figura 2.3. 1. a) Probeta graduada de 1000 ml; b) Picnómetro con sifón de 15cm de diámetro con 30cm de alto y de 10cm de diámetro con 30cm de alto (<http://www.elvec.com.mx/pages/agregados.html>, fecha de consulta 08/09/2011).

La densidad de los concretos depende mucho del tipo de agregado que se esté utilizando. En la tabla 2.3.1 se muestra una clasificación de la densidad de los agregados utilizados en los concretos.

Tabla 2.3. 1. Clasificación de densidades de los agregados en los concretos y sus aplicaciones típicas.

Categoría del agregado	Densidad en peso seco varillado del agregado (kg/m ³)	Densidad del concreto(kg/m ³)	Resistencias típicas (Mpa)	Aplicaciones típicas
Ultra ligero	< 500	300 - 1100	< 7	No estructurales solo para material de aislamiento.
Ligero	500 - 800	1100 - 1600	7 - 14	Unidades de albañilería
Estructural ligero	650 - 1100	1450 - 1900	17 - 35	Estructural
Peso normal	1100 - 1750	2100 - 2550	20 - 40	Estructural
Pesados	> 2100	2900 - 6100	20 - 40	Protección para radiaciones

De la tabla anterior se puede observar, que dependiendo de la categoría del agregado podemos ver qué tipo de concreto se tiene y por consiguiente el uso o la aplicación que debería tener dicho concreto, si es de uso estructural o no estructural. ^[8]

- **ABSORCIÓN**

El volumen de espacio de poros en el concreto, a diferencia de la facilidad con la cual un fluido puede penetrarlo, se mide por la absorción. Se acostumbra medir la absorción secando un espécimen hasta una masa constante, sumergiéndolo en el agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de la masa seca. Se pueden emplear varios procedimientos, con los cuales variarán los valores.

Una razón para esta variación en los valores de absorción es que, en un extremo, el secado a temperatura ordinaria puede ser ineficaz para remover toda el agua; por el otro lado, el secado a altas temperaturas puede remover algo del agua combinada. Por lo tanto, la absorción no se puede utilizar como una medida de la cantidad del concreto, pero casi todos los concretos buenos tienen una absorción debajo del 10% por masa; si se va a calcular el volumen ocupado por el agua, se necesita tomar en cuenta la diferencia en el peso específico del agua y del concreto.

La norma ASTM C 642-97 prescribe una prueba de absorción en varias porciones pequeñas de concreto, se emplea el secado de 100 a 110°C y la inmersión en agua a 21°C por lo menos durante 48 horas. Además, otra prueba similar a esa es la BS 1881: parte 122: 1983.

La absorción no es más que la fijación de las moléculas de un líquido o gas sobre la superficie de un sólido como consecuencia de las fuerzas de tipo Van der Waals, lo que origina la formación de monocapas o multicapas. A continuación se presenta en la tabla 2.3.2 una clasificación del tipo de absorción que se presente en los concretos después de saturarlos. El porcentaje de absorción se obtiene dividiendo la diferencia entre el peso húmedo con el peso seco y después dividirlo con su peso húmedo.^[30]

Tabla 2.3. 2. Clasificación del tipo de absorción, (Navarro Sánchez, Martínez Molina, 2000)

TIPO DE ABSORCIÓN	% H. ABSORCIÓN
BAJA	MENOS DEL 2%
MEDIANA	ENTRE 2% Y 4%
ALTA	MÁS DEL 4%

Especificaciones según la normativa ASTM

2.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En general, las normas nacionales e internacionales clasifican el concreto en base a su resistencia a la compresión, pues se considera como la propiedad de referencia del estado endurecido para muchas aplicaciones.

Cuando se trata de un concreto autocompactable, la resistencia a la compresión es consecuencia del aporte de finos, que garantizan la autocompactabilidad en el estado fresco, puesto que la resistencia a compresión depende de las propiedades de la pasta de cemento y de la adherencia en la zona de transición, propiedades que mejoran por el elevado contenido de finos ya mencionado.

Durante la dosificación del concreto autocompactable, la resistencia a compresión se ajusta por el tipo de fino utilizado y no por su cantidad. Si se precisa un concreto de la gama de bajas resistencias, se tiene que ir al mínimo de conglomerante con un papel importante del filler, mientras que si se necesita un concreto de alta resistencia, se tiene que ir a una dosificación alta de conglomerante. El tipo de cemento, también contribuye para la obtención de la resistencia necesaria. ^[5]

En nuestro medio, y en numerosos países del mundo se usan cilindros con una relación de esbeltez igual a 2. La resistencia a la compresión se determina en cilindros de 15 x 30 cm o en cubos de 15 x 15 x 15 cm. Generalmente las resistencias se determinan a los 28 días de edad del concreto o a la edad en el que el concreto vaya a recibir su carga de servicio. ^[19E]

En muchos países de Europa se usan cubos para obtener un índice de resistencia del concreto a la compresión. Algunas veces se utilizan también prismas de concreto simple, ensayados con la dirección de la carga paralela al eje longitudinal del prisma.

Tanto como cilindros, cubos y prismas tienen ventajas y desventajas, pero la tendencia actual parece inclinarse hacia el uso del cilindro. Para lograr una prueba a la compresión aceptable, es necesario que las cabezas de la máquina de ensaye estén totalmente en contacto con las superficies del espécimen en ambos extremos, de manera que la presión ejercida sea lo más uniforme posible. ^[31]

Los cilindros se fabrican por lo general en moldes de acero apoyados en una placa en su cara inferior y libre en su parte superior donde es necesario dar un acabado manualmente. Éste queda con frecuencia demasiado rugoso. Por lo tanto se debe de realizar una operación llamada cabeceado, el cual consiste en

aplicar un cierto material, generalmente azufre o pasta de cemento, a los extremos del cilindro para producir una superficie lisa de apoyo.

Una vez realizado el espécimen es muy importante fijar con gran detalle las condiciones de muestreo, fabricación, curado y ensaye. Entre estas últimas tiene particular importancia la velocidad de carga.^[31]

La evolución de la resistencia a la compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un concreto convencional. Sin embargo, hay que considerar, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados.^[5]

Para el ensayo a compresión simple de los cilindros se tiene que seguir los lineamientos de la norma ASTM C-39 DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO. Donde la determinación del esfuerzo a compresión se calcula dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo con el área de la cara axial del espécimen.

A continuación en la figura 2.3.2 se muestran los diferentes tipos de fallas que se puedan obtener al momento de la carga máxima de la muestra.^[51]

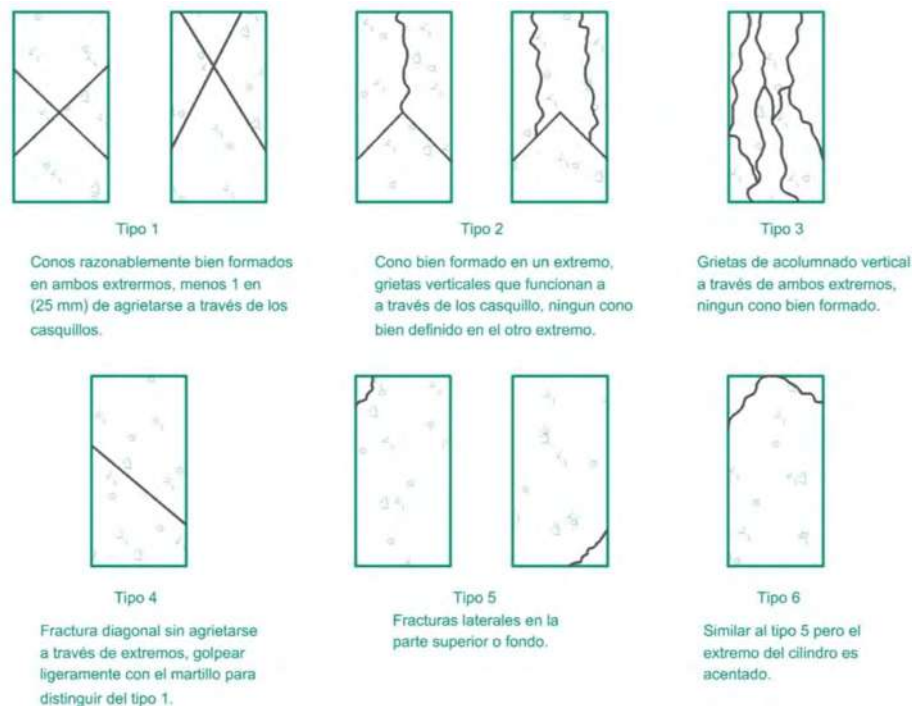


Figura 2.3. 2. Tipos de fallas en un concreto cilíndrico.

2.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad o “Módulo de Young” se define como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en el límite proporcional de un material. Para el concreto, el módulo secante se define como la pendiente de la línea recta trazada desde el origen de los ejes de la curva esfuerzo-deformación en algún porcentaje de la resistencia a la rotura. Este es el valor más comúnmente utilizado en el diseño estructural.^[29]

En un estudio realizado por AFStock, DJHannant y R.I.T. Williams hicieron una comparativa de curvas de esfuerzo-deformación, en donde observaron como varían las curvas dependiendo del material que se esté estudiando. Como ellos estaban haciendo estudios sobre concretos hidráulicos, graficaron las curvas del concreto, el agregado grueso y del cementante, como se muestra en la figura 2.3.3.

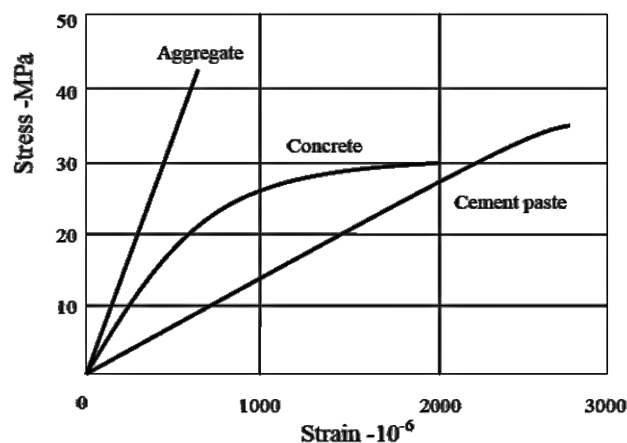


Figura 2.3. 3. Relaciones de curva esfuerzo-deformación de: pasta de cemento, agregado grueso y un concreto, (Brown, Tia & Liu, May 2001).

El módulo de elasticidad del concreto es muy diferente de la del cemento endurecido. Además, Amneville señala que, para un concreto de una resistencia propuesta, el agregado grueso tiene mayor módulo elástico.

Un estudio realizado por Bertil Persson, reporta que el módulo elasticidad de un concreto autocompactable fue el mismo que la de un concreto normal, siempre y cuando sus resistencias a la compresión sean las mismas.^[29]

Para conocer el comportamiento del concreto, es necesario determinar las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a las diferentes acciones a las que estén sujetos. En el caso más general sería necesario analizar todas las combinaciones de acciones a que puede estar sujeto un elemento. Para esto se

han hecho estudios experimentales sobre el comportamiento del concreto sujeto a estados uniaxiales de compresión y tensión, a estados biaxiales de compresión. A partir de estos estudios se han obtenido expresiones para determinar las deformaciones que producen estados combinados de esfuerzos. El esfuerzo es comúnmente una medida de la acción ejercida en el espécimen, y la deformación, una medida de respuesta. ^[28]

En la figura 2.3.4 se muestra un cilindro de concreto simple ensayado en compresión axial. En cilindros con relación de lado a diámetro igual a dos, como el que se muestra en la misma figura antes mencionada, la falla suele presentarse a través de planos inclinados respecto a la dirección de la carga. Esta inclinación es debida principalmente a la restricción que ofrecen las placas de apoyo de la maquina contra movimientos laterales.

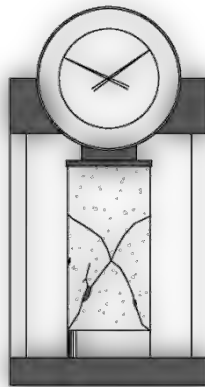


Figura 2.3. 4. Falla en compresión de un cilindro de concreto, (González Cuevas, 1996).

Las curvas esfuerzo-deformación se obtienen del ensayo de cilindros sujetos a carga axial repartida uniformemente en la sección transversal mediante una placa rígida. Los valores del esfuerzo resultan de dividir la carga total aplicada, P , entre el área de la sección transversal del cilindro, A , y representan valores promedio obtenidos bajo la hipótesis de que la distribución de deformaciones es uniforme y de que las características esfuerzo-deformación del concreto son constantes en toda la masa. El valor de la deformación unitaria, E_c , es la relación entre el acortamiento total, a , y la longitud de medición, l , como se muestra en la figura 2.3.5. ^[28]

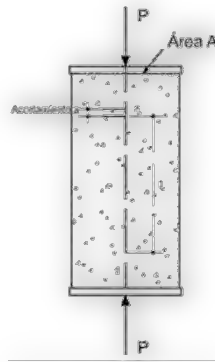


Figura 2.3. 5. Esquema de un cilindro sujeto a carga axial, (González Cuevas, 1996).

Para ensayos efectuados en un tiempo relativamente corto, del orden de unos cuantos minutos desde la iniciación de la aplicación de la carga hasta el colapso, se puede apreciar en la grafica 2.3.6., que el concreto no es un material elástico y que la parte inicial de estas curvas no es rigurosamente recta. Sin embargo, sin gran error puede considerarse una porción recta hasta aproximadamente el 40% de la carga máxima. ^[28]

En el ensaye de cilindros de concreto simple, la carga máxima se alcanza a una deformación unitaria de 0.002, si la longitud de la medición es del mismo orden de magnitud que el lado del espécimen.

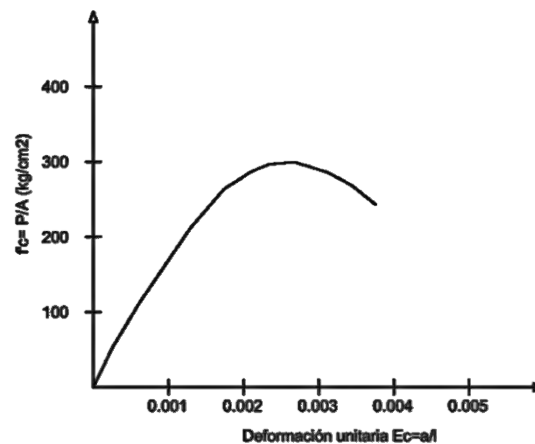


Figura 2.3. 6. Curva esfuerzo-deformación en compresión axial de un espécimen sujeto a carga de corta duración, (González Cuevas, 1996).

Se han propuesto varias ecuaciones para poder representar analíticamente la curva esfuerzo-deformación. El problema es complejo porque influyen varias variables, algunas inclusive ajenas a las propiedades intrínsecas del material, como la rigidez relativa de la máquina de ensaye.

Dentro de las características esfuerzo-deformación del concreto simple el efecto de la edad es algo muy importante, debido al proceso continuo de hidratación del cemento, el concreto aumenta su capacidad de carga con la edad. Este proceso de hidratación puede ser más o menos efectivo, según sean las condiciones de intercambio de agua con el ambiente, después del colado. Por lo tanto, el aumento de la capacidad de carga del concreto depende de las condiciones de curado a través del tiempo.

En la figura 2.3.7., se muestran las graficas de esfuerzo-deformación de un cilindro de 15x30cm, fabricados con el mismo concreto pero ensayados a distintas edades. El tipo de curado fue el mismo para todos los cilindros hasta el día de ensaye. Las curvas se obtuvieron aplicando incrementos de deformación constantes.

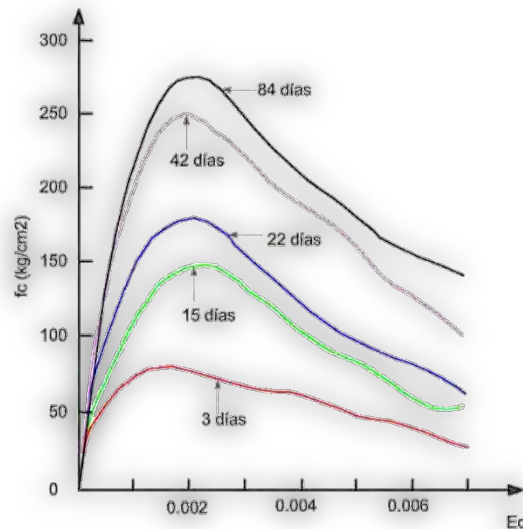


Figura 2.3. 7. Efecto de la edad en las curvas carga-deformación, (González Cuevas, 1996).

El aumento de la resistencia con la edad depende también del tipo de cemento, sobre todo a edades tempranas. En la figura 2.3.8., muestra el aumento de la resistencia con la edad hechos con cemento normal (tipo I) y de alta resistencia (tipo III), que son los dos tipos más empleados en estructuras de concreto reforzado. ^[28]

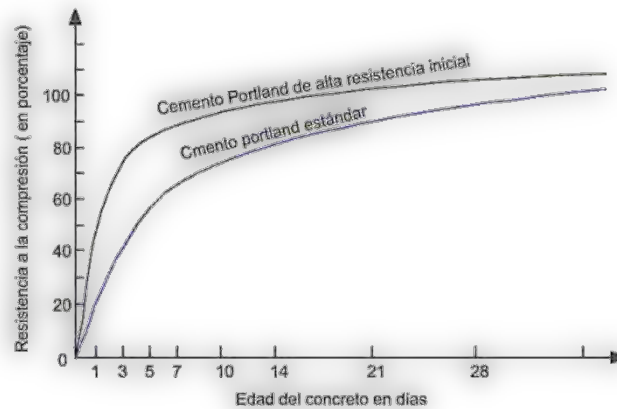


Figura 2.3. 8. Variación de la resistencia con la edad utilizando cementos diferentes, (González Cuevas, 1996).

Después de haber visto de cómo diferentes factores influyen en el comportamiento del concreto, tenemos otro factor muy importante que es: *la relación agua/cemento*. La resistencia del concreto depende de la relación a/c : a mayor relación a/c , menor es la resistencia. En la figura 2.3.9., se presentan curvas de esfuerzo deformación, correspondientes a distintas relaciones.

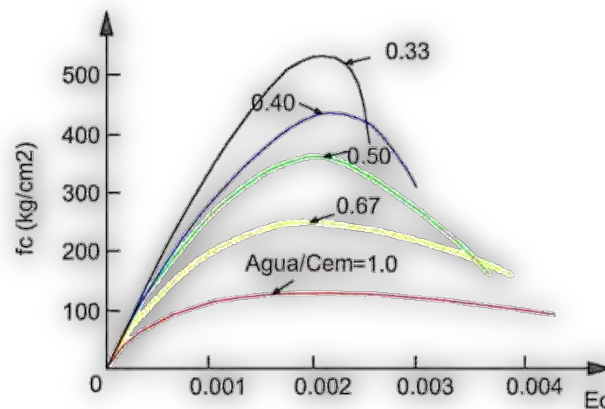


Figura 2.3. 9. Variación de la resistencia con diferentes relaciones de A/C, (González Cuevas, 1996).

Para estimar deformaciones debidas a cargas de corta duración, donde se puede admitir un comportamiento elástico sin errores importantes, es necesario definir un valor del módulo de elasticidad. Del estudio de las curvas esfuerzo-deformación mostradas, resulta obvio que el concepto convencional del módulo de elasticidad no tiene sentido en concreto. Por lo tanto, es necesario recurrir a definiciones arbitrarias, basadas en consideraciones empíricas. Así se puede definir el módulo del tangente inicial o tangente a un punto determinado de la curva esfuerzo-deformación y un módulo secante entre dos puntos de la misma.

Para tomar en cuenta cargas de larga duración en una forma simple, se utiliza a veces módulos elásticos menores que los correspondientes a las definiciones mencionadas anteriormente. ^[28]

El módulo de elasticidad es función principalmente de la resistencia del concreto y de su peso volumétrico. Se han propuesto varias expresiones para predecir el módulo de elasticidad a partir de estas variables. Por ejemplo, el Reglamento de la ACI presenta la ecuación:

$$E_c = w^{1.5} 4000 \sqrt{f'_c}$$

Donde:

E_c Es el módulo de elasticidad en kg/cm²

W Es el peso volumétrico del concreto en ton/m³;

f'_c Es la resistencia del concreto en kg/cm²

El reglamento del D.F. propone las ecuaciones, para concreto clase 1:

$$E_c = 14000 \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 4400 \sqrt{f'_c}$$

Para concreto clase 2;

$$E_c = 8000 \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 2500 \sqrt{f'_c}$$

Que son aplicables únicamente a concretos fabricados con agregados típicos de la ciudad de México. Estas ecuaciones únicamente dan valores aproximados, porque existen otras variables importantes, como el tipo de agregado. Cuando se requieran estimaciones de cierta precisión, conviene determinar el módulo de elasticidad del concreto usado en particular. ^[28]

El módulo secante se usa en ensayos de laboratorio para definir la deformabilidad de un concreto dado. La ASTM recomienda la pendiente de la línea que une los puntos de la curva correspondiente a una deformación de 0.00005 y al 40% de la carga máxima. ^[28]

Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) calcula el módulo de elasticidad, para esfuerzos cercanos a 50000 psi (344.74 MPa o 3515.34 kg/cm²) con la siguiente fórmula:^[30]

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

Donde:

E= Módulo de elasticidad, psi,

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga ultima

S_1 = Esfuerzo registrado correspondiente a una longitud de 50 millonésimas de deformación unitaria.

ϵ_2 = La longitud de deformación obtenida por el esfuerzo S_2 .

Debido a que los concretos autocompactables contienen un mayor volumen de pasta que un concreto convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los agregados, se podría prever un módulo de elasticidad ligeramente menor para el caso del concreto autocompactable. Este efecto debe ser más acentuado en primeras edades, y es de fundamental importancia en estructuras pretensadas, puesto que la relación entre la resistencia a compresión y la flecha debida al pre-tensado (o pos-tensado) se ve alterada. Sin embargo, dicha diferencia tiende a ser mayor para los tipos de baja de resistencia y menor para la de altas resistencias, ya que en la de los tipos de alta de resistencia de un concreto convencional es usual reducir el tamaño máximo del árido e incorporar finos.

Domone (2007) compara los resultados de distintas investigaciones experimentales, y obtiene que para concretos en la escala de bajas resistencias la diferencia entre el módulo de un concreto autocompactable y un concreto convencional sea del orden de un 40%, mientras que esta diferencia baja hasta un 5% en la gama de altas resistencias, tal como se ha comentado anteriormente.

Por su parte, Erik y Pentti (1999) obtienen un módulo de elasticidad del concreto autocompactable similar al de un concreto convencional, y sin reflejar la gran diferencia de resistencia a compresión (concretos autocompactables= 84 MPa y concreto convencional= 58.5 MPa). En este caso, se puede interpretar que el concreto autocompactable presenta un menor módulo para la misma resistencia a compresión y, dado a la diferencia de resistencias se igualan los valores del módulo. También, Persson (1999 y 2001) y Assié (2003) presentan valores similares del módulo de elasticidad del concreto autocompactable con respecto al

módulo de un concreto convencional, considerando el mismo rango de la resistencia a compresión.

Muchos factores pueden explicar las diferencias de resultados obtenidos, principalmente, las variaciones entre las dosificaciones, los distintos materiales utilizados como finos, el tipo y tamaño máximo de los áridos, el esqueleto granular, entre otros. ^[5]

2.3.4. RELACIÓN DE POISSON

Si se toma un prisma mecánico fabricado en el material cuyo coeficiente de Poisson pretendemos medir y se somete este prisma a una fuerza de tracción aplicada sobre sus bases superior e inferior, el coeficiente de Poisson se puede medir como: *la razón entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada*, mostrada de forma esquemática en la figura 2.3.10. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones, de hecho la fórmula usual para el Coeficiente de Poisson es:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}}$$

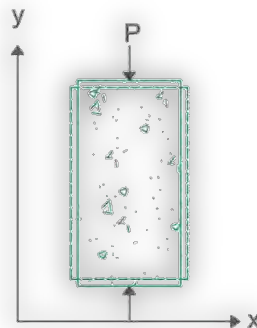


Figura 2.3. 10. Forma esquemática de la relación de Poisson.
(http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson, fecha de consulta 28/07/2011)

Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0,5. La mayor parte de los materiales prácticos en la ingeniería rondan entre 0.0 y 0.5, aunque existen algunos materiales compuestos llamados materiales auxéticos que tienen coeficiente de Poisson negativo. Termodinámicamente puede probarse que todo material tiene coeficientes de Poisson en el intervalo [-1, 0,5). El coeficiente de Poisson es adimensional. ^[19E]

Para el caso de los concretos hidráulicos conocer los valores del módulo de elasticidad y la relación de Poisson nos sirve para el dimensionamiento los elementos estructurales reforzados y no reforzados, se establece la cantidad de refuerzo, y la computación de los esfuerzos de tensión observadas.

Si se desea conocer el módulo de Poisson, se necesita conocer la deformación transversal al momento de efectuar la carga de compresión. La deformación transversal debe ser medida por un extensómetro no adherente capaz de hacer mediciones cercanas a los $25\mu\text{m}$ (0.635 micrómetros) y estas deformaciones o cambios de diámetro son obtenidos a la altura media del espécimen en estudio, o también pueden ser medidos por dos bandas extensométricas montadas en condiciones de servicio circunferencialmente en puntos diametralmente opuestos a la altura media de la muestra y capaz de medir la tensión circunferencial con una precisión de $5/1000000$. En la figura 2.3.11 se muestra el montaje de los micrómetros y de los anillos. ^[30]

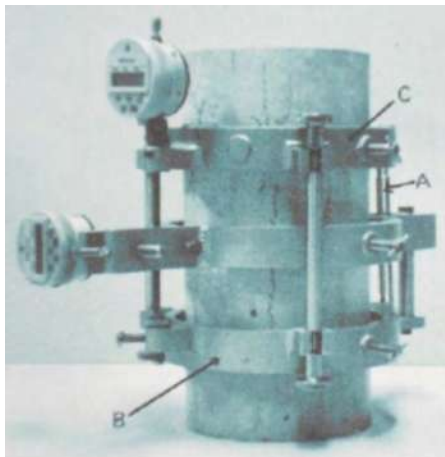


Figura 2.3. 11. Adecuado montaje de las bandas extensométricas (9)

Para concretos convencionales el rango de valores del coeficiente de Poisson debe de estar comprendido entre 0.15 y 0.20. ^[31]

Según los códigos de diseño del comité internacional de europa (CEB-FIP, MODEL CODE 1990) para un rango de esfuerzos entre $-0.5f_{ck} < \sigma_c < f_{ctk}$ el módulo de Poisson del concreto ν_c debe estar entre 0.1 a 0.2. ^[32]

Donde:

f_{ctk} Tensile strength

f_{ck} Compressive strength

σ_c Compressive stress

La norma ASTM C 469-02 propone la siguiente ecuación para calcular el módulo de Poisson, para deformaciones medidas al centésimo, siguiendo:

$$\nu = (\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

Donde:

ν = Relación de Poisson

ϵ_{t2} = Deformación transversal a la mitad del espécimen producido por el esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última registrada.

ϵ_{t1} = Deformación transversal a la mitad del espécimen producido por el esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de 0.000050. ^[30]

2.3.5. INDENTACIÓN VICKERS

La aplicación de penetradores para medir la tenacidad de fractura de materiales frágiles (materiales cerámicos, vidrios y metales duros) tiene una gran aceptación ya que es una técnica que precisa de muy pequeñas cantidades de material, las muestras necesitan poca preparación y, basta con un durómetro y un microscopio óptico para poder efectuar los ensayos. Todo esto hace que la técnica sea muy práctica, rápida y efectiva.

Cuando se presiona en una superficie lisa de material cerámico con un cuerpo duro y rígido (penetrador), el material se deforma al principio de forma elástica. Si la presión sigue aumentando aparece una impresión residual que es la que permite medir la dureza del material. Si la carga se hace todavía mayor, en materiales frágiles, aparece una zona agrietada que dependerá de la geometría del penetrador. ^[33]

Más concretamente, la dureza se puede definir como: *la resistencia de un material a la deformación plástica localizada*. A lo largo de los años, se han ido desarrollando técnicas cuantitativas de dureza. Se basan en un pequeño indentador o penetrador que es forzado sobre una superficie del material a ensayar, en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. En estos ensayos se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza. ^[34]

Los penetradores se pueden clasificar en dos grupos que son: *esféricos y afilados (de geometría esférica y piramidal respectivamente)*, como se pueden observar en las figuras 2.3.12 y 2.3.13. Los esféricos producen una fractura con forma troncocónica debajo del círculo del contacto. La ventaja de estos

penetradores es que el contacto hasta la rotura es bien conocido, pues es predominantemente elástico, pero no es sencilla la determinación experimental del cono de fractura, por lo que su uso no ha sido muy difundido. ^[35]

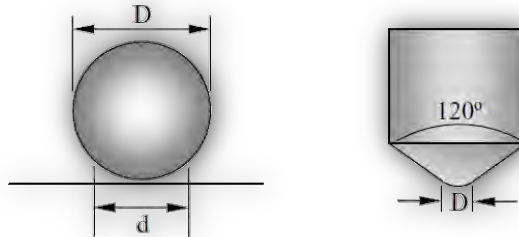


Figura 2.3. 12. Geometría del indentador esférico, (Botero, Diciembre 2005)

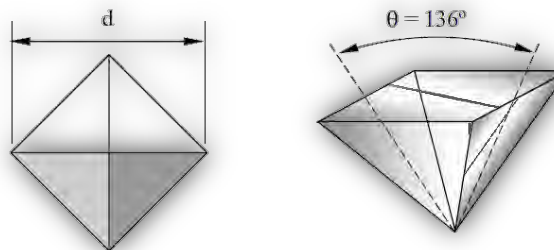


Figura 2.3. 13. Geometría del indentador afilado, (Botero, Diciembre 2005)

De los penetradores afilados, los más utilizados para la medida de la tenacidad de fractura han sido los tipos **Vickers y Knoop**. Estos presentan una gran ventaja sobre los esféricos porque generan una geometría de impresión residual constante, que no cambia según va avanzando el penetrador en el material. En la descripción del proceso de generación de grietas no hay un acuerdo unánime. ^[35]

El mecanismo más ampliamente aceptado es el siguiente: *según aumenta la carga aplicada con el penetrador se crean campos de tensiones elásticas cada vez mayores, debido a un flujo plástico o densificación estructural*. La deformación permanente resulta ser de la impresión residual, y el volumen acomodado debajo de la impronta tiene forma aproximadamente semiesférica. Si la carga aumenta aun más, eventualmente surgen grietas desde los extremos de la impresión. La generación de estas grietas de fractura parece que se inicia en el proceso de carga, pero no alcanza su configuración definitiva hasta que se ha realizado la descarga. ^[36]

El ensayo de indentación Vickers consiste en presionar un indentador sobre la superficie dejando una impresión después de la descarga, como se muestra en la figura 2.3.14.

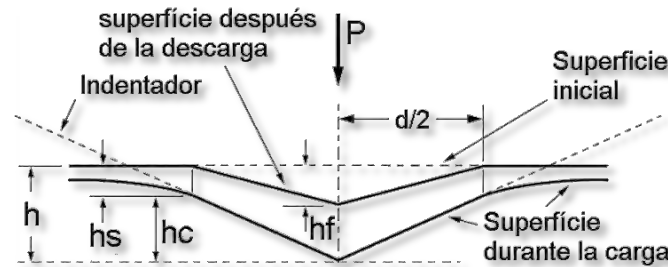


Figura 2.3. 14. Ensayo de indentación Vickers, (Meza, Chávez, & Vélez, Diciembre 2005).

El método Vickers nació en 1925 y continúa siendo el más utilizado en la actualidad a nivel industrial. El indentador de diamante Vickers tiene la forma de una pirámide de base cuadrada con un ángulo apical de 136° entre las caras (ángulo de aristas 148°), mostrado en la figura 2.3.13. La dureza Vickers se calcula usando la carga P del indentador y el área superficial de la impresión permanente. La presión media está dada por la carga dividida por el área proyectada de la impresión.^[6]

El número de la dureza Vickers se calcula de la siguiente manera:

$$HV = 1.8544 \left(\frac{P}{d^2} \right)$$

Donde:

P = carga, kgf, y;

d = longitud promedio de las dos diagonales de la indentación (huella) en milímetros.

O también puede ser medida con la siguiente fórmula:

$$HV = 0.0018544 \left(\frac{P}{d^2} \right)$$

Donde:

P = carga, N, y;

d = longitud promedio de las dos diagonales de la indentación (huella) en milímetros.^[37]

La teoría desarrollada para el cálculo de dureza mediante ensayos de indentación, supone que el material es idealmente elastoplástico y que el material se hunde alrededor del indentador, caso contrario para materiales plásticos rígidos estos tienden a formar un apilamiento alrededor del indentador en los cuales la técnica produce grandes errores. En la siguiente figura 2.3.15, se puede observar los dos casos antes mencionados. [34]

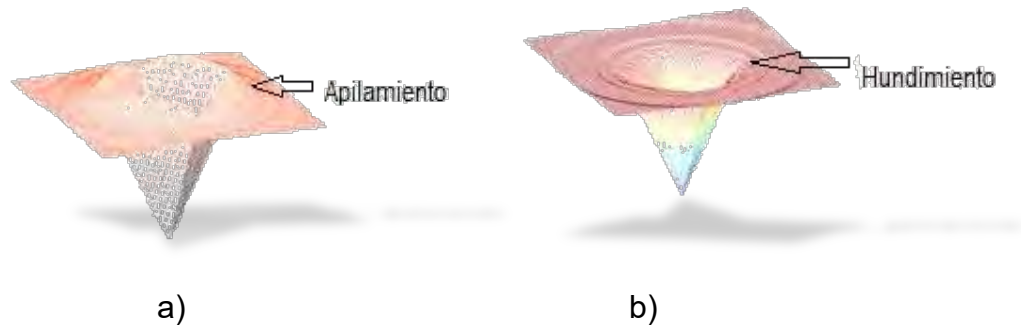


Figura 2.3. 15. Fenómenos de a) Apilamiento b) Hundimiento, en materiales indentados, con el indentador Vickers, (Dambaziki, Febrero 2005).

Después de una cierta carga, por lo general para el indentador Vickers anda alrededor de 15 y 2000 gramos, empieza la propagación de grietas. Se pueden generar dos tipos de grietas: *Radiales* y *Laterales*, mostradas en la figura 2.3.16. Las grietas radiales siempre son visibles en la superficie de la muestra en forma de cruz. Estas grietas se propagan debajo de la superficie en el plano central de la huella, a estas grietas son llamadas *grietas medias*. Adicionalmente, si la deformación plástica ha sido muy grande surgen grietas por debajo de la superficie según las cuatro caras de la impresión, a estas se les denomina *Grietas laterales*, y son las responsables de que en algunas ocasiones se observe el desprendimiento del material alrededor de la huella. [38]

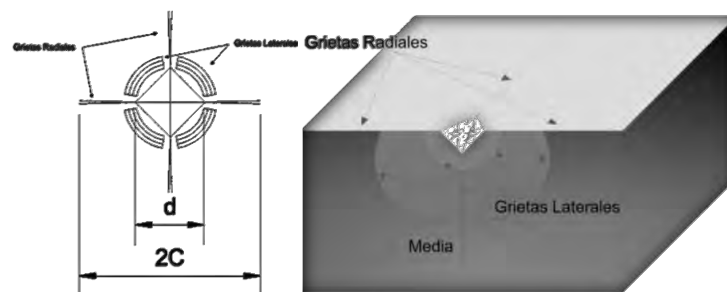


Figura 2.3. 16. Sistema de grietas creado por un indentador Vickers, (Caño, 1993).

Todos los materiales cambian su forma, volumen o ambos, bajo la influencia de un esfuerzo. Si este cambio producido por el esfuerzo se recupera totalmente a esta deformación se le llama *elástica*. Cuando un material totalmente elástico es indentado, la forma de la curva de carga coincide perfectamente con la curva de descarga. Al retirar el indentador la deformación sobre la muestra desaparece completamente, como se puede ver en la figura 2.3.17.

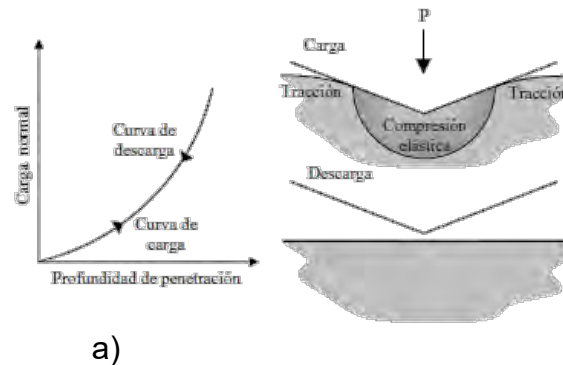


Figura 2.3. 17. Esquema de la indentación de un material completamente elástico con un indentador Vickers, a) curva de carga y descarga y b) efectos de carga y descarga sobre el material, (Botero, Diciembre 2005).

Cuando el límite elástico del material es excedido ocurre una deformación irreversible, a este tipo de deformación se le conoce con el nombre de: *Deformación plástica*. En la indentación de un material totalmente plástico, cuando se retira el indentador en el material queda una huella permanente igual a la formada a la máxima profundidad de penetración del indentador con la carga máxima aplicada. En este caso las curvas de carga y descarga similares a las mostradas en la figura 2.3.18. Se puede observar que en estas condiciones no hay una recuperación del material a su estado original. ^[35]

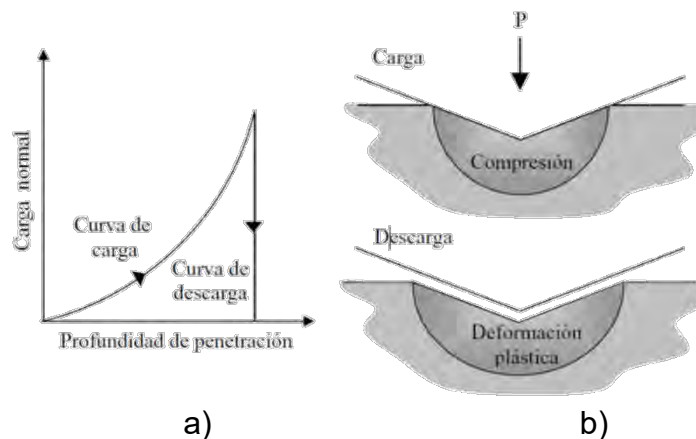


Figura 2.3. 18. Esquema de la indentación de un material completamente plástico con un indentador Vickers, a) curva de carga y descarga y b) efectos de carga y descarga sobre el material.

Otro tipo de deformación que se tiene es *la deformación elasto-plástica*. Este tipo de deformación es aquella en que en un mismo volumen existe una deformación plástica y elástica del material, por lo que el volumen deformado plásticamente muestra una cierta recuperación elástica cuando se retiran los esfuerzos exteriores. En este caso las curvas carga-descarga presentan un aspecto similar al mostrado en la figura 2.3.19.

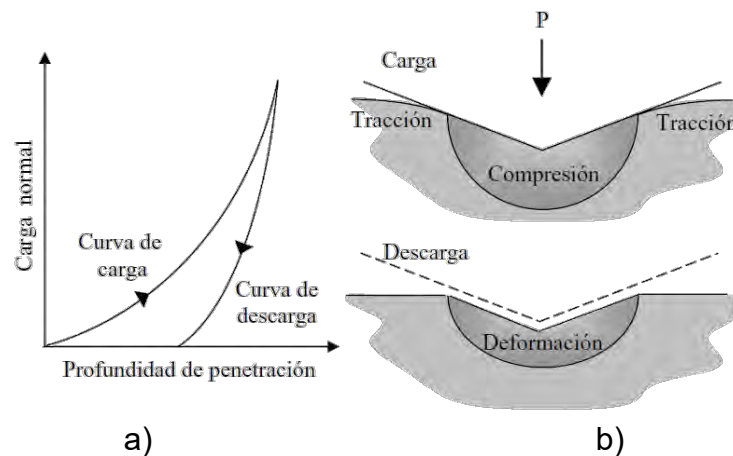


Figura 2.3. 19. Esquema de indentación de un material elasto-plástico, a) curva de carga descarga, b) efectos de carga y descarga sobre el material.

En materiales frágiles ocurre generalmente la deformación elasto-plástica cuando son indentados con un indentador piramidal, incluso con muy pequeñas cargas. En materiales dúctiles la deformación elasto-plástica puede ser incluso inducida por un indentador esférico o cilíndrico. ^[35]

2.4. TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE LA MICRO Y NANO-ESTRUCTURA DEL MAC

2.4.1. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, MEB (SEM)

El microscopio electrónico de barrido es una técnica de análisis de observación de todo tipo de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, que mediante el recorrido, a modo de barrido, de un haz muy fino de electrones, a gran velocidad que se genera mediante un filamento de wolframio sometido a un alto voltaje y aumentando su temperatura, sobre una superficie de material, lo caracteriza morfológicamente, y mediante los adecuados accesorios permite efectuar un microanálisis elemental. ^[39]

El haz de electrones en la muestra se encuentra bajo vacío y con un recubrimiento de oro o grafito (se ésta no conductora) para generar una vía a tierra. El vacío se realiza para tener una mejor estabilidad al haz de electrones debido a que son absorbidos por la atmosfera y para evitar ionización de gases.

Los electrones que interactúan con la muestra se recogen a diferentes sensores dependiendo del análisis a realizar.

El microscopio electrónico de barrido (SEM o MEB) es el mejor método adaptado al estudio de la morfología de las superficies. A diferencia de un microscopio óptico que utiliza fotones de espectro visible, la imagen entregada por el microscopio electrónico se genera por la interacción de un haz de electrones que *barre* un área determinada sobre la superficie de la muestra. ^[40]

Este microscopio consiste en un sistema que permite crear y desviar un haz de electrones, así como medir las variaciones del parámetro escogido, denominado coeficiente de emisión electrónica secundaria. También consta de un dispositivo que permite la reconstrucción de la imagen del objeto y grabarla. La fenomenología básica en que se fundamenta esta técnica reside en que en el momento en que los electrones, dotados de una energía de algunos kilovoltios, chocan contra una muestra sólida y se emiten electrones de energías diversas así como también una cierta radiación.

En el proceso de observación se genera una gran variedad de señales como:

- Electrones secundarios. Son emitidos por el material y provienen de capas situadas en la superficie hasta la profundidad que no excede algunos nanómetros y se utilizan preferentemente para las observaciones morfológicas del mismo.
- Electrones retrodispersados. Son empleados para la discriminación de las fases existentes dentro del mismo material observado, dado que su producción es proporcional y está íntimamente relacionado con el número atómico z .
- Electrones Auger. Se producen cuando un electrón de una capa interna de un átomo es expulsado por un aporte exterior de energía, como por ejemplo por un electrón primario, y reemplazado por un electrón de una capa más exterior. La energía disponible puede disiparse en forma de radiación o cederse a otro electrón del átomo. Este electrón Auger es emitido con una energía característica del material irradiado y el fenómeno puede servir al microanálisis de la muestra o para reconstruir las imágenes de repartición de los elementos químicos en los primeros nanómetros de la superficie (técnica de microanálisis de capas finas).
- Rayos X. los electrones producidos en el filamento del microscopio electrónico se hacen incidir sobre la superficie de un material, se produce una excitación de este y una emisión de radiación. Parte de esta radiación es de tipo rayos X, con una energía y longitud de ondas propias del

material, lo que nos permite deducir y cuantificar los elementos químicos que lo componen, EDX.

En la figura 2.4.1 se muestra esquemáticamente los efectos e incidencias del haz de electrones sobre un material en microscopía eléctrica de barrido (MEB).

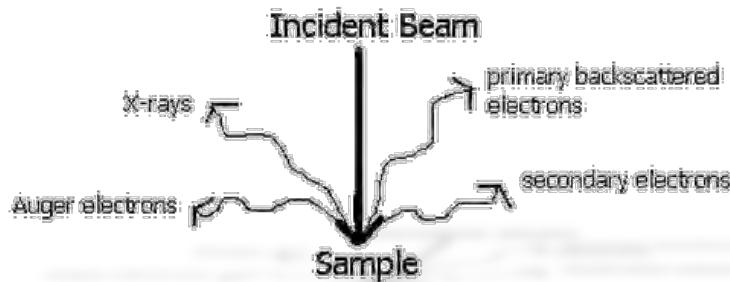
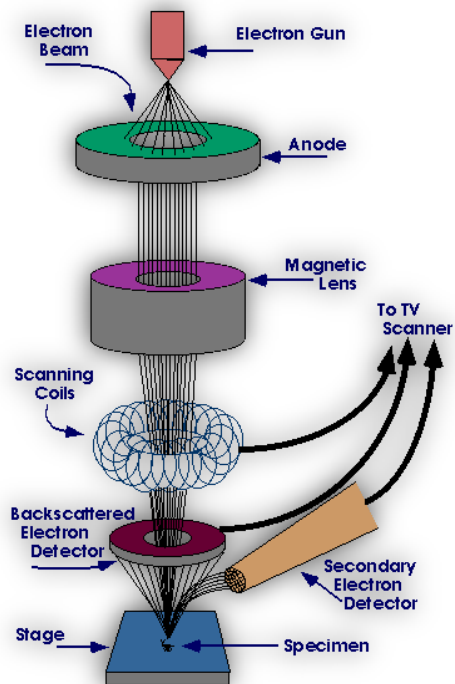


Figura 2.4. 1. Incidencia y efectos del haz de electrones.

La parte principal de un microscopio electrónico de barrido es la denominada columna de electrones la cual lleva alojados en su interior los siguientes elementos

- Un cañón de electrones con un filamento que actúa como emisor o fuente de iluminación, por analogía con un sistema óptico.
- Un sistema de lentes electromagnéticas encargado de focalizar y reducir a un diámetro muy pequeño el haz de electrones producido por el filamento.
- Un sistema de barrido que hace recorrer el haz de electrones ya focalizado por la superficie de la muestra.
- Uno o varios sistemas de detección que permiten captar el resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra y transformarlo en una señal eléctrica.
- Una salida conectada a una o varias bombas que producen el vacío necesario para que el conjunto funcione adecuadamente.

Además, el microscopio posee diversos sistemas que permiten observar las señales eléctricas procedentes de los detectores, en forma de imágenes en un monitor de TV, fotografía, espectro de elementos, etc. A continuación se muestra en la figura 2.4.2 un esquema general de cómo es que trabaja un equipo electrónico de barrido. ^[18]



a)



b)

Figura 2.4. 2. a) Diagrama de un microscopio electrónico de barrido cortesía de la universidad de Iowa, USA. b) Microscopio electrónica de barrido, (<http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>, fecha de consulta 20/08/2011).

Los escaneos con el microscopio electrónico de barrido emite un bombardeo de electrones sobre el espécimen a estudiar y este mide cualquier señal que se genere con el bombardeo. Las imágenes que resultan de las señales medidas pueden ser utilizadas para estudiar el tamaño de las partículas, la rugosidad de la superficie y las fracturas que se pudieran tener, mientras que las superficies pulidas son utilizadas para la determinación de la distribución de la fase y la composición química. El microanálisis de rayos X, proporciona un análisis químico cuantitativo del lugar, así como unos mapas de distribución de elementos. Las imágenes son monocromas, ya que reflejan el flujo de electrones o rayos X de las cuales resultan de la interacción haz/muestra. Electrones retrodispersados y las imágenes de rayos X son los modos de imagen más útil para la microscopia electrónica de barrido cuantitativo. El tratamiento informático y análisis cuantitativo de las imágenes hacen que la rutina sea posible. ^[40]

Imágenes de electrones secundarios. Los electrones secundarios son electrones de baja energía como resultado de una colisión inelástica de un haz de electrones primarios con un electrón del átomo de la muestra. Debido a su bajo consumo de energía, estos son absorbidos fácilmente y solo los que se quedan en la superficie son los que emiten una imagen de la topografía en la superficie. La

sombra aparente en la imagen es el resultado de los electrones secundarios absorbidos por partes de la muestra.

En la figura 2.4.3 se puede ver una imagen de la superficie fractura de una pasta de cemento endurecido. A temprana edad las pastas de cemento suelen tener espacios vacios lo suficientemente grande en donde los cristales puedan desarrollarse, mientras que en edades grandes, la forma de los cristales bien formados generalmente se encuentra en regiones de muy alta porosidad o en donde se encuentra aire atrapado. En la imagen se puede apreciar las placas típicas de hidróxido de calcio y las agujas de etringita.

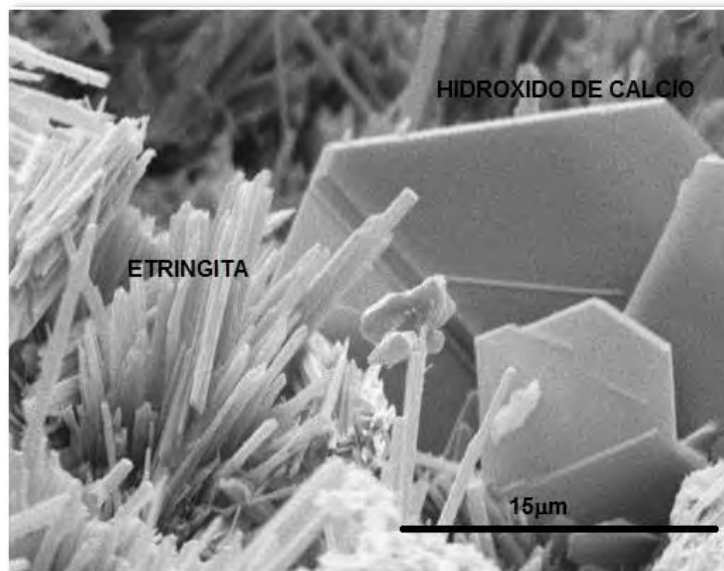


Figura 2.4. 3. Micrografías en la pasta de cemento mostrando la forma hexagonal del hidróxido de calcio y las agujas de etringita, (Stutzman, Noviembre 2000).

En la figura 2.4.4 se puede ver la el barrido de una pasta de cemento con siete días de hidratación, en el cual se ilustra la etringita en forma de agujas que los distinguen comúnmente, un bloque de cristales de hidróxido de calcio que se muestran separadas a lo largo del plano basal, una de tipo I que es un gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) identificadas por su forma corta y paquetes de agujas finas del tipo II S-C-H, y las agujas de etringita. Los de tipo II tienen más forma laminar de apariencia. Estos tipos de imágenes se aplican principalmente en el examen de la microestructura de las pastas a edad temprana, y en las imágenes de altos aumentos sirven para caracterizar la microestructura y textura del agregado. ^[41]

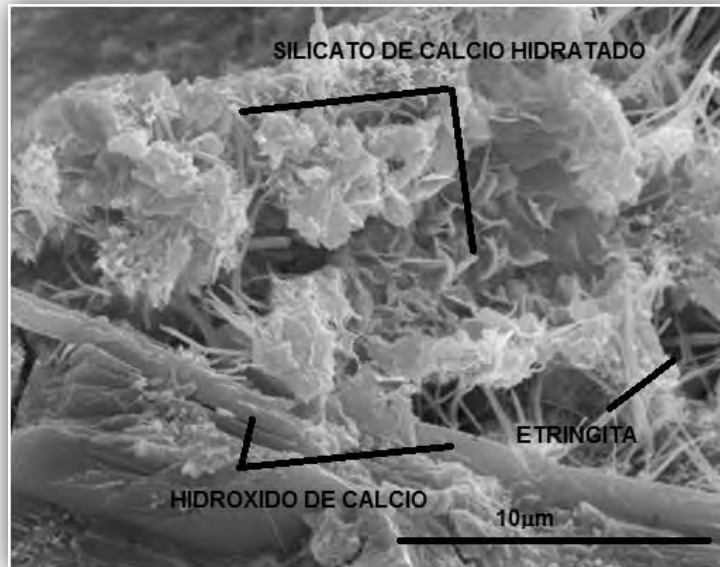


Figura 2.4. 4. Micrografía en una pasta de cemento a edades tempranas de hidratación. (Stutzman, Noviembre 2000).

2.4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X, DRX

Los rayos X utilizados para la difracción son ondas electromagnéticas con longitudes de onda que oscilan entre 0.05 y 0.25 nm (0.5 y 2.5 Å), del orden de los espacios interatómicos de los sólidos. Para producir rayos X para propósitos de difracción es necesario un voltaje de unos 35kV y se suministra entre un cátodo y un metal diana anódico, ambos mantenidos en vacío, como se muestra en la figura 2.4.3. [6]

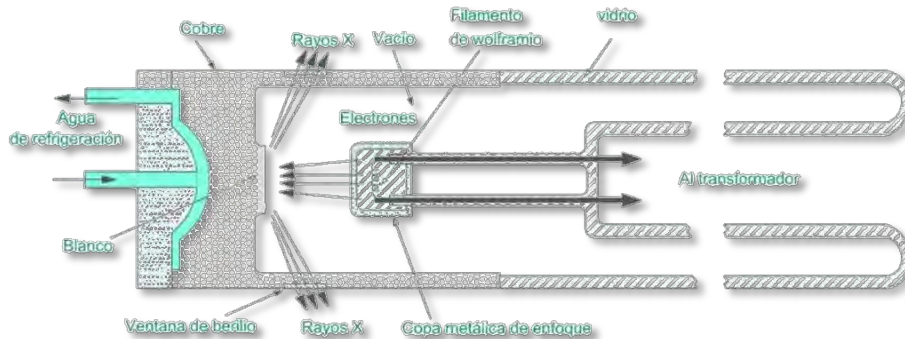


Figura 2.4. 5. Diagrama esquemático de la sección transversal de un tubo de rayos X de filamento sellado, (Smith, 1992).

Cuando el filamento de wolframio del cátodo se calienta, se liberan electrones por emisión termiónica y se aceleran a través del vacío por la gran diferencia de voltaje entre el cátodo y el ánodo, por consiguiente ganando energía

cinética. Cuando los electrones golpean la lámina de metal emiten rayos X. Sin embargo, la mayor parte de la energía cinética (98%) se convierte en calor, por lo tanto, la muestra tiene que enfriarse externamente (2).^[6]El espectro emitido a 35kV usando una lámina de molibdeno se muestra en la figura 2.4.4.

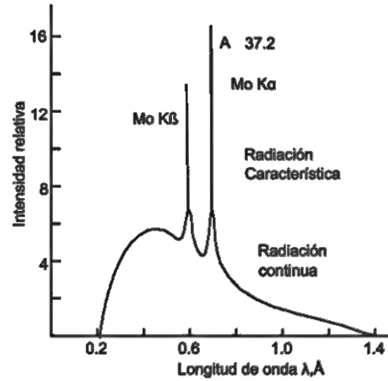


Figura 2.4. 6. Emisión del espectro de rayos X cuando el metal molibdeno se utiliza como metal diana en un tubo de rayos X operado a 35 kV, (Smith, 1992).

El espectro muestra radiación continua de rayos X para una longitud de onda que oscila entre 0.2 y 1.4 Å (0.02 y 0.14 nm) y dos picos de radiación determinada que designan las líneas K_{α} y K_{β} . Las longitudes de onda de las líneas K_{α} y K_{β} son características para un determinado elemento. En el molibdeno la línea K_{α} , aparece a una longitud de onda de unos 0.7 Å (0.07 nm). El origen de esta radiación determinada se explica como sigue: **Primero**, *electrones K (electrones del orbital $n=1$) se expulsan de átomo por bombardeo de la lámina con electrones altamente energéticos, dejando los átomos excitados. A continuación, algunos de los electrones de orbitales más altos (es decir, $n=2$ o $n=3$) caen a niveles energéticos más bajos, para reemplazar los electrones K perdidos, emitiendo energía de una determinada longitud de onda.* La transición de electrones del orbital L($n=2$) al orbital K ($n=1$) genera energía de longitud de onda correspondiente a la línea K_{β} como se indica en la figura 2.4.5. ^[6]

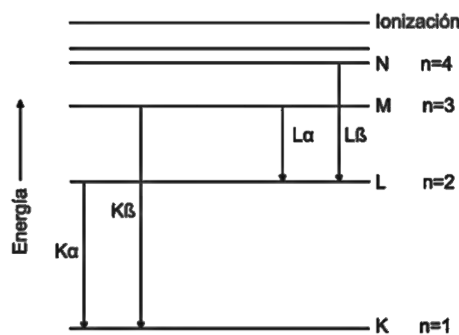


Figura 2.4. 7. Niveles de energía de los electrones en el molibdeno mostrando el origen de la radiación K_{α} y K_{β} , (Smith, 1992).

Antes de considerar las aplicaciones de las técnicas de difracción de los rayos X, es necesario saber cuáles son las condiciones geométricas necesarias para producir difracción o reforzar los grupos de rayos X reflejados.

Consideremos que un haz de rayos X monocromático (longitud de onda sencilla) incide sobre un cristal, como se muestra en la figura 2.4.6. Por simplificación, permitamos el reemplazamiento de planos cristalinos de centros de dispersión atómicos por planos cristalinos que actúan como espejos reflejando el haz de rayos X incidente. En la figura mostrada anteriormente, las líneas horizontales representan un conjunto de planos cristalinos paralelos con índices de Miller (hkl). Cuando un haz incidente de rayos X monocromáticos de longitud de onda λ golpea este conjunto de planos con un ángulo tal que el diagrama de ondas del haz deja los diversos planos en una situación fuera de fase, no se producirá haz reforzado alguno (figura 2.4.6(a)). De este modo tendrá preferencias destructivas. Si los diagramas de ondas reflejados del haz dejan a los diversos planos en fase, entonces se producirá un reforzamiento del haz o interferencia constructiva (figura 2.4.6 (b)).

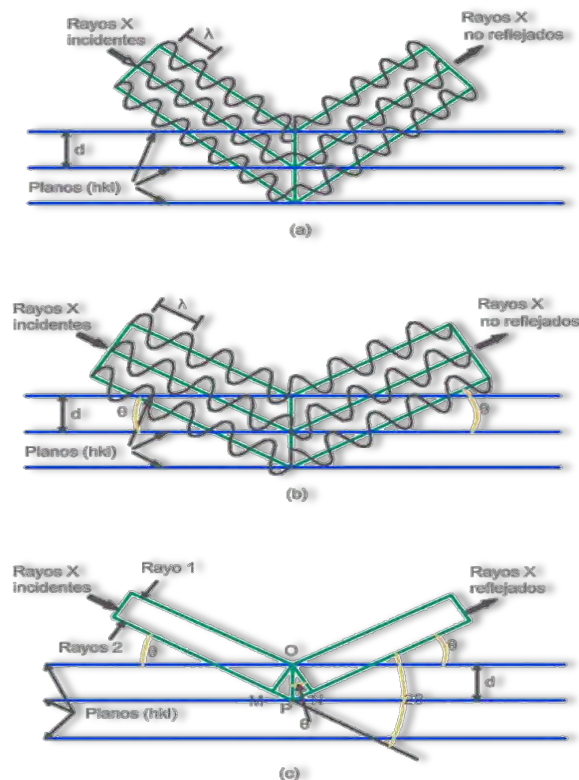


Figura 2.4. 8. Reflexión de un haz de rayos X por los planos (hkl) del cristal. (a) Para ángulos arbitrarios de incidencia no se produce haz reflejado alguno. (b) Para el ángulo de Bragg, θ , los rayos reflejados están en fase y se refuerzan mutuamente. (c) Similar a (b) con la excepción de que la representación de la onda ha sido suprimida, (Smith, 1992).

Consideremos los rayos X incidentes 1 y 2 como se indican en la figura 2.4.6(c). Para que estos rayos estén en fase, la distancia extra recorrido del rayo 2 es igual a $MP + PN$, que debe ser un número entero de longitudes de onda λ . De este modo:

$$n\lambda = MP + PN$$

Donde $n = 1, 2, 3, \dots$, y se conoce como orden de la difracción. Puesto que ambos MP y MN son iguales a d_{hkl} es el espaciado interplanar de los planos cristalinos de índices (hkl) la condición para interferencia constructiva debe ser:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

Esta ecuación, conocida como **ley de Bragg** establece la relación entre las posiciones angulares de los haces difractados en términos de longitud de onda λ de la radiación de rayos X incidente y de los espaciados interplanares d_{hkl} de los planos cristalinos. En la mayor parte de los casos, se utiliza el primer orden de difracción donde $n=1$, y así, para este caso, la ley de Bragg adopta la forma: ^[6]

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

La difracción de rayos X permite la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma diferente característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Los estudios de polimorfismo, transiciones de fase, medida del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase, etc.; se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

Para estudios de muestras contenidas en polvo usualmente se utiliza un difractómetro de polvo con una geometría denominada *Bragg-Brentano*, donde los rayos X filtrados divergen desde una línea de origen e incide sobre la muestra de 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, en la figura 2.4.7 se muestra la geometría del Bragg-Brentano,

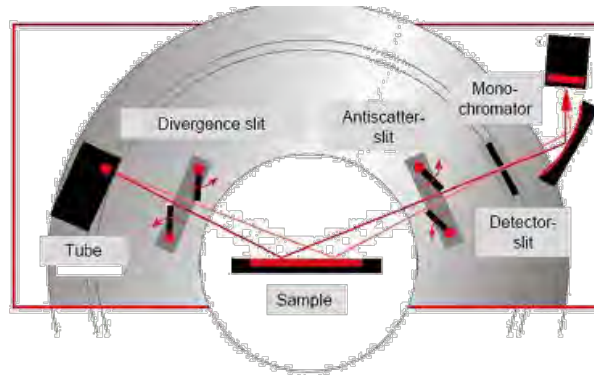


Figura 2.4. 9. Difractómetro de polvo con geometría de Bragg-Brentano (11), (<http://investigacion.us.es/scisi/cgi/servicios/area-de-rayosx/equipamiento>, fecha de consulta 03/08/2011).

2.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN, 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 de la luz y con ello se logra aumentar la resolución. Con este equipo se logra ver estructuras mucho más pequeñas, logrando aumentar hasta un millón de veces. Además tiene un poder de resolución de unas fracciones de nm (nanómetros).

Los electrones difractados al pasar a través de la muestra generan un difractograma que puede ser transformado directamente en imagen mediante lentes magnéticas que es la proyección de la estructura cristalina a lo largo de la dirección de los electrones.

Tanto el difractograma de electrones como la imagen reconstruida se pueden proyectar en una pantalla. El esquema de un microscopio electrónico de transmisión se muestra en la figura 2.4.8 (a). Difractogramas de monocristal (microcristal) similares en apariencia a los de nivel-cero, fotografías de precesión de R-X, se pueden obtener orientando los microcristales de pequeño espesor ($< 1\mu\text{m}$). Uno puede seleccionar un microcristal de la muestra y obtener el difractograma de ese microcristal embebido dentro de la muestra lo cual es una ventaja al estudiar muestras polifásicas ya que la difracción de neutrones y de R-X no permiten seleccionar la fase deseada sino que siempre se obtiene la superposición de los difractogramas de todas las fases presentes en la muestra. ^[42] Con cuidado y un buen microscopio electrónico, es posible obtener imágenes con resolución atómica permitiendo que el número adecuado de fases difractadas contribuyan a la imagen.

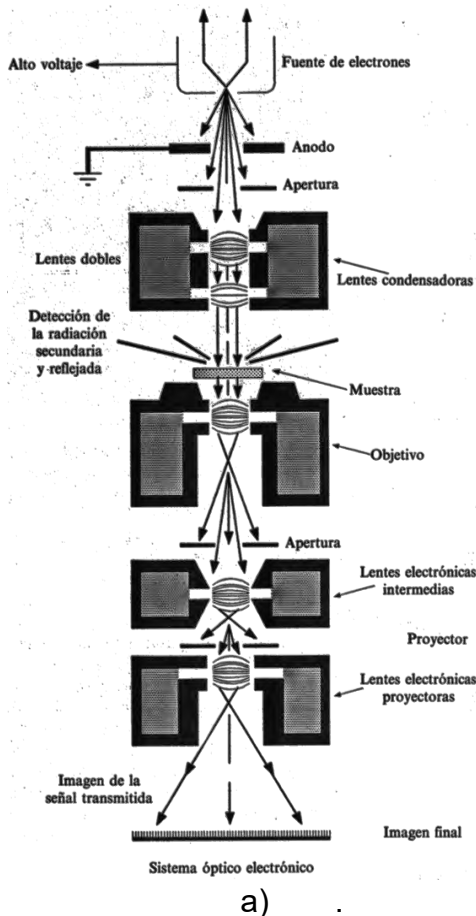


Figura 2.4. 10. a) Esquema de un microscopio electrónico de transmisión (<http://imagenologia-siram607.blogspot.com/2011/04/microscopia-electronica-de-transmision.html>, fecha de consulta 03/10/2011). b) Microscopio electrónico de transmisión Samsung TECNAI.

Las partes principales de un microscopio electrónico de transmisión son:

Cañón de electrones, que emite los electrones que chocan o atraviesan el espécimen (dependiendo que tipo de microscopio electrónico es), creando una imagen aumentada.

Lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones.

Sistema de vacío es una parte muy importante del microscopio electrónico. Debido a que los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, se debe hacer un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características.

Placa fotográfica o pantalla fluorescente que se coloca detrás del objeto a visualizar para registrar la imagen aumentada.

Sistema de registro que muestra la imagen que producen los electrones, que suele ser una computadora. ^[23E]

Los rayos de iluminación atraviesan la muestra y son enfocados por las lentes del objetivo y de proyección para formar una imagen aumentada sobre una pantalla fluorescente. Sin embargo el microscopio electrónico es más complejo. Para que los electrones puedan ser acelerados hasta la velocidad prefijada debe trabajarse en condiciones de alto vacío (10^{-4} a 10^{-8} KPa). El sistema central del microscopio electrónico incluyendo la pantalla fluorescente y el equipo fotográfico, lo constituye un tubo hueco. El equipo electrónico que suministra la corriente necesaria se halla generalmente situado a una cierta distancia para evitar la interferencia de los campos magnéticos dispersados. La mayoría de los microscopios están equipados con dispositivos de seguridad que no permiten conectar el filamento de alto voltaje hasta que no se ha conseguido el vacío apropiado. ^[42]

En el proceso de adquisición de la imagen, una parte de los electrones son dispersados y otros son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada de la muestra. Los electrones son acelerados al aplicar un potencial negativo que puede estar entre 100-1000kV y son focalizados mediante dos lentes condensadores sobre una muestra delgada, transparente a los electrones. Los electrones que atraviesan la muestra son recogidos y focalizados por la lente objetivo dentro de una imagen intermedia ampliada. La imagen es ampliada aún más con las lentes proyectora, con las cuales se controla el tamaño de la imagen en la pantalla fluorescente.

En un microscopio de transmisión se emplean dos métodos para obtener la imagen: *el de campo claro* (a partir de electrones directos que han atravesado la muestra sin interacción) y *el de campo oscuro* (electrones difractados). En el campo claro, la imagen se forma a partir del haz transmitido, que no ha sufrido dispersión, como resultado se tiene una imagen del objeto oscura sobre un fondo brillante. En la del campo oscuro, se utilizan los electrones dispersados, obteniéndose una imagen brillante sobre un fondo oscuro.

Una de las limitantes de la técnica TEM es que muchos materiales no sobreviven a las condiciones que existen en la cámara del microscopio: a) alto vacío; b) impacto de electrones acelerados. Muchas muestras se transforman ya que pueden perder el agua de hidratación o las moléculas orgánicas se pueden volatizar o reaccionar.

2.4.4. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, EIS, RESISTIVIDAD-IMPEDANCIA

Las técnicas electroquímicas son muy importantes para la evaluación del deterioro del material analizado; existe diversidad de técnicas pero las más utilizadas son las no destructivas tales como LPR y EIS.

La técnica de impedancia es un método para caracterizar a los materiales inorgánicos u orgánicos, mediante la medición de paso de una corriente eléctrica y variable en el tiempo (alternamente en dirección), a través de él y observar el comportamiento de ésta en función de la rapidez del cambio en el tiempo. La información obtenida por esta técnica nos permite determinar la forma en que los constituyentes químicos del material interaccionan entre sí con los campos eléctricos presentes a lo largo de él. En la figura 2.4.9 se muestra un esquema del método en que las propiedades, llamadas *dieléctricas de un material* se determinan experimentalmente.

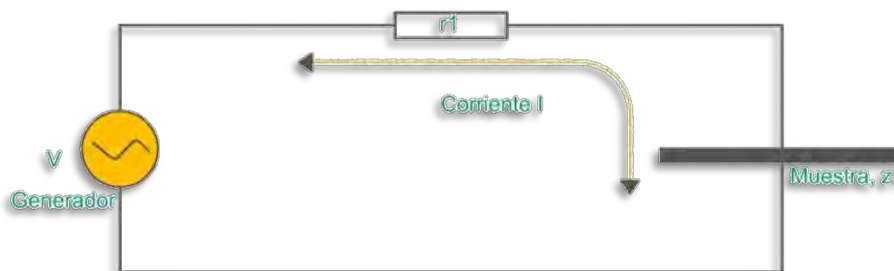


Figura 2.4. 11. Esquema del método de las propiedades dieléctricas de un material.

En la figura anterior, V representa una fuente de voltaje (generador) que cambia su polaridad en el tiempo alternamente, r_1 es el valor de la resistencia interna del generador al paso de corriente y Z_1 el valor de la resistencia más reactancia de la muestra del material a estudiar.

Las propiedades eléctricas de un material se pueden relacionar con las propiedades dieléctricas de éste. La función dieléctrica ϵ de un material es un parámetro característico de cada material y ésta a su vez nos proporciona información de la forma en que sus constituyentes (átomos, moléculas, iones cargas libres y cargas almacenadas) interaccionan entre sí bajo la presencia de campos eléctricos externos. Los materiales que contienen moléculas polares como el agua, amoníaco, metanol, etc. Ejemplos de estos materiales son todos los organismos vivos, alimentos polímeros, cerámicas, vidrio, cemento, maderas, etc., y que pueden ser analizadas mediante la técnica de impedancia.^[43]

En el proceso de caracterización dieléctrica, lo cual necesariamente involucra movimientos de portadores de cargas, de materiales no metálicos, ha cobrado gran importancia la técnica de espectroscopía de impedancias. El aspecto importante de esta técnica es la conexión directa que, frecuentemente, existe entre el comportamiento de un sistema real y el de un modelo idealizado. El modelo, en este caso, se constituye de componentes eléctricos discretos.

En especial, en sistemas cerámicos policristalinos esta técnica resulta ventajosa debido a que; la respuesta eléctrica de granos, fronteras de granos e interfaces electrodo/material, exhibe diferente dependencia de la frecuencia en cada caso.

Otro punto importante, establecido por Bauerle (1969), es que el comportamiento eléctrico de un material cerámico de una sola fase, puede describirse matemáticamente por una función compleja tal como la impedancia Z , o la admitancia, Y .^[44]

Estudios de espectroscopia de impedancia en concretos, morteros y en pastas de cemento han conducido a iniciar, posiblemente, la correlación de las propiedades dieléctricas con sus propiedades mecánicas. Incluso en recientes estudios se tiene la posibilidad de obtener, para las pastas de cemento, constantes dieléctricas con frecuencias bajo 200kHz. Aunque recientemente se ha demostrado que la respuesta dieléctrica aparece en frecuencias sobre de este.

Si un potencial (voltaje) se aplica a través de una celda electroquímica (corrosión de materiales, batería, etc.) una corriente se produce al flujo a través de la celda, con un valor determinado por los mecanismos de la reacción que tienen lugar. La reacción es la formación de nuevas especies químicas como resultado del movimiento de los iones a través del electrolito. Los movimientos iónicos son causados por la diferencia de potencial aplicada, y lo constituyen un flujo de corriente eléctrica.^[45]

Para que los iones móviles puedan ir a través del sólido deben, al menos parcialmente, ocupar un conjunto de sitios energéticamente equivalentes en el sólido, las cuales deben de estar interconectados formando "canales" de transporte para los iones. Así, si un ion gana suficiente energía de las fluctuaciones térmicas de la red, por ejemplo, como para salvar la barrera de energía entre los sitios de la red, entonces se establecerá un movimiento a saltos del ion. Este modelo ampliamente utilizado para describir la migración de los iones.^[46]

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de ohm.

$$E = IR$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en Ohms. En el caso de un señal alterna la expresión equivalente es la siguiente.

$$E = IZ$$

En la ecuación anterior Z representa la impedancia del circuito, con unidades en Ohms. Es necesario hacer notar que a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de CA depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de hertz (Hz) o número de ciclos por segundo (s-1).^[43]

En general el intervalo de de frecuencia útil en este tipo de estudios es muy amplio, de 10^{-3} Hz a 10^{12} *Hz. Aunque la selección del mismo dependerá del interés particular en cada caso.^[46]

De esta manera, es posible definir la admitancia (Y) de un circuito de CA. La admitancia es el recíproco de la impedancia y es un parámetro de importancia en los cálculos matemáticos que involucra la técnica y por otra parte, los equipos usados en estudios de EIS miden en realidad la admitancia.

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{E}$$

La impedancia de un sistema a cada frecuencia está definida por, la razón entre la amplitud de la señal de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. Un listado de estos parámetros a diferentes frecuencias constituye el “espectro de impedancia”.^[43]

La medición de las propiedades eléctricas ha demostrado ser útil en el análisis del sistema de los cementos. Las mediciones convencionales de las propiedades eléctricas suelen utilizar una sola frecuencia, o un rango estrecho de frecuencia, para medir la resistencia eléctrica. Por ejemplo, varios investigadores suelen utilizar una señal de corriente alterna de bajo voltaje en el rango de cuatro a cinco KHz o frecuencias aun más bajas (50Hz). Sin embargo, estas mediciones pueden ser problemáticos ya que no hay forma de saber el rango óptimo de la frecuencia que permita la medición de las propiedades a granel sin la influencia de los electrodos. Esto es especialmente cierto, ya que el rango de frecuencias óptimas para los sistemas de cemento está en función de muchas variables, como

son: el grado de hidratación, la composición del material, la temperatura, el secado, la polarización de los electrodos, etc.

En general, se sabe que el comportamiento eléctrico de un material cerámico de una sola fase cristalina puede describirse matemáticamente por una sola función compleja, tal como la impedancia Z y al admitancia Y . Esto significa que el proceso físico que tendrá lugar un sistema electrodo/electrolito solido/electrodo, al aplicarle un campo eléctrico, puede presentarse por un circuito eléctrico análogo o equivalente. [46]

La espectroscopia de impedancia proporciona una solución a este problema. Este método consiste en aplicar un voltaje sinusoidal a una frecuencia conocida la cual permite conocer o medir el ángulo de fase y la magnitud de la corriente inducida. Esta información se utiliza para calcular las partes real (Z') e imaginaria (Z'') de la impedancia ($|Z|$). Este proceso es repetido en una amplia gama de frecuencias, típicamente en mHz – MHz. [47]

La aplicación del espectro de impedancia en los cementos es relativamente un desarrollo reciente. En lugar de hacer mediciones con una sola frecuencia, las mediciones de la impedancia y el ángulo de fase pueden ser realizadas bajo diferentes frecuencias, estos datos pueden ser graficados en componentes reales (Z') o imaginarios (Z''), a estos tipos de gráficos son denominados con el nombre de la *grafica Nyquist*, después estas son analizadas en términos de sus parámetros de circuito equivalente. [48]

Estudios realizados de espectroscopia de impedancia en el cemento la función del desarrollo de la hidratación es muy importante. En la figura 2.4.10 muestra la grafica de Nyquist (parte real e imaginario de la impedancia) de un cemento portland ordinario.

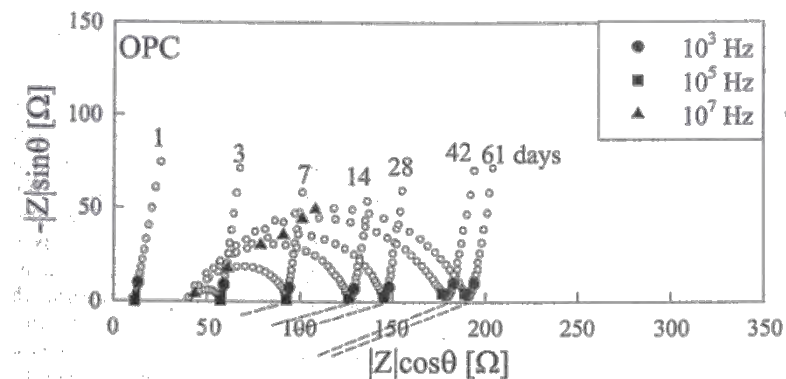


Figura 2.4. 12. Espectroscopia de impedancia de un cemento portland ordinario en función de su tiempo de hidratación.

En la figura anterior se puede observar que la frecuencia incrementa de derecha a izquierda a lo largo de la curva de impedancia. Es evidente que hay dos arcos bien diferenciados, a excepción de la que presenta una edad de hidratación muy temprana. En este estudio realizado, a partir de los espectros de impedancia similares obtenidos en este estudio, se propuso un modelo de identificación con las siguientes series R_0 -(R_1C_1)-(R_2C_2), la cual se puede ver en la figura 2.4.11.

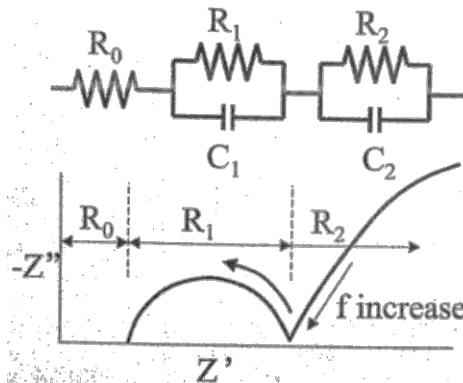


Figura 2.4. 13. Modelo de circuito equivalente para las pastas de cemento.

De acuerdo con el análisis del circuito equivalente, el arco de baja frecuencia (en relación con R_2 y C_2) representa el fenómeno de interface electrodo-cemento y el arco de alta frecuencia (en relación con R_1 y C_1) se asocia con los efectos de los granos. Varios estudios de impedancia han reportado una resistencia adicional (R_0) en la hidratación del cemento. Sin embargo, la resistencia R_0 es aún controversial. Los valores de R_0 en la pasta de cemento portland ordinario aumento de forma continua en la hidratación temprana hasta la aparición del arco con la frecuencia alta que indica que R_0 no se originó en el electrodo pero si en las fronteras de grano, pero en este estudio realizado se obtuvo el valor de R_0 sumando $R_0 + R_1$ el cual estos puntos se obtienen en la intersección de los arcos de alta y baja frecuencia con el eje de la parte real de la impedancia. Cuando el proceso de hidratación avanza, los arcos de altas frecuencias aparecen y los diámetros de estos arcos incrementan. ^[49]

Algunos de los primeros trabajos en la medición eléctrica en pastas de cemento hidratados suelen ser desde la década de 1920. La primera motivación de estos trabajos tempranos fue el usar técnicas eléctricas para determinar los tiempos de fraguado. Desde estos tiempos, numerosos artículos han sido publicados sobre la conductividad/resistividad de cementos hidratados. Dichas mediciones eran limitadas por diversas cuestiones.

- a. Las mediciones realizadas eran en una sola frecuencia o en un rango de frecuencia muy limitada, con estos datos eran interpretados en términos de conductividad iónica a través del agua en los poros y los electrodos.

- b. La frecuencia de la corriente alterna aplicado en dicho campo, eran usualmente de bajas frecuencias (100 Hz-10KHz), sobre todo para negar los problemas debido a la polarización de los electrodos.
- c. Además que el inciso (a) anterior, la respuesta macroscópica de cemento a un campo alterno eléctrico es normalmente representado por un modelo puramente resistivo, se ha prestado poca atención a la existencia de posibles fenómenos de polarización en el agregado que resulta en un componente en cuadratura de la impedancia medida.

A pesar que la banda ancha de corrientes alternas en espectroscopias de impedancia (ACIS) no es una técnica nueva, es relativamente nuevo que este método de prueba sea aplicado en la pasta de cemento duro con mediciones de impedancia en el grano son monitoreados sobre todo el rango de frecuencias de 1Hz-15MHz. Desde los inicios de la aplicación de esta técnica en las pastas de cemento, ACSI es ahora objeto de considerable atención como un método potencialmente poderoso en la caracterización de la evolución microestructural y el desarrollo de la estructura de los poros en el cemento.

Las ventajas de las mediciones de las propiedades de los materiales con este método en comparación con los otros métodos como SEM, TEM, DRX, etc., incluyen:

- Las muestras no requieren de una especial preparación antes de la prueba.
- El método no es destructivo.
- Las mediciones pueden ser realizados en los cementos hidratados.
- Relativamente la técnica antes mencionada, las mediciones de la impedancia son realizados en muestras mucho más grandes, por lo tanto los efectos pueden ser medidos en los granos.
- Las mediciones se llevan a cabo a temperaturas y presiones normales, por lo tanto, la microestructura del cemento no es dañada, lo cual es especialmente importante en la hidratación de las primeras etapas, cuando la pasta de cemento se encuentra en un relativamente débil estado plástico.
- Los modelos de circuitos equivalentes pueden ser desarrollados y sus características complejas pueden ser directamente relacionados con la estructura de su poro y el avance de su hidratación.

No todas estas técnicas se prestan directamente para la investigación de la red de poros capilares en el cemento y para los que lo hacen, la crítica puede hacerse a las técnicas de preparación de la muestra, las condiciones de prueba, y el tamaño de la muestra cuando sólo sea una pequeña parte del volumen.

En la solicitud de investigación del desarrollo microestructural en el sistema del cemento, es la respuesta de impedancia en el grano que es de interés y se realizan mediciones en el rango de 1Hz-15MHz (típicamente).

De artículos anteriores se dice que la resistencia de grano en los agregados típicos del concreto anda alrededor de 10^4 - 10^8 ohm-cm y la pasta de cemento (en estado líquido) aproximadamente de 100ohm-cm, esto puede ser concluido que el concreto puede ser considerado como no conductor por las partículas del agregado embebidos en una matriz de pasta de cemento iónico conductor.

A continuación se presentará un estudio de espectroscopia de impedancia realizado en una pasta de cemento, la cual se le fue variando su relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.6. En la figura 2.4.14 se muestra la respuesta de impedancia de la pasta de cemento.

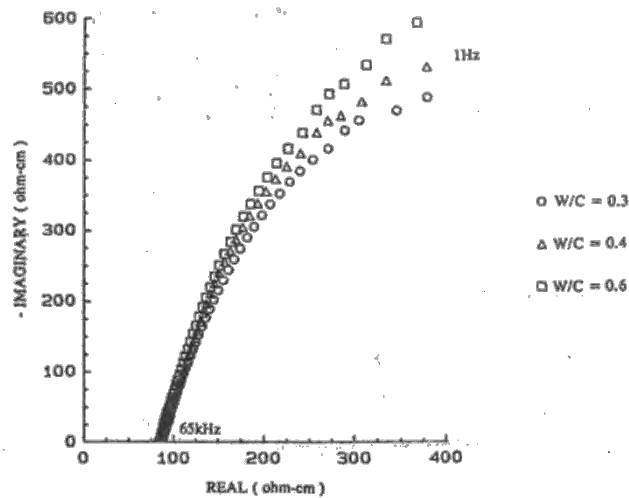
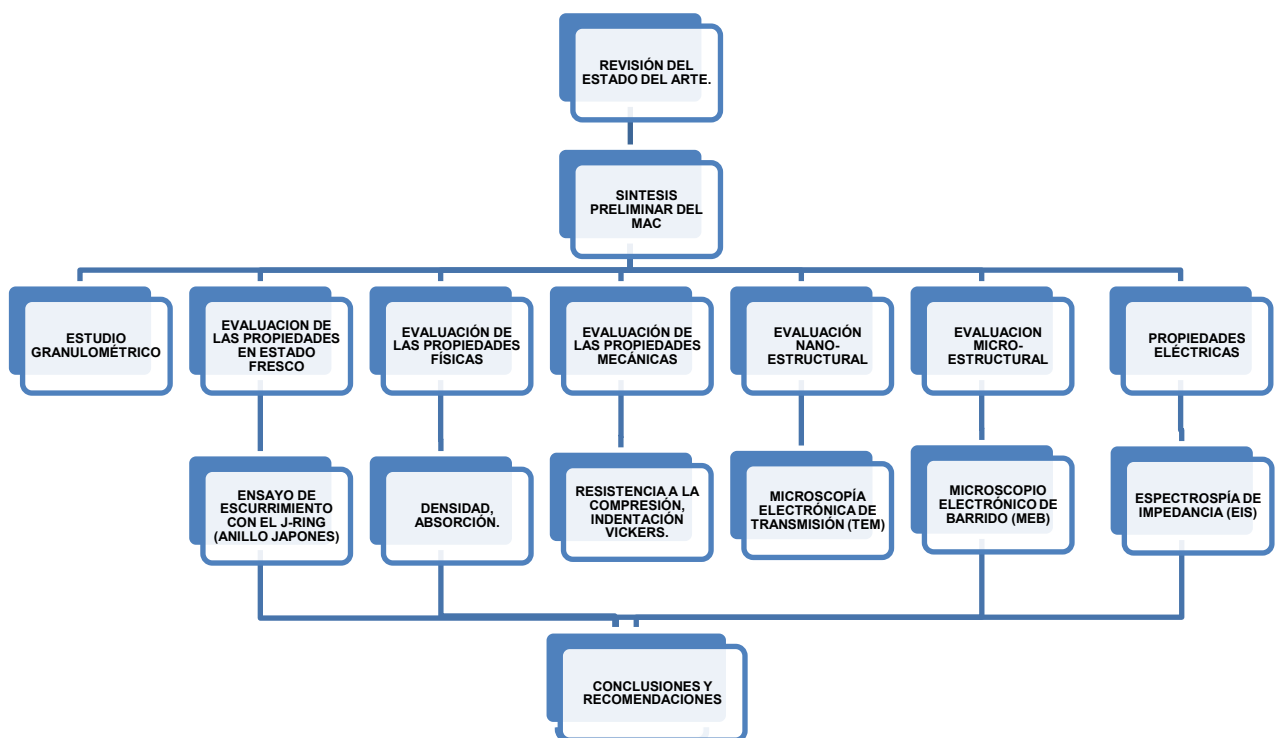


Figura 2.4. 14. Respuesta de impedancia de una pasta de cemento a un rango de 1Hz-65kHz.

La respuesta es denominado por el arco realizado por el efecto entre el electrodo/pasta de cemento. Se puede notar que todos los arcos convergen en la misma zona interceptando en el eje de la parte real aunque la relación a/c sean diferentes en el rango de 0.3-0.6. ^[50]

3. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA INNOVACIÓN DE LOS MICRO- CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES



3.1. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC

En la etapa preliminar de nuestro trabajo, buscamos un concreto con las características de autocompactabilidad y de resistencia alta que presenta el grupo de concretos autocompactables. De tal modo que, empezamos a hacer varias corridas con agregados diferentes y haciendo variaciones en la relación agua/cemento. Procuramos utilizar un solo tipo de cemento (CEMENTO PORTLAND COMPUESTO DE ROMPIMIENTO RÁPIDO DE LA MARCA HOLCIM, APASCO) y aditivo superfluidificante (PLASTOL 4000).

Nosotros designaremos a nuestro material como MAC (Morteros Autocompactables), esto es debido, a que en nuestro caso no utilizaremos agregados gruesos.

Todos los agregados que fuimos incorporando presentaban características diferentes: unos eran ecológicos (Cross de diferente granulometría), fillers minerales (carbón CC, wollastonita), materiales ferro magnéticos (óxido de hierro), arena de la región (basalto triturado), arena sílica y material de densidad baja (perlita).

3.2. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (PRIMERA ETAPA)

Se hicieron varias corridas, variando cada composición con relación al porcentaje en peso del cemento. Se elaboraron 3 cubos con dimensiones de 5x5x5 cm para cada composición y después fueron sometidos a carga de compresión axial hasta su ruptura con la máquina universal Tinius Olsen a una velocidad constante, ya que esta máquina cuenta con cuatro velocidades de carga. Cabe mencionar que, todos los especímenes elaborados en todas las etapas preliminares serán probados a compresión en la máquina universal antes mencionado. Para la elaboración de la síntesis de nuestro mortero se tuvo que seguir una metodología de elaboración, la cual se menciona a continuación.

1. Pesar cada uno de los compuestos de cada composición (materiales aglomerantes, agregados pétreos y aditivo), ver figura 3.2.1.
2. Mezclar el agua con el aditivo superfluidificante, en un tiempo aproximado de 5 minutos.
3. Adicionar el cemento al agua, con el aditivo previamente mezclado. Se debe de mezclar muy bien hasta que ya no se tengan grumos.
4. Dejar reposar la lechada por un tiempo de 5 minutos. Este reposo, es el que se requiere para que reaccione las partículas del aditivo superfluidificante con las partículas del cemento, ya que al momento de adherirse estas partículas al del cemento se forman unas pequeñas cadenas el cual

permitirá que se dispersen las partículas del cemento, y eso hará que se requiera menos cantidad de agua para disolver las partículas del cemento.

5. Agregar los otros componentes a la lechada, pero tiene que ser uno a la vez. Ver en la figura 3.2.2 los pasos 2, 3, 4 y 5.
6. Después de haber agregado todos los agregados a la mezcla, se procede a verter el concreto fresco en unos moldes cúbicos metálicos ya previamente engrasados. Ver figura 3.2.3.
7. Una vez transcurrido las 24 horas después del colado se procede a desmoldar. Ver figura 3.2.4 para los pasos 5 y 7.

A continuación se presenta una serie de imágenes del procedimiento antes mencionado.



Figura 3.2. 1. Pesado de todos los agregados.



Figura 3.2. 2. Proceso de mezclado de todos los agregados.



Figura 3.2. 3. Proceso de colocación del concreto en los moldes metálicos de 5x5x5 cm.



Figura 3.2. 4. Desmoldado de los cubos y curado de los mismos.

Después de una cierta edad, todos los cubos elaborados serán sometidos a una carga axial. Este procedimiento es el que usualmente se hace para poder conocer la resistencia a compresión de los especímenes. Para poder calcular la resistencia a compresión, basta con dividir la carga total registrada hasta la ruptura del espécimen con el área superficial del dicho espécimen. En la figura 3.2.5 se presentan una serie de imágenes en el proceso de ensaye a compresión de los cubos.



Figura 3.2. 5. Imágenes del proceso de ensaye en un cubo de 5x5x5 en la maquina Tinius Olsen.

En la tabla 3.2.1 se presentan todas las composiciones que se llevaron a cabo. Al momento de proponer la cantidad en porcentaje que se iba a tomar de cada agregado, nosotros no teníamos idea de cómo se iba a comportar nuestras mezclas. Al momento de ir realizando cada mezcla, se podía observar algunas de sus características en esta fresco, como puede ser: trabajabilidad, suficiente cantidad de agua, propiedades de autocompactabilidad, etc., y fue así como se fueron cambiando cantidades de agregados tanto como la variación de la relación agua-cemento.

Tabla 3.2. 1. Composiciones utilizadas para la elaboración de los cubos de 5x5x5cm en la primera etapa.

PRIMERA ETAPA													
COMPOSICIÓN	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13
	PORCENTAJE RESPECTO AL PESO DEL CEMENTO												
CPC 30R, HOLCIM APASCO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
OXIDO DE HIERRO	-	100	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
MARMOLINA	100	-	-	100	75	-	-	-	-	-	100	-	-
WOLLASTONITA	-	-	-	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10
ARENA SÍLICA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	-	-	-
CROSS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	20(#80)
BASALTO #40 y #60	-	-	-	-	-	-	75	-	75	-	-	-	-
R A/C	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
HIPERFLUIDIFICANTE PLASTOL 4000	15 GRAMOS POR KILOGRAMO DE CEMENTO												

Después de haber elaborado los cubos, siguiendo la metodología antes mencionado, estos fueron probados en la tabla 3.2.2 se muestra un resumen de las resistencias obtenidas hasta la ruptura de cada una de las ellas. En la imagen 3.2.6 se muestra la grafica del resumen de resistencias de cada composición. Este tipo de graficas nos sirve mucho para poder interpretar los resultados y ver el rango en el que andan las resistencias de nuestros especímenes.

Tabla 3.2. 2. Resumen de resistencias a compresión axial con la maquina Tinius Olsen.

RESUMEN DE RESULTADOS	
MUESTRAS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)
M-1	578.33
M-2	357.33
M-3	731.93
M-4	727.53

M-5	643.80
M-6	375.07
M-7	389.93
M-8	650.53
M-9	658.67
M-10	638.87
M-11	657.67
M-12	241.80
M-13	270.80

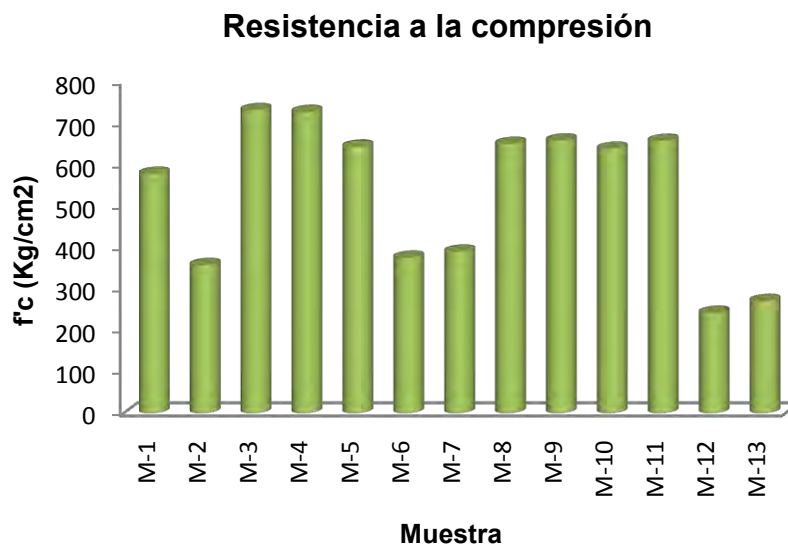


Figura 3.2. 6. Grafica de los resultados a compresión

A continuación se presentará en la tabla 3.2.3 las nomenclaturas y las composiciones de cada una de las muestras. Se podrá observar la cantidad en porcentajes de cada uno de los agregados en cada composición, estos fueron con relación al porcentaje en peso del cemento.

Tabla 3.2. 3. Nomenclatura y composición de cada una de las muestras.

NOMENCLATURA	COMPOSICIÓN
M-1	100% CPC30R, 100% MARMOLINA TIPO II, R a/c=0.35
M-2	100% CPC30R, 100% OXIDO DE HIERRO, R a/c=0.35
M-3	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, R a/c=0.35
M-4	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 100% MARMOLINA TIPO II, R a/c=0.35
M-5	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 50% MARMOLINA TIPO II, R a/c=0.35
M-6	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-7	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 75% BASALTO TRITURADO (37.5%#40 Y 37.5 #60), 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-8	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40

M-9	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 75% BASALTO TRITURADO (37.5%#40 Y 37.5 #60), 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-10	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 75% ARENA SÍLICA, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-11	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 100% MARMOLINA TIPO II, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-12	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 20% CROSS, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40
M-13	100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 20% CROSS #80, 10% WOLLASTONITA, R a/c=0.40

De esta primera etapa, de todas las composiciones antes mostradas en la tabla anterior, de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo a compresión, se realizó la selección de los compuestos con mayor resistencia a compresión, ya que en un principio no sabíamos cual iba ser el comportamiento de las 13 composiciones que teníamos.

3.2.1. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (SEGUNDA ETAPA)

En lo que corresponde a la segunda etapa, se seguirá el mismo proceso de síntesis seguida en la primera etapa. De los resultados obtenidos de las diversas composiciones, ahora se repetirán algunas composiciones, pero ahora se elaboraran seis cubos de 5x5x5 cm, esto se hace para tener menos errores y para que sea más confiable nuestros resultados. Se tomaron ahora cinco composiciones, solo los que dieron resistencias altas en la primera etapa. A continuación se presentará en la tabla 3.2.4 el resumen de las resistencias a compresión de cada una de las cinco composiciones y seguido de ello en la figura 3.2.7 se muestra la grafica para una mejor comparación de los resultados.

Tabla 3.2. 4. Resumen de resistencias a compresión.

RESUMEN DE RESULTADOS	
MUESTRAS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN KG/CM2
M-3	912.84
M-4	958.63
M-9	847.83
M-10	742.27
M-11	848.30

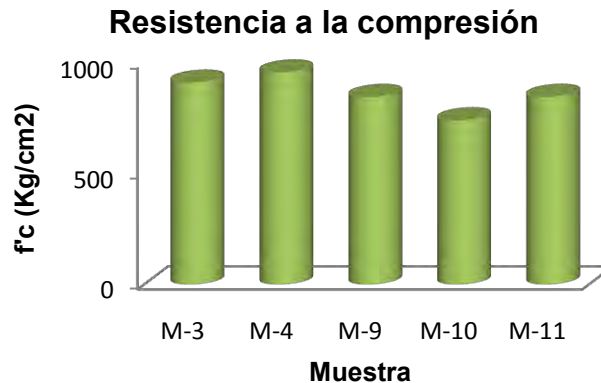


Figura 3.2. 7. Grafica de resultados a compresión.

De esta etapa, se pudo observar que la composición M-4 (100% CPC30R, 50% OXIDO DE HIERRO, 100% MARMOLINA TIPO II, R a/c=0.35), tuvo un mejor comportamiento mecánico que las demás composiciones.

3.2.2. SÍNTESIS PRELIMINAR DEL MAC (TERCERA ETAPA)

De los anteriores resultados, ahora podemos tener un poco más de noción en que rangos resistencia anda nuestro material. Pero ahora en esta etapa se procederá a eliminar algunas composiciones. De las dos etapas anteriores, solo nos quedaremos con las composiciones M-1, M-2 y M-4. Se tomaron estas composiciones porque se pudo ver que con el oxido de hierro (como filler mineral) y la marmolina (agregado grueso) se podía trabajar bien y con estos agregados podemos alcanzar resistencias altas. Pero además en esta etapa vamos a pre-clasificar grupos de morteros autocompactables, vamos a tener grupos con resistencias altas y otro con resistencias bajas. De resistencias bajas podemos tener aquellas composiciones que tengan como agregado CROSS (neumático molido), este compuesto puede tener la deficiencia de tener bajas resistencias, pero como sabemos, en nuestra actualidad no sabemos qué hacer con todas las toneladas de llantas que se tiran anualmente, **estos compuestos tendrán como un fin ecológico.**

Además, de las composiciones que contengan oxido de hierro y marmolina, se irán cambiando los porcentajes de estos agregados, esto con el fin de poder ver cuál es la cantidad máxima que podemos agregar a nuestra mezcla. A continuación se presenta en la tabla 3.2.5 las nuevas composiciones que se obtuvieron. Ahora se podrá observar que solo tendremos ocho composiciones.

Tabla 3.2. 5. Composiciones para la tercera etapa.

TERCERA ETAPA								
COMPOSICIÓN	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
	PORCENTAJE RESPECTO AL PESO DEL CEMENTO							
CPC 30R-RS, TOLTECA	100	100	100	100	100	100	100	100
OXIDO DE HIERRO	50	50	150	-	50	50	100	-
MARMOLINA	100	-	-	130	100	60	100	100
CARBÓN CC	-	-	-	-	15	10	5	-
CROSS	-	-	-	-	-	-	-	30
R A/C	0.35	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.53	0.4
HIPERFLUIDIFICANTE PLASTOL 4000	15 GRAMOS POR KILOGRAMO DE CEMENTO							

De estas composiciones se elaboraron en promedio 40 cubos de 5x5x5 cm para cada composición. En un principio se pretendía probar los cubos a 3, 14, 28 y 168 días, pero por cuestiones de tiempo y por otros factores no se logró obtener la resistencia a estas edades, pero se trató de tener unas pequeñas diferencias en días. A continuación se presentan serie de tablas de las resistencias a compresión obtenidas a distintas edades.

Tabla 3.2. 6. Resistencia a compresión de la composición M-1.

M-1	
EDAD (DÍAS)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (KG/CM2)
3	449.40
10	428.93
14	473.06
28	561.44
162	609.22

Tabla 3.2. 7. Resistencia a compresión de la composición M-2

M-2	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
3	330.62
14	453.17
28	549.47
140	598.40

Tabla 3.2. 8. Resistencia a compresión de la composición M-3

M-3	
EDAD(Días)	ESFUERZO (KG/CM2)
28	364.35

Tabla 3.2. 9. Resistencia a compresión de la composición M-4

M-4	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
14	480.42
28	515.55
162	616.30

Tabla 3.2. 10. Resistencia a compresión de la composición M-5

M-5	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
7	453.78
14	519.18
28	464.10

Tabla 3.2. 12. Resistencia a compresión de la composición M-7

M-7	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
40	399.98

Tabla 3.2. 11. Resistencia a compresión de la composición M-6

M-6	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
48	489.51

Tabla 3.2. 13. Resistencia a compresión de la composición M-8

M-8	
EDAD (DÍAS)	ESFUERZO (KG/CM2)
53	162.93

En la figura 3.2.8 se muestra una grafica donde se puede ver la diferencia de las resistencias a compresión de cada una de las composiciones, y aquí nos podemos dar cuenta de varias cosas: la primera, no podemos utilizar más del 50 por ciento de la cantidad de oxido porque se tendría que incrementar la relación agua-cemento y reduciría la resistencia. Segunda, no podemos utilizar más del 100 por ciento de marmolina porque, al igual que con el oxido, se tiene que incrementar la relación agua-cemento.

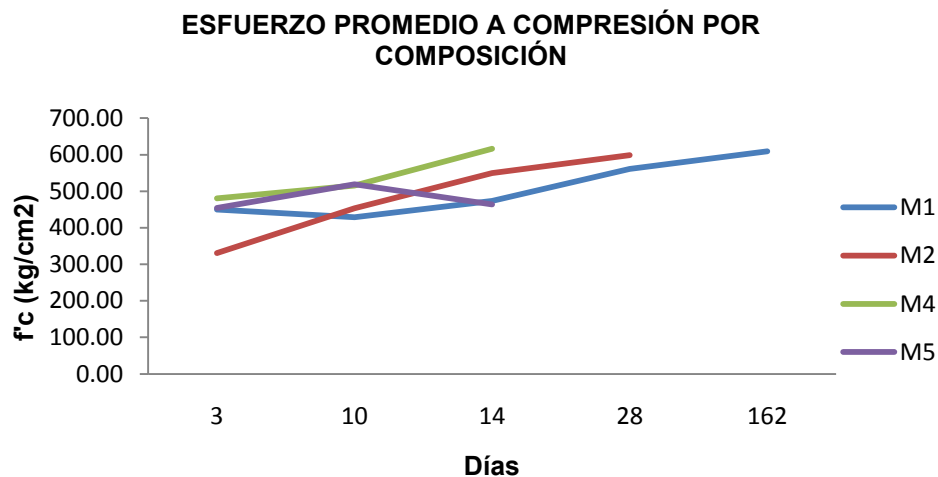


Figura 3.2. 8. Grafica comparativa de resistencias a compresión a diferentes edades.

A continuación se presenta en la tabla 3.2.14 la resistencia máxima que se obtuvieron en cada una de las composiciones y en su correspondiente edad. En la figura 3.2.8 se muestra la grafica de las resistencias máximas y su correspondiente edad de cada composición.

Tabla 3.2. 14. Tabla de resistencias máximas en cada composición.

COMPOSICIÓN	EDAD (DÍAS)	ESFUERZO MÁXIMO (KG/CM2)
M1	162 (M-1)	609.22
M2	140 (M-2)	598.40
M3	28 (M-3)	364.35
M4	162 (M-4)	616.30
M5	14 (M-5)	519.18
M6	48 (M-6)	489.51
M7	40 (M-7)	399.98
M8	53 (M-8)	162.93

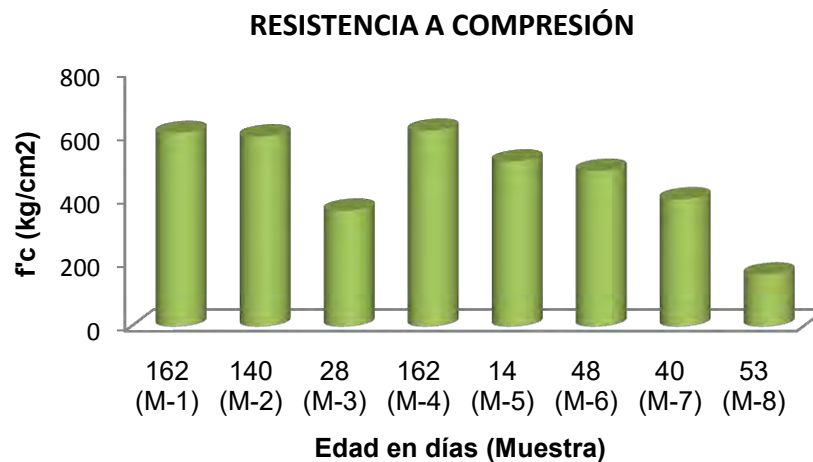


Figura 3.2. 9. Grafica de resistencia máxima a compresión en cada composición.

En esta etapa preliminar, podemos concluir con unas composiciones finales para nuestro mortero compactable con las siguientes observaciones:

- Se utilizarán en las composiciones finales un 50 por ciento máximo de óxido de hierro en relación al peso del cemento.
- Se tendrá un 0.50 de relación agua/cemento como máximo.
- Se tendrán tres grupos de morteros autocompactables: Densidad alta, media y baja.

4. DISEÑO DE MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

4.1. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO

En el caso de la etapa preliminar, para nuestro mortero utilizamos solamente un tipo de agregado pétreo que es la marmolina tipo II. Pero, para que podamos cumplir con la granulometría adecuada para un mortero, se debe de tener una granulometría apegada a la norma ASTM C33-03 STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGGREGATES. Para ello utilizamos diferentes tipos de agregados con diferentes tamaños.

Se empezó a buscar el porcentaje necesario para cada tipo de grano. En nuestro caso se utilizaron: Marmolina tipo I, II, especial, grano 1 y grano 2. Pero antes de empezar a buscar el porcentaje adecuado para cada tipo de agregado, se tuvo que graficar la granulometría de cada uno. A continuación, en las siguientes tablas y figuras se muestran las granulometrías de cada agregado.

Tabla 4.1. 1. Granulometría de la marmolina tipo I

MARMOLINA TIPO I					
ABERTURA EN MM	N° MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULADO	% PASA
0.56	30	93.25	7.81	7.81	92.19
0.15	100	997.54	83.56	91.37	8.63
0.075	200	50.02	4.19	95.56	4.44
	CHAROLA	53.03	4.44	100.00	0.00
		1193.84	100		

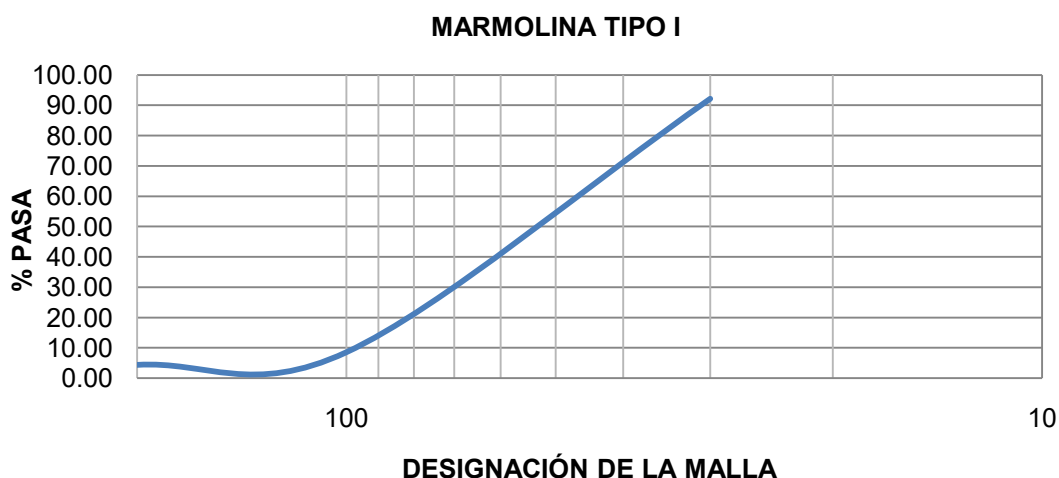


Figura 4.1. 1. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo I

Tabla 4.1. 2. Granulometría de la marmolina tipo II

MARMOLINA TIPO II					
ABERTURA EN MM	Nº MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% PASA
1.18	16	0	0.00	0.00	100.00
0.56	30	360.28	30.10	30.10	69.90
0.15	100	811.09	67.75	97.85	2.15
0.075	200	18.11	1.51	99.36	0.64
	CHAROLA	7.66	0.64	100.00	0.00
		1197.14	100.00		

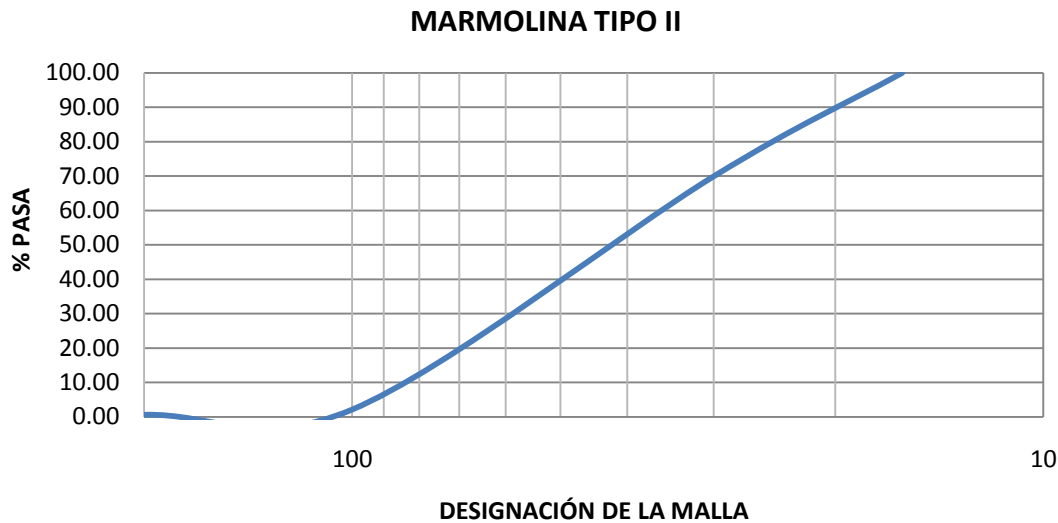


Figura 4.1. 2. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo II

Tabla 4.1. 3. Granulometría de la marmolina tipo especial

ESPECIAL					
ABERTURA EN MM	Nº MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% PASA
2	10	2.94	0.25	0.25	99.75
1.18	16	1011.86	84.35	84.59	15.41
0.56	30	181.61	15.14	99.73	0.27
0.15	100	1.97	0.16	99.90	0.10
0.075	200	0.12	0.01	99.91	0.09
	CHAROLA	1.1	0.09	100.00	0.00
		1199.6	100		

MARMOLINA TIPO ESPECIAL

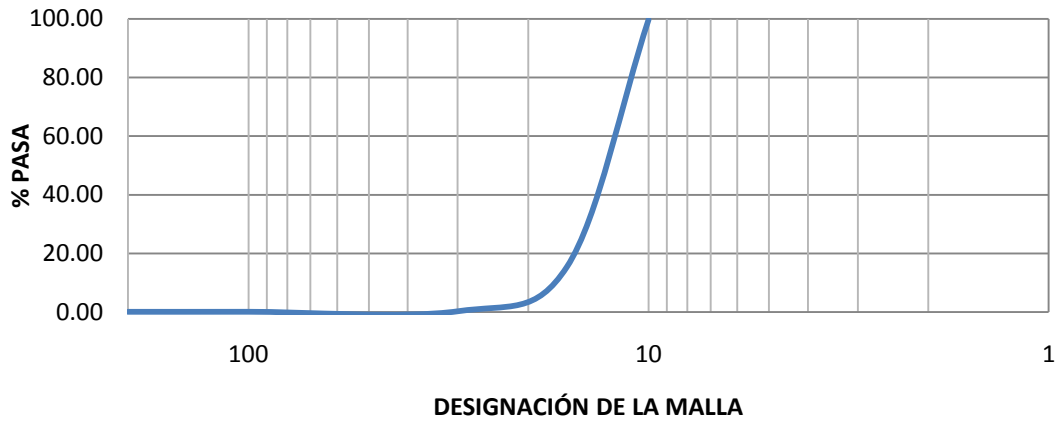


Figura 4.1. 3. Grafica de la granulometría de la marmolina tipo especial.

Tabla 4.1. 4. Granulometría de la marmolina del tipo Grano 1

GRANO I					
ABERTURA EN MM	Nº MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% PASA
2.36	8	4.23	0.35	0.35	99.65
2	10	801.27	66.81	67.17	32.83
1.18	16	388.95	32.43	99.60	0.40
0.56	30	1.28	0.11	99.70	0.30
0.15	100	0.28	0.02	99.73	0.27
0.075	200	0.10	0.01	99.74	0.26
	CHAROLA	3.17	0.26	100.00	0.00
		1199.28	100.00		

GRANO I



Figura 4.1. 4. Grafica de la granulometría de la marmolina del tipo Grano 1

Tabla 4.1. 5. Granulometría de la marmolina del tipo Grano 2

GRANO II					
ABERTURA EN MM	N° MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% PASA
4.75	4	0	0.00	0.00	100.00
2.36	8	708.71	59.09	59.09	40.91
2.0	10	477.40	39.81	98.90	1.10
1.18	16	9.44	0.79	99.68	0.32
0.56	30	0.45	0.04	99.72	0.28
0.15	100	0.35	0.03	99.75	0.25
0.075	200	0.11	0.01	99.76	0.24
	CHAROLA	2.88	0.24	100.00	0.00
		1199.34	100.00		

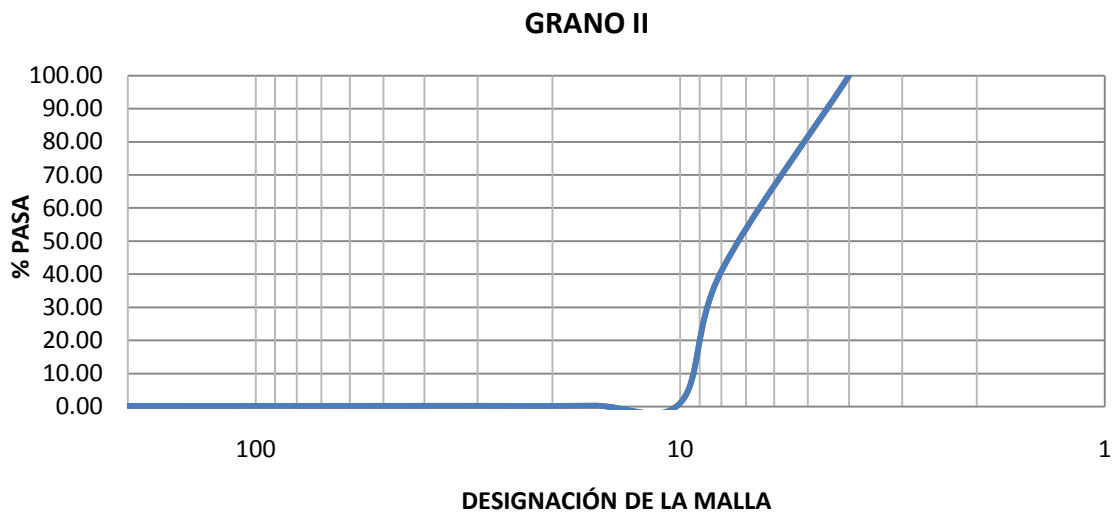


Figura 4.1. 5. Grafica de la granulometría de la marmolina del tipo Grano 2.

Para poder cumplir con la granulometría según la norma antes mencionada, se empezó a proponer diferentes porcentajes de cada uno de los agregados. Después hacer varias proporciones, se optó por la proporción que quedara dentro del rango que maneja la norma. De esta manera se optó por la siguiente proporción:

MARMOLINA TIPO I 15%
MARMOLINA TIPO II 35%
MARMOLINA TIPO ESPECIAL 16.6%
MARMOLINA GRANO 1 16.6%
MARMOLINA GRANO 2 16.6%

En la tabla 4.1.6. Se muestra la granulometría para nuestro mortero autocompactable, siguiendo los porcentajes antes descritos para cada agregado.

Tabla 4.1. 6. Granulometría para el mortero autocompactable

ABERTURA EN MM	N° MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% PASA
4.75	4	0	0.00	0	100.00
2.36	8	149	12.52	12.52	87.48
2.0	10	148.53	12.48	25.00	75.00
1.18	16	252.12	21.18	46.19	53.81
0.85	20	35.54	2.99	49.17	50.83
0.56	30	153.07	12.86	62.03	37.97
0.425	40	251.23	21.11	83.14	16.86
0.297	50	102.75	8.63	91.78	8.22
0.15	100	72.14	6.06	97.84	2.16
0.075	200	0.48	0.04	97.88	2.12
	CHAROLA	25.23	2.12	100.00	0.00
	TOTAL	1190.09	100.00		

A continuación se presenta en la figura 4.1.6 la grafica de la granulometría mostrada en la tabla anterior. Aquí se puede ver claramente como con este proporcionamiento quedamos dentro de los límites granulométricos que marca la norma ASTM C33-03.

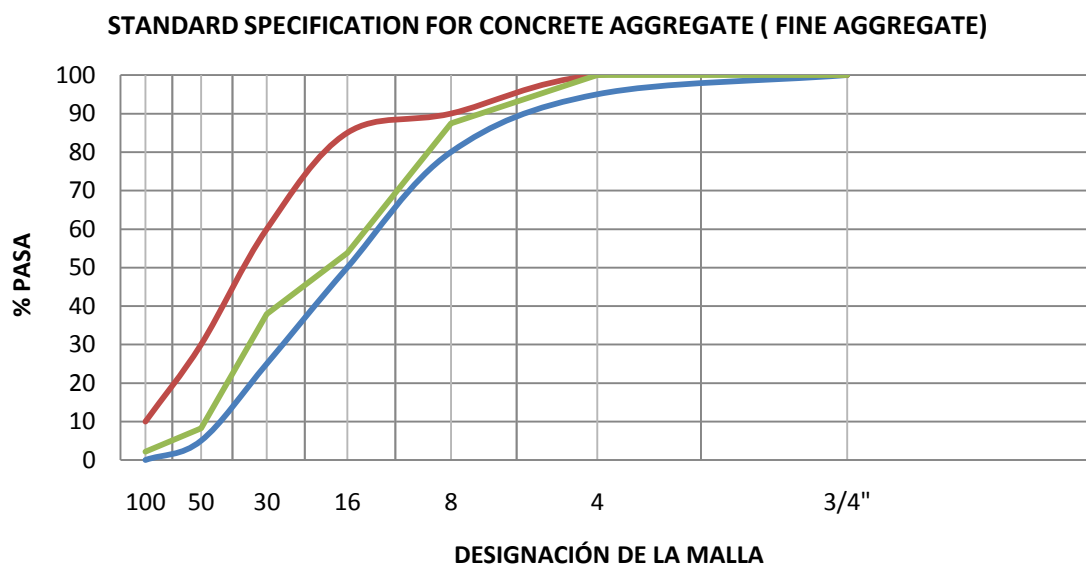


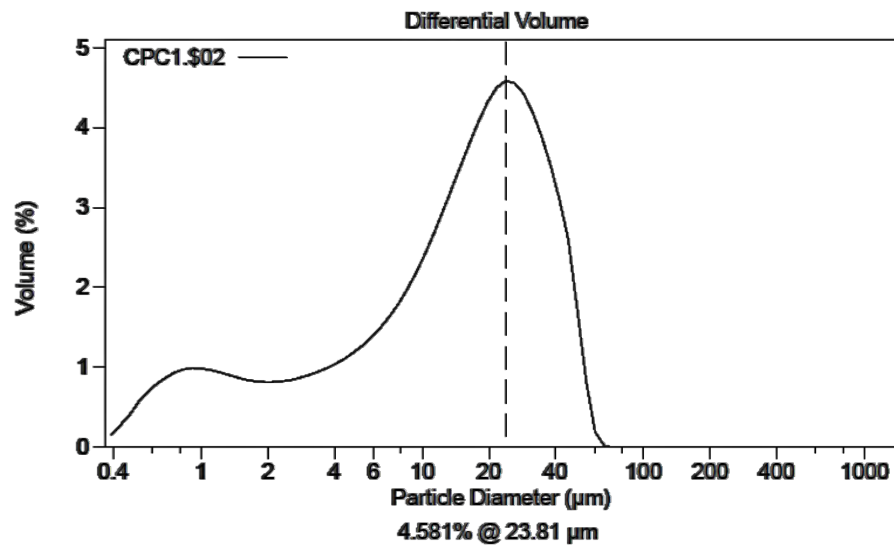
Figura 4.1. 6. Grafica de la granulometría final junto con la granulometría especificada por la norma ASTM C33-03.

Para analizar el tamaño de partícula del cemento, carbón y del oxido de hierro, se utilizo el analizador de partículas láser COULTER modelo LS100Q, el cual puede hacer la medición hasta un tamaño máximo de partícula de 1mm. En la figura 4.1.7 se muestran unas imágenes del equipo utilizado.



Figura 4.1. 7. Analizador de partículas láser COULTER modelo LS100Q

Las muestras a estudiar deben estar completamente secas, si en algún momento se introdujera algún material que presentara una cierta humedad, esto podría formar pequeñas aglomeraciones de partículas. Esto no es conveniente porque se estaría tomando tamaños de partícula erróneas. A continuación, se presentaran varias figuras con la distribución del tamaño de partícula y la cuantificación misma de estas. En la figura 4.1.8 se presentará la distribución del tamaño de partículas del CPC30R-RS de la marca comercial TOLTECA.



Volume Statistics (Geometric)		CPC1.502				
Calculations from 0.375 µm to 948.3 µm						
Volume:	100%	S.D.:	3.383			
Mean:	10.87 µm	Variance:	11.45			
Median:	15.79 µm	Skewness:	-0.962 Left skewed			
Mean/Median Ratio:	0.689	Kurtosis:	-0.055 Platykurtic			
Mode:	23.81 µm					
% >	10	25	50	75	90	
µm	38.23	27.13	15.79	5.829	1.333	

Figura 4.1. 8. Distribución del tamaño de partícula del CPC30R-RS.

De la figura anterior y del análisis estadístico realizado en el software del analizador de partículas, se tiene que, para el cemento se tuvo una media de tamaño de partícula de $10.87\mu\text{m}$ (0.01mm), pero con una moda de $23.81\mu\text{m}$ (0.02mm).

De la misma manera que del cemento, se analizó los tamaños de partícula del óxido de hierro. En la figura 4.1.9 se muestra la distribución del tamaño de partículas y su análisis estadístico.

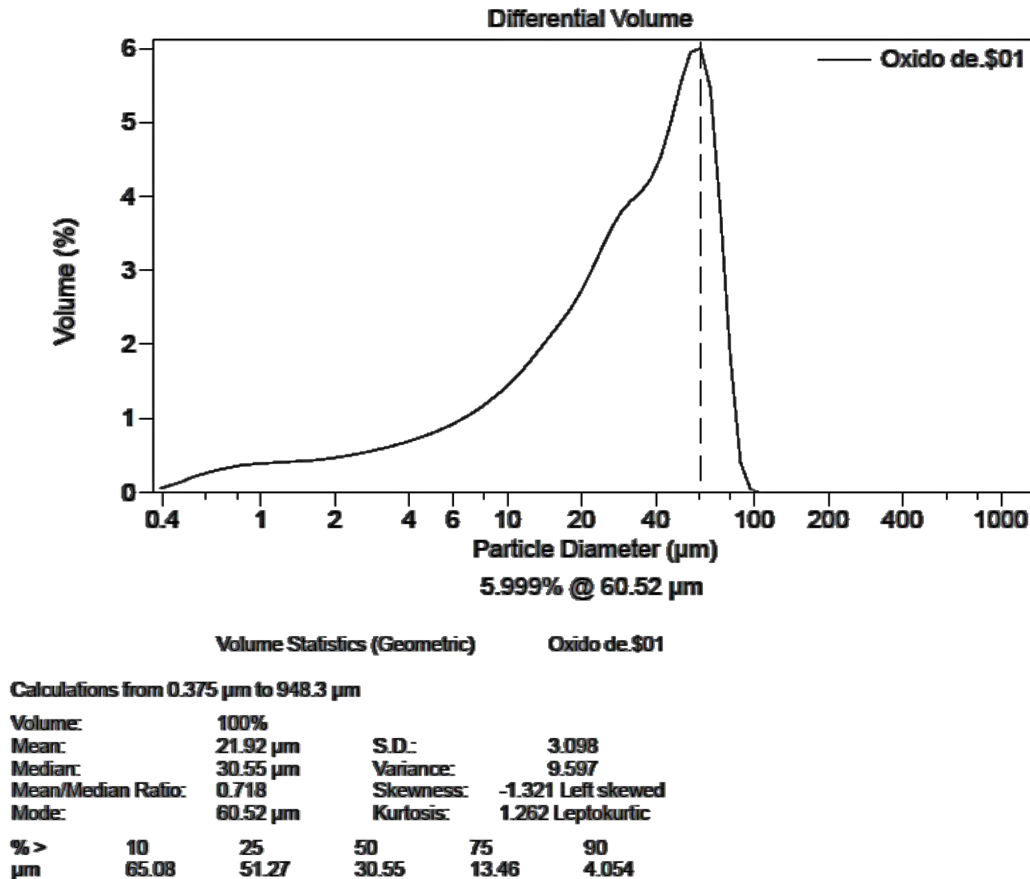
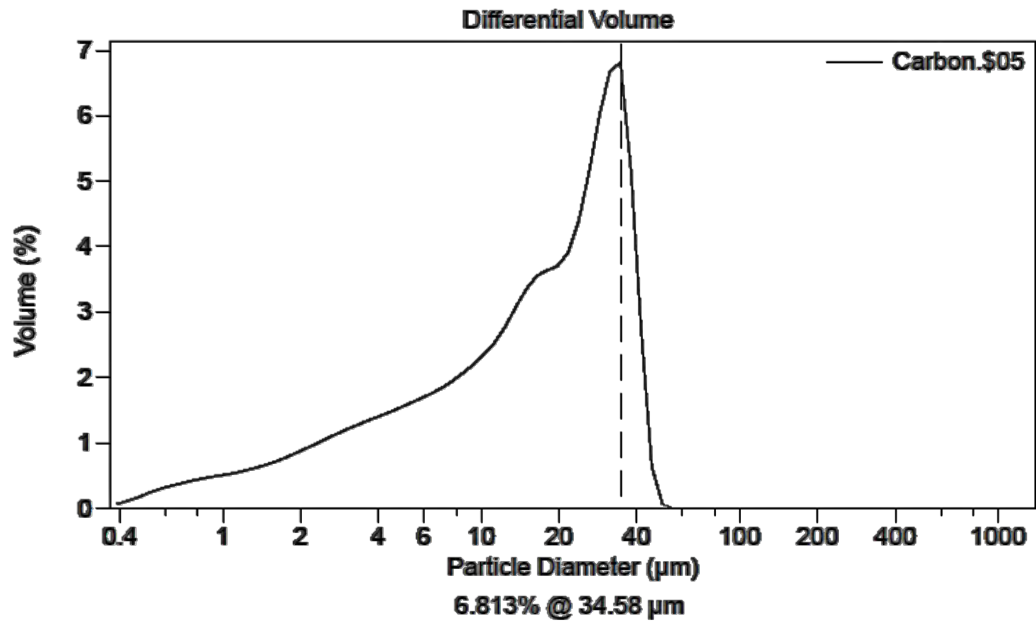


Figura 4.1. 9. Distribución de tamaño de partícula del óxido de hierro.

En lo que corresponde al óxido de hierro, se tiene del análisis estadístico, una media de tamaño de partícula de $21.92\mu\text{m}$ (0.02mm) pero con una moda de $60.52\mu\text{m}$ (0.06mm).

A continuación se presentará en la figura 4.1.10 la distribución del tamaño de partícula del Carbón junto con su análisis estadístico.



Volume Statistics (Geometric)		Carbon.\$05			
Calculations from 0.375 µm to 948.3 µm					
Volume:	100%	S.D.:	2.883		
Mean:	12.21 µm	Variance:	8.315		
Median:	16.67 µm	Skewness:	-1.018 Left skewed		
Mean/Median Ratio:	0.732	Kurtosis:	0.263 Leptokurtic		
Mode:	34.58 µm				
% >	10	25	50	75	90
µm	35.55	28.75	16.67	6.584	2.421

Figura 4.1. 10. Distribución del tamaño de partícula del Carbón.

En el caso del carbón se tiene una media de tamaño de partícula de 12.21µm (0.01mm), con una moda de 34.58µm (0.03mm).

4.2. DISEÑO FINAL DEL MORTERO AUTOCOMPACTABLE CON GRANULOMETRÍA SELECCIONADA

Como se pudo observar en las etapas preliminares para el diseño del mortero autocompactable, solo se utilizó como agregado pétreo la marmolina clase II. Ahora en este caso, como etapa final, se utilizará la granulometría seleccionada.

En la tabla 4.2.1 se presentan las composiciones finales, pero ahora utilizando como agregado el proporcionamiento mostrado anteriormente.

Tabla 4.2. 1. Composición final con granulometría seleccionada.

DOSIFICACIÓN FINAL DEL MAC CON AGREGADO DE GRANULOMETRÍA SELECCIONADA								
COMPOSICIÓN	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
	PORCENTAJE RESPECTO AL PESO DE CEMENTO							
CPC 30R-RS, TOLTECA	100	100	100	100	100	100	100	100
AGREGADO ASTM	100	100	100	100	100	100	-	
OXIDO DE HIERRO	-	50	50	-	-	-	-	
CARBÓN CC	-	-	10	15	-	-	-	
CROSS	-	-	-	-	10	20	-	10
PERLITA	-	-	-	-	-	-	30	30
R A/C	0.29	0.35	0.4	0.35	0.3	0.35	0.45	0.5
HIPERFLUIDIFICANTE PLASTOL 4000	15 RAMOS POR KILOGRAMO DE CEMENTO							

De estas composiciones se elaboraron:

- 3 cilindros para medir módulos de elasticidad y módulos de Poisson.
- 2 cubos de 10x10x10 cm para medir resistencias a compresión.
- 4 cubos de 5x5x5 cm para medir densidades y porcentajes de absorción.
- 3 cajas de petri para estudios de micro-estructuras.
- 3 bandas para medir propiedades eléctricas.

Para la elaboración de cada una de estos especímenes, se tuvo que seguir la misma metodología seguida en la etapa preliminar, pero ahora será en volúmenes mayores.

A continuación se presenta la siguiente secuencia de proceso de elaboración:

1. Engrasado de los moldes a utilizar, en este caso serían los moldes para los cilindros de 15x30 cm, para los cubos de 10x10x10cm y de 5x5x5 cm. Ver figura 4.2.1.

2. Pesar todos los agregados a utilizar. En nuestro caso se utilizó una balanza digital con un rango de 0 a 30 kilogramos. Cabe mencionar que hay que tener bien nivelado la balanza y tararlo (poner en ceros) cada vez que se pese un agregado diferente. Ver figura 4.2.2
3. Mezclar primeramente el aditivo con el agua en un tiempo aproximado de 5 minutos, después agregar el cemento. Hay que mezclar muy bien el cemento con el agua, ya previamente mezclado con el aditivo, hasta que no se noten grumos. Después de terminar el mezclado del cemento con el agua, se debe dejar reposar en un tiempo de 5 minutos. Este reposo es para que actúe el aditivo con las partículas de cemento. Una vez transcurrido los 5 minutos, ahora se prosigue a adicionar los otros componentes, esto es dependiendo de qué composición se trate. Ver figura 4.2.3.
4. Hacer la prueba de extensibilidad mediante el ensayo de J-Ring (anillo japonés). Ver figura 4.2.4.
5. Colocar el concreto fresco en los moldes, después de colarlos se deben de golpear con un martillo con cabeza de hule para eliminar el aire contenido en burbujas. Una vez hecho lo anterior, se debe de cubrir los moldes con bolsas de plástico esto para evitar la pérdida de humedad rápida del concreto. Ver figura 4.2.5.
6. Después de 24 horas se tendrán que desmoldar los especímenes para su curado en las tinas con agua. Ver figura 4.2.6.



Figura 4.2. 1. Engrasado de los moldes a utilizar



Figura 4.2. 2. Pesado de los agregados a utilizar, dependiendo del tipo de composición



Figura 4.2. 3. Proceso de mezclado de cada agregado



Figura 4.2. 4. Proceso de ensayo de extensibilidad con el J-Ring



Figura 4.2. 5. Proceso de colado del concreto a los moldes.



Figura 4.2. 6. Desmoldado y curado de los especímenes.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS MICRO-CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES

5.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

En este apartado, se realizó la medición de la extensibilidad del mortero autocompactable. Este se ejecutó mediante el ensayo del J-Ring (anillo japonés). El cual este constaba de 16 barras, las cuales estas funcionan como el armado de algún elemento estructural en donde será colocado el concreto. En el caso de la placa tenía las siguientes dimensiones: 90x90x1.3 cm.

Este ensayo viene como sustitución al ensayo de revenimiento con el cono de Abrams para concretos convencionales. Solo que ahora, el concreto no tiene que ser compactado, este debe de colocarse sin ningún tipo de vibrado. A continuación, se presenta un procedimiento para la realización de este tipo de ensayo.

1. Colocar en un espacio libre y bien nivelado la placa metálica en donde será montado el anillo japonés. Además, se tiene que humedecer la superficie de la placa con un trapo o esponja. Esto se hace para que el concreto no pierda humedad y pueda fluir con mayor libertad. Ver figura 5.1.1.
2. Colocar en la zona central de la placa el anillo japonés y poner el cono de Abrams en la parte central del anillo japonés. Ver figura 5.1.2.
3. Hacer el llenado del cono de Abrams con el concreto. Hay que tener cuidado a la hora del vaciado y, además, tener bien presionado el cono para que no haya filtraciones del concreto en la parte inferior del cono. Ver figura 5.1.3.
4. Después de hacer el llenado, con una varilla punta de bala lisa hay que enrasar el concreto. Ver figura 5.1.4.
5. Levantar lentamente en un tiempo de 5 segundos el cono de Abrams. Ver figura 5.1.5.
6. Medir con un flexómetro el diámetro de la extensibilidad, se deberá de tomar dos mediciones y estas deben ser cruzadas. Ver figura 5.1.6.



Figura 5.1. 1. Colocación de la placa metálica y su nivelado.



Figura 5.1. 2. Colocación del anillo japonés y del cono de Abrams en la parte central de la placa.



Figura 5.1. 3. Llenado del cono de Abrams.



Figura 5.1. 4. Enrasado del concreto con la varilla punta de bala liso.



Figura 5.1. 5. Vaciado del cono de Abrams.



Figura 5.1. 6. Medición de la extensibilidad.

Después de esta secuencia dada, en la tabla 5.1.1 se muestran los diámetros de extensibilidad registrados para cada composición. En el caso de la composición M-7 y M-8 no se les pudo medir la extensibilidad, ya que estos no presentaban propiedades de autocompactabilidad, entonces se prosiguió a medir su revenimiento como un concreto convencional.

Tabla 5.1. 1. Diámetros de extensibilidad y clasificación obtenida por el ensayo J-Ring (anillo japonés)

COMPOSICIÓN	EXTENSIBILIDAD						CLASIFICACIÓN
	D T50 (seg)	DJF1 (cm)	DJF2 (cm)	DF (cm)	PROMEDIO (cm)	DIFERENCIA (cm)	
M-1	7	80	85	85	82.5	2.5	ACEPTABLE
M-2	10	75	77	80	76.0	4.0	ACEPTABLE
M-3	16	68	71	73	69.5	3.5	ACEPTABLE
M-4	14	74	74	76	74.0	2.0	ÓPTIMO
M-5	24	71	72	74	71.5	2.5	ÓPTIMO
M-6	30	66	66	69	66.0	3.0	ACEPTABLE
M-7	R*	6	2	4.0		cm	
M-8	R*	2	2	2.0		cm	

* Revenimiento medido con el cono de Abrams.

De acuerdo a los resultados obtenidos, nuestros morteros autocompactables pueden ser clasificados de la siguiente manera en la tabla 5.1.2. Estas clasificaciones serán en base a los resultados mediante el ensayo de extensibilidad y J-Ring (anillo japonés).

Tabla 5.1. 2. Clasificación del mortero autocompactable

COMPOSICIÓN	CLASIFICACIÓN				
	SLUMP-FLOW				J-RING
	dF	dT50	TIPO	VSI*	
M-1	3	C	3-C	0	ACEPTABLE
M-2	3	C	3-C	0	ACEPTABLE
M-3	3	C	3-C	0	ACEPTABLE

M-4	3	C	3-C	0	ÓPTIMO
M-5	3	C	3-C	0	ÓPTIMO
M-6	3	C	3-C	0	ACEPTABLE
M-7					
M-8					

*ÍNDICE VISUAL DE ESTABILIDAD (Visual Stability Index)

Por lo que concluimos esta parte clasificando nuestro material como **Morteros autocompactables de alta fluidez y viscosidad plástica moderada, completamente estables, para las primeras seis composiciones. Para el caso de las composiciones M-7 y M-8 no podrían ser considerados morteros autocompactables.**

5.2. DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Para poder medir las densidades y el porcentaje de absorción que se tuviera en cada una de las dosificaciones, se tuvieron que elaborar cubos de dimensiones 5x5x5cm. Se elaboraron 4 cubos con las dimensiones antes mencionadas para cada dosificación, dando así un total de 32 cubos.

Para poder tener menor margen de error, se tuvieron que colar estos cubos el mismo día en el que se elaboraron los cilindros y las pastillas. Estos cubos se dejaron en una tina con agua para su curado y saturación. Todas las muestras se dejaron saturando alrededor de 120 días.

Para poder medir la densidad del concreto se tuvo que hacer la prueba con un picnómetro de 10 cm de diámetro y 30 cm de alto, la cual se siguió la siguiente secuencia.

1. Sacar de la pila o tina de curado los cubos y secarlos superficialmente. Ver figura 5.2.1.
2. Pesar los cubos en una balanza. Para nuestro caso fue pesado en una balanza electrónica con aproximación al décimo de gramo. Este peso registrado, se le denomina el peso húmedo. Este dato nos servirá para poder calcular el porcentaje de absorción, y colocar una probeta graduada a la salida del sifón. Ver figura 5.2.2.
3. Llenar con agua el picnómetro hasta la altura del orificio del sifón.
4. Introducir dentro del picnómetro con agua el espécimen. Hay que tener cuidado al introducir el espécimen, se recomienda introducirlo lentamente. Ver figura 5.2.3.
5. Registrar la cantidad de volumen desalojado y después llevarlo al horno para su secado. Conocer el peso seco de la muestra es un

complemento para poder conocer el porcentaje de absorción de la muestra. Ver figura 5.2.4.



Figura 5.2. 1. Retiro de las muestras de la tina de curado y su secado superficial.



Figura 5.2. 2. Pesado de la muestra saturada, secado superficialmente, y la colocación de la probeta graduada a la salida del sifón del picnómetro



Figura 5.2. 3. Colocación de la muestra en el picnómetro.



Figura 5.2. 4. Registro de la cantidad de agua desalojada y la colocación de las muestras al horno para su secado.

Después de haber terminado con todo el proceso anterior, se programo el horno para el secado de las muestras a 50°C durante tres días. Normalmente se debe de dejar las muestras en el horno a una temperatura de $100 \pm 5^\circ$ C, en

nuestro caso no fue posible porque habíamos usado Cross en algunas de nuestras composiciones. Después de haber transcurrido ese tiempo, no se debe de abrir el horno rápidamente, si no que hay que esperar a que baje la temperatura por lo menos a 30°C. Esto se hace para evitar algún choque térmico en las muestras.

Una vez retirado las muestras, estas serán pesadas nuevamente con la misma balanza, para poder conocer su peso seco y así poder obtener el porcentaje de absorción de cada una de las muestras.

A continuación se presenta en la tabla 5.2.1 y figura 5.2.6 los valores de densidad (kg/m³); y en la tabla 5.2.2 y figura 5.2.7 los valores del porcentaje de absorción de cada una de las muestras.

Tabla 5.2. 1. Resumen de densidades de las diferentes composiciones.

RESUMEN DE DENSIDADES		
MUESTRA	DENSIDAD(Kg/m ³)	CATEGORÍA
M-1	2365	NORMAL
M-2	2436	NORMAL
M-3	2261	NORMAL
M-4	2120	NORMAL
M-5	2196	NORMAL
M-6	1909	LIGERO
M-7	1189	LIGERO
M-8	1243	LIGERO

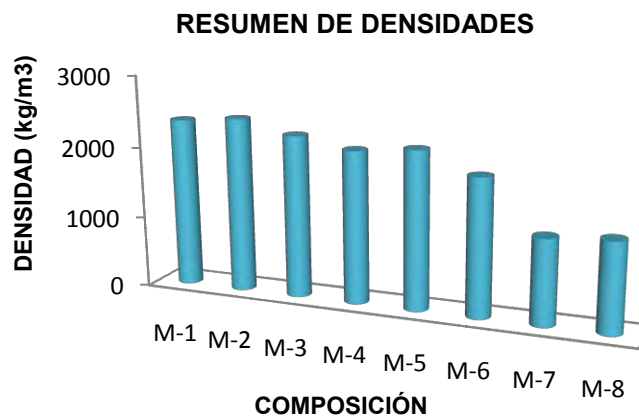


Figura 5.2. 5. Grafica de las densidades de cada composición.

Tabla 5.2. 2. Resumen de los porcentajes de absorción de las diferentes composiciones.

ABSORCIÓN		
MUESTRA	ABS %	TIPO DE ABSORCIÓN
M-1	1.41	BAJA
M-2	1.71	BAJA
M-3	3.69	MEDIANA
M-4	2.62	MEDIANA
M-5	1.75	BAJA
M-6	3.20	MEDIANA
M-7	8.06	ALTA
M-8	11.36	ALTA

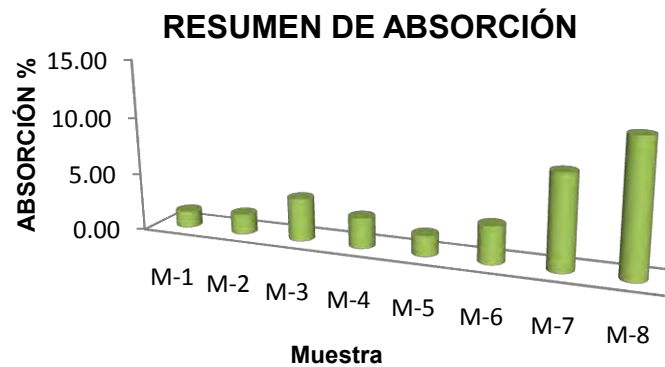


Figura 5.2. 6. Grafica de los porcentajes de absorción de cada composición.

De los datos mostrados en las tablas y figuras anteriores, se puede observar que mientras más denso sea el material menos absorción va presentar. Como es el caso de cinco composiciones (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5,) donde presentan una densidad normal y una absorción de baja a mediana. En el caso de las últimas tres composiciones (M-6, M-7, M-8), presentan una densidad baja y por consecuencia un porcentaje de absorción alta (menos el de M-6, absorción mediana).

5.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para conocer la resistencia a la compresión de los morteros autocompactables, se sometió a carga axial los cubos de 10x10x10cm con un equipo de la marca ALCON especial para hacer pruebas a compresión de cubos y cilindros de concreto. La cual se muestra en la figura 5.3.1.



Figura 5.3. 1. Máquina para ensaye a compresión.

En este ensayo, se tuvo que seguir la norma de la ASTM para poder realizar la prueba. A continuación se presentará una serie de tablas y figuras de las muestras antes y después de ser ensayadas.

Tabla 5.3. 1. Dosificación del MAC M-1 (estándar)

COMPOSICIÓN	M-1	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	1147.54
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	1147.54
OXIDO DE HIERRO	-	
CARBÓN CC	-	
CROSS	-	
PERLITA	-	
R A/C	0.29	329.5304
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	17.2131
Edad (días)	226	

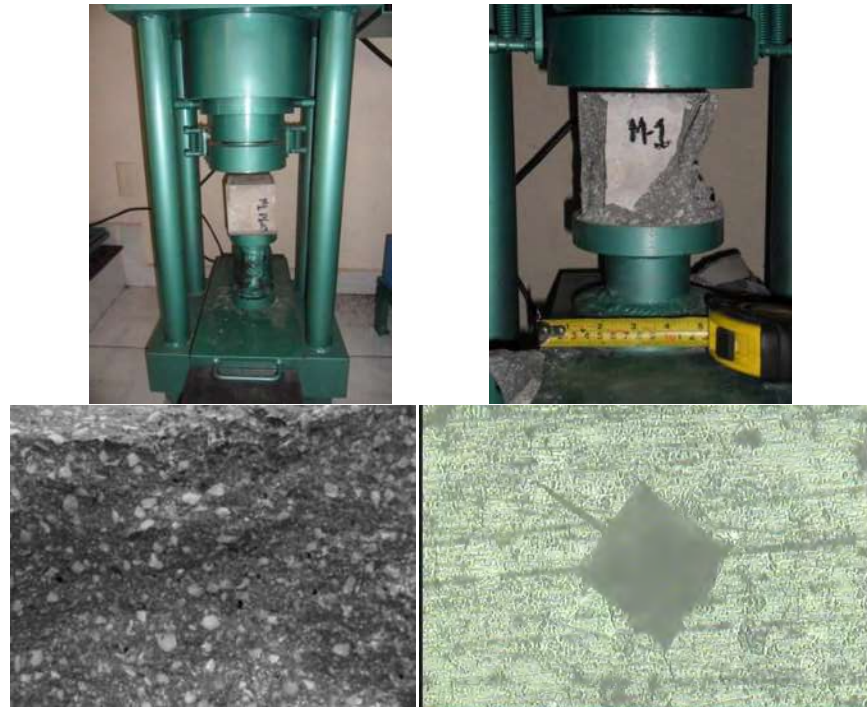


Figura 5.3. 2. Imágenes de la muestra M-1 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 2. Dosificación del MAC M-2

COMPOSICIÓN	M-2	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	825.791
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	825.791
OXIDO DE HIERRO	50% (w/w)	412.896
CARBÓN CC	-	
CROSS	-	
PERLITA	-	
R A/C	0.35	289.027
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	12.387
EDAD (DÍAS)	225	



Figura 5.3. 3. Imágenes de la muestra M-2 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 3. Dosificación del MAC M-3

COMPOSICIÓN	M-3	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	794.839
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	794.839
OXIDO DE HIERRO	50% (w/w)	397.419
CARBÓN CC	10% (w/w)	79.484
CROSS	-	
PERLITA	-	
R A/C	0.40	317.935
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	11.923
EDAD (DÍAS)	225	

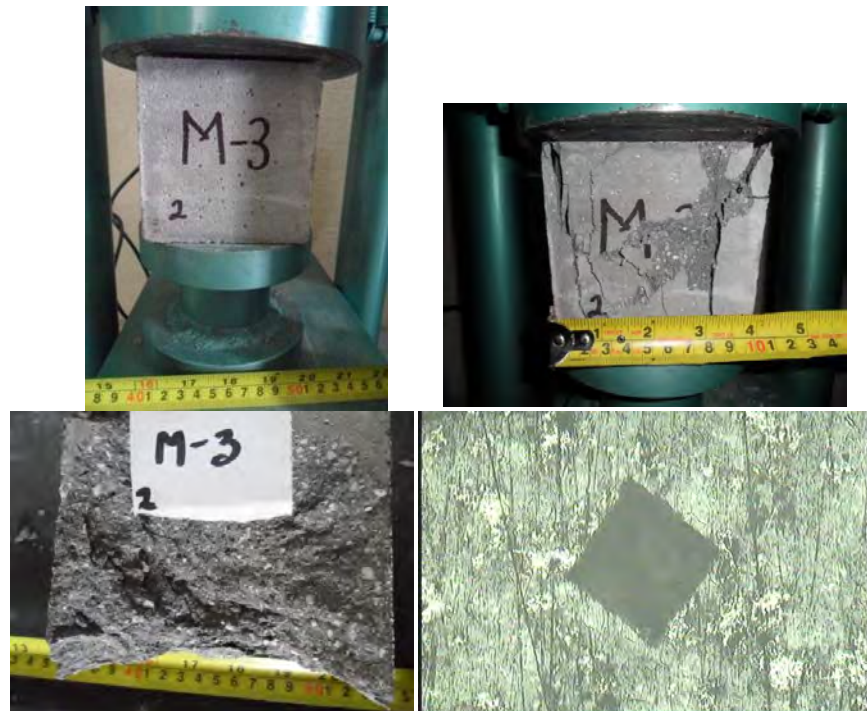


Figura 5.3. 4. Imágenes de la muestra M-3 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 4. Dosificación del MAC M-4

COMPOSICIÓN	M-4	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	943.3451
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	943.3451
OXIDO DE HIERRO	-	-
CARBÓN CC	15% (w/w)	141.5018
CROSS	-	
PERLITA	-	
R A/C	0.35	330.1708
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	14.1502
EDAD (DÍAS)	221	

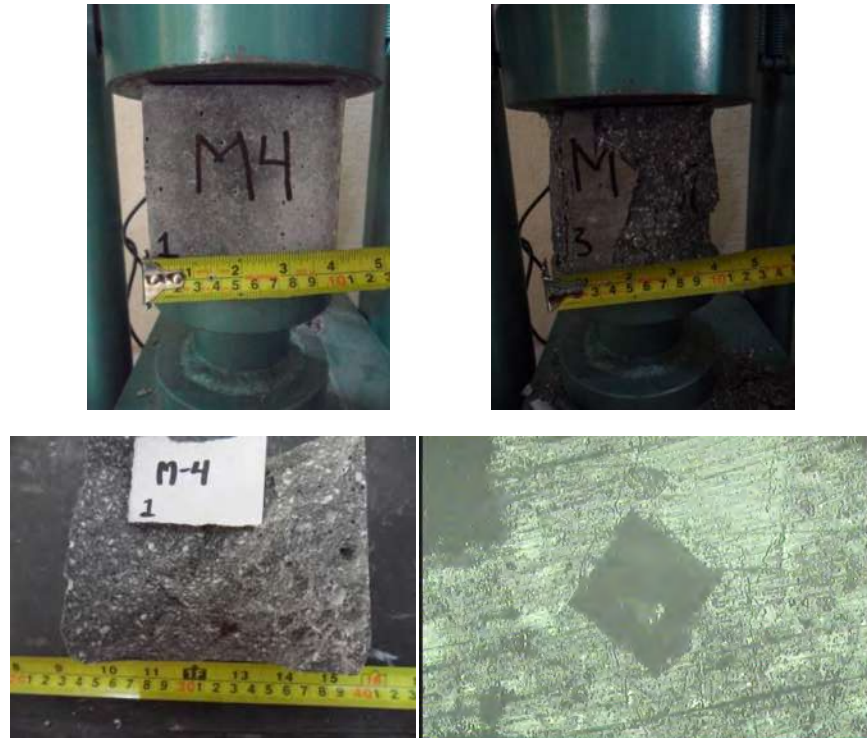


Figura 5.3. 5. Imágenes de la muestra M-4 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 5. Dosificación del MAC M-5

COMPOSICIÓN	M-5	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	766.1227
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	766.1227
OXIDO DE HIERRO	-	-
CARBÓN CC	-	
CROSS	10% (w/w)	76.6123
PERLITA	-	
R A/C	0.30	229.8368
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	11.4918
EDAD (DÍAS)	220	

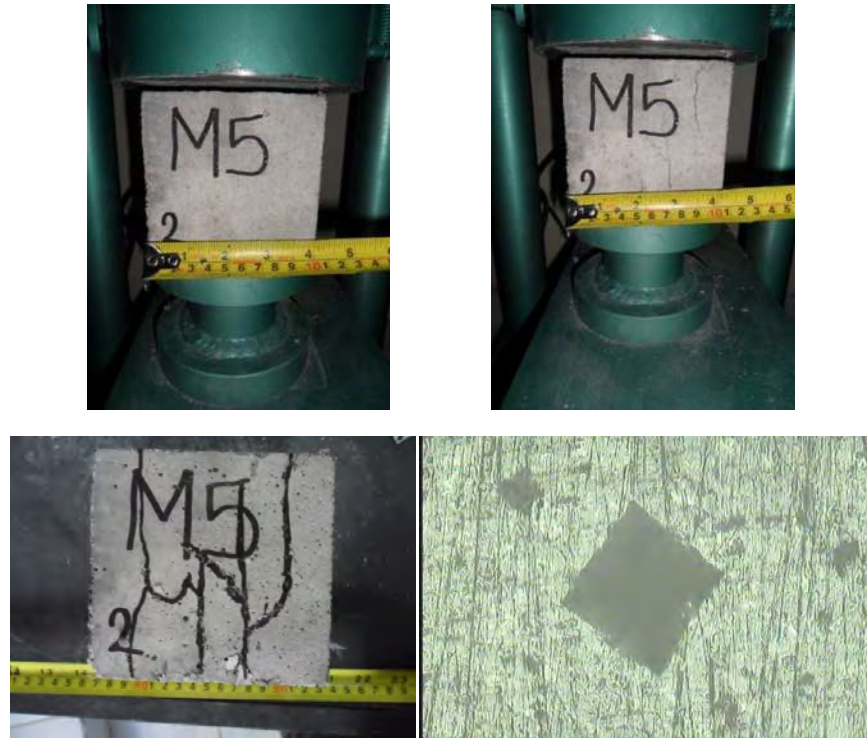


Figura 5.3. 6. Imágenes de la muestra M-5 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 6. Dosificación del MAC M-6

COMPOSICIÓN	M-6	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	644.9572
AGREGADO ASTM	100% (w/w)	644.9572
OXIDO DE HIERRO	-	-
CARBÓN CC	-	
CROSS	20% (w/w)	128.9914
PERLITA	-	
R A/C	0.35	225.7350
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	9.6744
EDAD (DÍAS)	221	

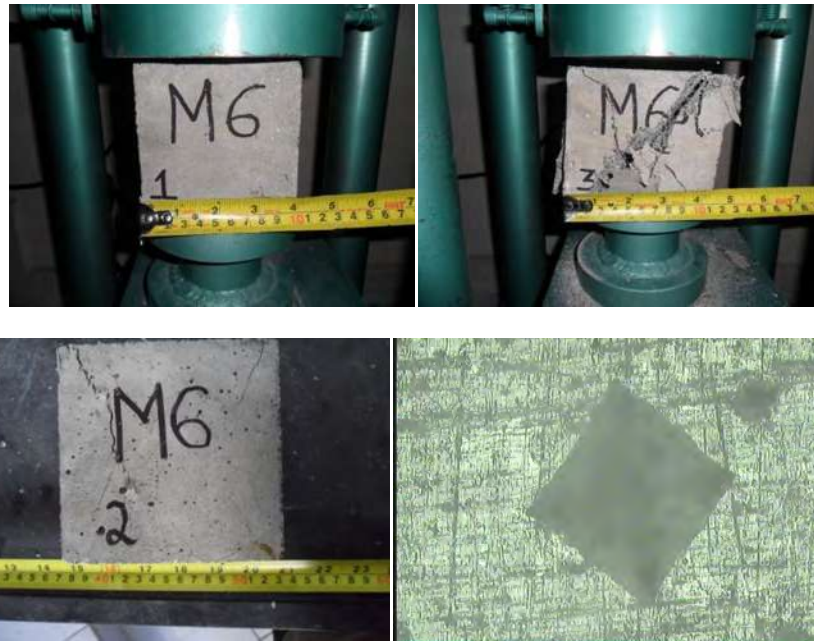


Figura 5.3. 7. Imágenes de la muestra M-6 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 7. Dosificación del MAC M-7

COMPOSICIÓN	M-7	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	765.4323
AGREGADO ASTM		
OXIDO DE HIERRO	-	
CARBÓN CC	-	
CROSS		
PERLITA	30% (w/w)	229.6297
R A/C	0.45	344.4446
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	11.4815
EDAD (DÍAS)	213	



Figura 5.3. 8. Imágenes de la muestra M-7 antes y después del ensayo a compresión

Tabla 5.3. 8. Dosificación del MAC M-8

COMPOSICIÓN	M-8	PESO EN KGS PARA 1M3
CPC 30R-RS	100% (w/w)	639.3569
AGREGADO ASTM		-
OXIDO DE HIERRO	-	-
CARBÓN CC	-	-
CROSS	10% (w/w)	63.9357
PERLITA	30% (w/w)	191.8071
R A/C	0.5	319.6785
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento	9.5904
EDAD (DÍAS)	211	

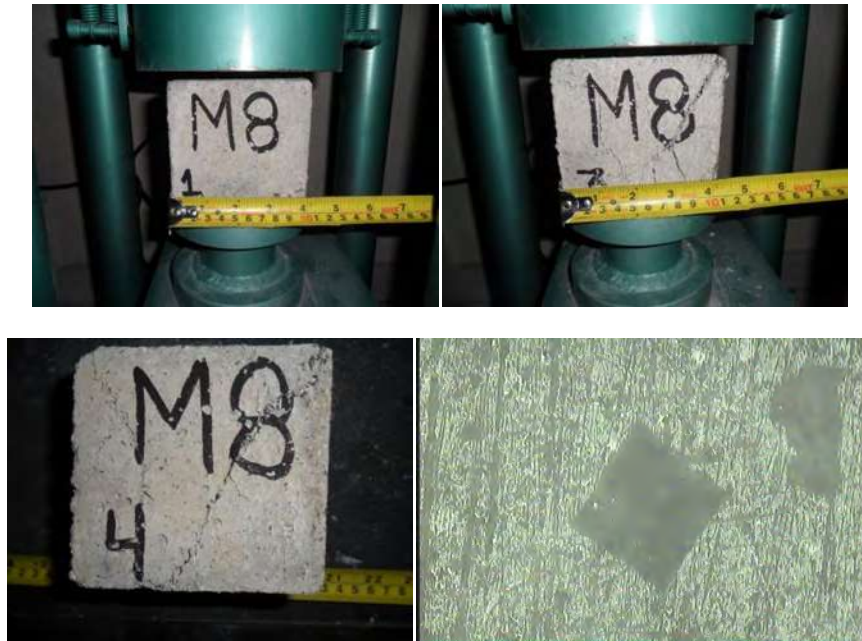


Figura 5.3. 9. Imágenes de la muestra M-8 antes y después del ensayo a compresión

Una vez visto los modos de falla en cada una de las muestras, a continuación se presenta en la tabla 5.3.9 los resultados de la prueba a compresión de los cubos.

Tabla 5.3. 9. Resumen de resistencias a compresión de las muestras

MUESTRA	EDAD (Días)	ÁREA (cm ²)	CARGA (Kg)	f'c (kg/cm ²)
M-1	226	100	91460	986.50
M-2	225	100	70960	785.15
M-3	225	100	86070	759.45
M-4	221	100	86160	834.13
M-5	220	100	54340	513.15
M-6	221	100	30070	281.90
M-7	213	100	12690	123.60
M-8	211	100	10400	110.63

Esfuerzo a compresión en kg/cm²

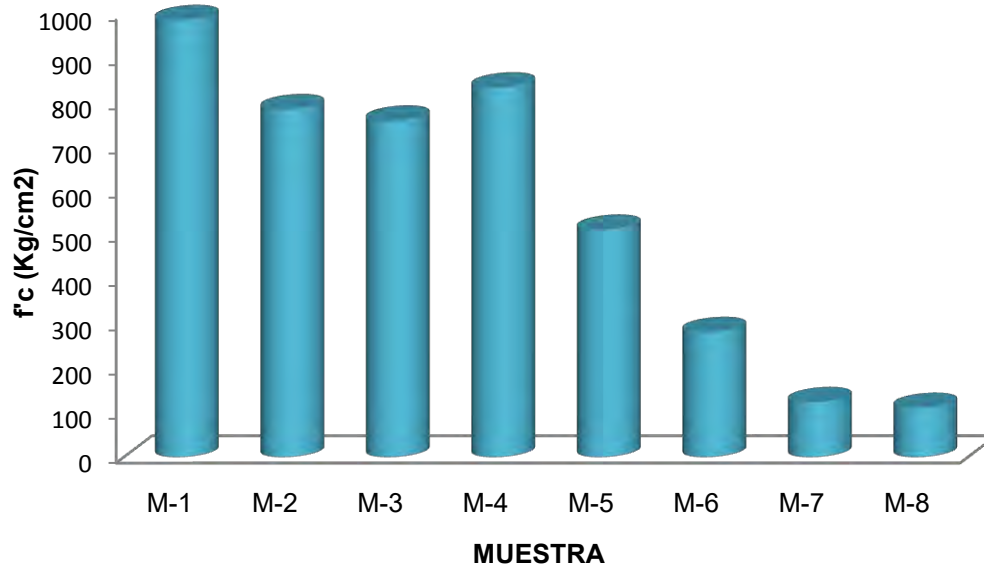


Figura 5.3. 10. Grafico de las resistencias a compresión de las muestras

De la figura 5.3.10, se puede ver que las cuatro primeras composiciones son las que presentan una resistencia a la compresión elevada. En el caso de las muestras M-5 y M-6 se ve una disminución en la resistencia, esto es debido a la incorporación de CROSS (neumático molido). Entre mayor cantidad de Cross es incorporado en la mezcla menor será la resistencia a la compresión. Sin embargo, en el caso de los que contienen Cross, presentan un comportamiento de falla diferente a las primeras cuatro muestras.

Para la obtención del módulo de elasticidad de los Micro-concretos autocompactables, se tuvo que utilizar una correlación con su resistencia a la compresión. Según Sidney, M., & Young, J. F se puede calcular el módulo de elasticidad con la siguiente formula:

$$E_c = 0.043\rho^{3/2}\sigma^{1/2}$$

Donde:

E_c Módulo de elasticidad en Gpa

ρ - Densidad del material en kg/m³

σ - Resistencia a la compresión a los 28 días en Mpa

Siguiendo la formula anterior, en la tabla 5.3.10 se pueden ver los valores de los módulos elasticidad de cada composición.

Tabla 5.3. 10. Módulo de elasticidad de los MAC

MUESTRA	DENSIDAD (KG/M3)	σ Mpa	Ec (Gpa)	Ec (kg/cm2)
M-1	2365	96.74	48.63	495,931.77
M-2	2436	77.00	45.36	462,576.37
M-3	2261	74.48	39.89	406,733.59
M-4	2120	81.80	37.97	387,221.27
M-5	2196	50.32	31.39	320,092.40
M-6	1909	27.65	18.85	192,235.49
M-7	1189	12.12	6.14	62,596.69
M-8	1243	10.85	6.21	63,321.99

De los datos anteriores, se prosiguió a realizar el diseño de un pavimento, el cual se encuentra en la sección de anexos. La metodología de diseño del pavimento fue con el *DISEÑO DE PAVIMENTOS CON EL MÉTODO DE LA PCA (Portland Cement Association)*, del tramo carretero UCAREO-TOCUARO, TRAMO UCAREO en los límites del estado de Michoacán y Guanajuato, en el km 0+000 AL km 6+140 con origen en UCAREO, Michoacán.

5.4. INDENTACIÓN VICKERS

Par las pruebas de indentación Vickers, se tuvieron que elaborar una muestra para cada composición. Estas tenían las siguientes dimensiones: 5x5x2.5cm. Se tuvieron que pulir las caras superiores de cada una de las muestras, quedando con una apariencia tipo espejo. Estas fueron pulidas con lijas de diferente número, las cuales eran: #300, 350, 500, 1000, 1200 y 2000. En la figura 5.4.1 se puede observar el proceso de lijado de cada una de las muestras.

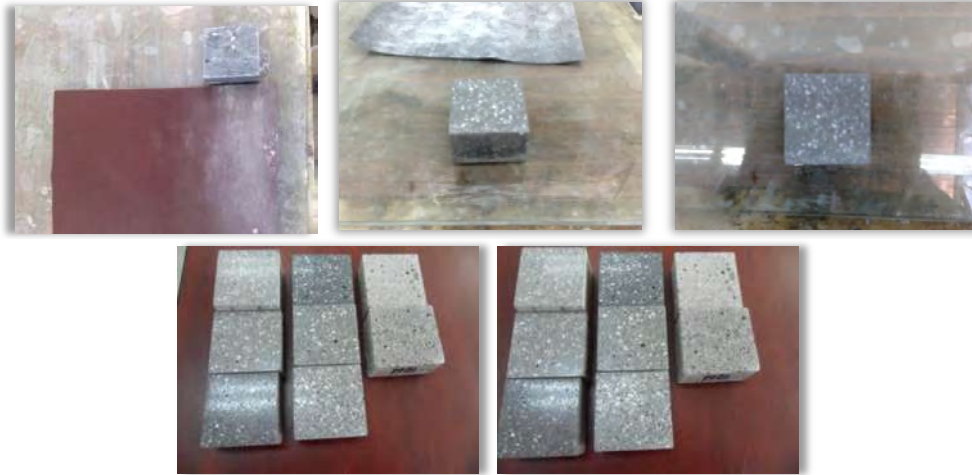


Figura 5.4. 1. Lijado de las muestras para un acabado espejo.

Este proceso de lijado de la cara superior de la muestra, es para que al momento de indentarlo se pueda observar bien las huellas del indentador Vickers. Después del proceso de pulido, se sometieron a un proceso de secado por tres días a 50°C en el horno, esto con la finalidad de eliminar la humedad presente en la muestra. Para la indentación se utilizó el indentador NANOVEA Series Vickers Hardness Tester con un rango de carga de 1Kgf (9.807N) a 50Kgf (490.332N). En la figura 5.4.2 se puede observar el indentador utilizado.



Figura 5.4. 2. Indentador Vickers.

En cada muestra se tuvieron que hacer indentaciones sobre la matriz y en el agregado. Para ello se hicieron un total de 30 indentaciones por sentido (horizontal y vertical) tanto como en el agregado y en la matriz, dando un total de 120 indentaciones por muestra. Para las mediciones de las huellas se tuvieron que seguir las indicaciones con forma a la norma ASTM C1327-03 ESTÁNDAR TEST METHOD FOR VICKERS INDENTATION HARDNESS OF ADVANCED CERAMICS.

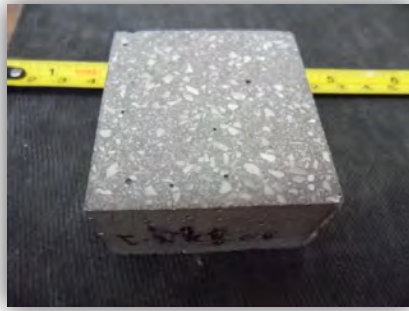
A continuación, se presentan varias tablas con los resultados de las indentaciones de cada una de las muestras. En estas tablas podremos observar las dimensiones de las huellas y la magnitud de la carga. Las cargas a las que fueron sometidas las muestras fueron de 1kgf (9.807N), 5kgf (49.03N) y 10 kgf (98.07N). En las primeras indentaciones realizadas con una carga de 1kgf, se pudieron obtener imágenes de las huellas. Con forme se iba incrementando la intensidad de la carga, se incrementaban las longitudes de las huellas, y era imposible alcanzar a tomar las imágenes de las huellas de la indentación.

Primeramente se mostraran las tablas correspondientes a los resultados de las indentaciones en los agregados de la M-1 (tabla 5.4.1), M-2 (tabla 5.4.2), M-3 (tabla 5.4.3), M-4 (tabla 5.4.4), M-5 (tabla 5.4.5) y M-6 (tabla 5.4.6). En el caso de la M-7 y M-8 no se pudieron tomar las indentaciones, ya que estos eran muy porosos y no se alcanzaba a visualizar las huellas. Después de haber visto los resultados de las indentaciones presentadas en las tablas, también se mostrarán los resultados de las durezas Vickers en forma grafica de todas las muestras.

Tabla 5.4. 1. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-1.

No	Load	Diagonal(μ m)		HV	PROMEDIO HV
	Kgf,N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	166	168	66	66.07
2	9.807	185	190	53	
3	9.807	161	156	73	
4	9.807	158	156	76	
5	9.807	157	169	70	
6	9.807	163	163	70	
7	9.807	158	164	71	
8	9.807	170	172	64	
9	9.807	163	160	71	
10	9.807	197	201	47	
11	49.03	392	395	60	66.28
12	49.03	359	372	69	
13	49.03	324	313	91	
14	49.03	394	394	60	
15	49.03	383	389	62	
16	49.03	392	387	61	
17	49.03	398	395	59	
18	49.03	373	373	67	
19	49.03	361	360	71	
20	49.03	385	385	63	
21	98.07	596	593	53	64.16
22	98.07	559	542	61	
23	98.07	624	613	49	
24	98.07	505	520	71	
25	98.07	515	505	71	
26	98.07	496	491	76	
27	98.07	502	479	77	
28	98.07	517	517	69	
29	98.07	554	567	59	
30	98.07	573	579	56	

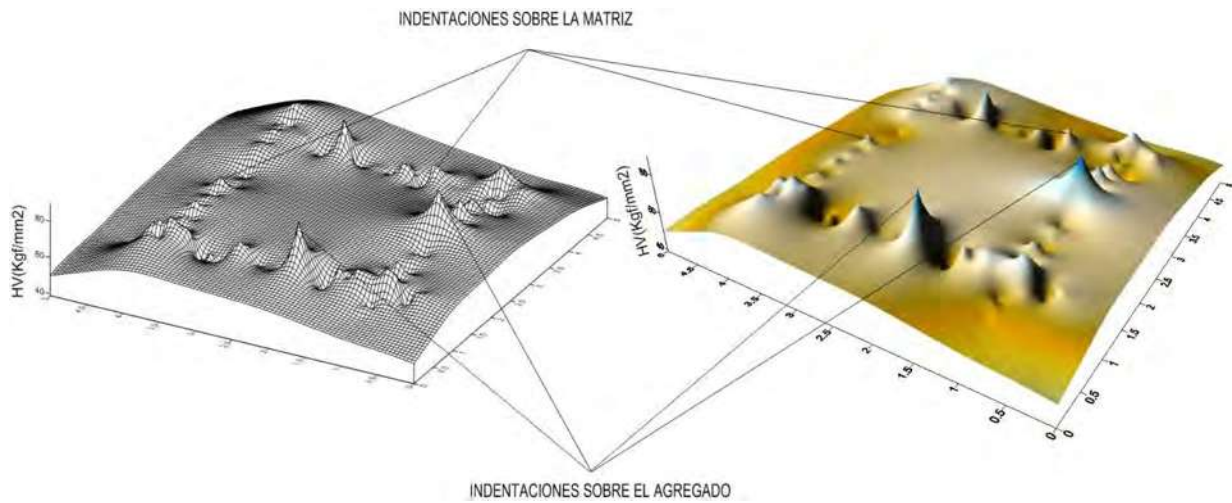
No	Load	Diagonal(μ m)		HV	PROMEDIO HV
	Kgf,N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	409.40	431.50	104.80	87.47
2	9.807	134.00	134.00	103.20	
3	9.807	121.20	127.80	119.60	
4	9.807	139.20	134.90	98.70	
5	9.807	130.30	153.20	92.20	
6	9.807	165.60	175.80	63.60	
7	9.807	171.70	187.20	57.50	
8	9.807	210.70	190.10	46.10	
9	9.807	151.90	170.50	71.30	
10	9.807	118.40	132.60	117.70	
11	49.03	310.10	327.80	91.10	98.71
12	49.03	309.80	317.40	94.20	
13	49.03	288.50	287.80	111.60	
14	49.03	303.80	308.80	98.80	
15	49.03	468.30	517.60	38.10	
16	49.03	292.50	290.70	109.00	
17	49.03	309.10	316.00	94.90	
18	49.03	295.20	307.50	102.10	
19	49.03	248.30	265.50	140.40	
20	49.03	285.30	303.70	106.90	
21	98.07	398.20	428.10	108.60	90.84
22	98.07	480.30	495.40	77.90	
23	98.07	411.00	450.30	99.90	
24	98.07	410.80	450.90	99.80	
25	98.07	468.20	479.50	82.50	
26	98.07	423.50	459.30	95.10	
27	98.07	461.70	528.50	75.60	
28	98.07	497.20	515.50	72.30	
29	98.07	443.10	455.10	91.90	
30	98.07	409.40	431.50	104.80	



a)



b)



c)

Figura 5.4. 3. a) y b) Imágenes de la muestra M-1 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-1.

Tabla 5.4. 2. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-2.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	128.50	136.90	105.30	90.56
2	9.807	176.50	176.00	59.60	
3	9.807	131.80	139.00	101.10	
4	9.807	145.00	154.60	82.60	
5	9.807	241.50	247.80	30.90	
6	9.807	110.80	117.60	142.10	
7	9.807	124.20	133.90	111.30	
8	9.807	119.90	129.30	119.40	
9	9.807	161.70	161.70	70.90	
10	9.807	144.10	155.80	82.40	
11	49.03	281.10	287.50	114.70	86.89
12	49.03	394.10	401.80	58.50	
13	49.03	388.30	377.80	63.10	
14	49.03	290.80	303.40	105.00	
15	49.03	292.50	301.90	104.90	
16	49.03	287.50	281.30	114.60	
17	49.03	286.20	291.90	110.90	
18	49.03	458.60	470.10	43.00	
19	49.03	278.90	270.50	122.80	
20	49.03	531.60	554.00	31.40	
21	98.07	414.80	409.00	109.20	81.42
22	98.07	528.10	542.70	64.60	
23	98.07	431.70	464.00	92.40	
24	98.07	582.00	605.20	52.60	
25	98.07	431.30	406.30	105.70	
26	98.07	425.80	423.00	102.90	
27	98.07	440.50	445.80	94.40	
28	98.07	562.70	553.70	59.50	
29	98.07	451.90	432.50	94.80	
30	98.07	685.30	708.40	38.10	

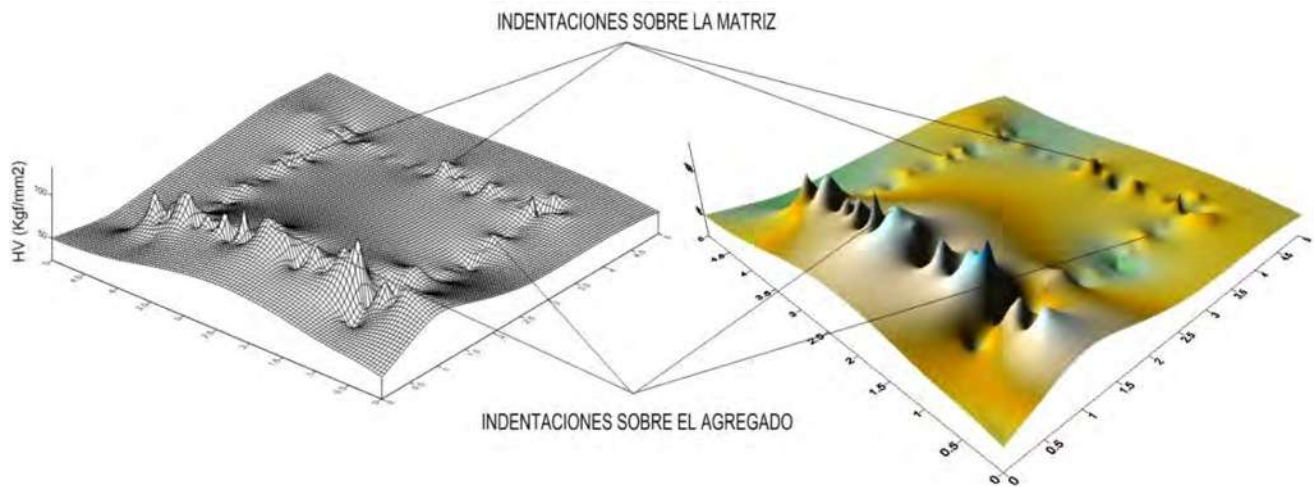
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	170.90	174.00	62.30	58.08
2	9.807	193.00	203.60	47.10	
3	9.807	180.20	178.10	57.70	
4	9.807	171.00	175.20	61.80	
5	9.807	178.70	183.70	56.40	
6	9.807	190.90	197.10	49.20	
7	9.807	199.20	198.40	46.90	
8	9.807	196.50	186.70	50.50	
9	9.807	162.10	159.10	71.80	
10	9.807	157.00	153.00	77.10	
11	49.03	349.30	346.10	76.60	49.01
12	49.03	416.50	396.50	56.10	
13	49.03	463.10	461.50	43.30	
14	49.03	439.20	442.90	47.60	
15	49.03	431.60	427.60	50.20	
16	49.03	458.30	461.40	43.80	
17	49.03	465.40	466.30	42.70	
18	49.03	546.20	532.90	31.80	
19	49.03	433.60	429.40	49.70	
20	49.03	435.10	440.70	48.30	
21	98.07	551.80	553.50	60.70	49.33
22	98.07	582.50	596.40	53.30	
23	98.07	636.70	634.30	45.90	
24	98.07	618.00	608.30	49.30	
25	98.07	619.90	608.70	49.10	
26	98.07	582.60	577.80	55.00	
27	98.07	750.90	744.10	33.10	
28	98.07	931.80	932.30	21.30	
29	98.07	525.90	516.40	68.20	
30	98.07	574.50	561.90	57.40	



a)



b)

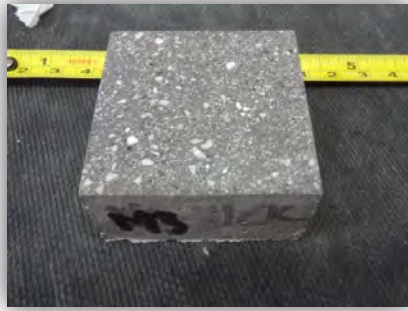


c)

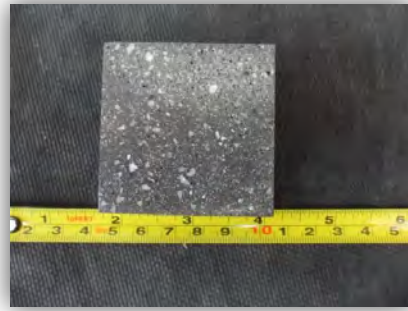
Figura 5.4. 4. a) y b) Imágenes de la muestra M-2 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-2.

Tabla 5.4. 3. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-3.

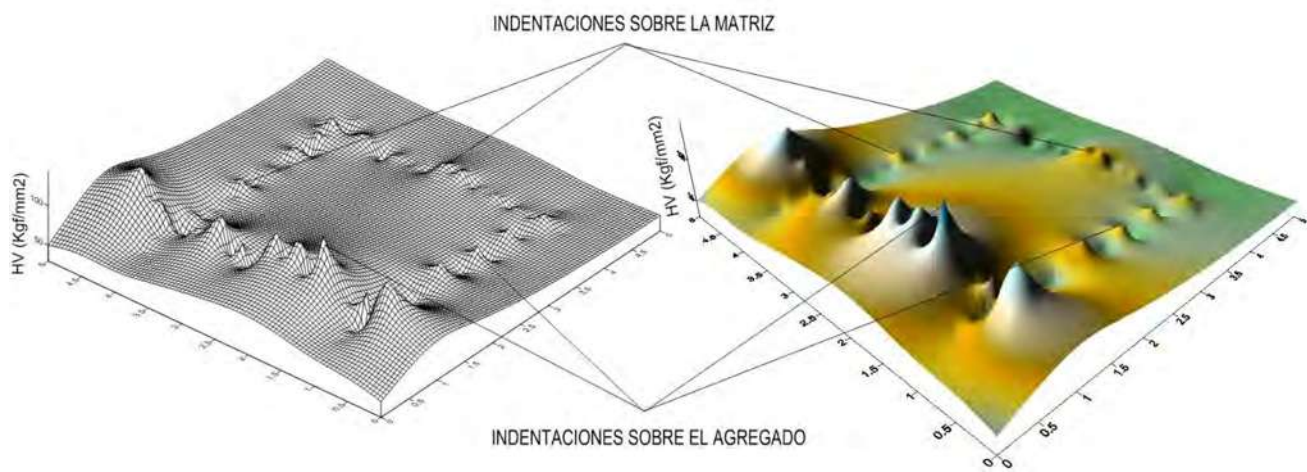
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	132.60	138.90	100.60	107.18
2	9.807	123.30	125.20	120.10	
3	9.807	118.30	124.40	125.90	
4	9.807	136.10	136.90	99.50	
5	9.807	134.60	124.50	110.40	
6	9.807	148.90	154.50	80.50	
7	9.807	154.20	160.80	74.70	
8	9.807	143.20	137.60	94.00	
9	9.807	123.10	128.50	117.10	
10	9.807	114.50	108.60	149.00	
11	49.03	465.00	465.30	42.80	84.22
12	49.03	280.20	272.60	121.30	
13	49.03	279.70	270.70	122.40	
14	49.03	340.00	336.30	81.00	
15	49.03	269.80	275.40	124.70	
16	49.03	292.90	304.90	103.70	
17	49.03	415.80	420.50	53.00	
18	49.03	419.80	425.90	51.80	
19	49.03	328.50	311.90	90.40	
20	49.03	424.60	426.80	51.10	
21	98.07	409.30	403.70	112.20	88.57
22	98.07	424.00	429.20	101.80	
23	98.07	494.40	500.70	74.90	
24	98.07	486.30	467.70	81.50	
25	98.07	537.00	544.20	63.40	
26	98.07	549.40	537.20	62.80	
27	98.07	472.40	486.00	80.70	
28	98.07	435.10	459.20	92.70	
29	98.07	454.80	455.90	89.40	
30	98.07	377.80	388.40	126.30	
1	9.807	166.90	170.60	65.10	53.46
2	9.807	166.90	162.70	68.20	
3	9.807	178.40	180.70	57.50	
4	9.807	193.10	194.20	49.40	
5	9.807	220.70	233.70	35.90	
6	9.807	222.90	227.40	36.50	
7	9.807	182.10	182.30	55.80	
8	9.807	182.70	178.90	56.70	
9	9.807	177.20	174.70	59.80	
10	9.807	191.30	194.70	49.70	
11	49.03	437.40	432.50	49.00	57.94
12	49.03	375.20	373.30	66.10	
13	49.03	378.00	359.90	68.10	
14	49.03	335.20	336.60	82.10	
15	49.03	404.70	407.70	56.10	
16	49.03	419.80	426.30	51.80	
17	49.03	452.40	456.40	44.90	
18	49.03	397.00	398.70	58.50	
19	49.03	360.40	365.90	70.30	
20	49.03	520.90	546.00	32.50	
21	98.07	613.90	618.00	48.80	51.81
22	98.07	572.50	579.20	55.90	
23	98.07	527.30	528.00	66.60	
24	98.07	690.30	659.10	40.70	
25	98.07	605.40	591.20	51.80	
26	98.07	561.90	558.80	59.00	
27	98.07	587.70	584.20	54.00	
28	98.07	620.10	606.70	49.20	
29	98.07	615.70	627.10	48.00	
30	98.07	653.00	642.90	44.10	



a)



b)



c)

Figura 5.4. 5. a) y b) Imágenes de la muestra M-3 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-3.

Tabla 5.4. 4. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-4

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	206.10	196.10	45.80	63.53
2	9.807	173.40	168.60	63.40	
3	9.807	198.30	197.40	47.30	
4	9.807	162.80	163.20	69.70	
5	9.807	165.80	167.10	66.90	
6	9.807	160.20	162.60	71.10	
7	9.807	182.30	175.50	57.90	
8	9.807	150.70	167.40	73.30	
9	9.807	171.60	166.10	65.00	
10	9.807	153.40	161.20	74.90	
11	49.03	419.40	420.80	52.50	92.82
12	49.03	285.00	288.20	112.80	
13	49.03	265.20	278.20	125.60	
14	49.03	294.30	320.30	98.10	
15	49.03	326.20	334.30	85.00	
16	49.03	342.70	356.10	75.90	
17	49.03	314.50	321.20	91.70	
18	49.03	324.80	330.70	86.30	
19	49.03	331.70	340.80	82.00	
20	49.03	274.90	285.00	118.30	
21	98.07	431.60	439.00	97.80	89.83
22	98.07	461.80	448.90	89.40	
23	98.07	527.90	531.30	66.10	
24	98.07	637.20	615.60	47.20	
25	98.07	432.40	442.00	97.00	
26	98.07	544.40	563.00	60.40	
27	98.07	426.60	434.00	100.10	
28	98.07	336.20	325.30	169.50	
29	98.07	546.00	561.60	60.40	
30	98.07	397.40	422.10	110.40	

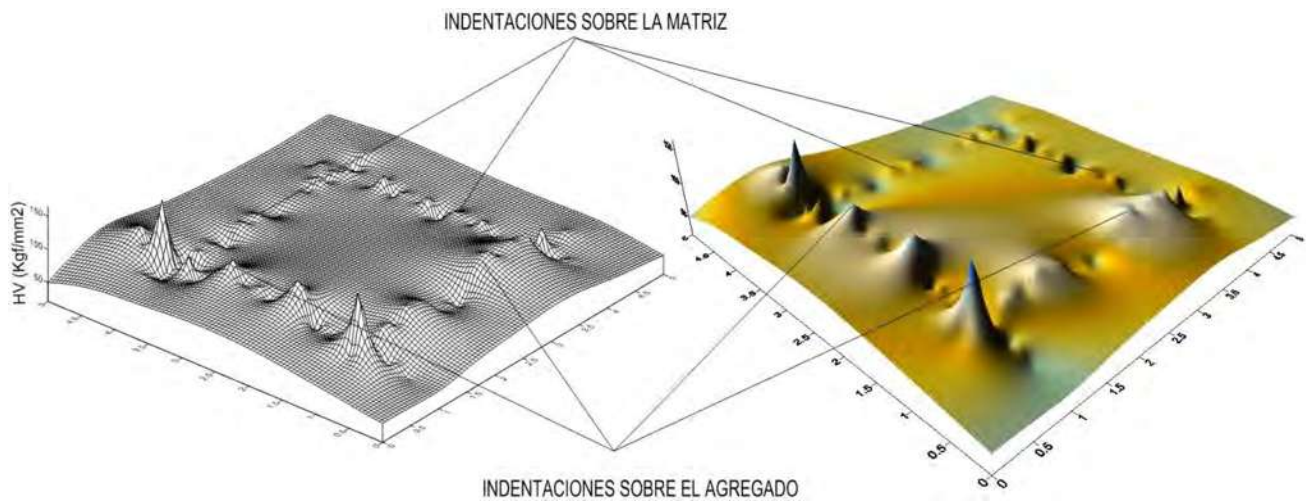
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	160.70	158.60	72.70	93.72
2	9.807	156.50	150.90	78.40	
3	9.807	102.30	100.80	179.80	
4	9.807	170.70	168.00	64.60	
5	9.807	162.60	158.20	72.00	
6	9.807	139.40	143.00	93.00	
7	9.807	142.90	140.40	92.40	
8	9.807	151.10	152.20	80.60	
9	9.807	137.80	128.80	104.30	
10	9.807	137.70	135.40	99.40	
11	49.03	304.40	313.30	97.20	82.81
12	49.03	314.70	322.40	91.30	
13	49.03	371.90	362.00	68.80	
14	49.03	369.30	375.60	66.80	
15	49.03	368.40	374.50	67.20	
16	49.03	423.70	417.10	52.40	
17	49.03	365.70	377.60	67.10	
18	49.03	303.90	308.60	98.80	
19	49.03	291.90	298.60	106.30	
20	49.03	282.60	292.10	112.20	
21	98.07	432.70	440.80	97.20	90.61
22	98.07	440.50	404.20	103.90	
23	98.07	417.80	414.70	107.00	
24	98.07	430.70	423.00	101.70	
25	98.07	418.60	419.50	105.60	
26	98.07	488.30	499.90	75.90	
27	98.07	404.40	406.40	112.80	
28	98.07	527.80	529.80	66.30	
29	98.07	545.10	545.80	62.30	
30	98.07	500.00	504.90	73.40	



a)



b)



c)

Figura 5.4. 6. a) y b) Imágenes de la muestra M-4 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-4.

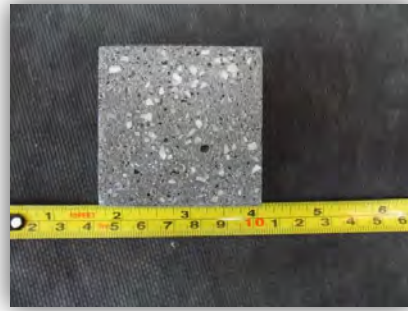
Tabla 5.4. 5. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-5.

o	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	Kgf,N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	171.50	166.10	65.00	83.83
2	9.807	157.50	170.20	69.00	
3	9.807	146.70	164.70	76.40	
4	9.807	178.10	182.70	56.90	
5	9.807	163.70	160.70	70.40	
6	9.807	131.40	133.90	105.30	
7	9.807	118.90	126.90	122.70	
8	9.807	122.30	136.30	110.90	
9	9.807	145.00	151.70	84.20	
10	9.807	161.60	147.60	77.50	
11	49.03	356.90	327.40	79.20	100.38
12	49.03	383.90	396.50	60.80	
13	49.03	290.90	297.80	107.00	
14	49.03	329.70	341.10	82.40	
15	49.03	296.70	283.10	110.30	
16	49.03	241.90	250.90	152.70	
17	49.03	281.30	263.40	125.00	
18	49.03	340.70	345.50	78.70	
19	49.03	300.40	308.60	99.90	
20	49.03	292.10	294.20	107.80	
21	98.07	618.00	598.90	50.00	70.12
22	98.07	449.00	457.20	90.30	
23	98.07	650.60	636.50	44.70	
24	98.07	609.60	600.50	50.60	
25	98.07	578.70	574.40	55.70	
26	98.07	541.30	548.50	62.40	
27	98.07	473.60	487.20	80.30	
28	98.07	409.10	417.90	108.40	
29	98.07	505.80	514.70	71.20	
30	98.07	460.80	459.30	87.60	

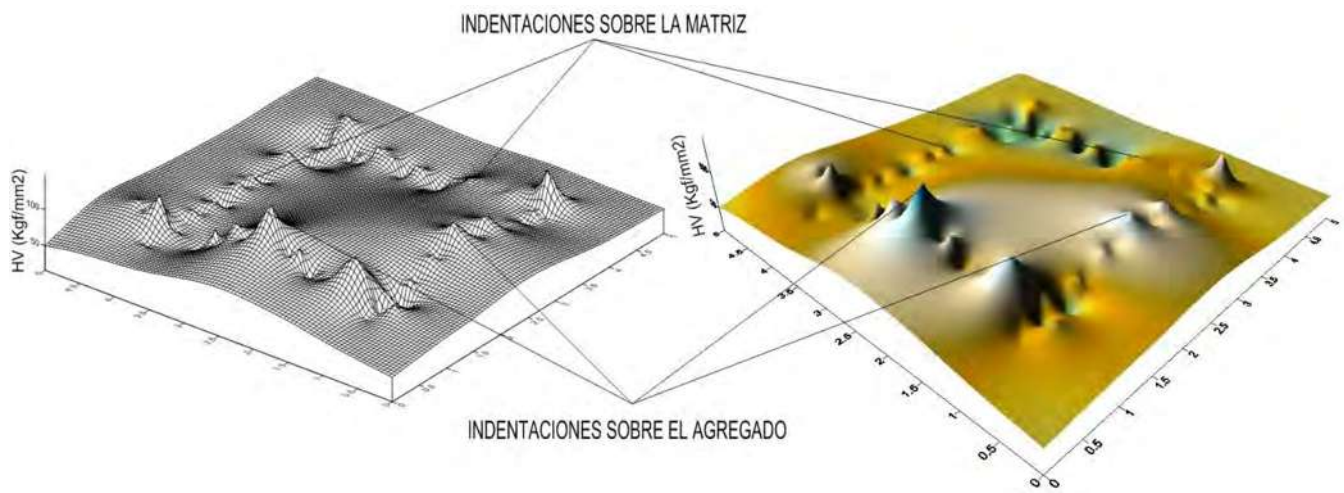
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	Kgf,N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	169.40	167.70	65.20	58.43
2	9.807	171.30	170.10	63.60	
3	9.807	183.30	174.30	58.00	
4	9.807	173.50	159.20	67.00	
5	9.807	245.80	212.50	35.30	
6	9.807	161.20	153.20	75.00	
7	9.807	190.60	169.20	57.20	
8	9.807	281.50	282.30	23.30	
9	9.807	154.10	155.90	77.10	
10	9.807	176.60	167.40	62.60	
11	49.03	342.10	346.20	78.20	90.60
12	49.03	312.30	328.00	90.40	
13	49.03	339.50	353.80	77.10	
14	49.03	311.00	332.20	89.60	
15	49.03	273.50	285.90	118.50	
16	49.03	292.30	311.70	101.60	
17	49.03	327.40	318.20	88.90	
18	49.03	360.50	367.70	69.90	
19	49.03	302.60	311.30	98.40	
20	49.03	310.80	319.20	93.40	
21	98.07	507.90	524.40	69.60	68.20
22	98.07	530.70	531.40	65.70	
23	98.07	525.00	538.10	65.60	
24	98.07	547.40	560.90	60.30	
25	98.07	583.50	640.00	49.50	
26	98.07	532.30	541.40	64.30	
27	98.07	541.90	525.40	65.10	
28	98.07	393.80	416.90	112.80	
29	98.07	501.60	507.10	72.90	
30	98.07	575.40	573.40	56.20	



a)



b)



c)

Figura 5.4. 7. a) y b) Imágenes de la muestra M-5 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-5.

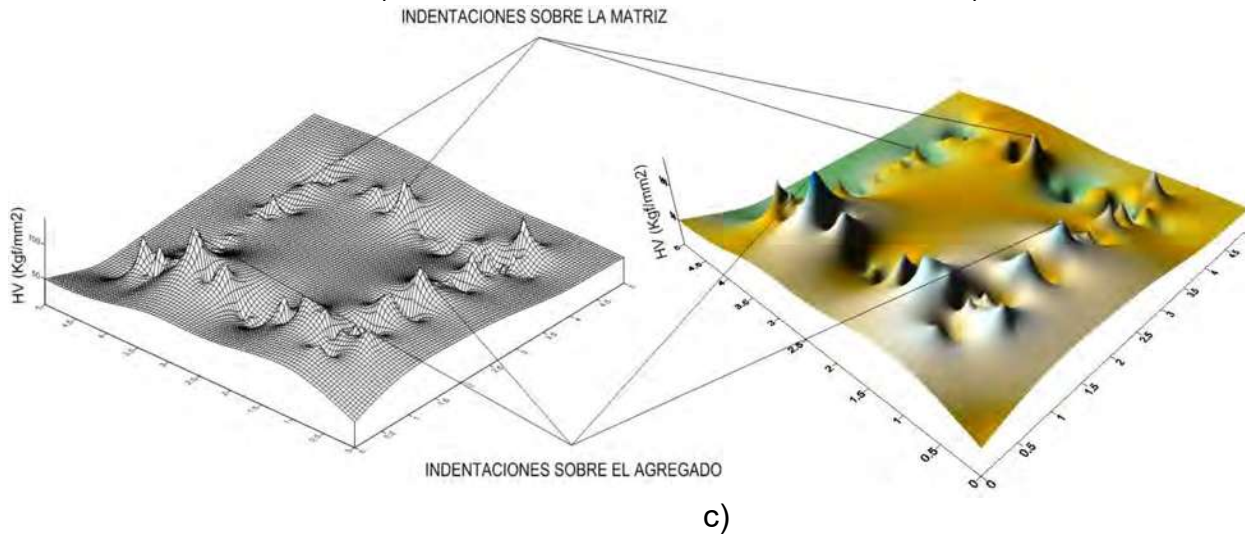
Tabla 5.4. 6. Resultado de las indentaciones sobre el agregado de la M-6.

No	Load Kgf,N	Diagonal(μ m)		HV (kgf/mm ²)	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
		D1	D2		
1	9.807	147.30	138.60	90.70	98.89
2	9.807	124.40	130.50	114.10	
3	9.807	136.90	145.00	93.30	
4	9.807	142.20	142.20	91.70	
5	9.807	134.00	135.80	101.90	
6	9.807	186.80	186.10	53.30	
7	9.807	126.00	130.50	112.70	
8	9.807	132.20	137.30	102.10	
9	9.807	124.70	130.20	114.10	
10	9.807	123.60	130.30	115.00	
11	49.03	729.90	753.20	16.80	62.49
12	49.03	291.60	288.90	110.00	
13	49.03	355.00	367.30	71.00	
14	49.03	491.00	464.00	40.60	
15	49.03	598.70	578.70	26.70	
16	49.03	424.10	424.20	51.50	
17	49.03	527.70	505.40	34.70	
18	49.03	383.50	371.50	65.00	
19	49.03	295.10	289.20	108.60	
20	49.03	302.10	306.60	100.00	
21	98.07	711.20	716.20	36.40	82.32
22	98.07	368.60	398.90	125.90	
23	98.07	357.00	356.00	145.90	
24	98.07	499.20	515.30	72.00	
25	98.07	464.10	470.00	85.00	
26	98.07	490.20	506.30	74.60	
27	98.07	405.00	426.10	107.30	
28	98.07	567.20	574.30	56.90	
29	98.07	429.40	434.80	99.30	
30	98.07	955.80	974.80	19.90	
1	9.807	136.10	139.20	97.80	79.12
2	9.807	180.20	182.30	56.40	
3	9.807	152.10	155.40	78.40	
4	9.807	144.30	140.50	91.40	
5	9.807	174.90	167.10	63.40	
6	9.807	136.10	139.40	97.70	
7	9.807	201.40	214.50	42.80	
8	9.807	189.50	185.30	52.80	
9	9.807	132.80	137.80	101.20	
10	9.807	120.50	139.90	109.30	
11	49.03	272.40	310.20	109.20	72.00
12	49.03	708.90	692.30	18.80	
13	49.03	543.40	548.80	31.00	
14	49.03	322.80	285.90	100.00	
15	49.03	281.10	264.90	124.40	
16	49.03	339.60	337.90	80.80	
17	49.03	332.20	327.40	85.20	
18	49.03	359.10	361.30	71.40	
19	49.03	346.10	345.60	77.50	
20	49.03	644.70	661.60	21.70	
21	98.07	519.40	528.80	67.50	56.09
22	98.07	447.40	421.40	98.20	
23	98.07	859.70	753.90	28.40	
24	98.07	454.90	444.50	91.60	
25	98.07	875.70	806.80	26.20	
26	98.07	750.70	740.90	33.30	
27	98.07	895.30	895.40	23.10	
28	98.07	735.40	721.30	34.90	
29	98.07	389.70	448.30	105.60	
30	98.07	576.50	616.30	52.10	



a)

b)



c)

Figura 5.4. 8. a) y b) Imágenes de la muestra M-6 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-6.

Una vez visto los resultados de las indentaciones tanto verticales como horizontales en los agregados, posteriormente se promediaron los resultados. A continuación se presentan los resúmenes de resultados de cada una de las muestras y junto a ellas unas imágenes para poder ver la forma de las huellas y la propagación de las grietas.

Tabla 5.4. 7. Resumen del promedio de indentaciones en M-1.

M-1	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	66.07	87.47	76.77	0.71	
5	49.03	66.28	98.71	82.49	0.81	
10	98.07	64.16	90.84	77.50	0.76	

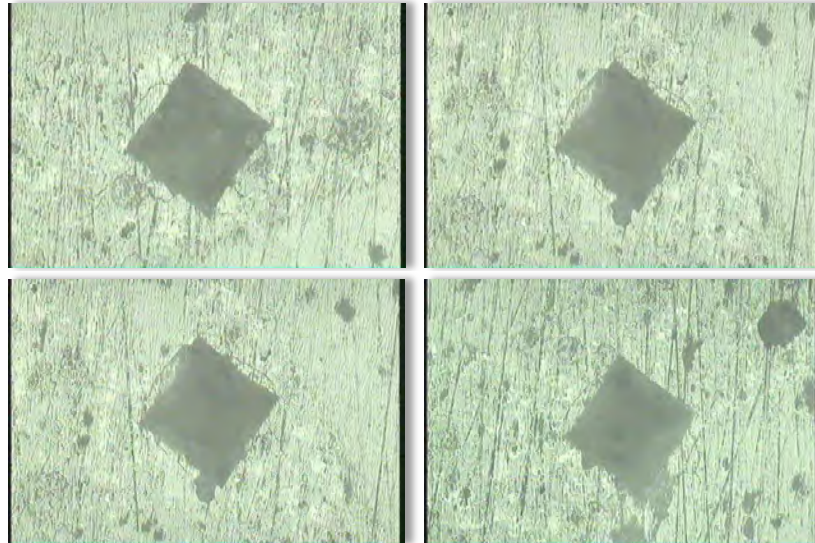


Figura 5.4. 9. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-1.

Tabla 5.4. 8. Resumen del promedio de indentaciones en M-2.

M-2	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	90.56	58.08	74.32	0.73	
5	49.03	86.89	49.01	67.95	0.67	
10	98.07	81.42	49.33	65.37	0.64	

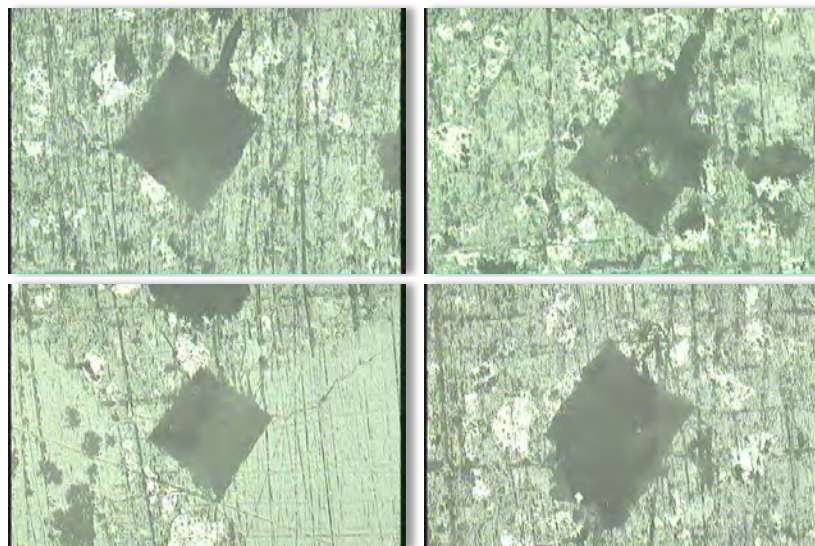


Figura 5.4. 10. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-2.

Tabla 5.4. 9. Resumen del promedio de indentaciones en M-3.

M-3	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	107.18	53.46	80.32	0.79	
5	49.03	84.22	57.94	71.08	0.70	
10	98.07	88.57	51.81	70.19	0.69	

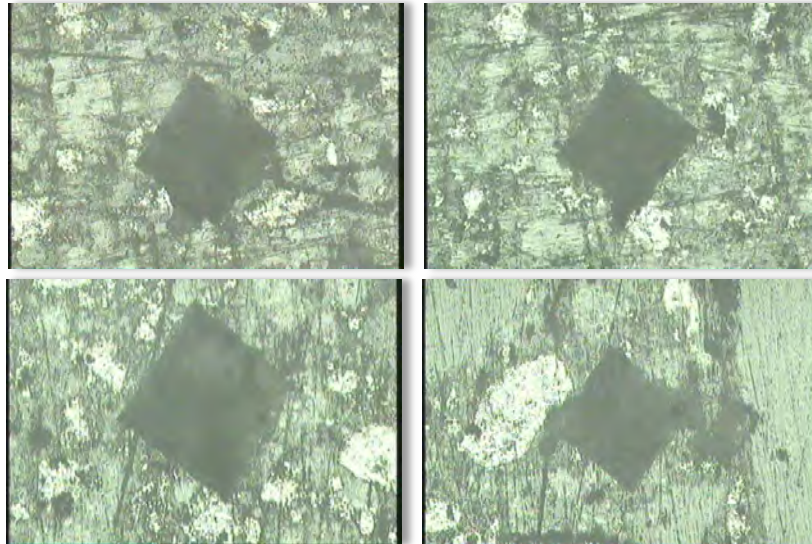
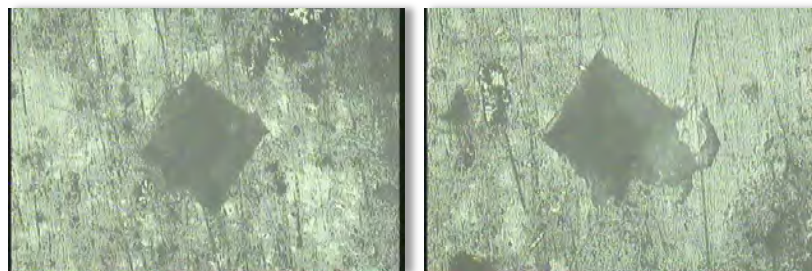


Figura 5.4. 11. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-3.

Tabla 5.4. 10. Resumen del promedio de indentaciones en M-4.

M-4	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	63.53	93.72	78.63	0.77	
5	49.03	92.82	82.81	87.82	0.86	
10	98.07	89.83	90.61	90.22	0.89	



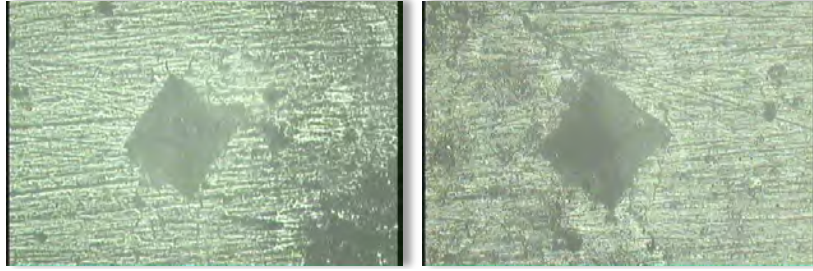


Figura 5.4. 12. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-4.

Tabla 5.4. 11. Resumen del promedio de indentaciones en M-5.

M-5	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	83.83	58.43	71.13	0.70	
5	49.03	100.38	90.60	95.49	0.94	
10	98.07	70.12	68.20	69.16	0.68	

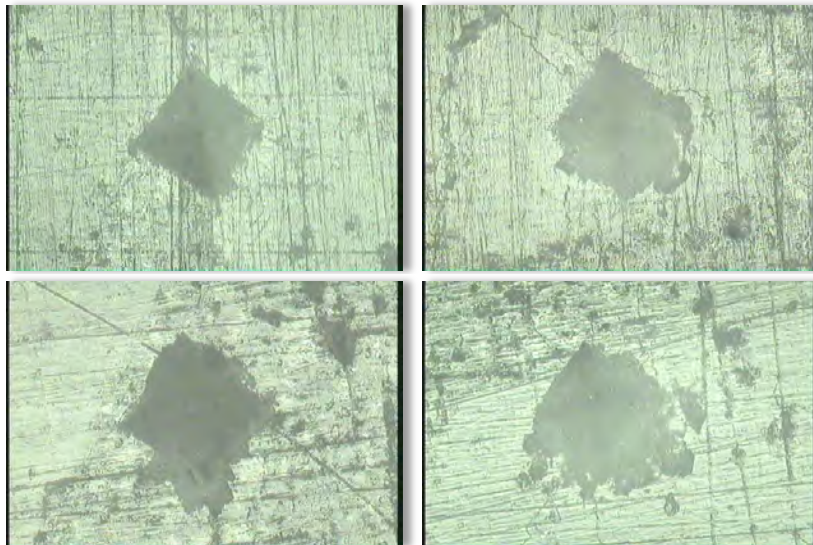


Figura 5.4. 13. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-5.

Tabla 5.4. 12. Resumen del promedio de indentaciones en M-6.

M-6	RESUMEN INDENTACIONES EN EL AGREGADO					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	98.89	79.12	89.00	0.87	
5	49.03	62.49	72.00	67.24	0.66	
10	98.07	82.32	56.09	69.20	0.68	

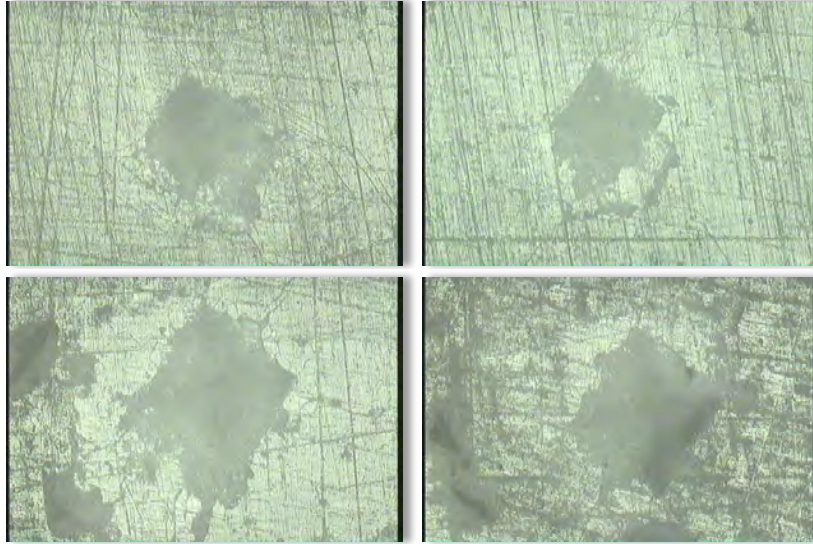


Figura 5.4. 14. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en el agregado de la M-6.

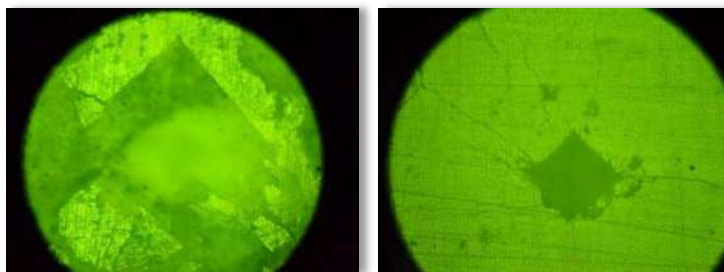


Figura 5.4. 15. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en el agregado de la M-6.

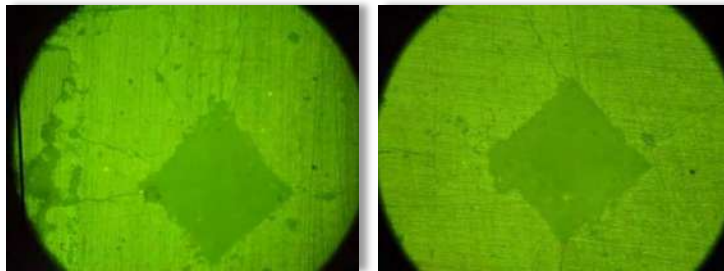


Figura 5.4. 16. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 10kgf (98.07N) en el agregado de la M-6.

Después de ver el resultado de los promedios de cada una de las muestras, a continuación para poder tener una mejor comparación de la variación de la dureza Vickers de los agregados se presenta en la figura 5.4.17 la grafica comparativa de todas las muestras.

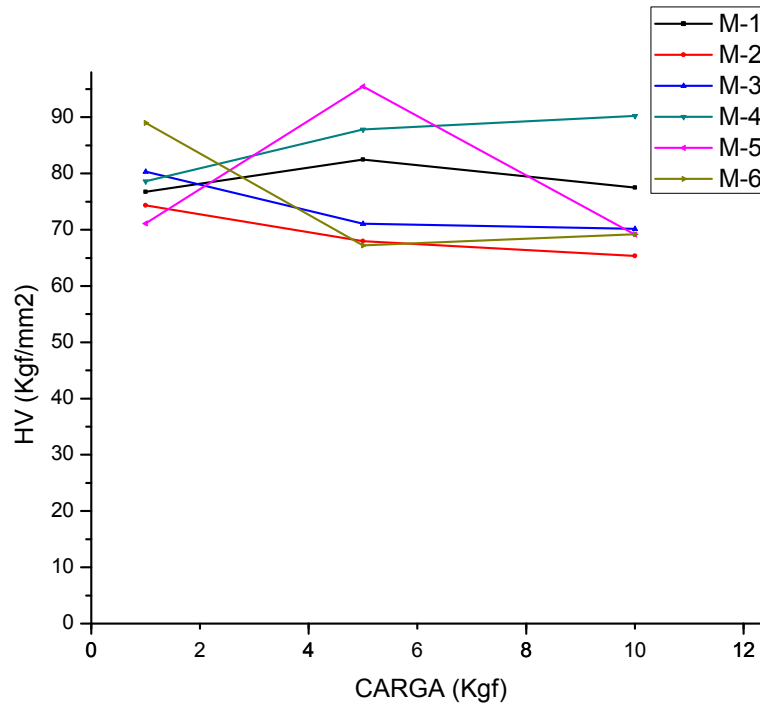


Figura 5.4. 17. Grafica comparativa de durezas Vickers en el agregado de cada una de las muestras a diferentes cargas.

En seguida, como el caso anterior, se presentará una serie de tablas con los resultados de las indentaciones en la matriz. En este caso se pudieron hacer las indentaciones en todas las composiciones. En las muestras de las composiciones de la M-7 y M-8 se tomaron indentaciones con cargas de 9.807N (1kgf) y 49.03 N (5Kgf). Cuando se hacían las indentaciones con la carga de 98.07N (10kgf) se tenían unas huellas muy grandes y eran imposibles de medir sus dimensiones, ya que el rango de distancia que maneja la maquina es hasta 1000 μm (1mm).

Tabla 5.4. 13. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-1.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	170.20	174.40	62.40	61.70
2	9.807	169.50	162.00	67.40	
3	9.807	166.60	172.30	64.50	
4	9.807	178.20	178.80	58.20	
5	9.807	180.60	182.30	56.30	
6	9.807	172.30	169.60	63.40	
7	9.807	174.90	171.40	61.80	
8	9.807	172.30	180.40	59.60	
9	9.807	388.80	398.20	59.80	
10	49.03	377.00	386.30	63.60	61.71
11	49.03	360.70	358.00	71.80	
12	49.03	487.70	472.70	40.20	
13	49.03	392.20	383.50	61.60	
14	49.03	368.70	376.90	66.70	
15	49.03	405.90	404.60	56.40	
16	49.03	392.60	392.10	60.20	
17	49.03	389.10	394.90	60.30	
18	49.03	398.70	401.10	57.90	
19	49.03	399.10	402.30	57.70	
20	49.03	334.80	328.40	84.30	61.77
21	98.07	538.40	550.60	62.50	
22	98.07	568.00	573.00	56.90	
23	98.07	551.90	554.20	60.60	
24	98.07	525.30	526.00	67.10	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	159.90	166.50	69.60	62.73
2	9.807	161.50	160.90	71.30	
3	9.807	165.70	172.50	64.80	
4	9.807	176.10	173.20	60.70	
5	9.807	174.10	177.40	60.00	
6	9.807	167.50	172.80	64.00	
7	9.807	174.70	194.10	54.50	
8	9.807	175.10	165.30	64.00	
9	9.807	171.10	168.80	64.20	
10	9.807	183.20	186.50	54.20	
11	49.03	370.30	366.80	68.20	61.50
12	49.03	386.80	394.40	60.70	
13	49.03	384.20	375.00	64.30	
14	49.03	380.00	384.90	63.30	
15	49.03	397.00	397.00	58.80	
16	49.03	366.20	365.90	69.10	
17	49.03	405.90	399.40	57.10	
18	49.03	403.60	399.20	57.50	
19	49.03	400.80	393.60	58.70	
20	49.03	402.80	401.30	57.30	
21	98.07	583.60	583.80	54.40	65.64
22	98.07	547.90	532.60	63.50	
23	98.07	526.80	520.30	67.60	
24	98.07	519.30	527.60	67.60	
25	98.07	539.20	537.80	63.90	
26	98.07	525.00	504.10	70.00	
27	98.07	526.00	530.70	66.40	
28	98.07	524.20	519.80	68.00	
29	98.07	548.00	556.80	60.70	
30	98.07	502.40	496.60	74.30	

*Ver figura 5.4.3 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-1.

Tabla 5.4. 14. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-2

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	180.50	177.60	57.80	61.11
2	9.807	175.70	165.60	63.60	
3	9.807	174.10	170.10	62.60	
4	9.807	180.80	175.70	58.30	
5	9.807	154.10	156.90	76.60	
6	9.807	181.10	186.00	55.00	
7	9.807	179.80	174.20	59.10	
8	9.807	182.30	183.40	55.40	
9	9.807	185.20	187.20	53.40	
10	9.807	162.80	164.30	69.30	
11	49.03	420.50	428.30	51.40	52.41
12	49.03	467.80	473.00	41.90	
13	49.03	389.10	388.90	61.20	
14	49.03	421.00	417.40	52.70	
15	49.03	344.80	352.60	76.20	
16	49.03	461.80	434.40	46.10	
17	49.03	428.50	430.20	50.20	
18	49.03	428.50	416.40	51.90	
19	49.03	445.60	449.30	46.30	
20	49.03	450.70	444.70	46.20	
21	98.07	620.00	611.10	48.90	50.75
22	98.07	647.00	638.50	44.80	
23	98.07	610.20	622.90	48.70	
24	98.07	601.90	570.60	53.90	
25	98.07	627.40	615.30	48.00	
26	98.07	648.30	647.80	44.10	
27	98.07	633.40	631.70	46.30	
28	98.07	579.30	582.00	55.00	
29	98.07	575.90	569.60	56.50	
30	98.07	546.50	553.50	61.30	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	180.30	181.70	56.60	59.18
2	9.807	179.70	174.30	59.10	
3	9.807	156.30	165.70	71.50	
4	9.807	175.10	173.50	61.00	
5	9.807	168.60	161.30	68.10	
6	9.807	184.30	179.30	56.10	
7	9.807	178.40	178.30	58.20	
8	9.807	175.90	179.70	58.60	
9	9.807	196.40	189.00	49.90	
10	9.807	189.70	185.30	52.70	
11	49.03	418.60	418.00	52.90	51.47
12	49.03	464.20	457.10	43.60	
13	49.03	430.30	421.60	51.10	
14	49.03	395.90	389.30	60.10	
15	49.03	410.70	424.50	53.10	
16	49.03	416.50	425.10	52.30	
17	49.03	441.10	446.10	47.10	
18	49.03	427.90	431.00	50.20	
19	49.03	384.00	385.60	62.60	
20	49.03	467.60	475.40	41.70	
21	98.07	537.30	544.60	63.30	49.32
22	98.07	667.30	665.00	41.70	
23	98.07	670.40	664.30	41.60	
24	98.07	602.80	596.80	51.50	
25	98.07	593.50	597.20	52.30	
26	98.07	563.30	568.50	57.90	
27	98.07	588.80	600.10	52.40	
28	98.07	596.60	621.00	50.00	
29	98.07	693.00	682.00	39.20	
30	98.07	656.80	650.80	43.30	

*Ver figura 5.4.4 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-2.

Tabla 5.4. 15. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-3.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	192.10	188.20	51.20	54.87
2	9.807	192.90	192.90	49.80	
3	9.807	182.50	178.20	57.00	
4	9.807	169.60	170.00	64.30	
5	9.807	192.20	192.60	50.00	
6	9.807	182.80	180.40	56.20	
7	9.807	186.20	179.10	55.50	
8	9.807	196.30	199.80	47.20	
9	9.807	177.70	171.90	60.60	
10	9.807	178.60	182.40	56.90	
11	49.03	400.10	393.00	58.90	56.24
12	49.03	419.90	422.60	52.20	
13	49.03	364.00	352.00	72.30	
14	49.03	394.60	387.50	60.60	
15	49.03	364.50	359.50	70.70	
16	49.03	405.60	396.50	57.60	
17	49.03	455.80	452.20	44.90	
18	49.03	429.50	431.60	50.00	
19	49.03	463.70	451.20	44.30	
20	49.03	428.40	424.60	50.90	
21	98.07	620.40	630.10	47.40	47.29
22	98.07	800.90	818.20	28.20	
23	98.07	593.30	607.80	51.40	
24	98.07	577.40	551.30	58.20	
25	98.07	606.60	599.60	50.90	
26	98.07	646.60	627.40	45.70	
27	98.07	542.90	567.60	60.10	
28	98.07	694.50	683.20	39.00	
29	98.07	638.10	619.80	46.80	
30	98.07	637.20	642.50	45.20	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm2)
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	
1	9.807	183.60	179.40	56.20	56.08
2	9.807	164.60	169.40	66.40	
3	9.807	168.10	173.50	63.50	
4	9.807	164.70	170.50	66.00	
5	9.807	188.20	182.60	53.90	
6	9.807	210.70	212.50	41.40	
7	9.807	184.40	176.60	56.90	
8	9.807	172.10	177.40	60.70	
9	9.807	201.90	195.10	47.00	
10	9.807	200.80	188.80	48.80	
11	49.03	450.30	447.20	46.00	52.33
12	49.03	428.90	424.80	50.80	
13	49.03	428.60	428.60	50.40	
14	49.03	369.90	365.20	68.60	
15	49.03	429.70	425.50	50.70	
16	49.03	449.30	444.70	46.40	
17	49.03	408.00	397.70	57.10	
18	49.03	399.80	415.10	55.80	
19	49.03	428.40	437.10	49.50	
20	49.03	427.60	450.80	48.00	
21	98.07	537.90	548.50	62.80	49.33
22	98.07	592.20	600.90	52.10	
23	98.07	790.60	831.30	28.10	
24	98.07	531.90	542.90	64.20	
25	98.07	605.80	598.60	51.10	
26	98.07	517.00	516.50	69.40	
27	98.07	666.60	661.20	42.00	
28	98.07	752.50	752.70	32.70	
29	98.07	641.10	623.90	46.30	
30	98.07	646.70	642.70	44.60	

*Ver figura 5.4.5 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-3.

Tabla 5.4. 16. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-4.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	(kgf/mm2)
1	9.807	173.80	165.10	64.50	60.16
2	9.807	163.80	160.90	70.30	
3	9.807	180.20	181.60	56.60	
4	9.807	176.80	174.10	60.20	
5	9.807	168.90	161.20	68.00	
6	9.807	175.50	174.80	60.40	
7	9.807	195.10	198.60	47.80	
8	9.807	177.90	179.40	58.10	
9	9.807	177.10	173.70	60.20	
10	9.807	181.50	183.90	55.50	
11	49.03	345.50	347.90	77.10	63.36
12	49.03	395.20	398.00	58.90	
13	49.03	361.70	378.60	67.60	
14	49.03	367.20	351.60	71.70	
15	49.03	382.20	395.10	61.30	
16	49.03	537.20	568.50	30.30	
17	49.03	345.60	347.40	77.20	
18	49.03	392.00	398.20	59.30	
19	49.03	387.90	374.70	63.70	
20	49.03	377.20	369.20	66.50	
21	98.07	637.70	623.90	46.60	57.83
22	98.07	472.20	477.60	82.20	
23	98.07	577.90	584.60	54.80	
24	98.07	581.40	582.80	54.70	
25	98.07	588.40	569.00	55.30	
26	98.07	538.00	520.50	66.20	
27	98.07	594.20	577.60	54.00	
28	98.07	559.20	568.50	58.30	
29	98.07	559.80	568.80	58.20	
30	98.07	625.10	617.90	48.00	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	(kgf/mm2)
1	9.807	159.50	147.10	78.90	60.60
2	9.807	165.40	162.70	68.90	
3	9.807	176.20	178.70	58.80	
4	9.807	173.40	171.90	62.20	
5	9.807	170.80	166.70	65.10	
6	9.807	172.30	171.10	62.90	
7	9.807	306.80	327.60	18.40	
8	9.807	165.70	164.70	67.90	
9	9.807	174.70	175.70	60.40	
10	9.807	173.50	170.90	62.50	
11	49.03	409.00	409.50	55.30	56.17
12	49.03	496.20	473.80	39.40	
13	49.03	393.40	384.80	61.20	
14	49.03	370.10	360.30	69.50	
15	49.03	395.00	392.80	59.70	
16	49.03	367.70	362.20	69.60	
17	49.03	403.90	406.60	56.40	
18	49.03	431.30	439.20	48.90	
19	49.03	444.10	456.80	45.60	
20	49.03	397.00	415.80	56.10	
21	98.07	566.00	554.60	59.00	56.37
22	98.07	560.70	561.00	58.90	
23	98.07	581.80	601.70	52.90	
24	98.07	506.80	497.30	73.50	
25	98.07	627.80	638.50	46.20	
26	98.07	528.80	535.10	65.50	
27	98.07	597.90	599.30	51.70	
28	98.07	582.30	571.60	55.70	
29	98.07	724.20	718.90	35.60	
30	98.07	539.30	531.00	64.70	

*Ver figura 5.4.6 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-4.

Tabla 5.4. 17. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-5.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	170.10	170.50	63.90	61.87
2	9.807	178.40	189.30	54.80	
3	9.807	169.90	163.10	66.80	
4	9.807	152.90	158.90	76.20	
5	9.807	181.00	184.50	55.50	
6	9.807	173.90	179.90	59.20	
7	9.807	182.70	183.70	55.20	
8	9.807	166.50	162.60	68.40	
9	9.807	188.50	183.90	53.40	
10	9.807	170.50	166.40	65.30	
11	49.03	385.90	387.20	62.00	56.39
12	49.03	503.70	507.60	36.20	
13	49.03	390.00	387.10	61.40	
14	49.03	362.50	363.00	70.40	
15	49.03	433.30	432.60	49.40	
16	49.03	354.40	370.70	70.50	
17	49.03	482.00	482.90	39.80	
18	49.03	420.30	422.50	52.20	
19	49.03	392.20	398.10	59.30	
20	49.03	381.00	388.00	62.70	
21	98.07	510.90	517.50	70.10	48.90
22	98.07	649.60	656.00	43.50	
23	98.07	760.90	819.50	29.60	
24	98.07	999.90	915.30	20.20	
25	98.07	638.30	633.00	45.80	
26	98.07	663.90	682.40	40.90	
27	98.07	554.20	572.10	58.40	
28	98.07	550.00	567.90	59.30	
29	98.07	526.90	522.70	67.30	
30	98.07	587.60	585.10	53.90	

*Ver figura 5.4.7 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-5.

Tabla 5.4. 18. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-6.

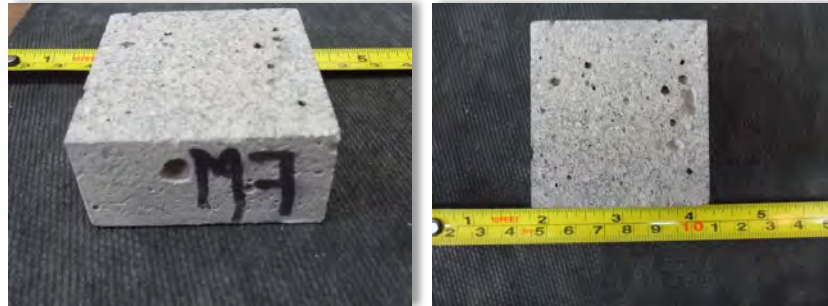
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
1	9.807	197.10	197.10	47.70	46.71
2	9.807	214.80	211.20	40.80	
3	9.807	192.00	196.00	49.20	
4	9.807	163.90	166.00	68.10	
5	9.807	199.10	198.70	46.80	
6	9.807	265.90	286.20	24.30	
7	9.807	259.80	263.50	27.00	
8	9.807	185.10	178.00	56.20	
9	9.807	185.60	184.60	54.10	
10	9.807	190.00	184.20	52.90	
11	49.03	793.70	774.90	15.00	42.99
12	49.03	824.90	930.50	12.00	
13	49.03	531.50	531.00	32.80	
14	49.03	544.20	547.70	31.10	
15	49.03	552.90	563.30	29.70	
16	49.03	393.10	391.10	60.30	
17	49.03	298.50	285.20	108.80	
18	49.03	510.70	518.70	34.90	
19	49.03	542.60	520.80	32.70	
20	49.03	353.00	361.40	72.60	
21	98.07	524.70	522.50	67.60	43.89
22	98.07	578.90	626.00	51.00	
23	98.07	605.80	590.30	51.80	
24	98.07	584.60	609.80	51.90	
25	98.07	597.10	583.60	53.20	
26	98.07	703.70	720.50	36.50	
27	98.07	699.40	709.70	37.30	
28	98.07	999.90	999.90	18.50	
29	98.07	744.50	786.70	31.60	
30	98.07	683.30	686.00	39.50	
1	9.807	185.20	188.20	53.20	56.30
2	9.807	191.20	180.60	53.60	
3	9.807	168.90	178.80	61.30	
4	9.807	229.40	225.80	35.70	
5	9.807	168.70	173.70	63.20	
6	9.807	169.80	166.20	65.70	
7	9.807	176.20	180.40	58.30	
8	9.807	180.90	177.30	57.80	
9	9.807	229.80	229.40	35.10	
10	9.807	152.10	154.10	79.10	
11	49.03	729.10	695.00	18.20	42.71
12	49.03	467.20	486.80	40.70	
13	49.03	542.10	551.80	30.90	
14	49.03	436.90	444.10	47.70	
15	49.03	471.50	488.00	40.20	
16	49.03	437.20	437.90	48.40	
17	49.03	432.00	443.70	48.30	
18	49.03	409.20	410.90	55.10	
19	49.03	598.50	594.80	26.00	
20	49.03	358.90	360.50	71.60	
21	98.07	859.30	851.60	25.30	39.08
22	98.07	999.90	999.90	18.50	
23	98.07	751.90	805.90	30.50	
24	98.07	633.00	631.30	46.40	
25	98.07	587.50	593.60	53.10	
26	98.07	623.30	635.90	46.70	
27	98.07	614.30	604.90	49.90	
28	98.07	927.20	933.90	21.40	
29	98.07	672.60	672.60	40.90	
30	98.07	565.40	563.60	58.10	

*Ver figura 5.4.8 para la grafica de las durezas Vickers sobre la matriz de M-6.

Tabla 5.4. 19. *Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-7.

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	(kgf/mm2)
1	9.807	327.90	351.90	16.00	35.16
2	9.807	432.20	421.90	10.10	
3	9.807	187.60	177.40	55.60	
4	9.807	194.30	189.00	50.40	
5	9.807	221.40	216.30	38.70	
6	9.807	214.50	213.50	40.40	
7	9.807	405.20	417.40	10.90	
8	9.807	202.10	208.20	44.00	
9	9.807	200.90	197.00	46.80	
10	9.807	220.90	216.80	38.70	
11	49.03	491.50	499.70	37.70	34.91
12	49.03	526.70	542.00	32.40	
13	49.03	405.20	416.80	54.80	
14	49.03	528.10	528.80	33.20	
15	49.03	769.40	759.10	15.80	
16	49.03	515.60	500.10	35.90	
17	49.03	473.30	467.60	41.80	
18	49.03	538.10	546.50	31.50	
19	49.03	421.70	433.10	50.70	
20	49.03	784.90	772.00	15.30	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV
	N	D1	D2	(kgf/mm2)	(kgf/mm2)
1	9.807	183.00	184.80	54.80	35.95
2	9.807	185.80	181.80	54.80	
3	9.807	203.30	218.20	41.70	
4	9.807	270.80	276.70	24.70	
5	9.807	291.80	295.70	21.40	
6	9.807	268.50	263.60	26.10	
7	9.807	240.40	238.90	32.20	
8	9.807	206.80	212.70	42.10	
9	9.807	190.50	197.20	49.30	
10	9.807	189.30	201.10	48.60	
11	9.807	233.50	240.50	33.00	22.80
12	9.807	308.70	313.40	19.10	
13	9.807	216.00	215.20	39.80	
14	9.807	283.10	272.20	24.00	
15	9.807	259.80	257.70	27.60	
16	49.03	929.00	933.30	10.60	
17	49.03	959.10	870.50	11.00	
18	49.03	526.00	500.00	35.20	
19	49.03	507.60	538.40	33.80	
20	49.03	999.40	942.10	9.80	
21	49.03	498.30	489.70	37.90	
22	49.03	719.10	716.70	17.90	
23	49.03	914.50	881.90	11.40	
24	49.03	813.00	818.30	13.90	
25	49.03	447.30	445.30	46.50	



a)

b)

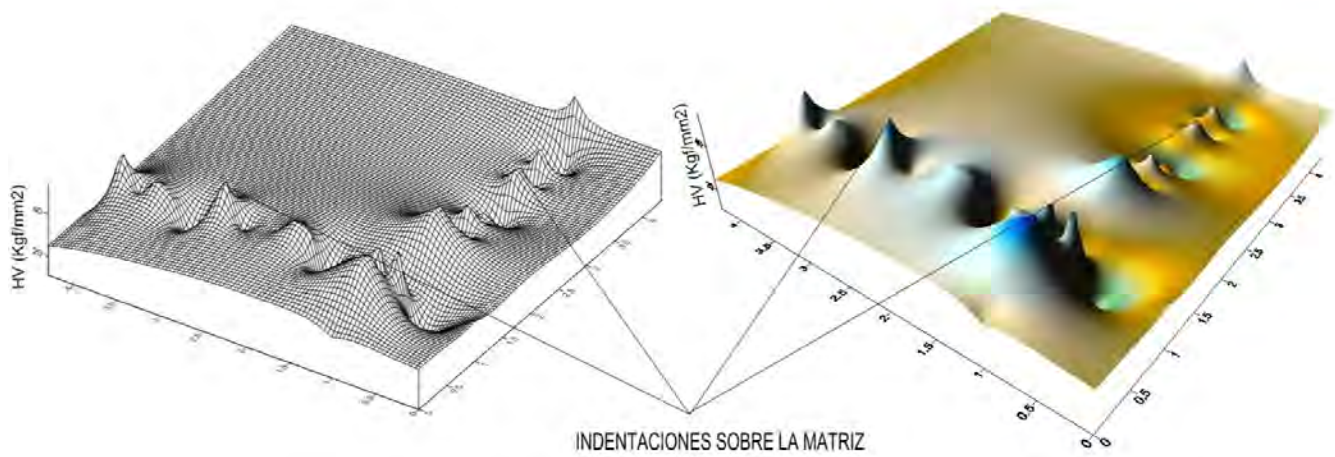


Figura 5.4. 18. a) y b) Imágenes de la muestra M-7 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-7.

Tabla 5.4. 20. Resultado de las indentaciones sobre la matriz de la M-8.

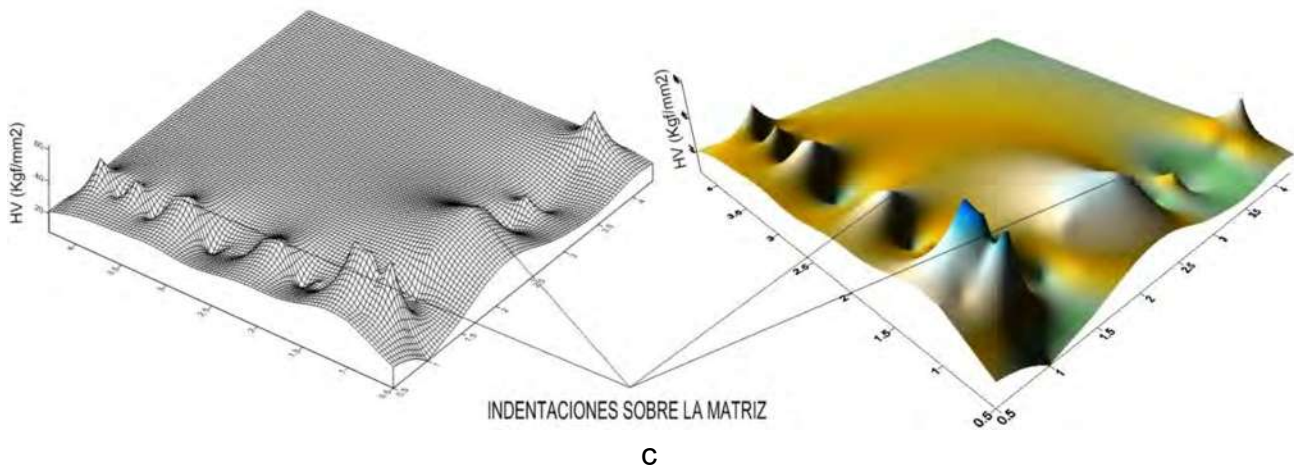
No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	459.70	477.20	8.40	36.83
2	9.807	289.00	280.90	22.80	
3	9.807	172.40	169.10	63.60	
4	9.807	173.40	174.40	61.30	
5	9.807	168.90	172.80	63.50	
6	9.807	296.20	279.70	22.30	
7	9.807	263.50	254.90	27.60	
8	9.807	325.00	334.60	17.00	
9	9.807	203.10	208.90	43.60	
10	9.807	223.00	217.60	38.20	
11	49.03	617.30	661.20	22.60	27.05
12	49.03	652.10	647.20	21.90	
13	49.03	848.50	865.80	12.60	
14	49.03	454.60	461.40	44.20	
15	49.03	485.90	482.50	39.50	
16	49.03	851.90	829.80	13.10	
17	49.03	480.30	478.90	40.30	
18	49.03	702.90	668.30	19.70	
19	49.03	472.10	448.90	43.70	
20	49.03	846.00	845.80	12.90	

No	Load	Diagonal(μm)		HV	PROMEDIO HV (kgf/mm ²)
	N	D1	D2	(kgf/mm ²)	
1	9.807	225.20	218.50	37.60	35.45
2	9.807	225.70	226.40	36.20	
3	9.807	202.20	199.50	45.90	
4	9.807	309.20	287.20	20.80	
5	9.807	297.60	275.70	22.50	
6	9.807	341.30	345.10	15.70	
7	9.807	215.70	215.20	39.90	
8	9.807	218.20	194.70	43.50	
9	9.807	205.80	199.30	45.20	
10	9.807	196.20	200.00	47.20	
11	49.03	477.30	479.10	40.50	21.54
12	49.03	752.10	696.80	17.60	
13	49.03	825.80	837.90	13.30	
14	49.03	584.10	567.50	27.90	
15	49.03	999.90	999.90	9.20	
16	49.03	925.40	931.10	10.70	
17	49.03	808.10	791.80	14.40	
18	49.03	666.40	708.30	19.60	
19	49.03	438.20	450.40	46.90	
20	49.03	762.20	791.70	15.30	



a)

b)



c)

Figura 5.4. 19. a) y b) Imágenes de la muestra M-8 para la indentación; c) grafico de las durezas Vickers, tanto en el agregado como en la matriz de la muestra M-8.

Después de haber visto todos los resultados de las indentaciones de la matriz, para poder tener una mejor visualización de las durezas, se promediaron los valores de las indentaciones en cada carga. A continuación se presentan las siguientes tablas del resumen de las indentaciones y algunas figuras de las huellas de las indentaciones como se mostró en el caso de las indentaciones sobre el agregado.

Tabla 5.4. 21. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-1.

M-1	RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	61.70	62.73	62.22	0.61	
5	49.03	61.71	61.50	61.60	0.59	
10	98.07	61.77	65.64	63.71	0.63	

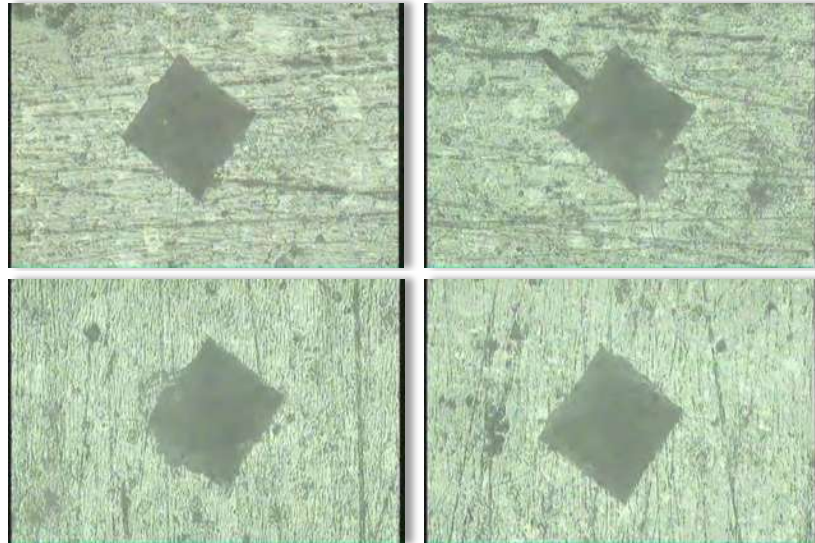


Figura 5.4. 20. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-1.

Tabla 5.4. 22. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-2.

RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ						
M-2	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
	1	9.81	61.11	59.18	60.14	0.59
5	49.03	52.41	51.47	51.94	0.51	
10	98.07	50.75	49.32	50.04	0.49	

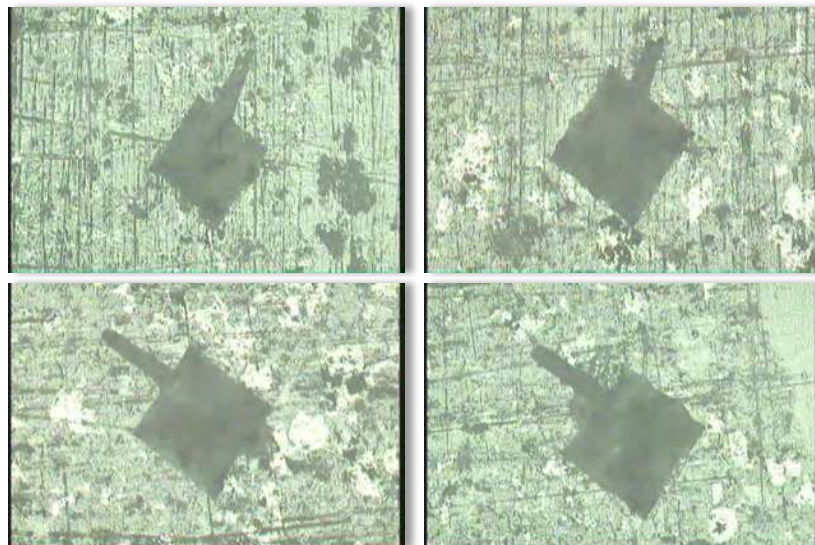


Figura 5.4. 21. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-2.

Tabla 5.4. 23. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-3.

M-3	RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	54.87	56.08	55.48	0.54	
5	49.03	56.24	52.33	54.29	0.53	
10	98.07	47.29	49.33	48.31	0.47	

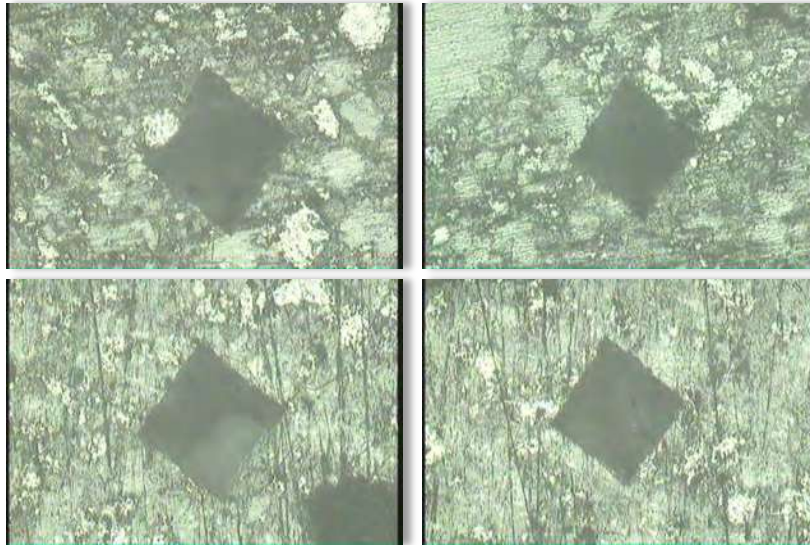
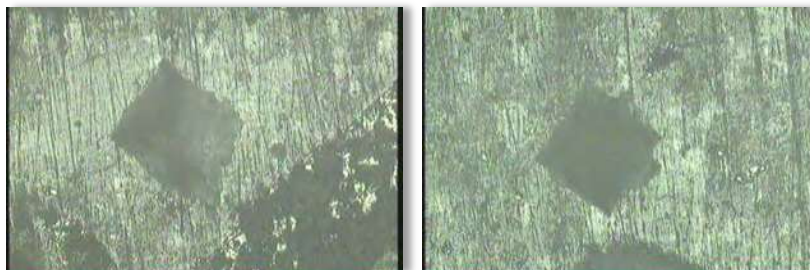


Figura 5.4. 22. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-3.

Tabla 5.4. 24. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-4.

M-4	RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	60.16	60.60	60.38	0.59	
5	49.03	63.36	56.17	59.76	0.59	
10	98.07	57.83	56.37	57.10	0.56	



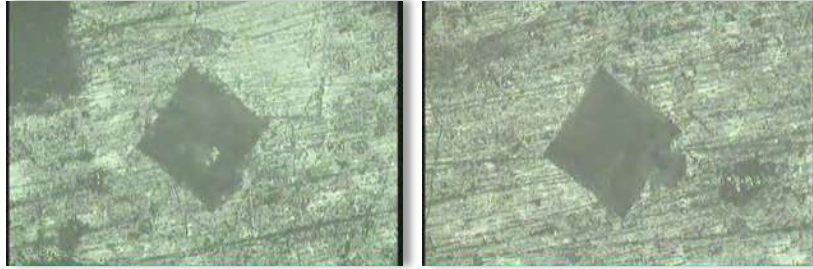


Figura 5.4. 23. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-4.

Tabla 5.4. 25. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-5.

M-5	RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	58.45	61.87	60.16	0.59	
5	49.03	47.71	56.39	52.05	0.51	
10	98.07	41.67	48.90	45.29	0.44	

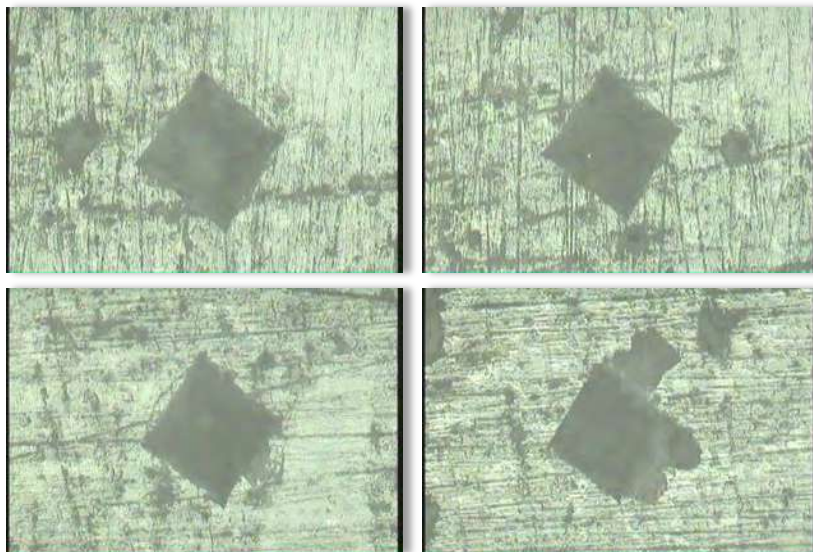


Figura 5.4. 24. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-5.

Tabla 5.4. 26. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-6.

M-6	RESUMEN INDENTACIONES EN LA MATRIZ					
	Kgf	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV(N/mm2)
			1	2		
1	9.81	46.71	56.30	51.50	0.51	
5	49.03	42.99	42.71	42.85	0.42	
10	98.07	43.89	39.08	41.49	0.41	

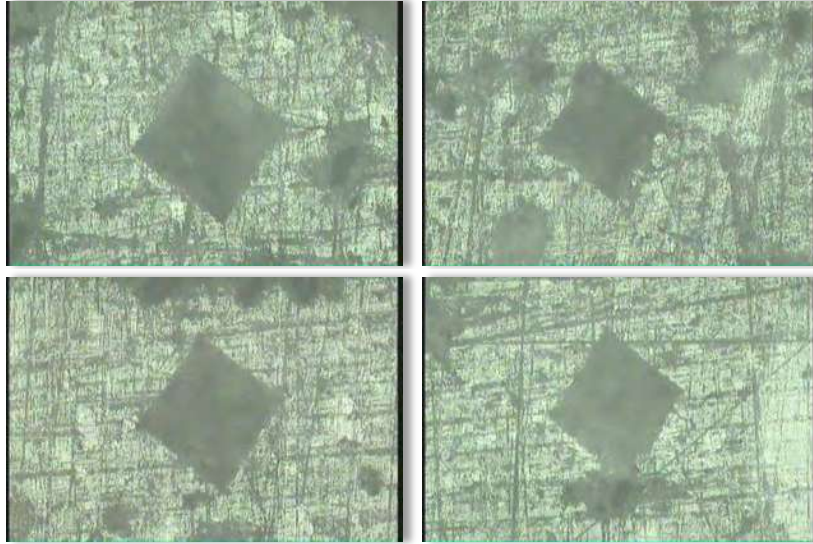


Figura 5.4. 25. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-6.

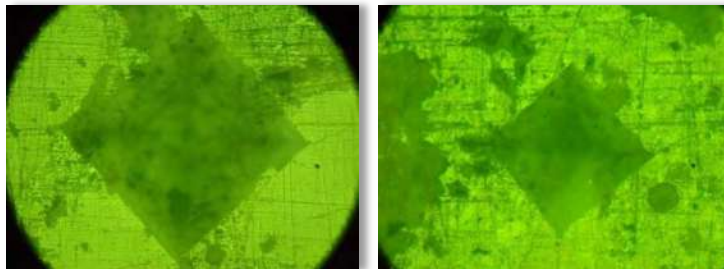


Figura 5.4. 26. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-6.

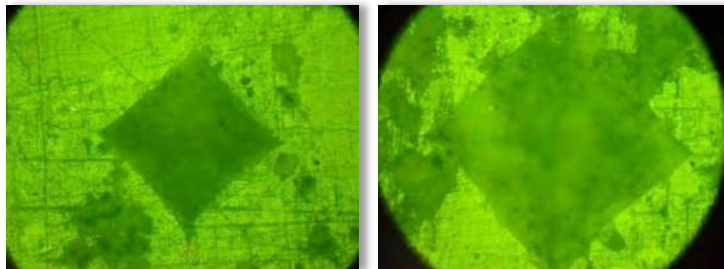


Figura 5.4. 27. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 10kgf (98.07N) en la matriz de la M-6.

Tabla 5.4. 27. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-7.

M-7	RESUMEN INDENTACIONES LA MATRIZ					
	CARGA (Kgf)	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV (N/mm2)
			1	2		
1	9.81	35.16	35.95	35.55	0.35	
5	49.03	34.91	22.80	28.86	0.28	

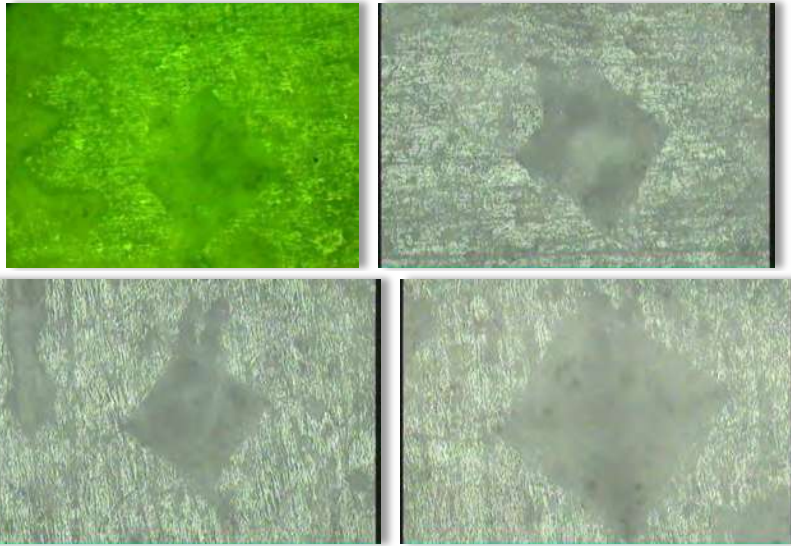


Tabla 5.4. 28. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-7.

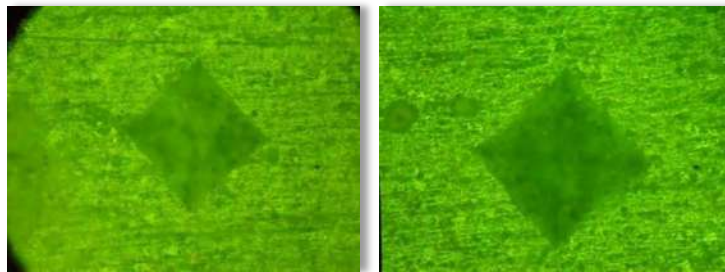
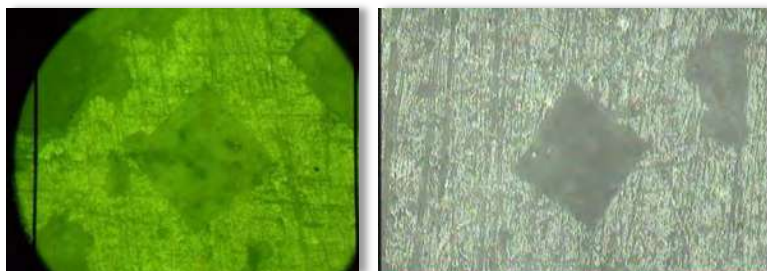


Figura 5.4. 28. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-7.

Tabla 5.4. 29. Resumen del promedio de las indentaciones en la M-8.

M-8	RESUMEN INDENTACIONES LA MATRIZ					
	CARGA (Kgf)	CARGA (N)	HV(Kgf/mm2)		PROMEDIO	HV (N/mm2)
			1	2		
1	9.81	36.83	35.45	36.14	0.35	
5	49.03	27.05	21.54	24.30	0.24	



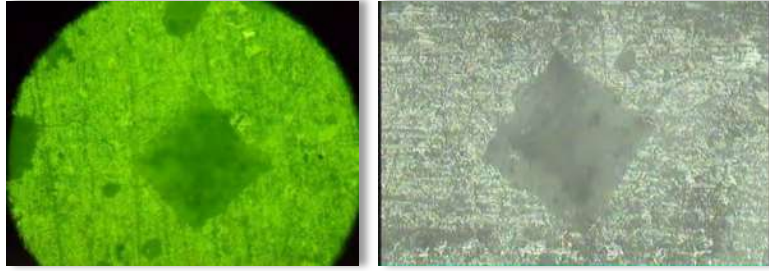


Figura 5.4. 29. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 1kgf (9.807N) en la matriz de la M-8.

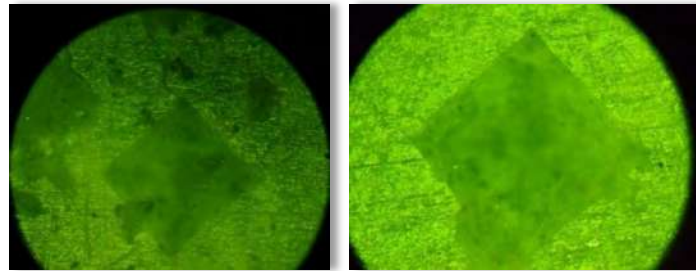


Figura 5.4. 30. Imagen de las huellas del indentador con una carga de 5kgf (49.03N) en la matriz de la M-8.

Después de haber visto los resultados anteriores y los distintos tipos de huellas, se presentará en la imagen 5.4.31 una grafica comparativa de los resultados de todas las composiciones y así poder observar la variación de las durezas Vickers.

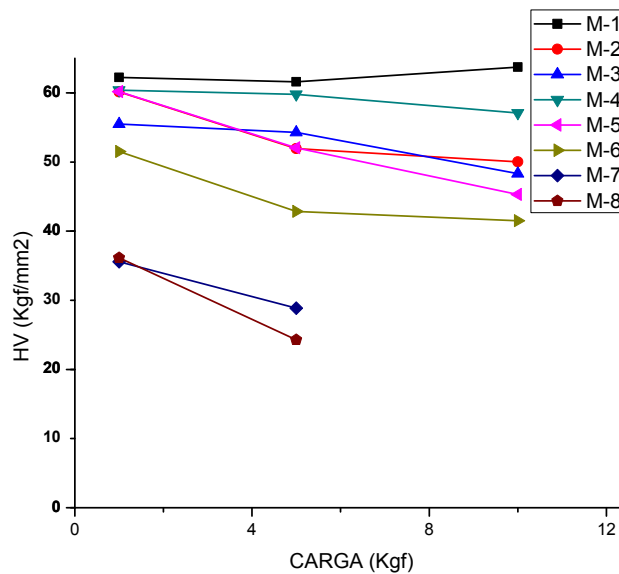


Figura 5.4. 31. Grafica comparativa de las durezas Vickers en la matriz de cada una de las muestras a diferentes cargas.

En este momento, con los resultados antes mostrados, no sabemos bien cuál es el comportamiento de nuestro material. Para poder conocer al menos que rango de dureza presenta nuestro material, se prosiguió a hacer indentaciones sobre un cristal con dimensiones de 10x10x0.9 cm y sobre un piso cerámico, con dimensiones de 10x10x0.5 cm. Se sometieron a las mismas cargas de indentación que las muestras del mortero autocompactable. En la figura 5.4.32 se muestra la imagen del cristal y del piso cerámico previo al ensayo.



Figura 5.4. 32. Cristal de 9mm de espesor y piso cerámico de 5mm de espesor.

Cabe mencionar que en el caso de piso cerámico, solo se pudieron hacer indentaciones con cargas de 1Kgf (9.807N) y 5Kgf (49.03N), esto es debido a que con cargas mayores la huella no era fácil percibir, por la fractura excesiva presentada.

A continuación en la tabla 5.4.30 se presenta el resumen de las indentaciones del vidrio y en la figura 5.4.33 y 5.4.34 se puede ver la imagen de las huellas del indentador sobre el vidrio.

Tabla 5.4. 30. Resumen de las indentaciones sobre el vidrio de 10x10x0.9 cm.

RESUMEN INDENTACIONES SOBRE CRISTAL DE 9mm DE ESPESOR							
CARGA (kgf)	CARGA (N)	HV (Kgf/mm²)					PROMEDIO
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	
1	9.807	384.44	367.92	362.74	361.84	367.94	368.98
5	49.03	454.04	449.84	447.94	442.22	441.78	447.16
10	98.07	481.54	470.10	464.70	457.42	459.20	466.59

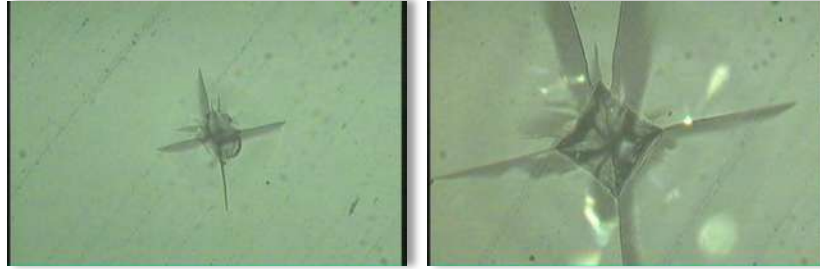


Figura 5.4. 33. Imagen de las huellas del indentador sobre el vidrio, con cargas de 1kgf (9.897N) y 5kgf (49.03N).

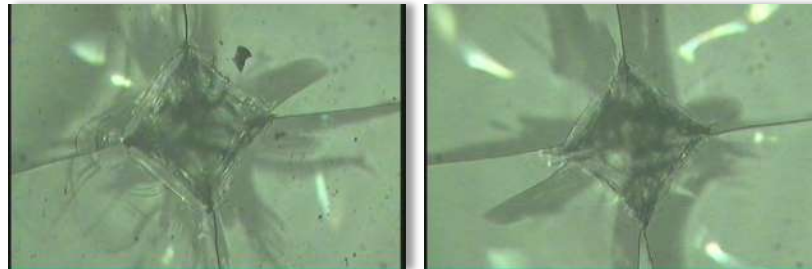


Figura 5.4. 34. Imagen de las indentaciones sobre el cristal con 10kgf (98.07N).

Una vez visto los resultados de las indentaciones sobre el vidrio, ahora se presentan los resultados de las indentaciones sobre el piso cerámico. En la tabla 5.4.31 se muestra el resumen de las indentaciones realizadas. En este caso no se tienen datos de indentaciones con la carga de 10kgf (98.07N), porque el material a esta carga presentaba una fractura excesiva. En la figura 5.4.35 y 5.4.36 se presentan las imágenes de las huellas del indentador en el piso cerámico.

Tabla 5.4. 31. Resumen de las indentaciones sobre el piso cerámico de 10x10x0.5cm.

RESUMEN INDENTACIONES SOBRE CRISTAL DE 9mm DE ESPESOR							
CARGA (kgf)	CARGA (N)	HV (Kgf/mm ²)					PROMEDIO
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	
1	9.807	395.06	416.62	434.64	414.80	427.56	417.74
5	49.03	405.64	458.42	486.96	471.98	466.10	457.82

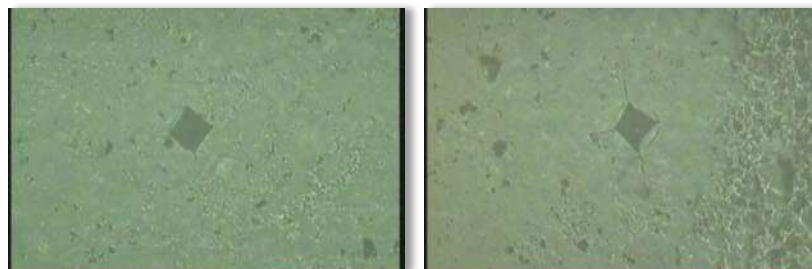


Figura 5.4. 35. Imagen de las huellas sobre el piso cerámico a una carga de 1kgf (9.807N)

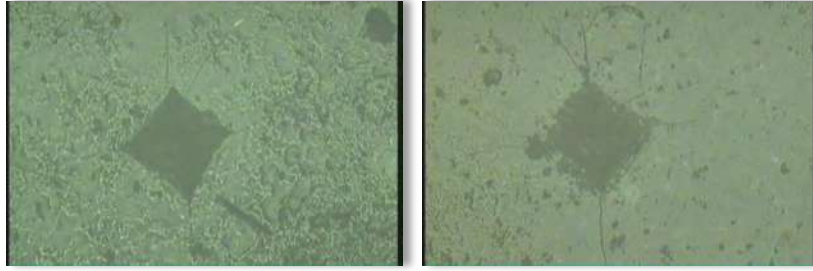


Figura 5.4. 36. Imagen de las huellas sobre el piso cerámico a una carga de 5kgf (49.03N).

De los resultados presentados anteriormente, en la figura 5.4.37 y 5.4.38 se presentan las graficas comparativas con los resultados obtenidos sobre las muestras del mortero autocompactable, agregado y matriz.

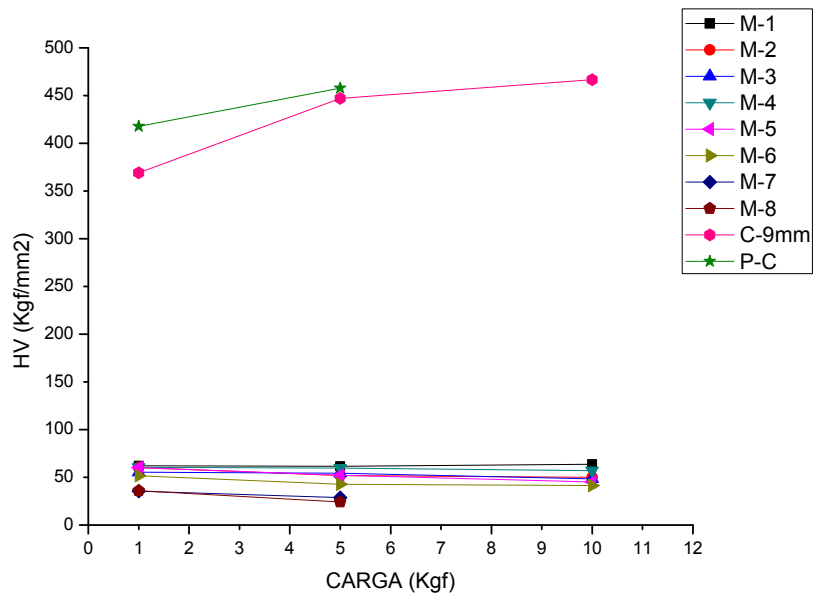


Figura 5.4. 37. Grafica comparativa de los resultados de las indentaciones sobre la matriz del MAC con los del cristal y del piso cerámico.

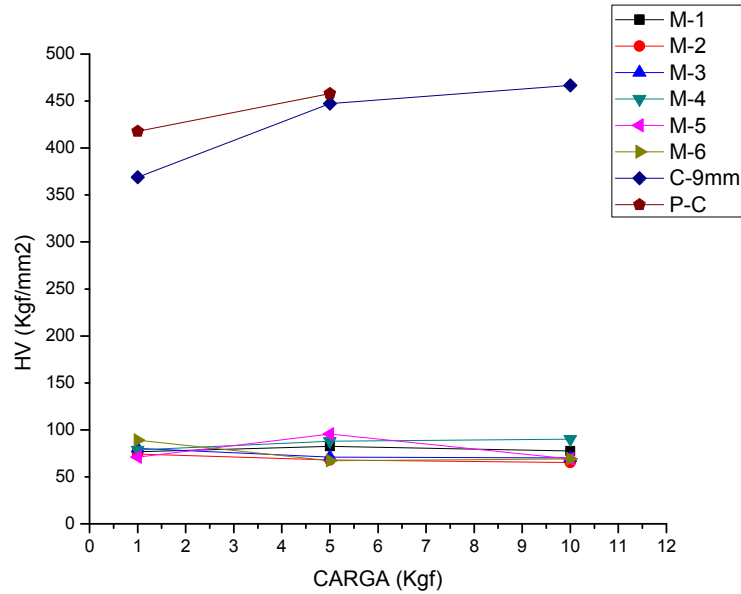


Figura 5.4. 38. Grafica comparativa de los resultados de las indentaciones sobre el agregado del MAC con los del cristal y del piso cerámico.

En la figura 5.4.37 se puede observar la comparación de dureza Vickers realizadas en la matriz del mortero autocompactable con el piso cerámico y el cristal, donde se puede ver que las durezas de los MAC están muy por debajo del grado de dureza del piso cerámico y el cristal. De igual manera de la figura 5.4.38 se hizo la comparación de las durezas Vickers realizados en el agregado de los MAC con el piso cerámico y el cristal.

De las figuras antes mostradas, se puede decir que los MAC, además de presentar unas resistencias altas a compresión, no tienen un comportamiento similar al del cristal, ya que no se presentaron grietas radiales como en el caso del cristal y el piso cerámico.

5.5. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL MAC

5.5.1. SEM

Para la elaboración de las muestras para el microscopio electrónico de barrido se tuvieron que elaborar unas muestras en cajitas de petri. Se elaboraron tres para cada composición (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, M-8) como se muestra en la figura 5.5.1.

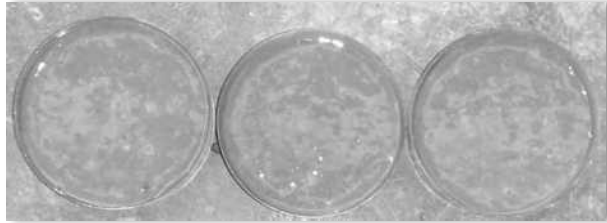


Figura 5.5. 1. Elaboración de las muestras en cajas de petri.

Después estos especímenes fueron sometidos a un proceso de secado en el horno por 3 días a 50°C, como se puede ver en la figura 5.5.2, ya que estos estaban en un proceso de curado, estando sumergidos en agua.



Figura 5.5. 2. Colocación de las muestras en el horno para su secado.

Una vez transcurrido los tres días, en cada una de las pastillas se tuvieron que labrar tres cubitos (aproximadamente 1cm³), preferentemente tomados de la parte central de cada pastilla, y después de ello, solo se seleccionaba un cubito de para cada composición. En la figura 5.5.3 se pueden ver los cubitos labrados y la selección de una sola muestra de cada composición.



Figura 5.5. 3. Labrado de los cubitos y la selección de la mejor muestra.

El criterio de selección que se tomo, fue del que presentara al menos una de sus caras lo más plano posible, sin oquedades y sin presencia de poros notorios a simple vista, ya que el barrido, solo se hará en una de las caras de cada muestra seleccionada. Una vez seleccionado la mejor muestra para cada composición, se prosiguió a sumergir en alcohol las ocho muestras seleccionadas, esto con la finalidad de parar por completo la hidratación. Las muestras fueron sumergidas en alcohol en un periodo de 4 días, antes de sumergirlas en alcohol, las muestras tenían 165 días de edad. En la figura 5.5.4 se muestran las imágenes del proceso de saturación en alcohol de las muestras seleccionadas.



Figura 5.5. 4. Saturación de las muestras en alcohol.

Una vez cumplido los días de saturación en alcohol, las muestras fueron colocados en bolsas para evitar el contacto con la humedad ambiente. Después, estos fueron cubiertos con una película delgada de oro para su estudio por el microscopio electrónico de barrido MEB, a este proceso se le llama *Metalización*. El equipo utilizado para el metalizado de cada una de las muestras fue de la marca DENTON VACUUM modelo DESK II. en la figura 5.5.5 se muestra la imagen del equipo utilizado y de la colocación de las muestras.



Figura 5.5. 5. Imagen del equipo metalizador DENTON VACUUM modelo DESK II y la colocación de las muestras en el metalizador.

Una vez hecho la metalización de las muestras, se debe de tener mucho cuidado con la cara del espécimen metalizado, procurando protegerlo contra el polvo y del contacto mismo con los dedos. Lo más recomendado, es colocar todas las muestras sobre una placa y mantenerlo dentro de algún contenedor antes de llevarlo a su análisis con el microscopio electrónico de barrido. El microscopio electrónico de barrido utilizado fue de la casa JEOL modelo JSM-6400. El equipo también lleva acoplado una unidad de microanálisis BRUCKER X FLASH-4010 de una resolución de 133 electrón volts, mediante la cual se representan los rayos X emitidos como un espectro EDX. Dicho equipo antes descrito es presentada en la figura 5.5.6 y 5.5.7.



Figura 5.5. 6. Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6400.



Figura 5.5. 7. Unidad de microanálisis BRUCKER X FLASH-4010, resolución 133eV.

Una vez preparada las muestras, se prosiguió a hacer el estudio de cada una de las muestras, para ello se siguió un orden.

Como inicio de nuestro estudio se tiene la muestra M-1, el cual se mostrará de nueva cuenta los elementos que lo componen y las cantidades de cada una de ellas. En la tabla 5.5.1 se mostraran los elementos que componen este mortero autocompactable. Cabe mencionar, que este es nuestro mortero autocompactable estándar o de referencia.

Tabla 5.5. 1. Dosificación del MAC M-1 (estándar)

COMPOSICIÓN	M-1
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	-
CROSS	-
PERLITA	-
R A/C	0.29
HIPERFLUIDIFICANTE PLASTOL 4000	15 gr/kg de cemento
Edad (días)	174

Al inicio del análisis de esta muestra, se tomaron unas imágenes a una baja magnificación, esto con la finalidad de buscar una zona donde se presentara una parte del agregado y de la matriz. En la figura 5.5.8 se presente la micrografía de la muestra M-1 a una magnificación de 20X.

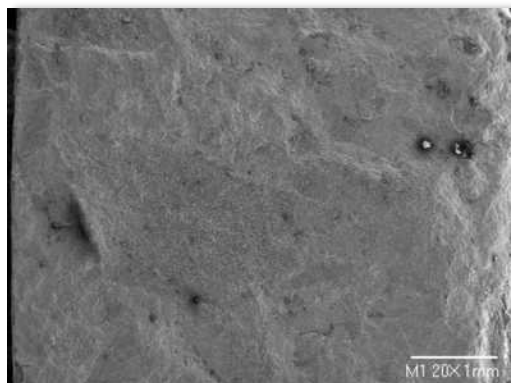


Figura 5.5. 8. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 20X.

En la micrografía anterior se puede ver que el material se presenta muy homogéneo y sin presencia de porosidad. En la figura 5.5.9 se presenta una

magnificación de la misma zona antes mostrada, esta imagen fue tomada a una magnificación de 100X. Ahora, en esta micrografía se puede distinguir con claridad la interface Matriz-Agregado y, se puede notar que hay una muy buena interface, ya que no se presenta ninguna separación entre la pasta y el agregado.

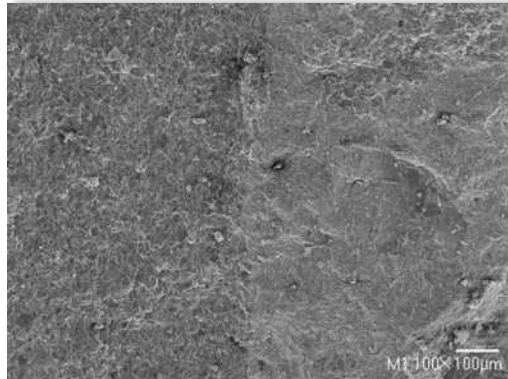


Figura 5.5. 9. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 100X.

De la figura 5.5.9. en la parte izquierda se puede ver la parte del agregado y del lado derecho se tiene la matriz del cemento. De nueva cuenta se hizo una magnificación aun mayor, esta vez fue a 500X, esto con la finalidad de cercionarnos de que hubiera una buena interface y sin presencia de porosidad. En la figura 5.5.10 se presenta la imagen de la micrografía a una magnificación de 500X.

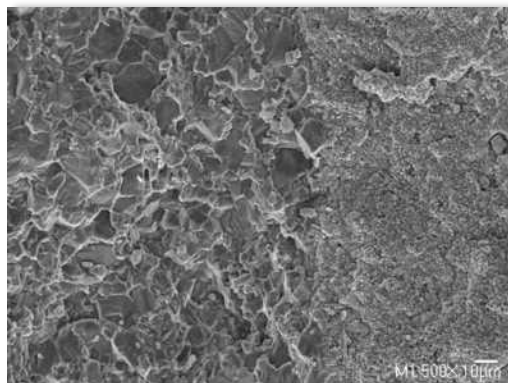
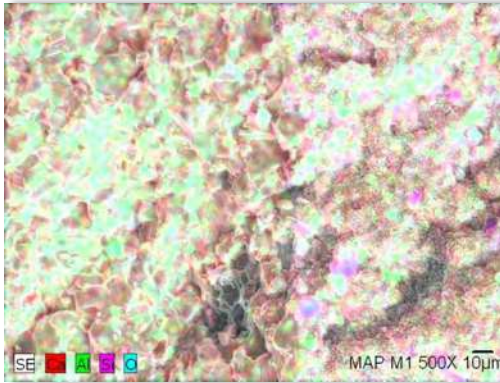
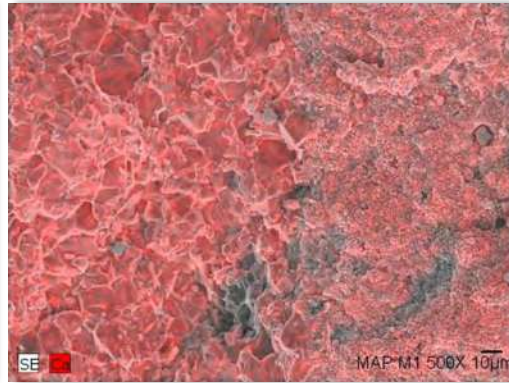


Figura 5.5. 10. Micrografía de la muestra M-1 a 500X de magnificación.

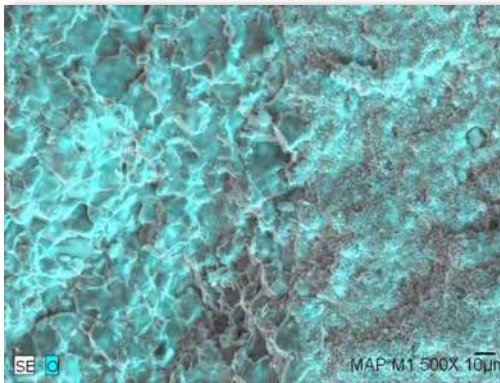
A esta misma magnificación se hizo un mapeo químico en la zona de interface matriz-agregado, para ver los elementos presentes en esa zona y su distribución. En la figura 5.5.11 se presenta el mapeo químico de la micrografía de la imagen mostrada en la figura 5.5.10. De estas imágenes se puede observar la magnitud de presencia de cada uno de los elementos.



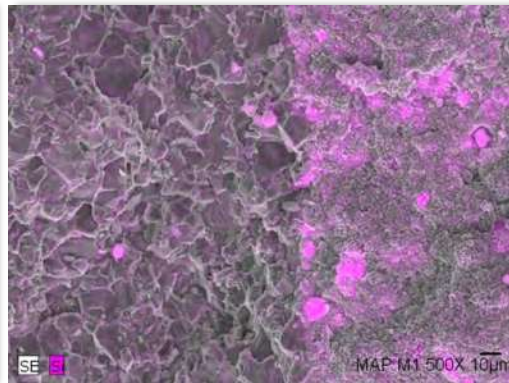
a) Distribución de todos los elementos químicos presentes en la muestra M-1



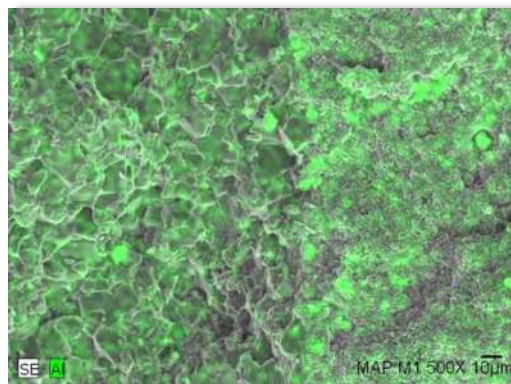
b) Distribución del calcio en la muestra M-1



c) Distribución del Oxígeno en la muestra M-1



d) Distribución del Silicio en la muestra M-1



e) Presencia del Aluminio

Figura 5.5. 11. Mapeo químico de la zona de interface Matriz-Agregado de la muestra M-1 a una magnificación de 100X; a), b), c), d) y e).

De los elementos principales que se pueden encontrar en la pasta del cemento y del agregado mineral (marmolina) son: Silicio, Calcio, Aluminio, Oxígeno. De las imágenes presentadas en la figura 5.5.11, en la imagen a) y b) se puede apreciar la cantidad de calcio presente, tanto en la matriz como en el

agregado; en las imágenes c) y d) se puede apreciar la gran presencia del oxígeno en ambos casos, pero en el caso del elemento Silicio, solo está presente en mayor cantidad en la matriz de cemento; en la imagen e) se tiene el Aluminio, donde se puede observar que se encuentra presente en la Matriz como en el Agregado, pero en menor cantidad. A continuación, se presentará un microanálisis de rayos-X para el análisis químico cualitativo, la cual se presenta los datos en la tabla 5.5.2 y su grafico en la figura 5.5.12.

Tabla 5.5. 2Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxígeno	44.561744	64.115583	81.647090	5.089417
Calcio	24.586585	35.375259	17.983507	0.754211
Silicio	0.352875	0.507718	0.368317	0.039628
Aluminio	0.001000	0.001439	0.001086	0.000026
	69.50220452	100	100	

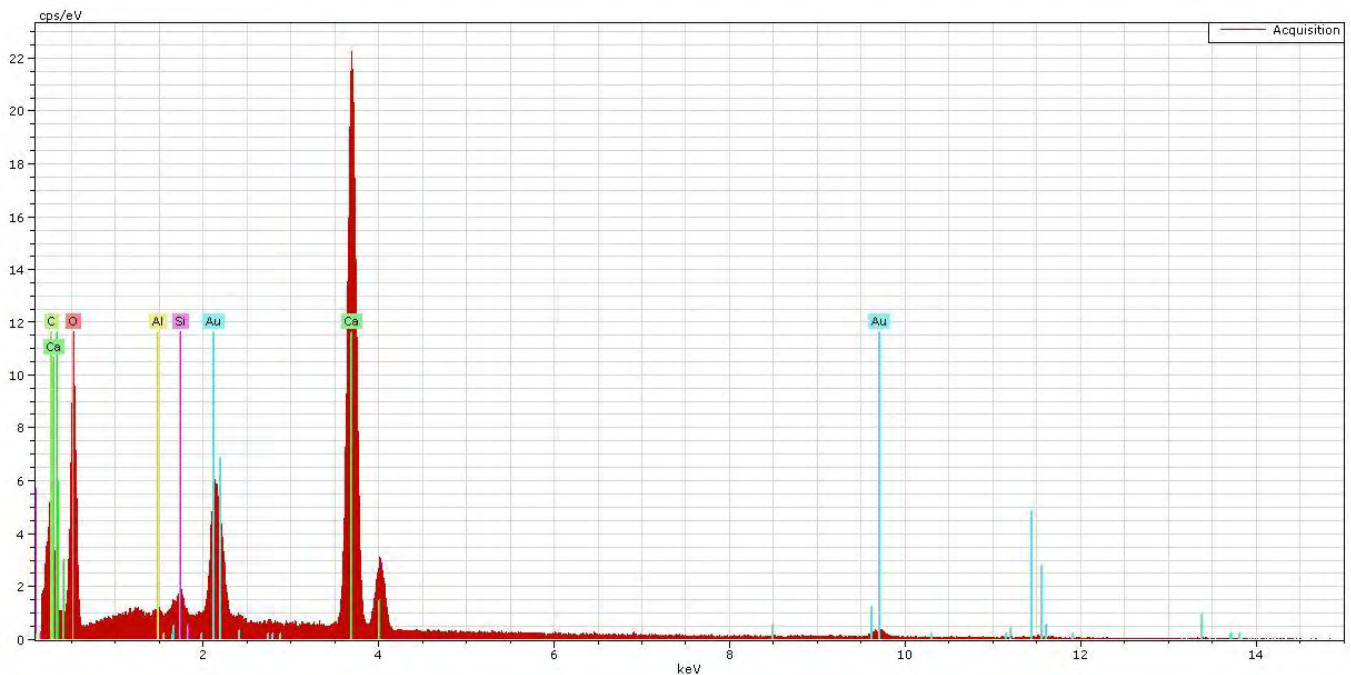


Figura 5.5. 12. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-1 a una magnificación de 500X.

Posteriormente de haber hecho este mapeo a una magnificación de 500X, se realizó otra magnificación en esa misma zona, pero ahora fue una magnificación de 2500X sobre la matriz del cemento como se muestra en la figura 5.5.13.

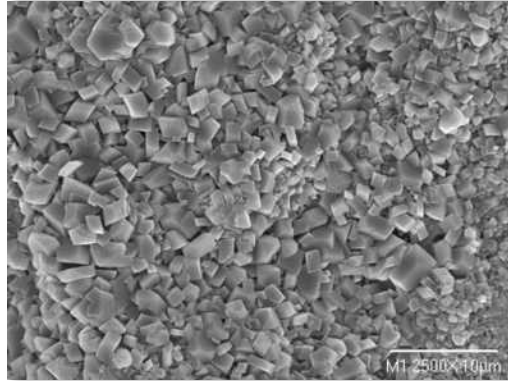
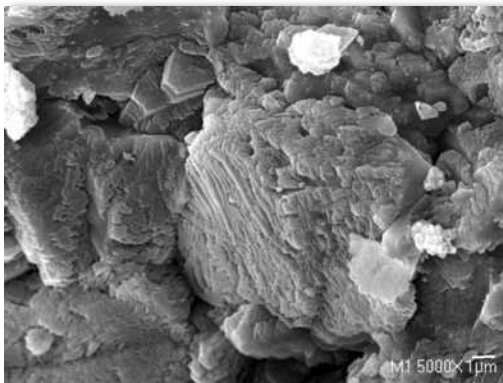


Figura 5.5. 13. Micrografía de la M-1 a una magnificación de 2500X.

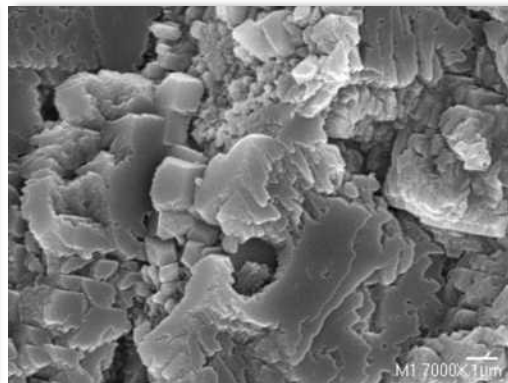
En la figura 5.5.13 se pudo observar que la matriz del cemento se encuentra muy homogéneo y compacto, además, se puede ver que solo tenemos Silicatos de Calcio Hidratados (SCH) o comúnmente conocidos como **“Gel de Tobermorita”**.

Se sabe que el **Gel de Tobermorita** es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de esta con los agregados en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de los conglomerados, por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo. ^[51]

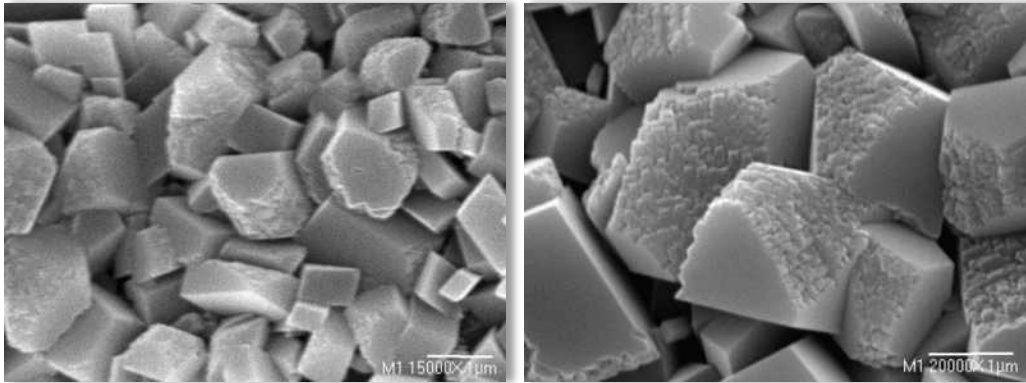
Seguidamente se muestran otras imágenes tomadas a 5000X, 7000X, 15000X y 20000X, esto con la finalidad de poder observar si entre los cristales formados por el gel de Tobermorita se tenga la presencia de algunas grietas o de la formación de etringita. En la figura 5.5.14 se muestra la imagen del gel de Tobermorita a las magnificaciones antes descritas.



a) Presencia de gel de Tobermorita a una magnificación de 5000X



b) Micrografía del gel de Tobermorita tomada a una magnificación de 7000X



c) Micrografía del gel de Tobermorita tomada a una magnificación de 15000X

d) Micrografía del gel de Tobermorita tomada a una magnificación de 20000X

Figura 5.5. 14. Micrografías de la muestra M-1 sobre cristales de gel de Tobermorita tomadas a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).

Posteriormente de estas magnificaciones no se encontró la presencia de etringita, por lo que nuestra muestra (M-1), es un mortero autocompactable compacto y muy homogéneo con una buena compacidad. En seguida presentaremos las micrografías de la muestra M-2 pero antes, se presentará en la tabla 5.5.3 los componentes de esta muestra.

Tabla 5.5. 3. Dosificación del MAC M-2.

COMPOSICIÓN	M-2
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	50% (w/w)
CARBÓN CC	-
CROSS	-
PERLITA	-
R A/C	0.35
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	173

Siguiendo la misma secuencia de análisis de la muestra M-1, se presentarán las micrografías de la muestra M-2. La primera micrografía que se hizo fue a una magnificación de 20X, con la finalidad de poder ver si hay presencia de poros, pero al igual que la muestra anterior, no se presenta porosidad. En la figura 5.5.15 se presenta la imagen tomada a una magnificación de 20X.

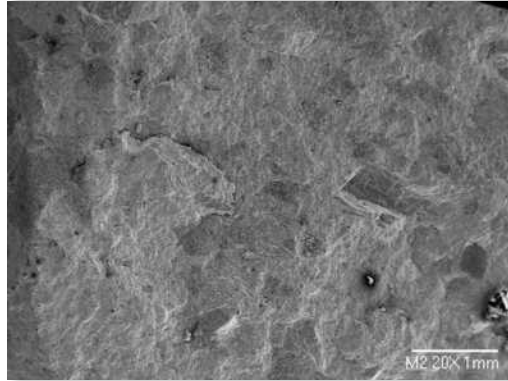


Figura 5.5. 15. Micrografía de la muestra M-2 a 20X de magnificación.

En la micrografía anterior se puede notar que hay una buena homogeneidad, pero aun no se alcanza a percibir la interface Matriz-Agregado. Para poder observar mejor la interface, se hizo una magnificación a 100X en esa misma zona, como se muestra en la figura 5.5.16.

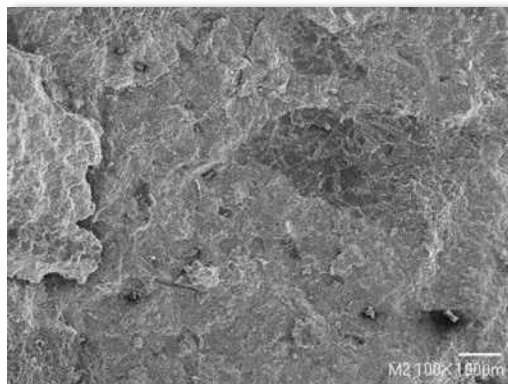
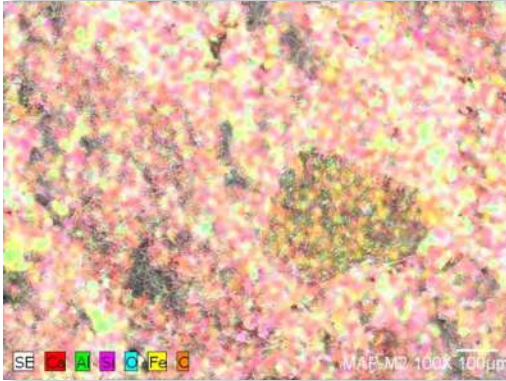
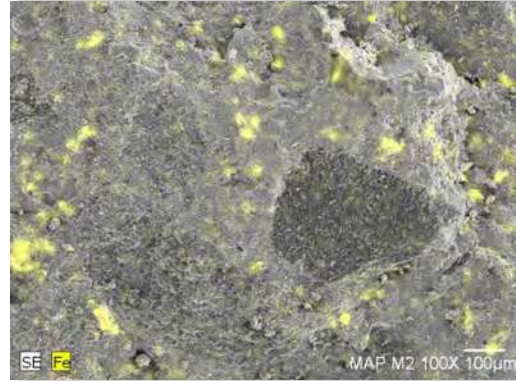


Figura 5.5. 16. Micrografía de la muestra M-2 a una magnificación de 100X.

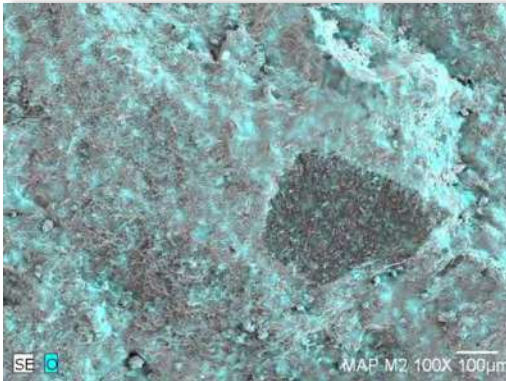
Para poder conocer bien lo que estábamos viendo en la micrografía anterior, se hizo un mapeo químico de esa zona, ya que en este caso, además de la presencia de los elementos químicos de las pasta de cemento y del agregado, tendremos la presencia de partículas de oxido de hierro. A continuación, se presentará una serie de imágenes, donde se presentan los elementos antes mencionados.



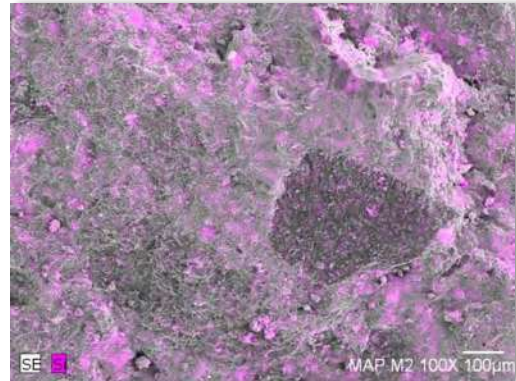
a) Distribución de todos los elementos químicos presentes en la muestra M-2



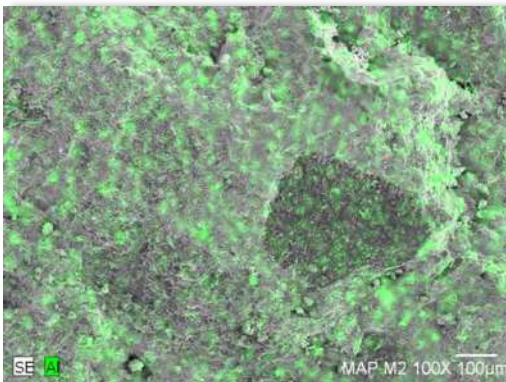
b) Distribución del Hierro en la muestra M-2



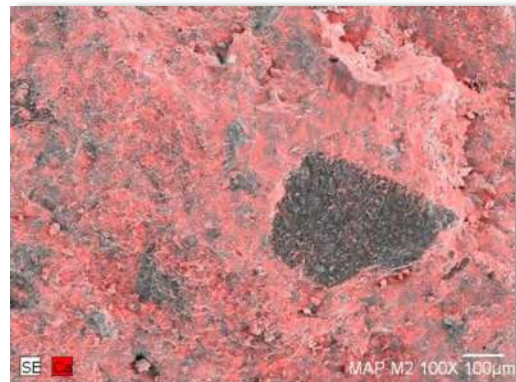
c) Distribución del Oxígeno en la muestra M-2



d) Distribución del Silicio en la muestra M-2



e) Distribución del Aluminio en la muestra M-2

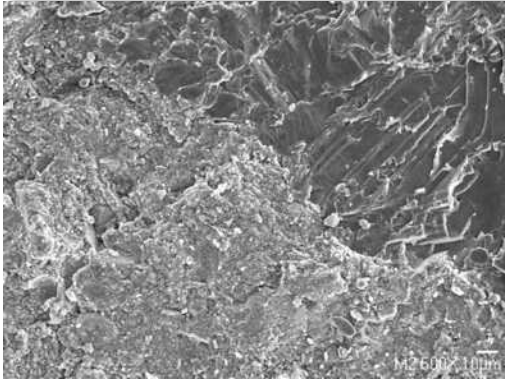


f) Distribución del calcio en la muestra M-1

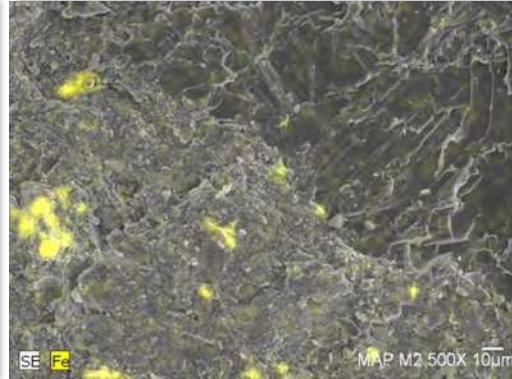
Figura 5.5. 17. Mapeo químico de la muestra M-2 a una magnificación de 100X; a) b), c) d), e) y f).

Después de esta micrografía y del mapeo químico a esta magnificación, no se aprecia muy bien la interface y además quedan algunas partes del mapeo

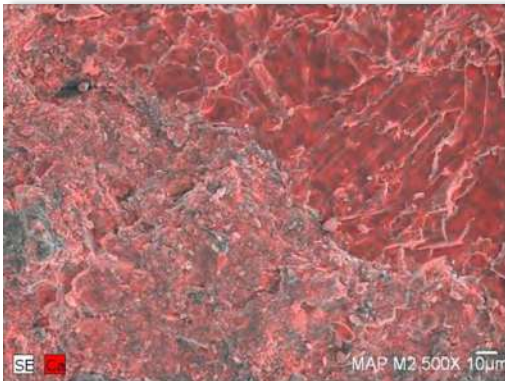
químico sin caracterizar, por esta razón se tuvo que hacer otro mapeo químico a una magnificación de 500X y, se hizo un microanálisis de rayos X para el análisis químico cualitativo, por ello se presenta la siguiente secuencia de imágenes del mapeo químico en la figura 5.5.18.



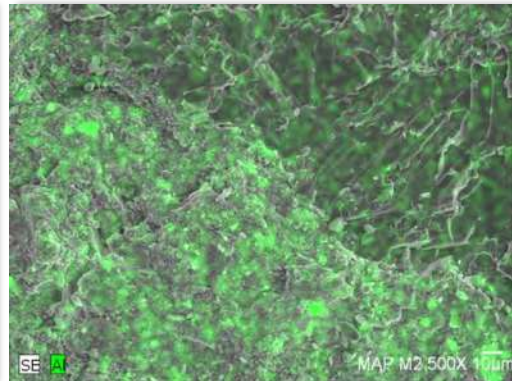
a) Micrografía de la muestra M-2 a una magnificación de 500X



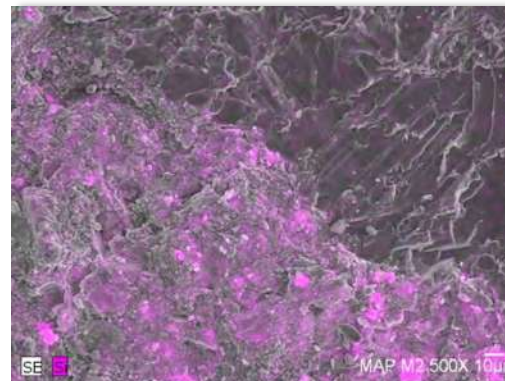
b) Distribución del Hierro en la muestra M-2



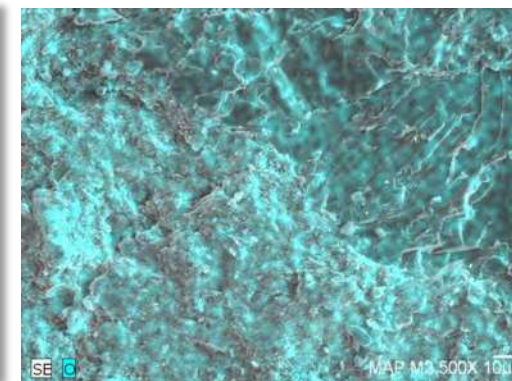
c) Distribución del Calcio en la muestra M-2



d) Distribución del Aluminio en la muestra M-2



e) Distribución del Silicio en la muestra M-2



f) Distribución del Oxígeno en la muestra M-2

Figura 5.5. 18. Mapeo químico de la muestra M-2, a una magnificación de 500X; a), b), c), d), e) y f).

De este mapeo presentado, la partícula antes vista, se trata de una partícula del agregado. Además se puede apreciar que si hay una buena interface Matriz-Agregado.

En la tabla 5.5.4 se presenta una cuantificación de los elementos químicos obtenidos del microanálisis de rayos-X, y en la figura 5.5.19 se presenta el grafico del mismo.

Tabla 5.5. 4. Cuantificación de los elementos en porcentaje, obtenidos del microanálisis (EDS).

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxígeno	42.862	63.107	80.902	5.521
Silicio	1.418	2.088	1.525	0.084
Calcio	21.996	32.385	16.574	0.677
Aluminio	0.191	0.282	0.214	0.034
Hierro	1.452	2.138	0.785	0.067
	67.920	100	100	

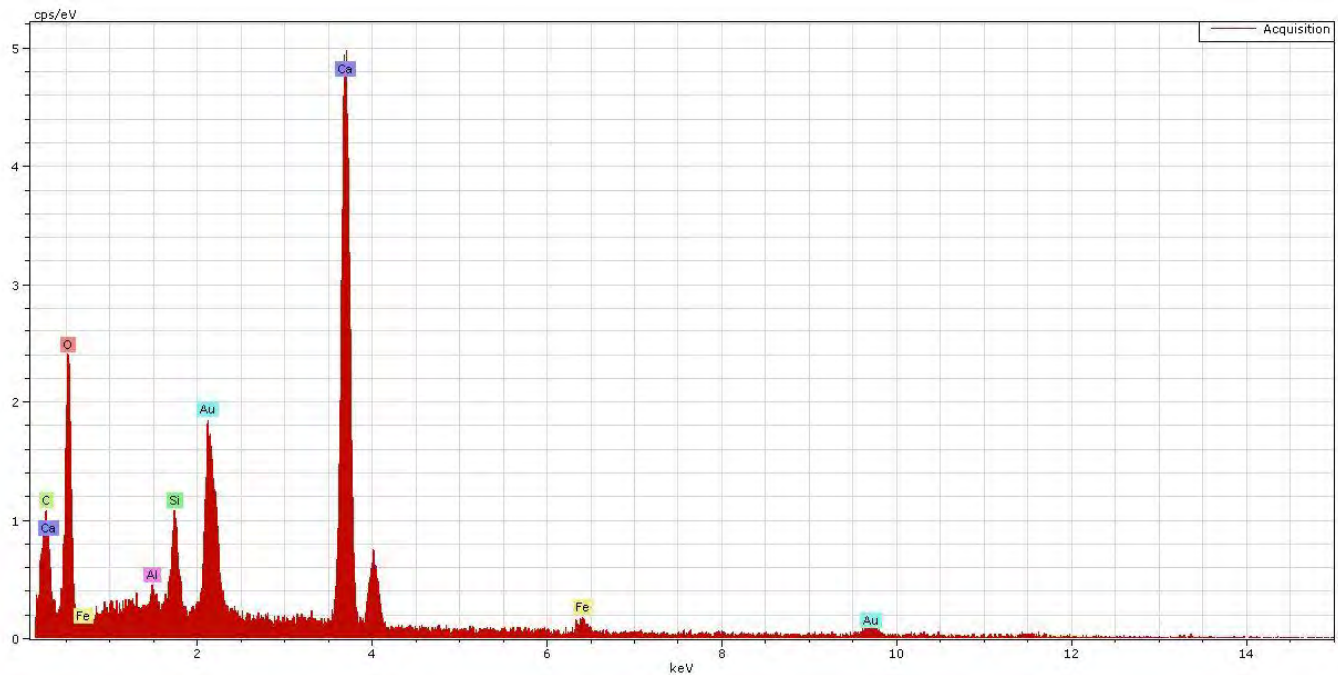


Figura 5.5. 19. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-2 a una magnificación de 500X.

Una vez visto la microestructura de la muestra M-2, ahora se analizará la muestra M-3, el cual se muestra su dosificación en la tabla 5.5.5.

Tabla 5.5. 5. Dosificación del MAC M-3

COMPOSICIÓN	M-3
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	50% (w/w)
CARBÓN CC	10% (w/w)
CROSS	-
PERLITA	-
R A/C	0.40
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	173

En la figura 5.5.20 se presenta la micrografía de la muestra M-3 a una magnificación de 20X, en donde se puede notar rápidamente la presencia macro poros con tamaños de aproximadamente de 1mm, la cual estos son generados por el aire atrapado en el interior de la masa de concreto.

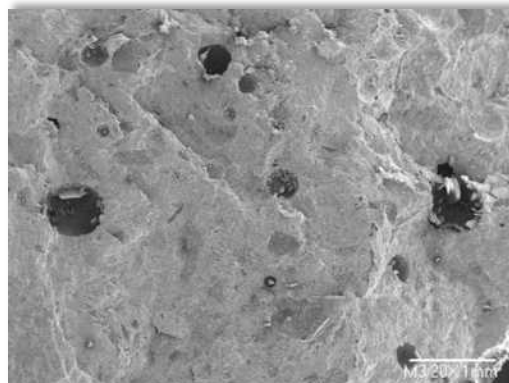


Figura 5.5. 20. Micrografía de la muestra M-3 a una magnificación de 20X.

De la figura 5.5.20 se tomo una micrografía en la zona donde se encuentra un poro de la muestra, esta fue tomada a una magnificación de 200X. Se puede observar que dentro del poro, se encuentra la formación de unos cristales de **portlandita** la cual se presenta en la figura 5.5.21.

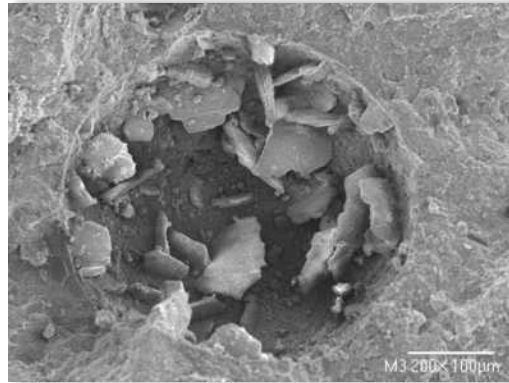
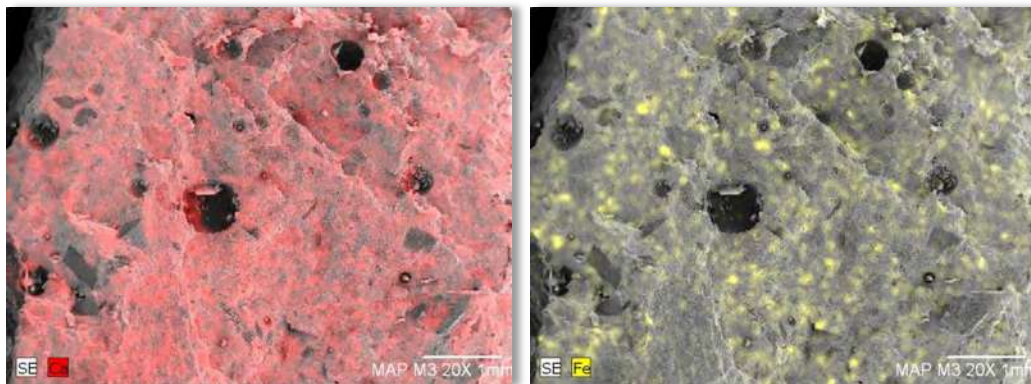


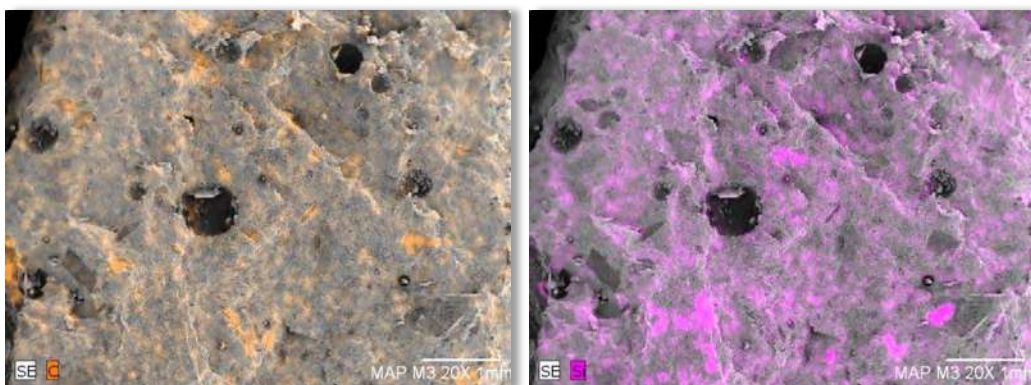
Figura 5.5. 21. Micrografía de un poro en la muestra M-3.

Ahora, se hará un mapeo químico sobre la muestra M-3 a una magnificación de 20X, la cual se presenta una serie de figuras del mapeo, mostrando la presencia de los elementos químicos antes mencionados y la del carbón que ahora será un nuevo elemento en nuestra muestra.



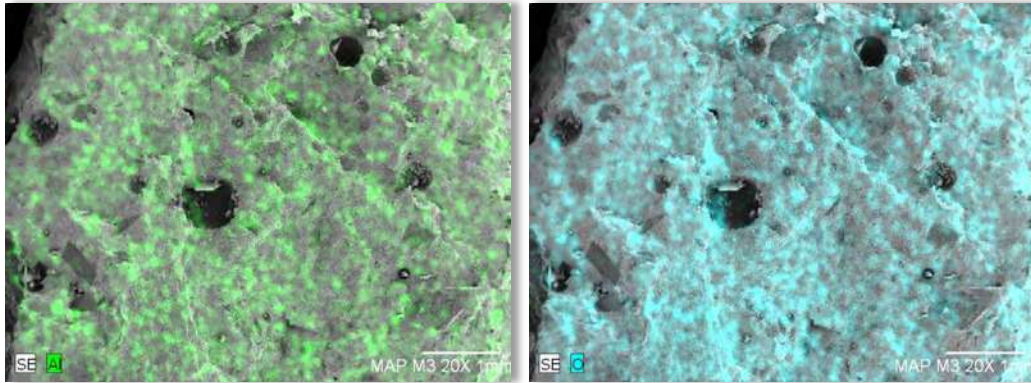
a) Distribución del Calcio en la muestra M-3

b) Distribución del Hierro en la muestra M-3



c) Distribución del Carbón en la muestra M-3

d) Distribución del Silicio en la muestra M-3



e) Distribución del Calcio en la muestra M-3

f) Distribución del Oxígeno en la muestra M-3

Figura 5.5. 22. Mapeo de la muestra M-3 a una magnificación de 20X; a), b), c), d), e) y f).

En la tabla 5.5.6 se presenta la cuantificación en porcentaje de los elementos obtenidos del microanálisis de rayos X, para el análisis químico cualitativo realizado a 100X de magnificación y, la grafica de la misma presentada en la figura 5.5.23.

Tabla 5.5. 6. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	8.2461	11.5799	18.7496	1.2282
Oxígeno	38.1140	53.5233	65.0587	5.0764
Silicio	0.9696	1.3616	0.9428	0.0652
Calcio	18.4964	25.9744	12.6039	0.5736
Hierro	5.3620	7.5298	2.6221	0.1813
Aluminio	0.0177	0.0248	0.0179	0.0008
Magnesio	0.0044	0.0062	0.0050	0.0002
	71.2101	100	100	

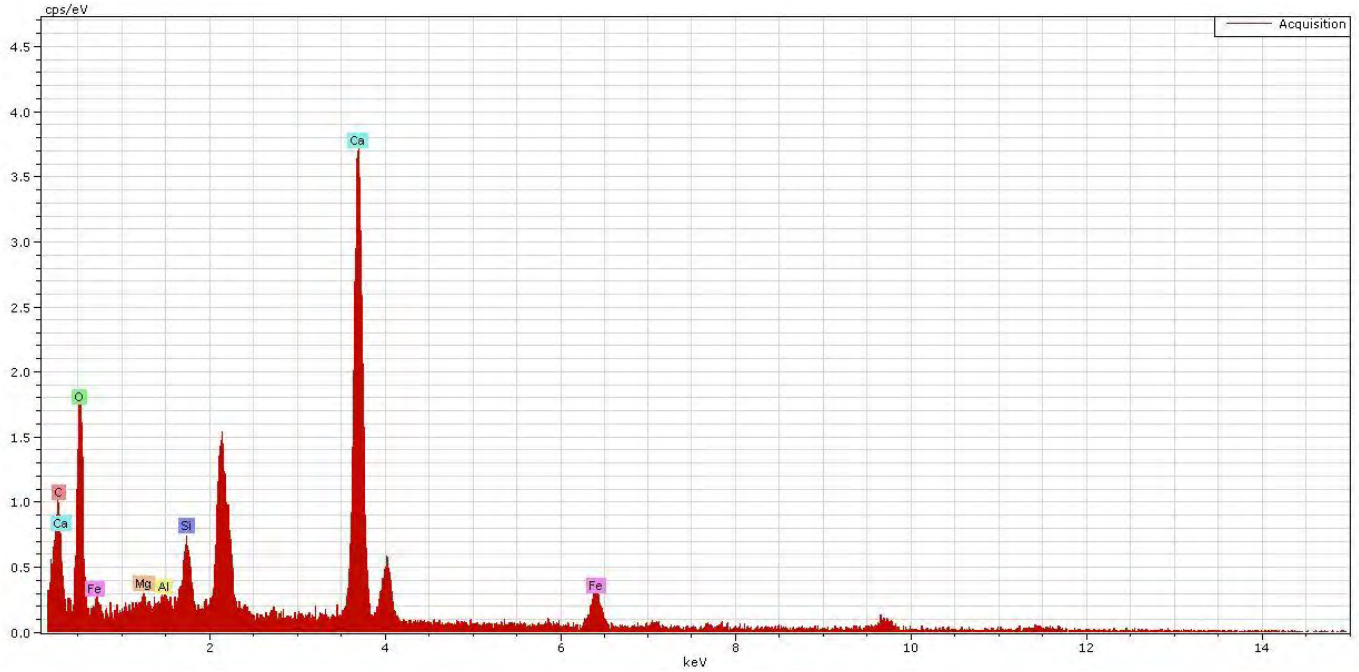
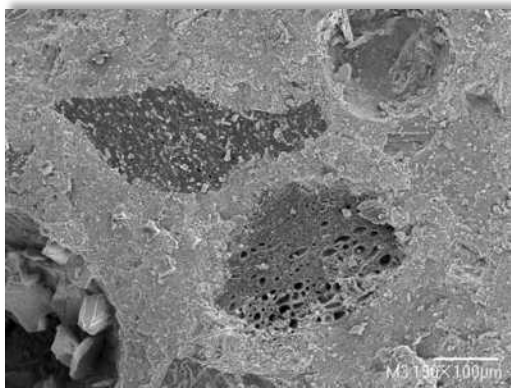
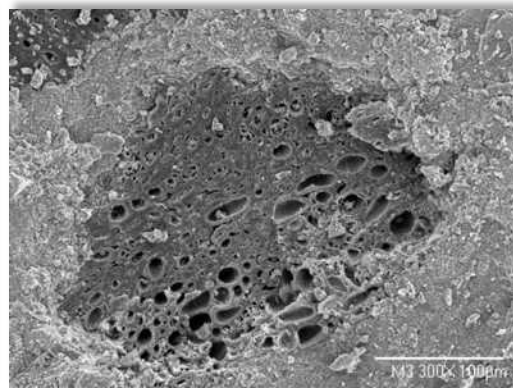


Figura 5.5. 23. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-3 a una magnificación de 100X

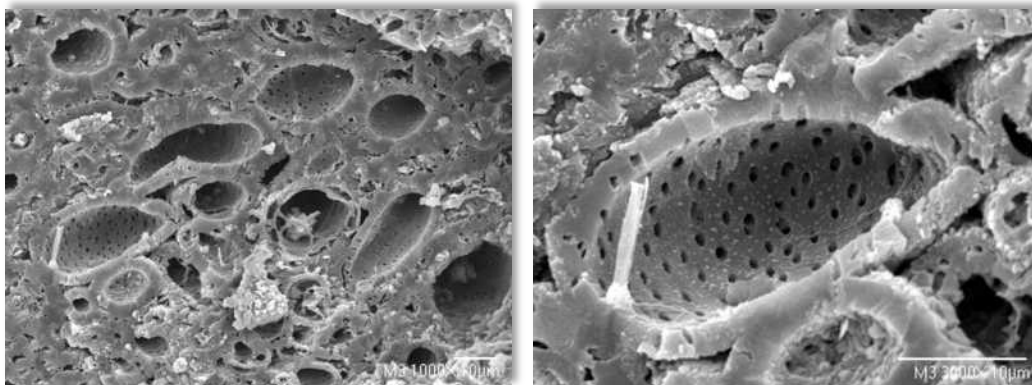
En seguida de ver el mapeo anterior, se prosiguió a hacer una micrografía sobre una de las partículas del Carbón, el cual se encontraba situado en la parte derecha del poro sobre muestra antes mostrada. En la figura 5.5.23 se muestra una imagen tomada sobre la partícula de Carbón a diferentes magnificaciones.



a) Micrografía con una magnificación de 150X



b) Micrografía con una magnificación de 300X

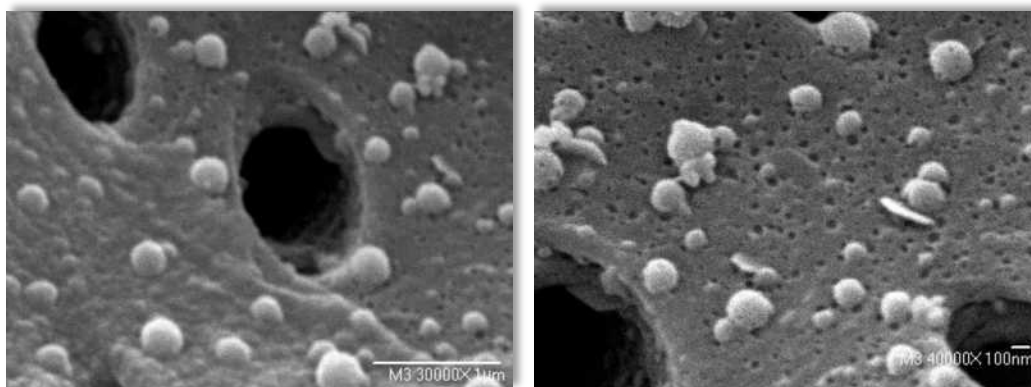


c) Micrografía con una magnificación de 1000X

b) Micrografía con una magnificación de 3000X

Figura 5.5. 24. Micrografía sobre la partícula de carbón a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).

De las imágenes mostradas en la figura 5.5.24, se puede notar que las partículas de carbón son relativamente porosas, ya que dentro de los macroporos de un tamaño aproximado de $35\mu\text{m}$ (0.04mm) se encuentran otros microporos con un diámetro aproximado de $1\mu\text{m}$ (0.001mm). Aparte de esos microporos, se tiene también la presencia de nanoporos con tamaño aproximado de 100nm (0.0001mm), para poder apreciar estos poros, se presenta la micrografía de los nanoporos del carbón en la figura 5.5.25.



a) Micrografía con una magnificación de 30000X

b) Micrografía con una magnificación de 40000X

Figura 5.5. 25. Micrografía de los poros de la partícula de carbón a diferentes magnificaciones; a) y b).

Por esta misma razón, esta muestra al momento de hacerle la prueba de absorción, tiene un porcentaje de absorción mediana. ***Pero en todos los poros encontrados, en ninguna se tenía presencia de etringita.***

Ahora tendremos el análisis de la muestra M-4, en donde se tiene un incremento en porcentaje de carbón, como se muestra en la tabla 5.5.7 la dosificación del MAC M-4.

Tabla 5.5. 7. Dosificación del MAC M-4

COMPOSICIÓN	M-4
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	15% (w/w)
CROSS	-
PERLITA	-
R A/C	0.35
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	169

En este caso ya no fue necesario hacer el mapeo químico, nada más se observó con varias micrografías algunos sitios de interés sobre la muestra. Uno de esos sitios era observar la interface Matriz-Agregado y de algunos poros.

En la figura 5.5.26 se presenta una micrografía realizada a una magnificación de 20X. En esta figura se puede notar que hay una buena interface, pero con presencia de poros.

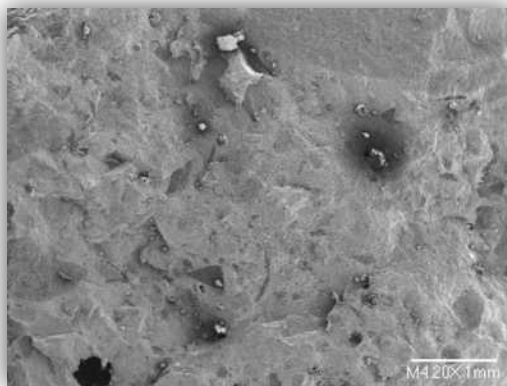
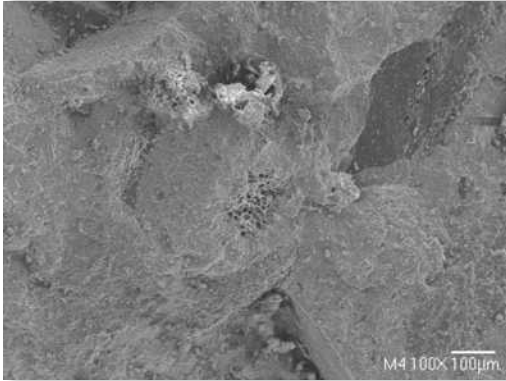
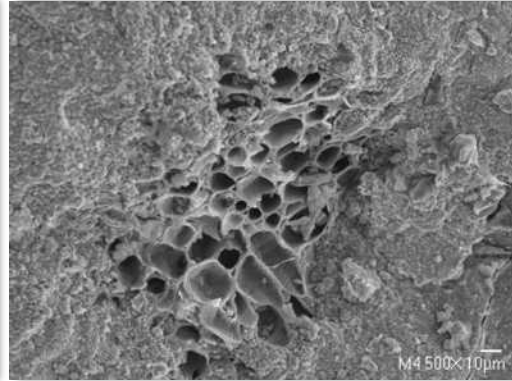


Figura 5.5. 26. Micrografía de la muestra M-4 a una magnificación de 20X.

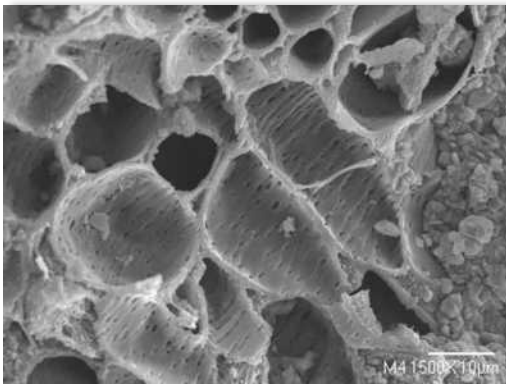
De la figura anterior se localizó una zona donde se tenía la presencia de algunas partículas de carbón, en la cual se hicieron varias micrografías a diferentes magnificaciones la cual se presenta en la figura 5.5.26.



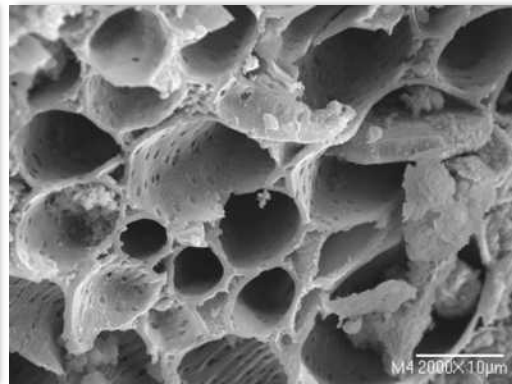
a) Micrografía a una magnificación de 100X



b) Micrografía a una magnificación de 500X



c) Micrografía a una magnificación de 1500X



d) Micrografía a una magnificación de 2000X

Figura 5.5. 27. Micrografías sobre una partícula de carbón en la muestra M-4 a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).

De esta manera, se puede ver que no se presenta una sola forma de los poros en la partícula de carbón, pero por lo general, tiene una porosidad excesiva. Siguiendo con nuestro análisis de las muestras, ahora tenemos el caso de la muestra M-5, el cual ya no se tendrá la presencia de partículas de hierro, porque en esta nueva muestra ya no se incorporará óxido de hierro, como se puede ver en la tabla 5.5.8 la dosificación de dicha muestra.

Tabla 5.5. 8. Dosificación del MAC M-5

COMPOSICIÓN	M-5
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	-
CROSS	10% (w/w)
PERLITA	-
R A/C	0.30
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	168

Las primeras micrografías que se realizaron sobre esta muestra, fueron a 20X y 100X de magnificación. Se hicieron estas micrográficas a estas magnificaciones para localizar la parte de interface Matriz-Agregado. Pero en este caso, era más importante visualizar como se presentaba la interface de la pasta de cemento con los filamentos de neumático incorporados en la mezcla. En la figura 5.5.28 se presentan las micrográficas a las magnificaciones antes mencionadas.

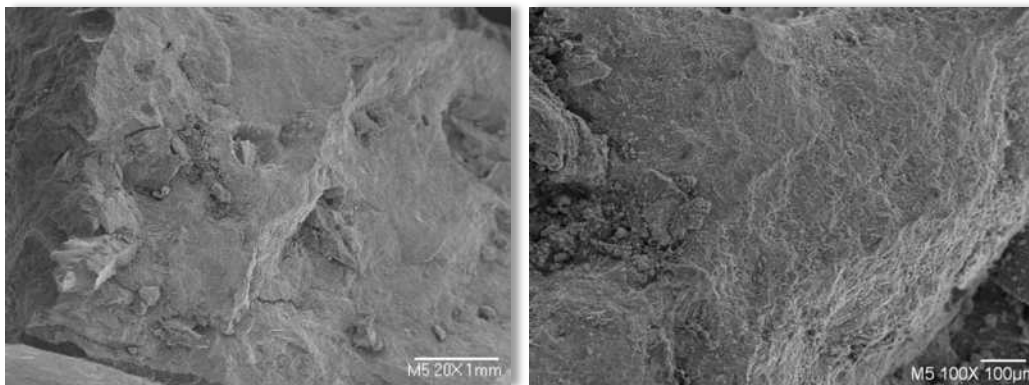
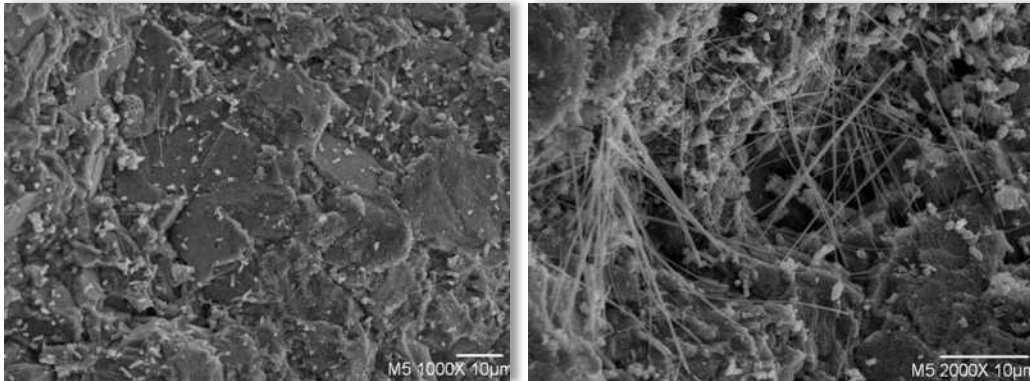
a) Micrografía a una magnificación
de 20Xb) Micrografía a una magnificación de
100X

Figura 5.5. 28. Micrografías sobre la muestra M-5 a diferentes magnificaciones; a) y b)

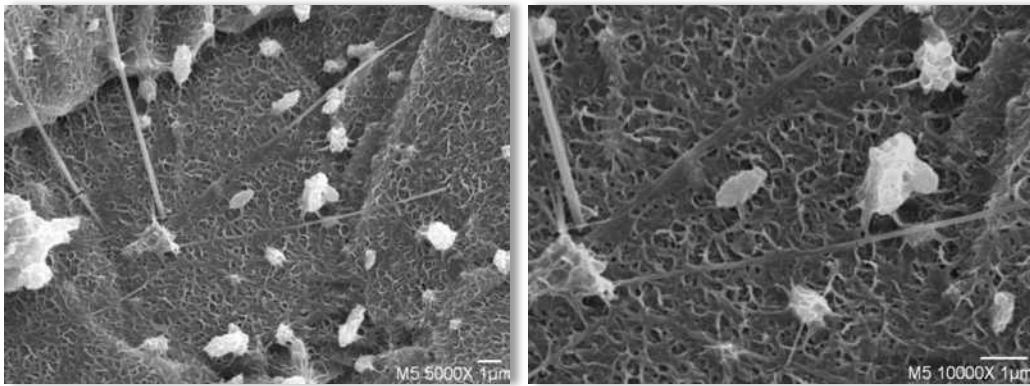
En la figura 5.5.29 se presentan otras micrografías sobre esa misma zona, pero ahora a unas magnificaciones mucho mayores. Estas magnificaciones fueron 1000X, 5000X y a 10000X. En la magnificación de 1000X se puede ver la interface que hay entre la matriz de cemento y el neumático, y se puede notar que no hay una buena interface entre estos dos elementos. En las otras magnificaciones se puede ver la gran diferencia de las estructuras entre ambos elementos, además,

en este caso se puede observar la presencia de aguas de etringita sobre el neumático.



a) Micrografía a una magnificación de 1000X

b) Micrografía a una magnificación de 2000X



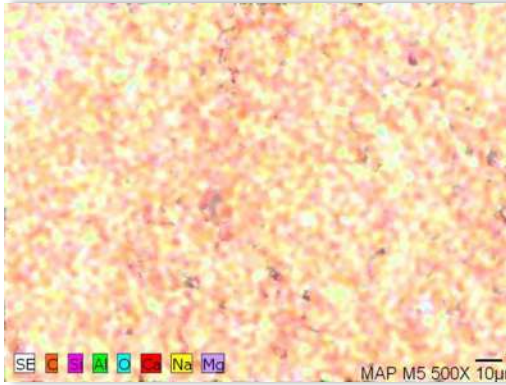
c) Micrografía a una magnificación de 5000X

d) Micrografía a una magnificación de 10000X

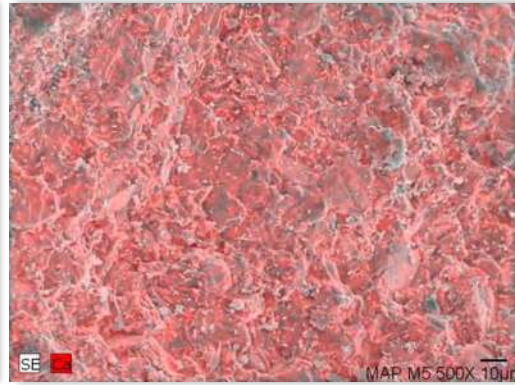
Figura 5.5. 29. Micrografías sobre la muestra M-5 en la zona de interface y en una partícula de neumático; a), b), c) y d).

De las micrografías anteriores (b), c) y d)), se puede observar la presencia de **aguas de etringita** y, tratan de incrustarse sobre el neumático.

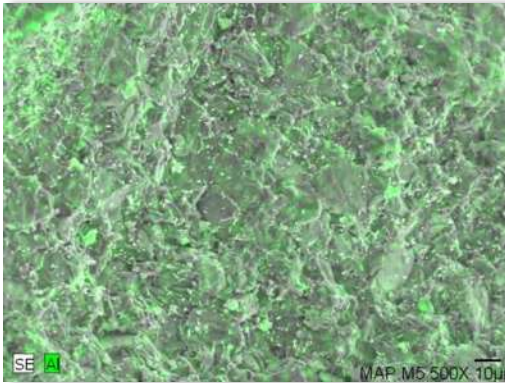
Posterior a la obtención de las micrografías sobre la muestra, se prosiguió a hacer un mapeo químico a una magnificación de 500X el cual se muestra en la figura 5.5.30.



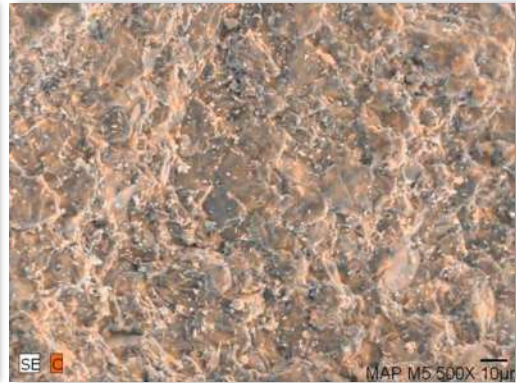
a) Distribución de todos los elementos químicos sobre la muestra M-5



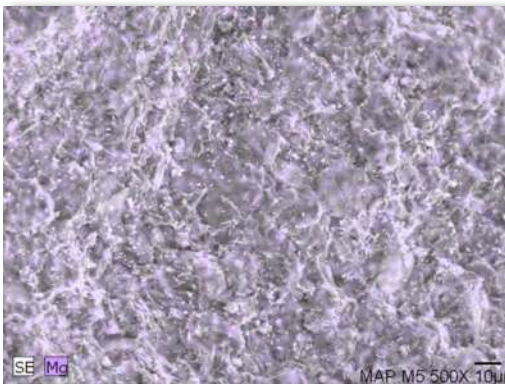
b) Distribución del Calcio en la muestra M-5



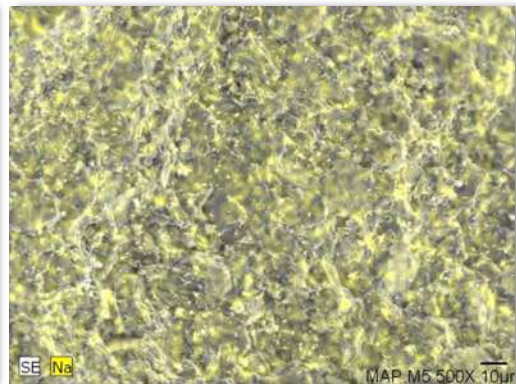
c) Distribución del Aluminio en la muestra M-5



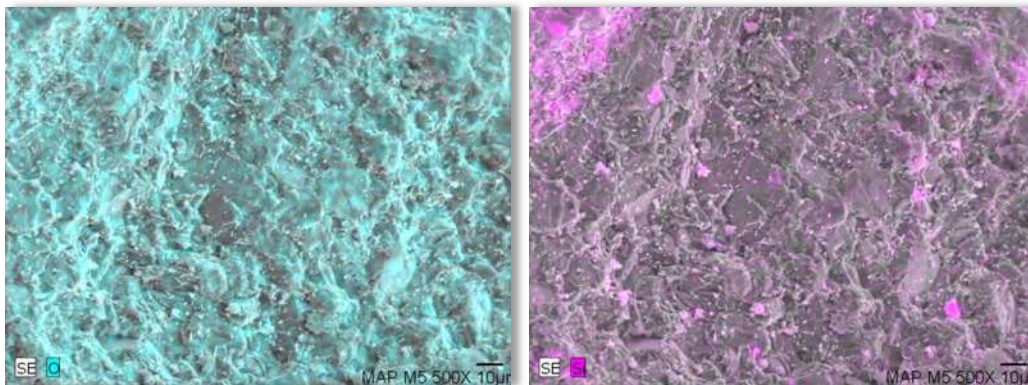
d) Distribución del Carbón en la muestra M-5



e) Distribución del Magnesio en la muestra M-5



f) Distribución del Sodio en la muestra M-5



e) Distribución del Oxígeno en la muestra M-5

f) Distribución del Silicio en la muestra M-5

Figura 5.5. 30. Mapeo químico sobre la muestra M-5 a una magnificación de 500X, a), b), c), d), e) y f).

De este mapeo químico se tiene en la tabla 5.5.9 la cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis de rayos X para el análisis químico cualitativo realizado a 500X de magnificación y, la grafica de la misma presentada en la figura 5.5.31.

Tabla 5.5. 9. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	17.085893	17.08623	23.96785	5.721027
Oxígeno	64.575981	64.57727	68.00454	19.96805
Silicio	0.7279562	0.727971	0.436711	0.055176
Calcio	16.924856	16.92519	7.11524	0.526973
Aluminio	0.1784569	0.178461	0.111439	0.033248
Magnesio	0.1457211	0.145724	0.101018	0.032681
Sodio	0.3591359	0.359143	0.263205	0.047183
	99.998	100	100	

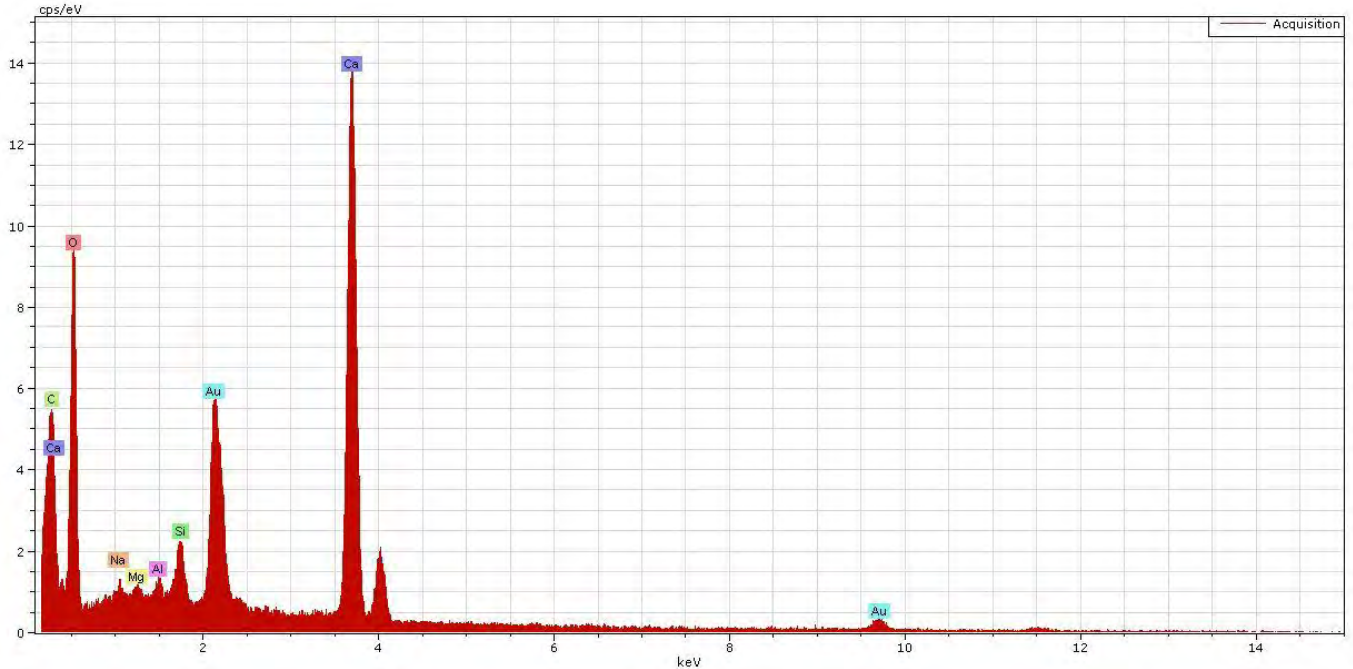


Figura 5.5. 31. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-5 a una magnificación de 500X

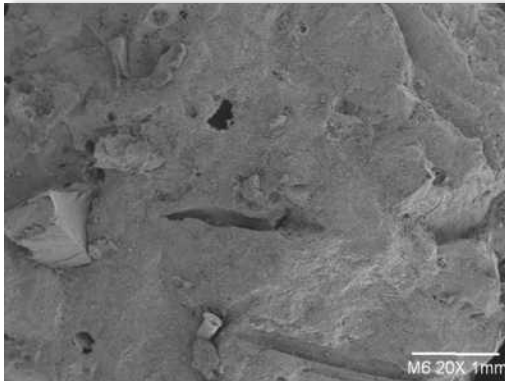
Continuando con nuestro análisis, ahora tendremos a la muestra M-6, que es similar al anterior pero en este caso se tiene mayor cantidad de neumático. En la tabla 5.5.10 se muestra la composición de nuestra muestra.

Tabla 5.5. 10. Dosificación del MAC M-6

COMPOSICIÓN	M-6
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	100% (w/w)
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	-
CROSS	20% (w/w)
PERLITA	-
R A/C	0.35
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	169

Sobre esta muestra se hicieron micrográficas a una magnificación de 20X, 100X y 500X, las cuales se presentan en la figura 5.5.32. En la micrografía con una magnificación de 100X, se tiene una partícula de neumático y en la zona de la

parte inferior de dicha partícula, se puede notar la mala interface que se tiene con la matriz del cemento.



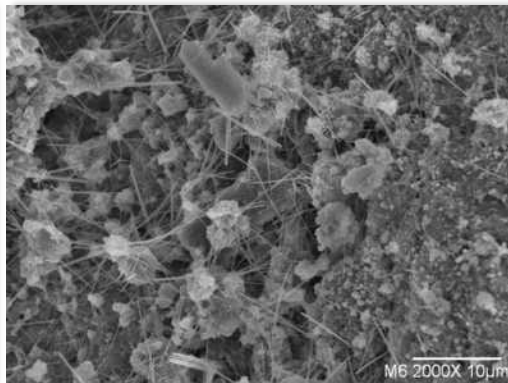
a) Micrografía de la muestra M-6 a una magnificación de 20X



b) Micrografía de la muestra M-6 a una magnificación de 100X



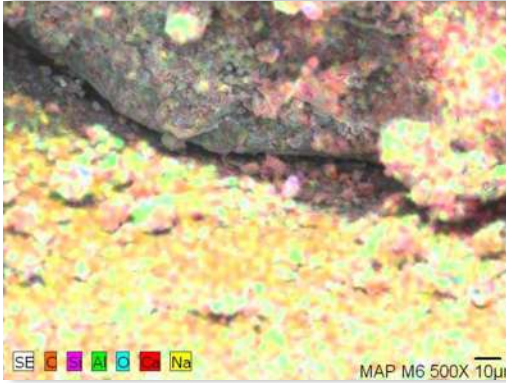
c) Micrografía de la muestra M-6 a una magnificación de 500X



d) Micrografía de la muestra M-6 a una magnificación de 2000X

Figura 5.5. 32. Micrografía sobre la muestra M-6 a diferentes magnificaciones; a), b), c) y d).

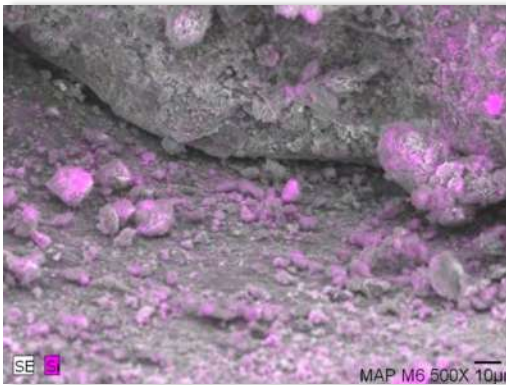
En la micrografía de la figura 5.5.32 d), se puede observar que hay presencia de agujas de etringita, más sobre la parte donde se encuentra la partícula de neumático. En esta muestra se realizó un mapeo químico a una magnificación de 500X sobre la zona de la interface Matriz-Neumático, la cual se presentan las distribuciones de los elementos químicos mostrada en la figura 5.5.33.



a) Distribución de todos los elementos químicos sobre la muestra M-6



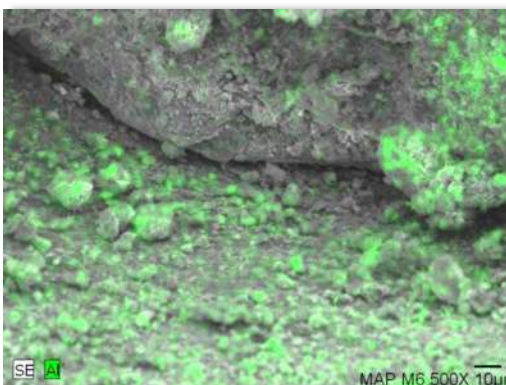
b) Distribución del Calcio en la muestra M-6



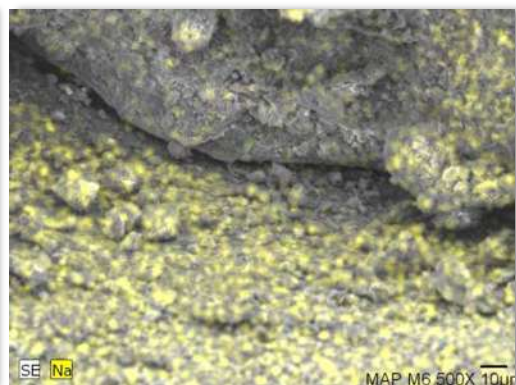
c) Distribución del Silicio en la muestra M-66



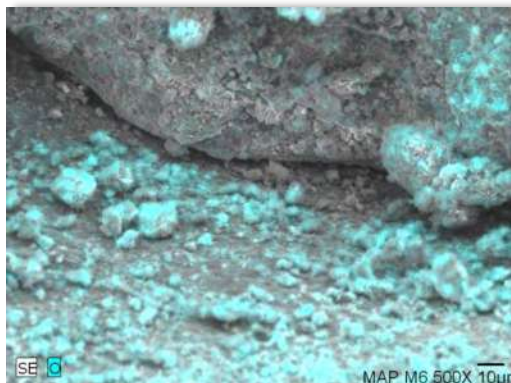
d) Distribución del Carbón en la muestra M-6



e) Distribución del Aluminio en la muestra M-66



f) Distribución del Sodio en la muestra M-6



g) Distribución del Oxígeno en la muestra M-6

Figura 5.5. 33. Mapeo químico sobre la muestra M-6 a una magnificación de 500X, a), b), c), d), e), f) y g).

Como en los casos anteriores, del mapeo químico, se tiene en la tabla 5.5.11 la cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis de rayos X para el análisis químico cualitativo realizado a 500X de magnificación y, la grafica de la misma presentada en la figura 5.5.34.

Tabla 5.5. 11. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS).

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	42.12591	42.12675	51.97246	13.00535
Oxígeno	47.27068	47.27162	43.78157	14.54878
Silicio	1.326099	1.326125	0.699676	0.07997
Calcio	8.760474	8.760649	3.239103	0.284826
Aluminio	0.258637	0.258642	0.142045	0.036953
Sodio	0.256202	0.256207	0.16514	0.040825
	99.998	100	100	

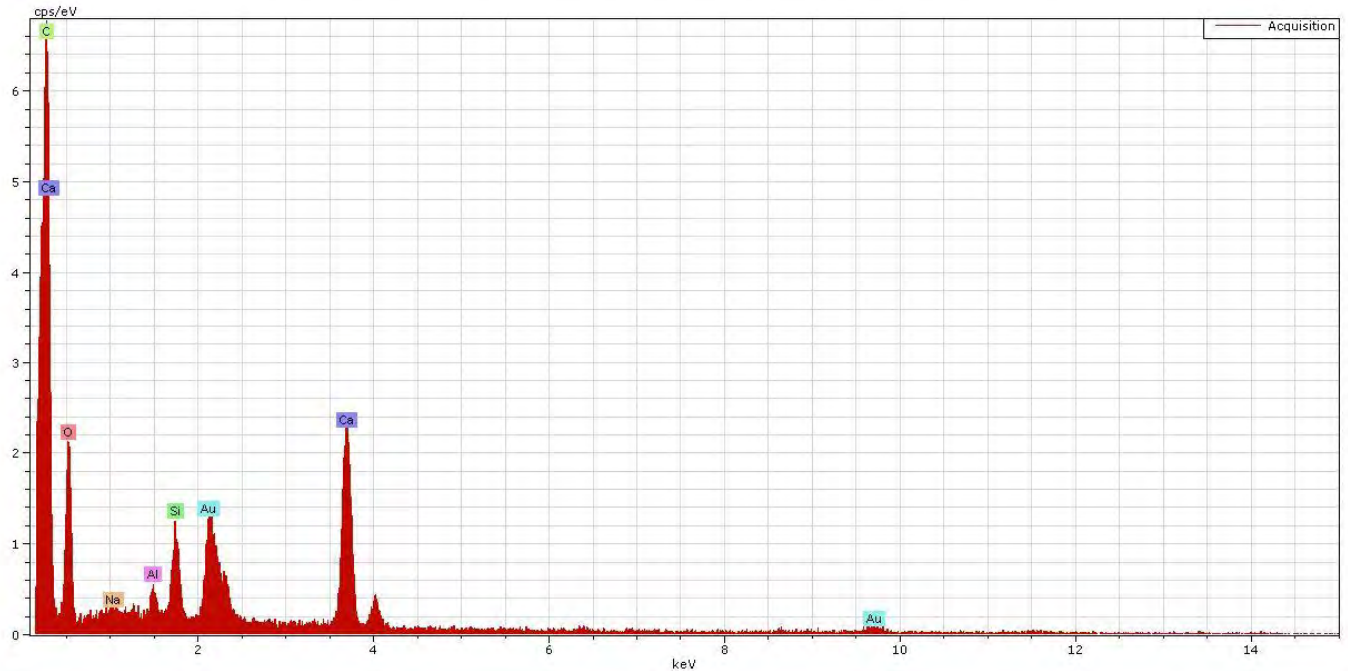


Figura 5.5. 34. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-6 a una magnificación de 500X

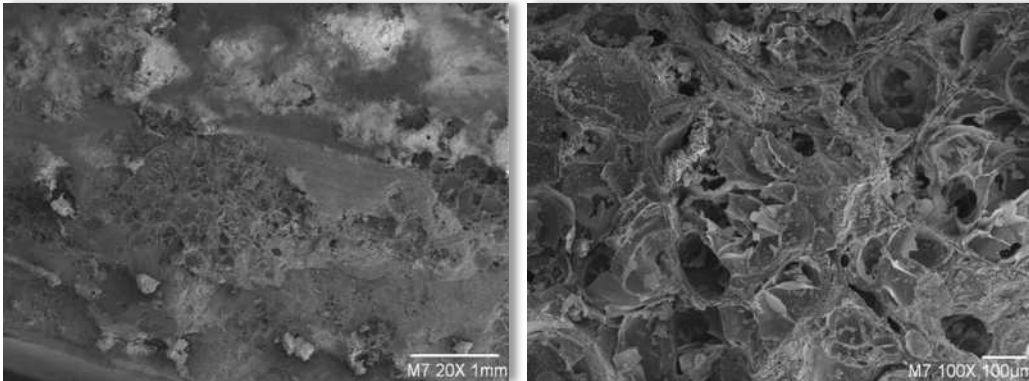
Una vez visto la microestructura de todos los compuestos que contienen como agregado pétreo la marmolina, ahora veremos cómo es la microestructura de las muestras M-7 y M-8, ya que estos tienen como agregado la Perlita, siendo la perlita un agregado ligero. En la tabla 5.5.12 se presenta la composición de la muestra M-7.

Tabla 5.5. 12. Dosificación del MAC M-7.

COMPOSICIÓN	M-7
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	-
CROSS	
PERLITA	30% (w/w)
R A/C	0.45
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	161

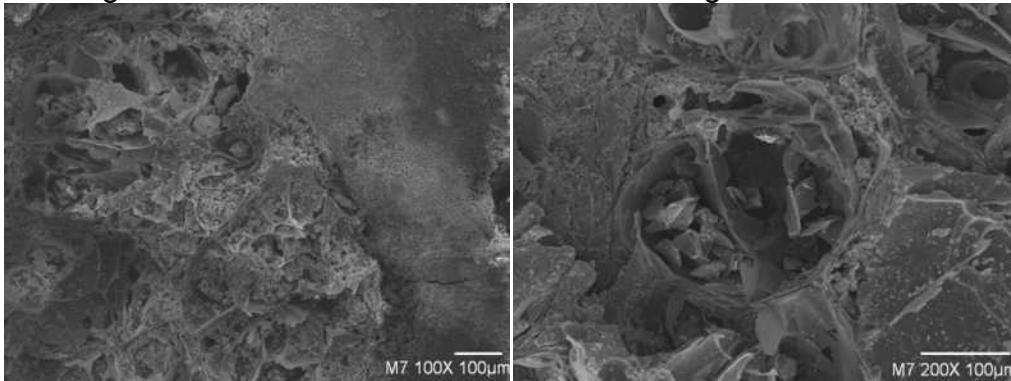
De esta muestra se tomaron unas micrografías a diferentes magnificaciones, similares a las magnificaciones de las muestras anteriores.

Desde la primera micrografía tomada, se puede ver que es un compuesto muy poroso. En la figura 5.5.35 se muestran las micrografías tomadas a esta muestra.



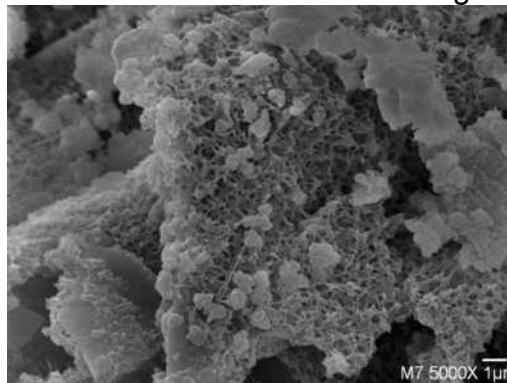
a) Micrografía de la muestra M-7 a una magnificación de 20X

b) Micrografía de la muestra M-7 a una magnificación de 100X



c) Micrografía de la muestra M-7 a una magnificación de 100X

d) Micrografía de la muestra M-7 a una magnificación de 200X

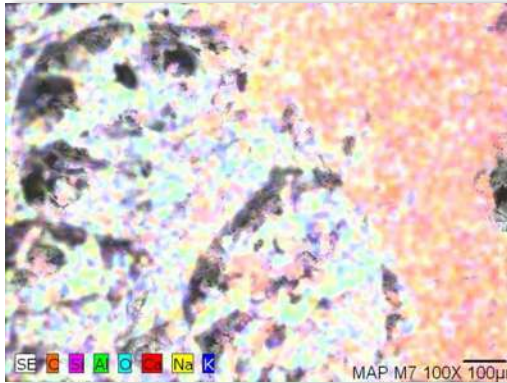


e) Micrografía de la muestra M-7 a una magnificación de 5000X

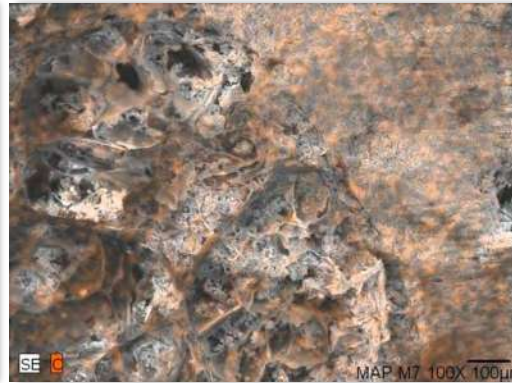
Figura 5.5. 35. Micrografía sobre la muestra M-7 a diferentes magnificaciones; a), b), c), d) y e).

De las micrografías tomadas a unas magnificaciones de 20X y 100X, se puede notar que las partículas de perlita son muy porosas, además, se tiene una

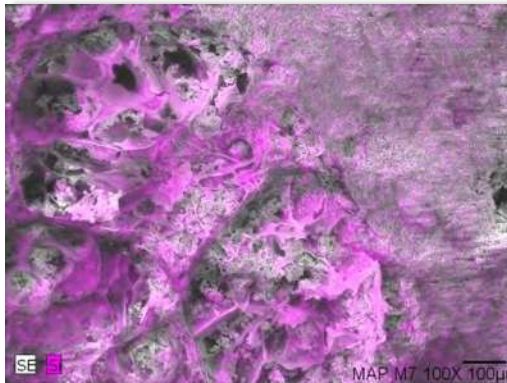
mala interface con la pasta de cemento, es por esta razón, que este tipo de compuestos presentan una resistencia mecánica muy baja y un porcentaje de absorción alta. En las otras magnificaciones, 200X y 5000X, se puede notar que en las porosidades **hay presencia de cristales de portlandita y de etringita**. En esta muestra se hizo el mapeo químico a una magnificación de 100X la cual se presenta en la figura 5.5.36.



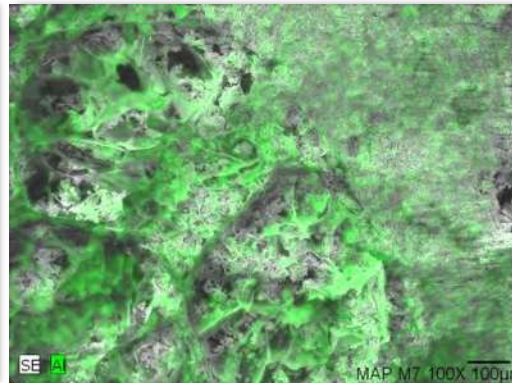
a) Distribución de todos los elementos químicos sobre la muestra M-7



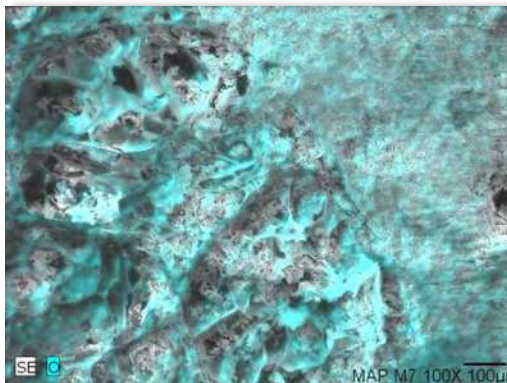
b) Distribución del Carbono en la muestra M-7



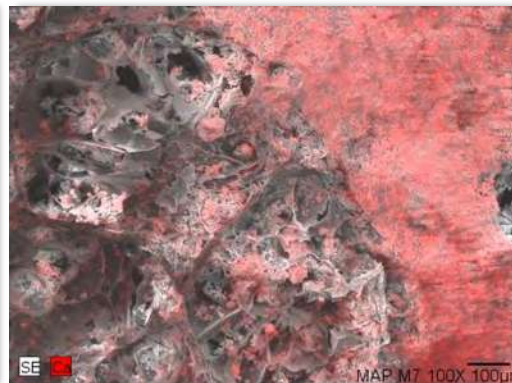
c) Distribución del Silicio en la muestra M-7



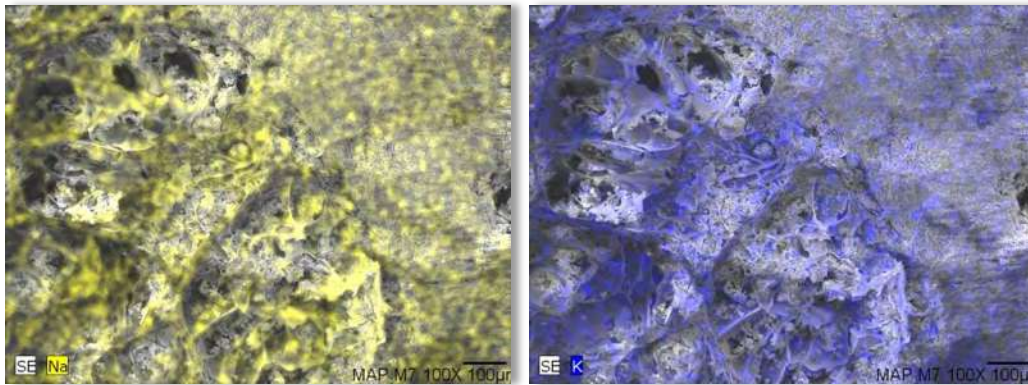
d) Distribución del Aluminio en la muestra M-7



e) Distribución del Oxígeno en la muestra M-7



f) Distribución del Calcio en la muestra M-7



f) Distribución del Sodio en la muestra M-7

g) Distribución del Potasio en la muestra M-7

Figura 5.5. 36. Mapeo químico sobre la muestra M-7 a una magnificación de 100X, a), b), c), d), e), f) y g).

Una vez realizado el mapeo químico, se tiene en la tabla 5.5.13 la cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis de rayos X para el análisis químico cualitativo realizado a 100X de magnificación y, la grafica de la misma presentada en la figura 5.5.37.

Tabla 5.5. 13. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS)

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Oxígeno	80.59523	80.59604	89.34564	0.741232
Sodio	0.544726	0.544732	0.420254	0.058646
Aluminio	1.67632	1.676337	1.10194	0.102475
Silicio	8.030443	8.030523	5.071367	0.357881
Potasio	0.943568	0.943577	0.428039	0.053769
Calcio	8.208709	8.208792	3.632758	0.268461
	99.999	100	100	

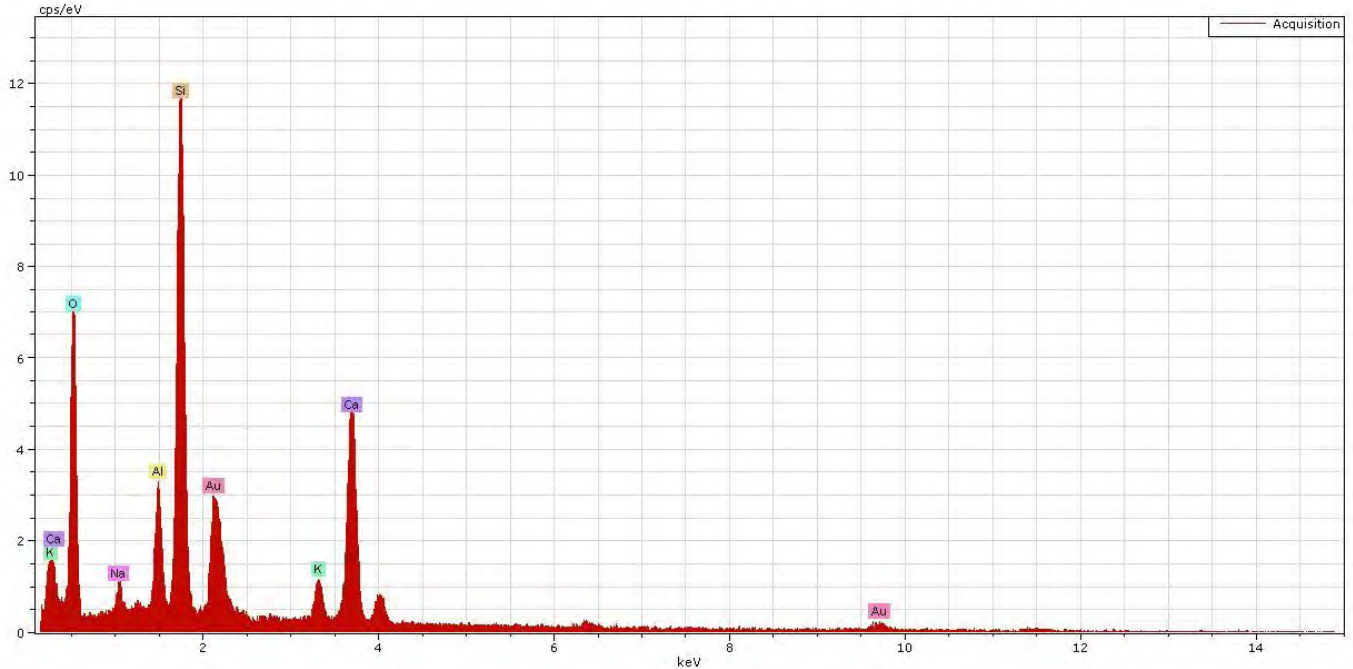


Figura 5.5. 37. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-7 a una magnificación de 100X

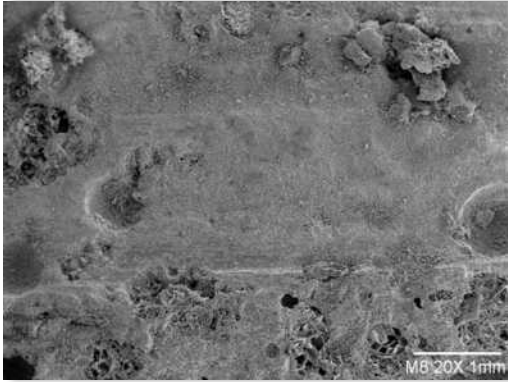
Por último tenemos a la muestra M-8, el cual es similar al anterior, pero en este caso se le adicionó neumático en un cierto porcentaje la cual se muestra la dosificación en la tabla 5.5.14.

Tabla 5.5. 14. Dosificación del MAC M-8

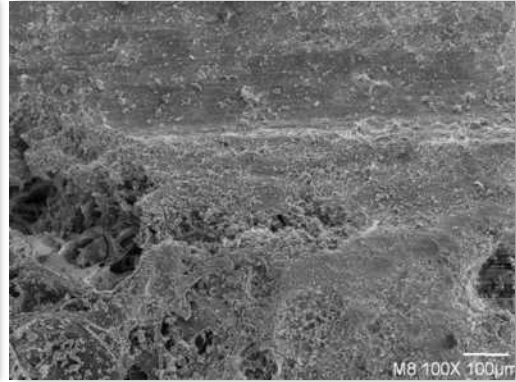
COMPOSICIÓN	M-8
CPC 30R-RS	100% (w/w)
AGREGADO ASTM	
OXIDO DE HIERRO	-
CARBÓN CC	-
CROSS	10% (w/w)
PERLITA	30% (w/w)
R A/C	0.5
HIPERFLUIDIFICANTE	15 gr/kg de cemento
EDAD (DÍAS)	159

Las micrografías tomadas fueron a magnificaciones de 20X, 100X, 200X, 500X, 2000X, 10000X y 40000X, de las cuales se trataron de localizar las zonas de la interface Matriz-Agregado. En este caso se tiene una mala interface, además se tiene mucha presencia de *etringita*. La mayoría de la formación de la etringita

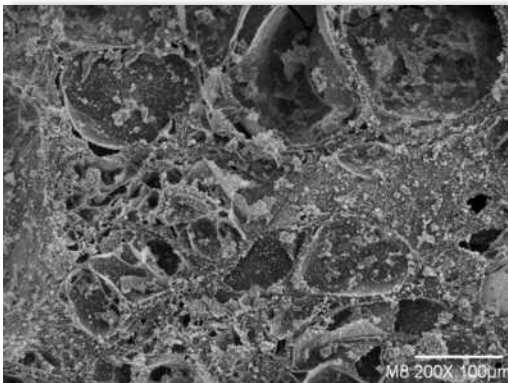
se encontraba en donde había filamentos de neumático y, en donde las agujas de la etringita trataban de introducirse a la matriz del neumático. Las micrografías tomadas se presentan en la figura 5.5.38.



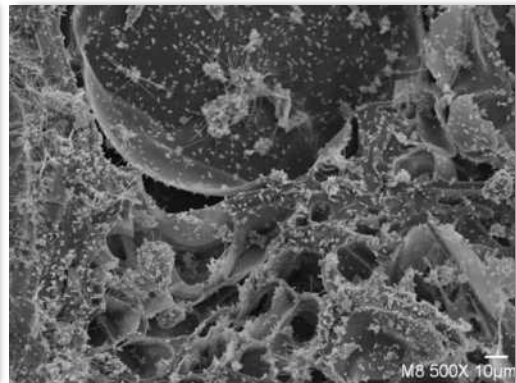
a) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 20X



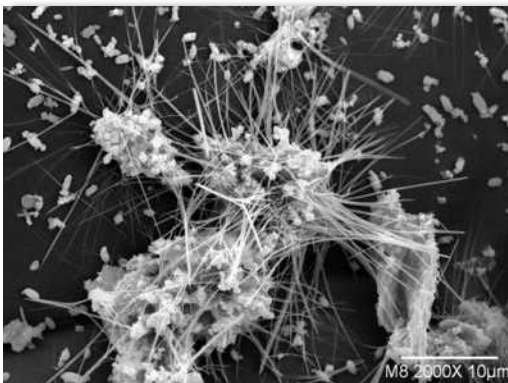
b) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 100X



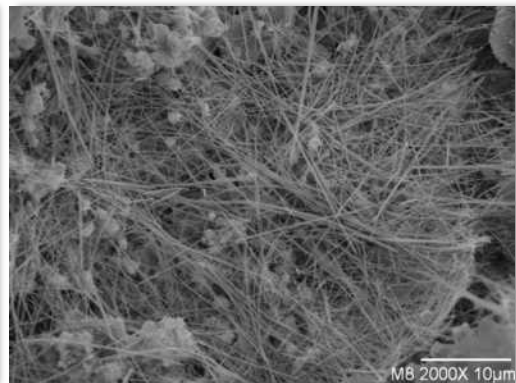
c) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 200X



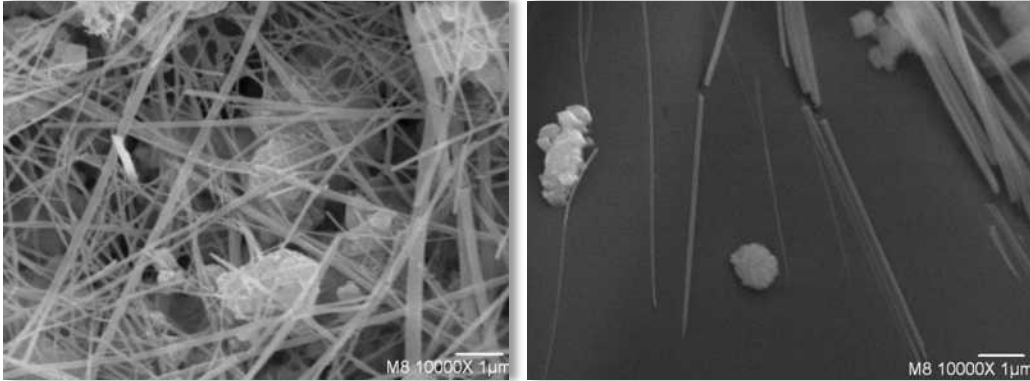
d) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 500X



e) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 2000X

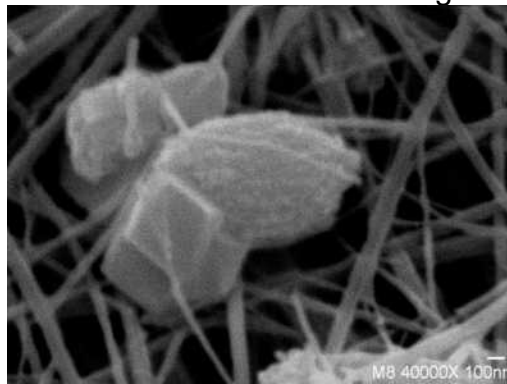


f) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 2000X



g) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 10000X

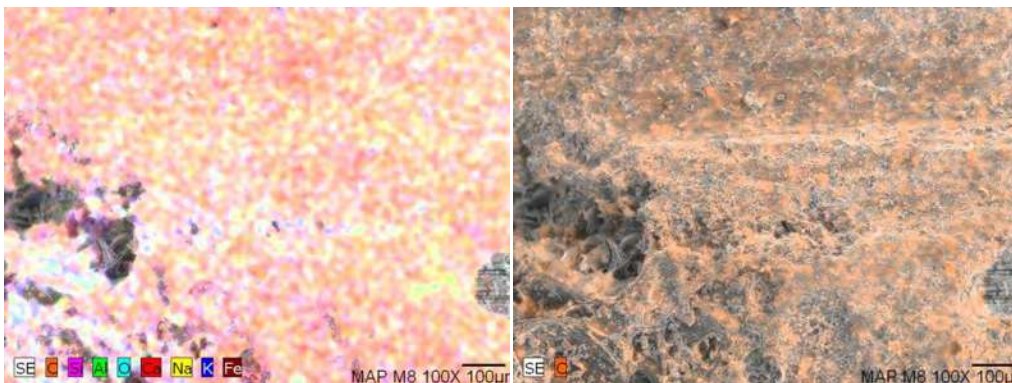
h) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 10000X



i) Micrografía de la muestra M-8 a una magnificación de 40000X

Figura 5.5. 38. Micrografía sobre la muestra M-8 a diferentes magnificaciones; a), b), c), d), e), f), g), h), i).

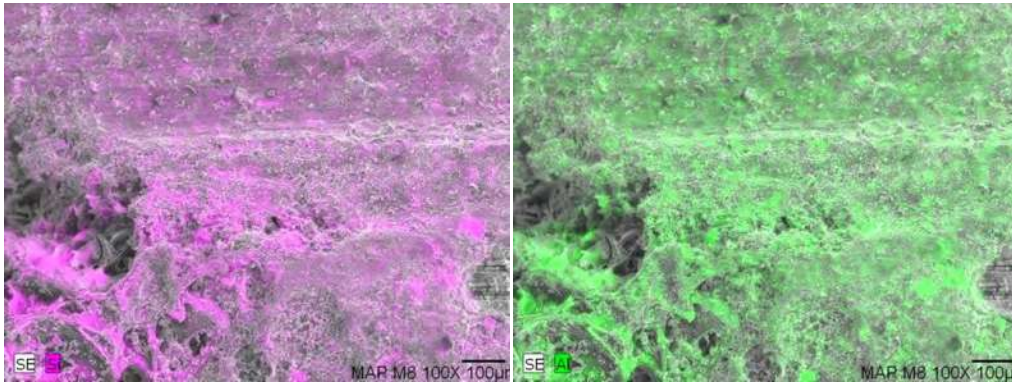
Para el mapeo químico de esta muestra, fue realizada a una magnificación de 100X, la cual fue realizada en una zona donde podríamos tener la interface de la Matriz-Agregado. En la figura 5.5.39 se presentan las imágenes de las distribuciones de los elementos químicos presentes en la muestra.



a) Distribución de todos los elementos químicos sobre la

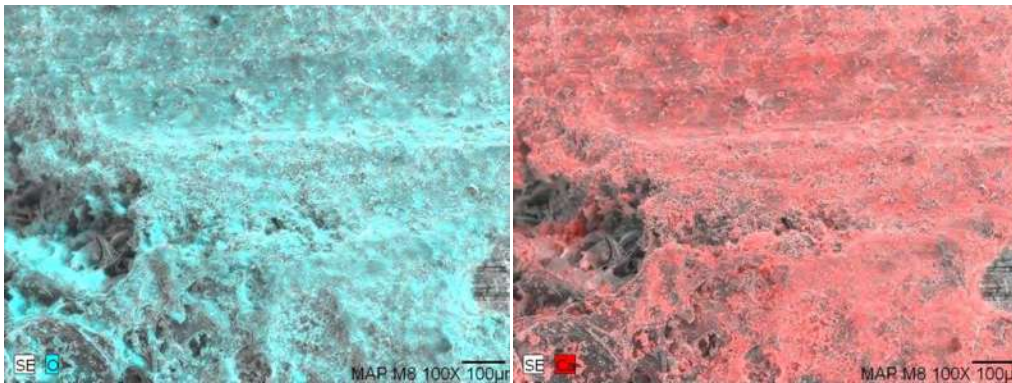
b) Distribución del Carbón en la muestra M-8

muestra M-8



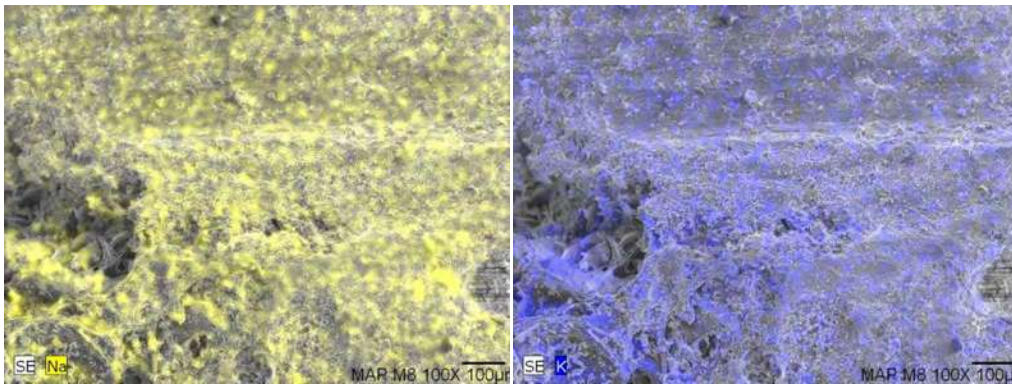
c) Distribución del Silicio en la muestra M-8

d) Distribución del Aluminio en la muestra M-8



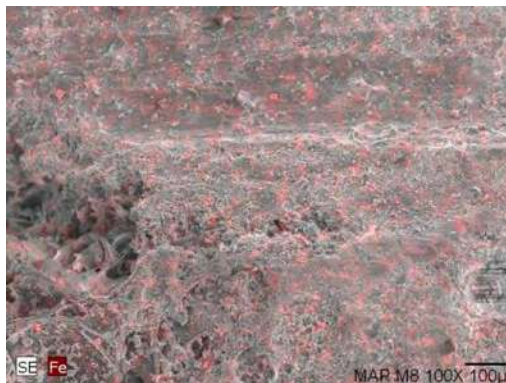
e) Distribución del Oxígeno en la muestra M-8

f) Distribución del Calcio en la muestra M-8



g) Distribución del Sodio en la muestra M-8

h) Distribución del Potasio en la muestra M-8



i) Distribución del Hierro en la muestra M-8

Figura 5.5. 39. Mapeo químico sobre la muestra M-8 a una magnificación de 100X, a), b), c), d), e), f), g), h), i).

A continuación se presenta en la tabla 5.5.15 la cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis de rayos X para el análisis químico cualitativo realizado a 100X de magnificación y, la grafica de la misma presentada en la figura 5.5.40.

Tabla 5.5. 15. Cuantificación en porcentaje de los elementos, obtenidos del microanálisis (EDS)

Elemento	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbón	2.546458	2.546509	3.759634	1.461854
Exigen	77.84987	77.85142	86.2864	24.05288
Sodio	0.308688	0.308694	0.238108	0.044067
Aluminio	1.092426	1.092447	0.717981	0.075489
Silicio	5.179248	5.179352	3.270188	0.239692
Calcio	12.01723	12.01747	5.317243	0.381418
Magnesio	0.106517	0.10652	0.077716	0.030615
Potasio	0.350875	0.350882	0.159141	0.035698
Hierro	0.546689	0.5467	0.173592	0.040939
	99.998	100	100	

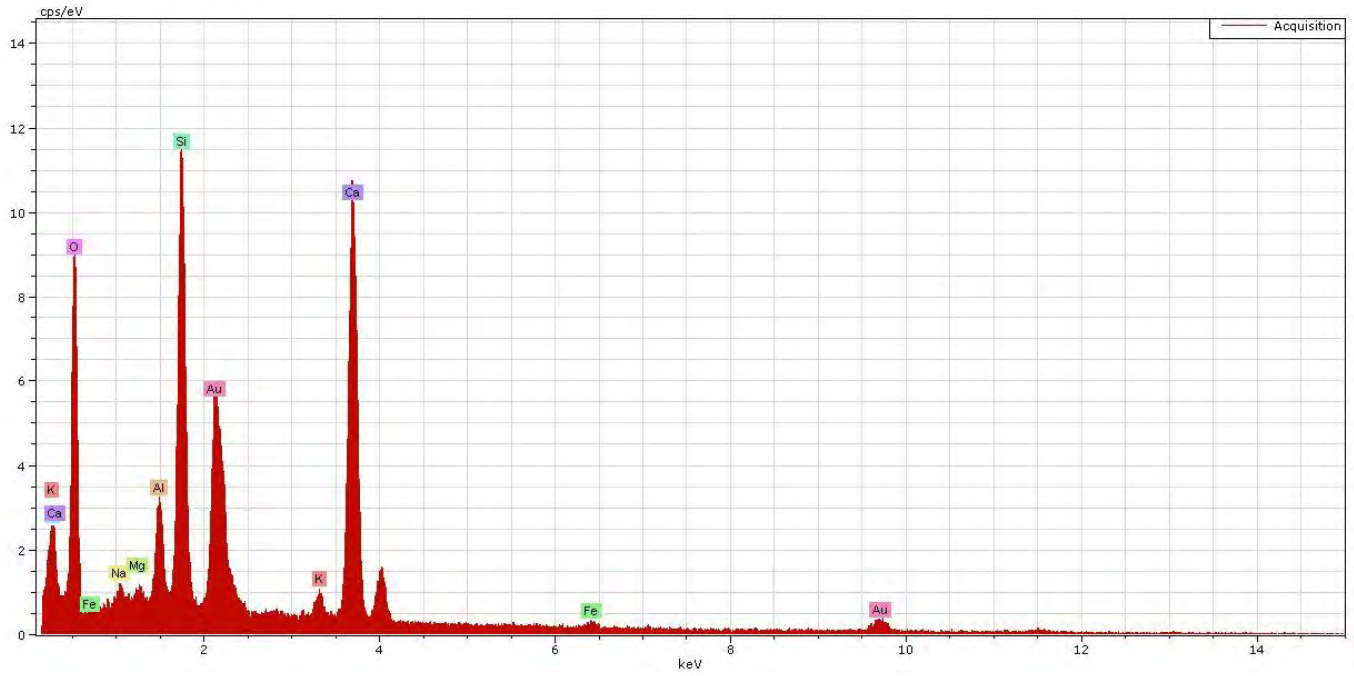


Figura 5.4. 39. Grafico del microanálisis de rayos-X en la muestra M-8 a una magnificación de 100X

5.6. CARACTERIZACIÓN NANO-ESTRUCTURAL DEL MAC

5.6.1. TEM

Anteriormente se vio la característica micro-estructural de todas las composiciones del mortero autocompactable (MAC), ahora se pretende observar y analizar su característica nano-estructural. En este trabajo solo se realizarán estudios de TEM en el cemento anhidro y el hidratado. De los resultados obtenidos de este estudio se pretenderá comparar la estructura de estos dos componentes. En la literatura se dice que el cemento anhidro es de una estructura cristalina y una vez que entra en contacto con el agua y se hidrolizan las partículas del cemento anhidro forman un gel que no es cristalino. Entonces nuestro fin es la de comprobar si es cristalino o no cristalino ese gel formado.

La muestra a analizar en el microscopio fue preparada moliendo nuestro cemento hidratado en un mortero de Ágata, hasta obtener partículas finas, más o menos como los tamaños de partícula del cemento anhidro. El microscopio electrónico de transmisión utilizada fue de la marca PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20, el cual trabaja a 200kV manejando una temperatura en el cañón de 1800°C y un voltaje de aceleración de 4200V el cual se muestra en la figura 5.6.1.



Figura 5.6. 1. Microscopio TEM PHILIPS modelo TECNAI FEG DF20.

Para la elaboración del polvo del cemento hidratado, se llevó a cabo la siguiente metodología.

- Se elaboraron tres pastillas del cemento hidratado en cajitas de petri. Una vez transcurrido 24 horas, tiempo de fraguado, se dejaron en una tina con agua para su curado. Ver figura 5.5.2.
- Después de que se haya tenido una hidratación muy avanzada, se procedió a someterlo a secado en el horno por tres días a 50°C. Ver figura 5.5.3.

- De las pastillas elaboradas, de estas se tomará una muestra de 2cm³ de la parte central de la pastilla la cual después será molido en el mortero de Ágata. Ver figura 5.5.4.



Figura 5.6. 2. Pastillas de cemento hidratado fresco colocado en cajas de petri.



Figura 5.6. 3. Colocación de las pastillas en el horno para su secado.



Figura 5.6. 4. Molido del cemento hidratado hasta convertirlo en polvo.

Una vez preparado las muestras, se prosiguió a estudiar su nanoestructura. Se presentarán las imágenes de las micrografías obtenidas por el microscopio electrónico de transmisión (TEM) en campo claro del cemento anhidro (CPC30R-RS), ubicando distintas zonas. Las primeras imágenes fueron tomadas de la zona 1 a una baja amplificación y si se logró ver que el cemento anhidro si es cristalino.

Esto se puede conocer rápidamente obteniendo la transformada rápida de Fourier que el mismo equipo nos proporciona, en el cual se puede observar las frecuencias producidas por los planos cristalinos como se muestra en la figura 5.6.5. (Ortorrómbica)

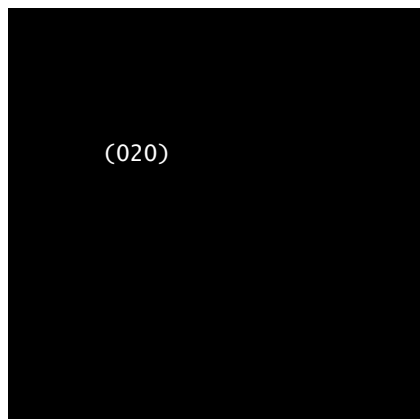


Figura 5.6. 5. Transformada Rápida de Fourier del cemento anhidro zona 1

Una vez obtenida la transformada rápida de Fourier de los planos cristalinos, se tomaron algunas imágenes de esa zona. En la figura 5.6.6 (a) se muestra una imagen de alta resolución mostrando planos orientados correspondientes a la dirección (020) con una distancia interplanar de 0.34nm (nanómetros), una imagen de una zona diferente con las misma distancia interplanar se muestra en la imagen 5.6.6 (b) la cual corresponde a la fase **hemihidrato de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)** con una estructura **ortorrómbica** determinada por la indexación de la transformada rápida de Fourier.

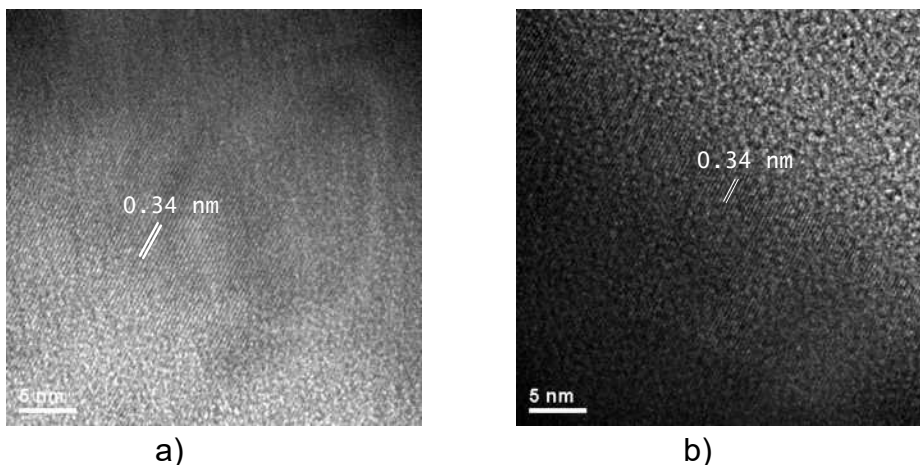


Figura 5.6. 6. Imágenes obtenidas a una amplificación de 5nm en campo claro; a) y b)

Se realizó un análisis químico puntual en la superficie de la imagen 5.6.6 (a), con la finalidad obtener los elementos químicos presentes en dicha fase. En la

tabla 5.6.1 se puede observar la cuantificación del análisis químico obtenido por EDS (Espectroscopía de Energía Dispersiva) con la cual se corrobora la fase obtenida por el análisis realizado por TEM, y en la figura 5.6.7 se muestra la grafica del análisis químico del cemento anhidro, en la cual se observa los picos característicos de la fase del **hemihidrato de yeso**.

Tabla 5.6. 1. Cuantificación de los elementos químicos por EDS.

EDS IMAGEN 4 CPC30R-RS GYP					
Detector					
Element	Weight %	Atomic %	Uncertainty %	Correction	k-Factor
O (K)	1.486	3.311	0.163	0.514	1.98
Al (K)	1.982	2.619	0.114	0.965	1.04
Si (K)	4.013	5.095	0.159	0.977	1
S (K)	31.233	34.734	0.452	0.911	1.101
Ca (K)	60.17	53.526	0.631	0.975	1.148
Fe (K)	1.114	0.711	0.106	0.994	1.48

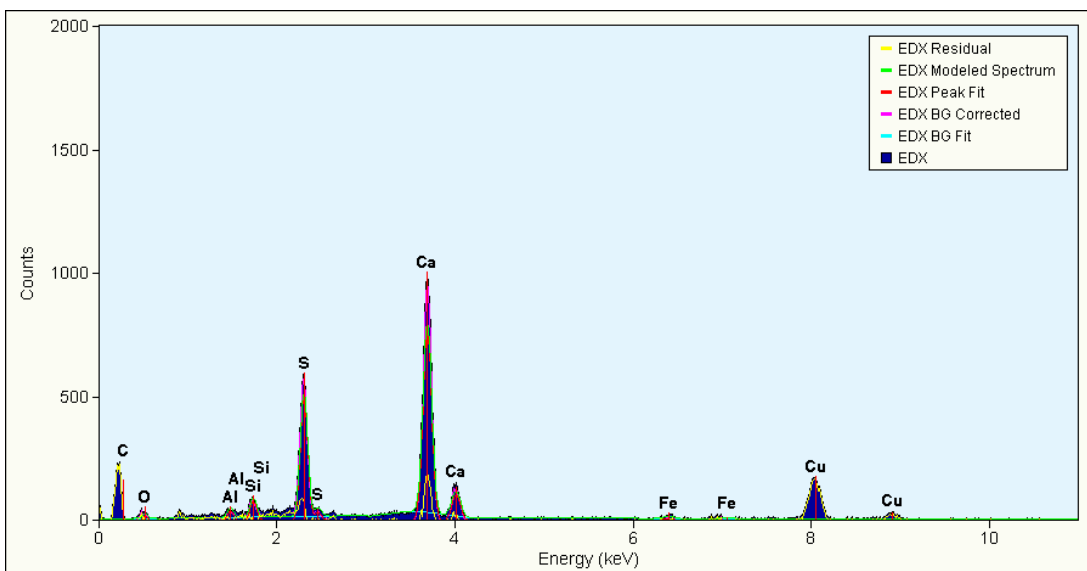


Figura 5.6. 7. Grafica del análisis químico realizado en el cemento anhidro

De la misma manera que lo anterior, se busco otra zona de la misma muestra con la finalidad de determinar diferentes fases presentes en el cemento anhidro. En la figura 5.6.8 se presenta la transformada rápida de Fourier tomada de la imagen 5.6.9 (b) del cemento anhidro de la zona 2 mostrando las frecuencias de los planos difractados en la dirección (012), lo cual corresponde a la fase cristalina del **aluminio ferrita de tetracalcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)** con una estructura cristalina **ortorrómbica**. La imagen 5.6.9 (a) muestra una partícula aglomerada alargada del cemento anhidro de un tamaño aproximado de $20\mu\text{m}$

(micrómetros) tomada a baja amplificación (40000X). En la figura 5.6.9 (b) se muestra un precipitado fino rectangular de aproximadamente 50nm (nanómetros) de largo por 30nm (nanómetros) de ancho con una distancia interplanar de 0.263nm (nanómetros), las imágenes 5.6.9 (c-d) muestran una amplificación de la imagen 5.6.9 (b) mostrando con más detalle los planos interplanares del precipitado rectangular de 0.263nm (nanómetros) de distancia. Además también en la zona 2 se hizo un análisis químico, el cual se muestran en la tabla 5.6.2 la cuantificación de dicho análisis en y en la figura 5.6.10 la grafica del análisis, en el cual se observa los elementos característicos de la fase determinada.

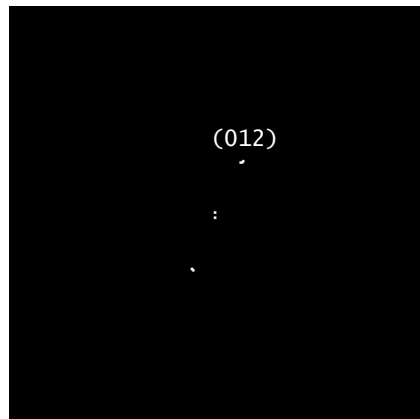
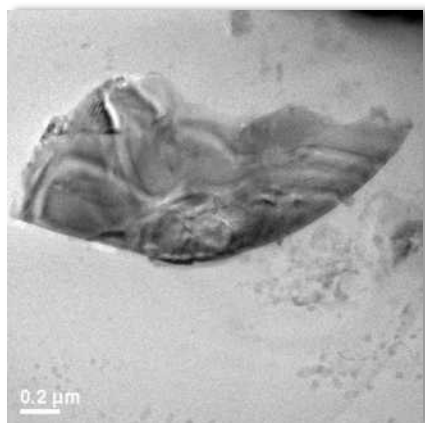
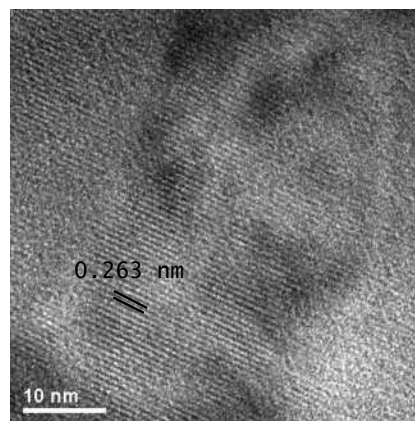


Figura 5.6. 8. Transformada Rápida de Fourier del cemento anhidro zona 2

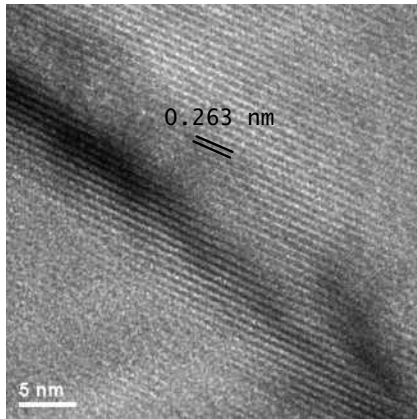
Al igual que la zona 1, también la zona 2 en la FFT se puede observar la orientación de los planos cristalinos.



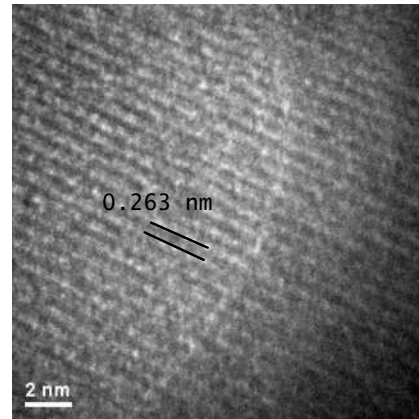
a) Imagen tomada a una amplificación de 0.2 μm



b) Imagen tomada a una amplificación de 10nm



c) Imagen tomada a una
amplificación de 5nm



d) Imagen tomada a una
amplificación de 2nm

Figura 5.6. 9. Imágenes tomadas del cemento anhidro en la zona 2 a diferentes
amplificaciones en campo claro; a), b), c) y d).

Tabla 5.6. 2. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.

EDS IMAGEN 1 CPC30R-RS GYP					
Detector					
Element	Weight %	Atomic %	Uncertainty %	Correction	k-Factor
O (K)	15.467	31.04	0.654	0.514	1.98
Al (K)	8.704	10.358	0.318	0.965	1.04
Si (K)	2.274	2.599	0.16	0.977	1
Mg (K)	1.713	2.263	0.129	0.945	1.034
Ca (K)	54.98	44.045	0.71	0.975	1.148
Fe (K)	16.86	9.693	0.449	0.994	1.48

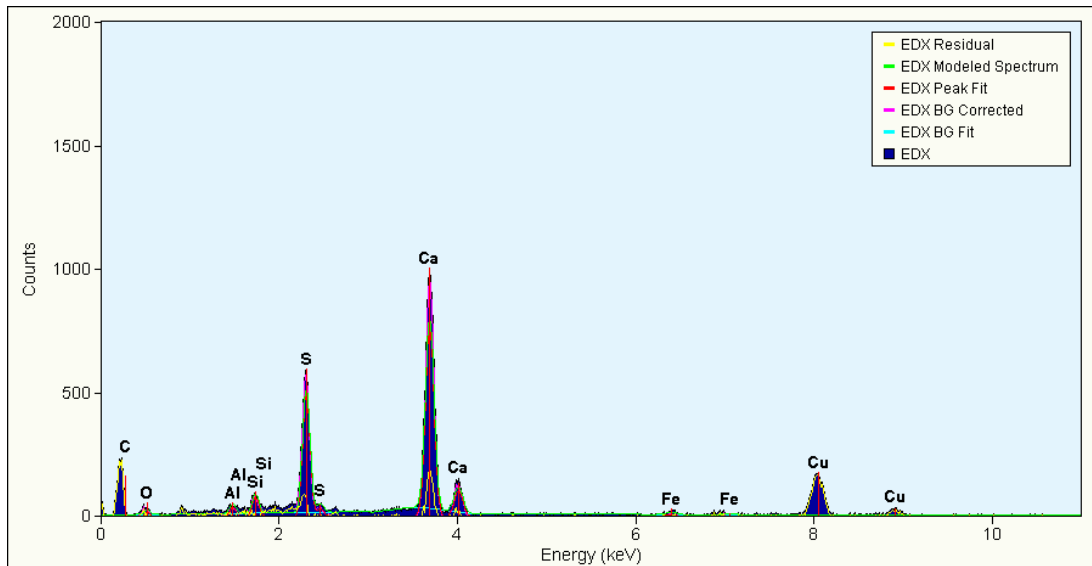


Figura 5.6. 10. Grafica del análisis químico realizado en el cemento anhidro en la
zona 2.

Viendo las imágenes anteriores y las Transformadas Rápidas de Fourier, se puede decir que “**el cemento anhidro es cristalino**”.

Ahora vamos a observar el cemento hidratado. Al igual que el cemento anhidro, al cemento hidratado se le tomaron varias imágenes a diferentes ampliaciones en campo claro y obscuro; además su análisis químico elemental.

A continuación se presenta el análisis de una zona en la muestra del cemento hidratado. En la figura 5.6.11 se presenta una imagen de la Transformada Rápida de Fourier del cemento hidratado, mostrando un patrón **policristalino** para los planos (220) y (400) con una distancia interatómica de 0.3nm (nanómetros) y 0.278nm (nanómetros) respectivamente que corresponde a **la fase cristalina del gel de Tobermorita (S-C-H) con una estructura cristalina ortorrómbica**. La figura 5.6.12 (a) muestra varios precipitados circulares del gel de tobermorita tomados a 40000X en campo claro, la imagen 5.6.12 (b) muestra una imagen de campo oscuro de los precipitados del gel de tobermorita, donde se puede apreciar la presencia de finos precipitados del gel que cumplen con la ley de Bragg, los cuáles se pueden observar con gran detalle en las imágenes 5.6.12 (c-d) los cuáles tiene un tamaño promedio en el rango de 3 a 15 nm (nanómetros).

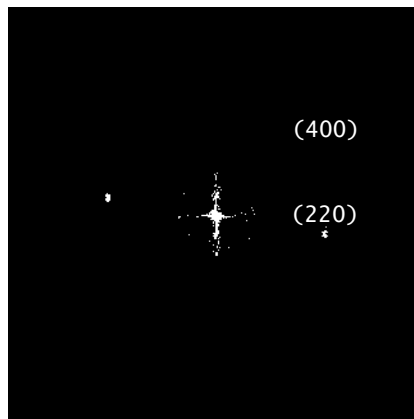
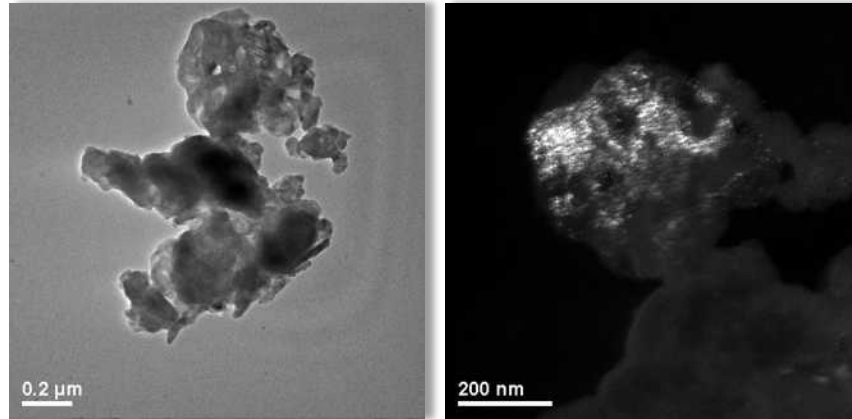
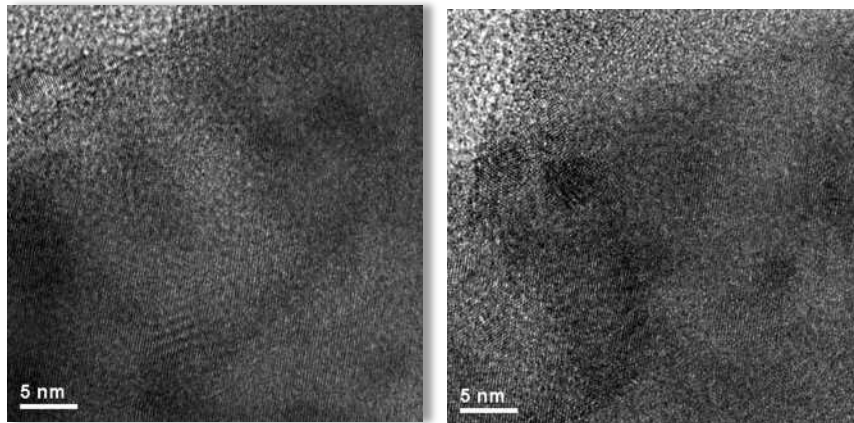


Figura 5.6. 11. Transformada Rápida de Fourier del cemento hidratado



a) Imagen tomada a una
amplificación de 0.2 μm en
campo claro

b) Imagen tomada a una
amplificación de 200nm en
campo oscuro



c) Imagen tomada a una
amplificación de 5nm

d) Imagen tomada a una
amplificación de 5nm

Figura 5.6. 12. Imágenes tomadas del cemento hidratado en la zona 1 a diferentes
amplificaciones en campo claro y obscuro; a), b), c) y d).

Después de estas imágenes, se hizo un análisis químico la cual se presenta en la tabla 5.6.3 la cuantificación de los porcentajes de los elementos presentes y en la figura 5.6.13 la representación grafica del mismo mostrando los elementos de la fase cristalina del gel de tobermorita.

Tabla 5.6. 3. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.

EDS CPC30R-RS HYD P5					
Detector					
Element	Weight %	Atomic %	Uncertainty %	Correction	k-Factor
O (K)	10.998	22.152	0.484	0.514	1.98
Al (K)	0.15	0.179	0.065	0.965	1.04
Si (K)	21.55	24.727	0.458	0.977	1
S (K)	1.497	1.505	0.121	0.911	1.101
Ca (K)	59.309	47.687	0.746	0.975	1.148
Fe (K)	6.494	3.747	0.317	0.994	1.48

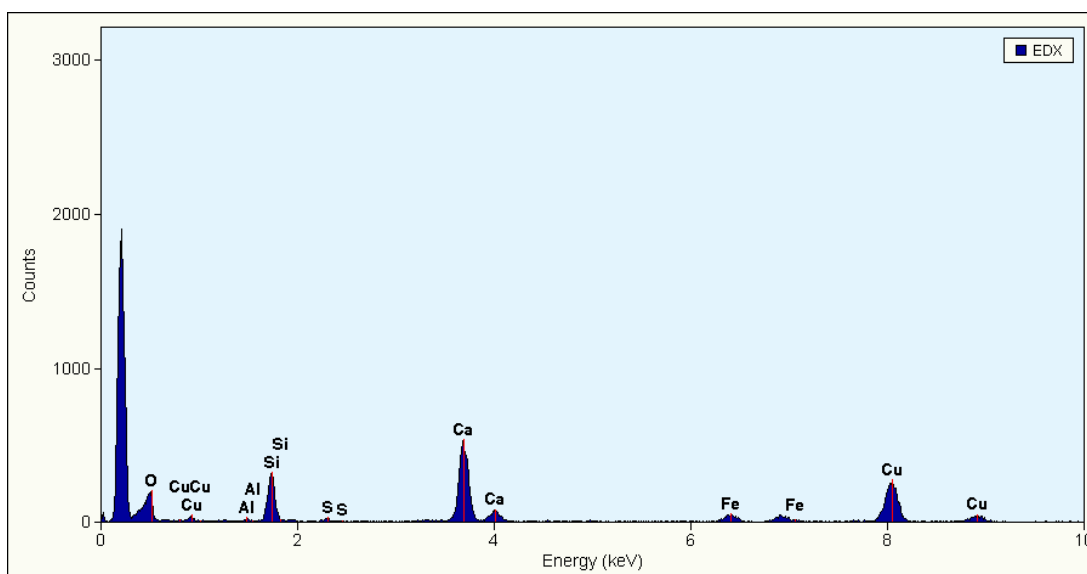


Figura 5.6. 13. Grafica del análisis químico realizado en el cemento hidratado.

De la misma manera cómo se presentaron las imágenes de la zona 1 del cemento hidratado, se presenta a continuación la zona 2. El análisis en diferentes zonas se hace para poder tener estudio completo de la nanoestructura de la muestra.

En la figura 5.6.14 se muestra la transformada rápida de Fourier de otra zona la cual denominamos zona 2. La figura 5.6.15 (b), en la cual se observa la frecuencia característica de **la fase cristalina del gel de tobermorita (SCH)** en el plano (220) la cual tiene una **estructura cristalina ortorrómbica**. La figura 5.6.15 (a) muestra un aglomerado del gel de tobermorita tomado a 40000x y la figura 5.6.15 (b) muestra precipitados muy finos del gel en el rango de 5 a 15nm (nanómetros) de tamaño tomados a 700000X.

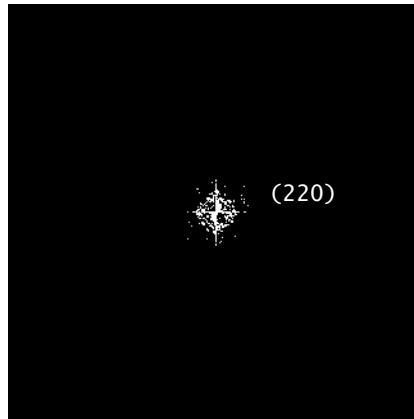
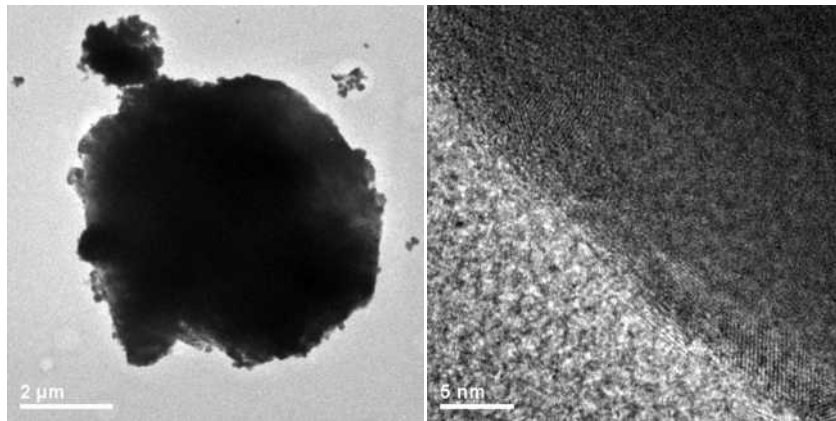


Figura 5.6. 14. Transformada rápida de Fourier del cemento hidratado en la zona 2.



a) Imagen tomada a una
amplificación de 0.2 μm en
campo claro

b) Imagen tomada a una
amplificación de 5nm

Figura 5.6. 15. Imagen tomada en el cemento hidratado a diferentes
amplificaciones; a) y b)

En la tabla 5.6.4 se muestra la cuantificación del análisis químico puntual de la fase y en la figura 5.6.16 se muestra su representación grafica.

Tabla 5.6. 4. Cuantificación de los elementos en porcentaje del EDS.

EDS CPC30R-RS HYD P3					
Detector					
Element	Weight %	Atomic %	Uncertainty %	Correction	k-Factor
O (K)	34.196	54.106	0.627	0.514	1.98
Al (K)	1.654	1.551	0.1	0.965	1.04
Si (K)	12.365	11.145	0.234	0.977	1
S (K)	1.373	1.084	0.094	0.911	1.101
Ca (K)	49.749	31.422	0.437	0.975	1.148
Mg (K)	0.661	0.688	0.076	0.945	1.034

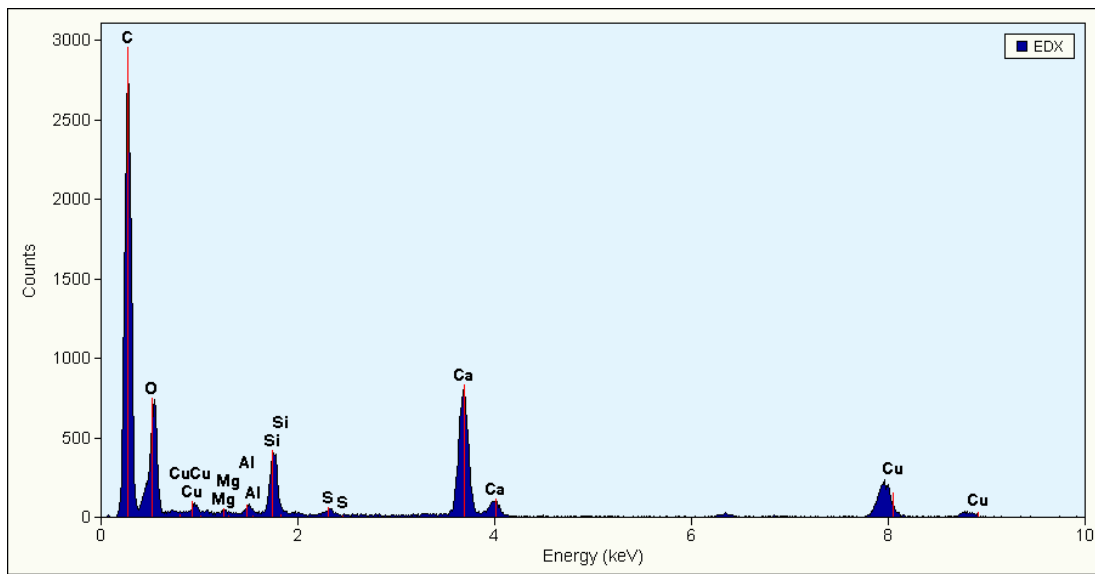


Figura 5.6. 16. Grafica del análisis químico realizado en el cemento hidratado.

5.7. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL MAC

5.7.1. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA (IES)

Para poder llevar a cabo la caracterización eléctrica de un compuesto es necesario conformar un sistema rígido, con geometría bien definida. Es común hacer este tipo de trabajo con muestras sinterizadas en forma de pastilla o paralelepípedo. En nuestro caso para poder llevar a cabo estas mediciones se tuvieron que elaborar unas pastillas circulares de aproximadamente 1.5 de diámetro y con un espesor de 0.5cm, tal como se muestra en la figura 5.7.1. El cual estos fueron elaborados el mismo día que todas las muestras para las pruebas antes vistas.



Figura 5.7. 1. Pastillas circulares elaboradas para la caracterización eléctrica.

Para poder llevar a cabo la caracterización eléctrica de los especímenes, se tuvieron que preparar las muestras dándole un tratamiento físico el cual fue el lijado de las dos caras de las pastillas, esto con la finalidad de que se tuviera un buen contacto entre las caras del espécimen con los electrodos. Después estos fueron sometidos a un proceso de secado, dejándolos en el horno a 50°C por dos días, esto se hace para poder eliminar la presencia de agua en los poros de las muestras.

Fue necesario colocarle en sus caras opuestas un material que funcione como electrodo, por lo general puede ser de oro, plata, platino, o algún otro metal, el cual depende del tipo de material que se esté ensayando. En el caso de nosotros fue necesario hacer ese recubrimiento en las caras opuestas de las pastillas con pintura plata, en cual se puede ver en la figura 5.7.2 el acabado final de cada una de las pastillas.



Figura 5.7. 2. Preparación y acabado final de las muestras antes del ensayo.

Después de haber terminado este proceso, se dejaron por lo menos 24 horas a temperatura ambiente las pastillas ya pintadas con la finalidad para que la pintura de plata pudiera estar seca antes de proceder con el ensayo.

Para poder llevar a cabo la medición, el equipo utilizado fue un SOLARTRON SI 1260 que está constituida por un generador/analizador de funciones conocido como FRA, por sus siglas en ingles “frequency response analyser”, el cual puede aplicar o analizar señales sinusoidales, en un amplio intervalo de frecuencias. También cuenta con una interface dieléctrica, modelo 1296-2A. En la figura 5.7.3 se puede ver el equipo utilizado descrito anteriormente.



Figura 5.7. 3. Equipo utilizado para la caracterización eléctrica de las muestras.

Este equipo utilizado cuenta con un porta muestras modelo 1296-2A el cual este va conectado al con el equipo de interface dieléctrica. Este fue diseñado para ser utilizado a temperatura ambiente cuando se esté probando materiales sólidas que puedan tener una alta impedancia. Este cuenta con dos electrodos paralelos, en donde una es fija y la otra se puede mover hasta el contacto con la muestra mediante el ajuste con el micrómetro integrado. En la figura 5.7.4 se puede ver el porta muestras antes descrito y en la figura 5.7.5 el arreglo de los electrodos en el porta muestra.



Figura 5.7. 4. Porta muestras modelo 1296-2A para especímenes sólidos

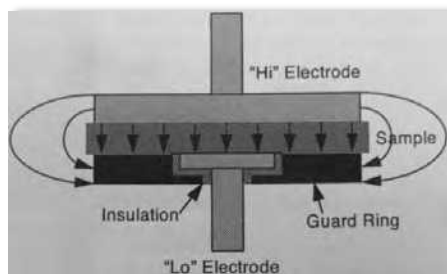


Figura 5.7. 5. Arreglo de los electrodos en el porta muestras 1296-2A.

Una vez colocado la pastilla en el porta muestras, se prosigue a realizar el ensayo. Para poder ir viendo en tiempo real los resultados del ensayo, se tuvo que utilizar el software del mismo equipo, el cual es denominado SmaRT (Solartron Materials Research and Test Software).

En el caso nuestro se tuvo que programar el equipo para que hiciera tres mediciones (sweep) y haciendo variaciones en el voltaje aplicado, con el fin de tener una respuesta de impedancia más estable, por lo cual se decidió trabajar con un **voltaje constante de 200mV y el rango de frecuencia en el que se hizo el análisis fue de 10mHz -1MHz.**

Las pastillas elaboradas fueron nada más de las composiciones M-1L, M-1, M-2L, M2, M-3L, M-4L, M4, M7 Y M8. En la tabla 5.7.1 se presentan los compuestos de cada una de las composiciones antes mencionadas.

Tabla 5.7. 1. Composiciones utilizadas para la elaboración de las pastillas.

DOSIFICACIÓN FINAL DEL MAC CON AGREGADO DE GRANULOMETRÍA SELECCIONADA									
COMPOSICIÓN	M-1L	M-1	M-2L	M-2	M-3L	M-4L	M-4	M-7	M-8
	PORCENTAJE RESPECTO AL PESO DE CEMENTO								
CPC 30R-RS, TOLTECA	100	100	100	100	100	100	100	100	100
AGREGADO ASTM	-	100	-	100	-	-	100	-	
OXIDO DE HIERRO	-	-	50	50	50	-	-	-	
CARBÓN CC	-	-	-	-	10	15	15	-	
CROSS	-	-	-	-	-	-	-	-	10
PERLITA	-	-	-	-	-	-	-	30	30
R A/C	0.29	0.29	0.35	0.35	0.4	0.35	0.35	0.45	0.5
HIPERFLUIDIFICANTE PLASTOL 4000	15 GRAMOS POR KILOGRAMO DE CEMENTO								

El objetivo de la medición de las diferentes composiciones, era ver como variaban las resistencias y las capacitancias, para ello como primer paso era hacer la medición de las impedancias de cada una de las pastillas. Una vez obtenido los datos, se calculaban la parte real (Z') e imaginaria (Z''), para poder graficarlas en la forma de Nyquist plot y así poder analizarlas.

A continuación, se presentarán una serie de tablas donde se podrá observar el rango de frecuencia utilizada, el valor de la impedancia, el ángulo de fase, y los valores calculados de la parte real e imaginaria de cada una de las composiciones. Después de cada tabla, se mostrara la grafica de los datos en Nyquist plot. Estos gráficos fueron realizados con un software denominado Zview, que es únicamente para ver espectroscopias de impedancia. En cada una de las graficas, fueron trazados los semicírculos, esto con la finalidad de poder calcular los valores de la Resistencia (Ohms) y las capacitancias (Fadios), el cual se mostrarán los resultados en la tabla 5.7.19.

Tabla 5.7. 2. Datos de la medición en la muestra M-1L

Frequency (Hz)	Z	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	2.12E+08	-2.63E+01	1.90E+08	-9.41E+07
1.26E-02	1.97E+08	-2.81E+01	1.73E+08	-9.27E+07
1.58E-02	1.85E+08	-3.07E+01	1.59E+08	-9.46E+07
2.00E-02	1.71E+08	-3.33E+01	1.43E+08	-9.41E+07
2.51E-02	1.56E+08	-3.61E+01	1.26E+08	-9.19E+07
3.16E-02	1.42E+08	-3.90E+01	1.11E+08	-8.95E+07
3.98E-02	1.29E+08	-4.20E+01	9.57E+07	-8.61E+07
5.01E-02	1.15E+08	-4.50E+01	8.16E+07	-8.14E+07
6.31E-02	1.02E+08	-4.80E+01	6.83E+07	-7.58E+07
7.94E-02	8.97E+07	-5.07E+01	5.67E+07	-6.94E+07
1.00E-01	7.82E+07	-5.36E+01	4.64E+07	-6.29E+07
1.26E-01	6.74E+07	-5.60E+01	3.77E+07	-5.59E+07
1.58E-01	5.80E+07	-5.85E+01	3.03E+07	-4.94E+07
2.00E-01	4.93E+07	-6.07E+01	2.42E+07	-4.30E+07
2.51E-01	4.20E+07	-6.29E+01	1.92E+07	-3.74E+07
3.16E-01	3.54E+07	-6.45E+01	1.52E+07	-3.20E+07
3.98E-01	2.97E+07	-6.63E+01	1.20E+07	-2.72E+07
5.01E-01	2.49E+07	-6.78E+01	9.41E+06	-2.31E+07
6.31E-01	2.08E+07	-6.93E+01	7.36E+06	-1.95E+07
7.94E-01	1.73E+07	-7.06E+01	5.75E+06	-1.63E+07
1.00E+00	1.43E+07	-7.17E+01	4.51E+06	-1.36E+07
1.26E+00	1.19E+07	-7.27E+01	3.53E+06	-1.13E+07
1.58E+00	9.79E+06	-7.36E+01	2.77E+06	-9.39E+06
2.00E+00	8.06E+06	-7.43E+01	2.18E+06	-7.76E+06
2.51E+00	6.63E+06	-7.49E+01	1.72E+06	-6.40E+06
3.16E+00	5.44E+06	-7.55E+01	1.37E+06	-5.27E+06
3.98E+00	4.47E+06	-7.59E+01	1.09E+06	-4.33E+06
5.01E+00	3.66E+06	-7.62E+01	8.76E+05	-3.55E+06
6.31E+00	3.00E+06	-7.63E+01	7.08E+05	-2.91E+06
7.94E+00	2.45E+06	-7.64E+01	5.77E+05	-2.38E+06
1.00E+01	2.01E+06	-7.63E+01	4.74E+05	-1.95E+06
1.26E+01	1.64E+06	-7.61E+01	3.93E+05	-1.59E+06
1.58E+01	1.34E+06	-7.58E+01	3.29E+05	-1.30E+06
2.00E+01	1.10E+06	-7.53E+01	2.79E+05	-1.06E+06
2.51E+01	9.01E+05	-7.46E+01	2.39E+05	-8.69E+05
3.16E+01	7.39E+05	-7.38E+01	2.07E+05	-7.10E+05
3.98E+01	6.07E+05	-7.27E+01	1.81E+05	-5.80E+05
5.01E+01	5.00E+05	-7.13E+01	1.60E+05	-4.74E+05
6.31E+01	4.13E+05	-6.97E+01	1.43E+05	-3.88E+05
7.94E+01	3.43E+05	-6.78E+01	1.29E+05	-3.17E+05
1.00E+02	2.86E+05	-6.56E+01	1.18E+05	-2.60E+05

1.26E+02	2.39E+05	-6.31E+01	1.08E+05	-2.14E+05
1.58E+02	2.02E+05	-6.03E+01	1.00E+05	-1.76E+05
2.00E+02	1.72E+05	-5.72E+01	9.35E+04	-1.45E+05
2.51E+02	1.48E+05	-5.38E+01	8.78E+04	-1.20E+05
3.16E+02	1.29E+05	-5.02E+01	8.28E+04	-9.92E+04
3.98E+02	1.14E+05	-4.64E+01	7.85E+04	-8.25E+04
5.01E+02	1.02E+05	-4.26E+01	7.47E+04	-6.88E+04
6.31E+02	9.17E+04	-3.88E+01	7.15E+04	-5.75E+04
7.94E+02	8.39E+04	-3.52E+01	6.86E+04	-4.83E+04
1.00E+03	7.77E+04	-3.17E+01	6.61E+04	-4.08E+04
1.26E+03	7.27E+04	-2.85E+01	6.39E+04	-3.47E+04
1.58E+03	6.87E+04	-2.56E+01	6.20E+04	-2.97E+04
2.00E+03	6.55E+04	-2.31E+01	6.02E+04	-2.57E+04
2.51E+03	6.28E+04	-2.10E+01	5.87E+04	-2.25E+04
3.16E+03	6.06E+04	-1.93E+01	5.72E+04	-2.00E+04
3.98E+03	5.87E+04	-1.80E+01	5.58E+04	-1.82E+04
5.01E+03	5.70E+04	-1.72E+01	5.44E+04	-1.68E+04
6.31E+03	5.54E+04	-1.67E+01	5.30E+04	-1.59E+04
7.94E+03	5.38E+04	-1.66E+01	5.15E+04	-1.54E+04
1.00E+04	5.22E+04	-1.69E+01	5.00E+04	-1.52E+04
1.26E+04	5.06E+04	-1.74E+01	4.83E+04	-1.52E+04
1.58E+04	4.89E+04	-1.83E+01	4.64E+04	-1.54E+04
2.00E+04	4.71E+04	-1.95E+01	4.44E+04	-1.57E+04
2.51E+04	4.52E+04	-2.10E+01	4.22E+04	-1.62E+04
3.16E+04	4.31E+04	-2.26E+01	3.98E+04	-1.66E+04
3.98E+04	4.09E+04	-2.45E+01	3.72E+04	-1.70E+04
5.01E+04	3.86E+04	-2.66E+01	3.45E+04	-1.73E+04
6.31E+04	3.61E+04	-2.88E+01	3.17E+04	-1.74E+04
7.94E+04	3.36E+04	-3.12E+01	2.88E+04	-1.74E+04
1.00E+05	3.10E+04	-3.35E+01	2.59E+04	-1.71E+04
1.26E+05	2.85E+04	-3.61E+01	2.30E+04	-1.67E+04
1.58E+05	2.58E+04	-3.87E+01	2.01E+04	-1.62E+04
2.00E+05	2.33E+04	-4.13E+01	1.75E+04	-1.54E+04
2.51E+05	2.08E+04	-4.38E+01	1.50E+04	-1.44E+04
3.16E+05	1.85E+04	-4.62E+01	1.28E+04	-1.33E+04
3.98E+05	1.63E+04	-4.85E+01	1.08E+04	-1.22E+04
5.01E+05	1.42E+04	-5.06E+01	9.02E+03	-1.10E+04
6.31E+05	1.24E+04	-5.26E+01	7.50E+03	-9.81E+03
7.94E+05	1.07E+04	-5.44E+01	6.20E+03	-8.66E+03
1.00E+06	9.12E+03	-5.60E+01	5.10E+03	-7.56E+03

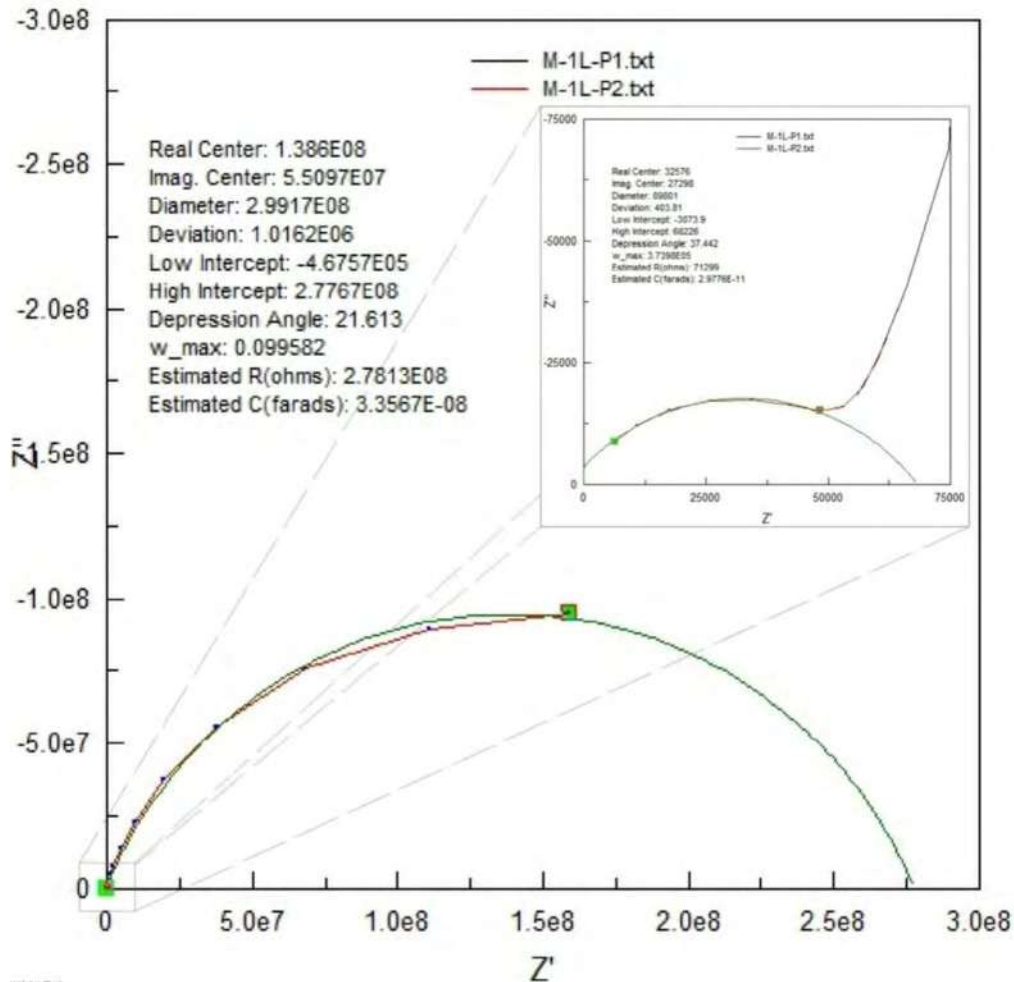


Figura 5.7. 6. Nyquist plot de la muestra M-1L

La figura 5.7.6 muestra que el material cuya composición corresponde al CPC-30R-RS tiene dos resistencias mostrados en la tabla 5.7.19, una de $2.7813E08$ Ohms y 71299 Ohms. La resistencia menor podría despreciarse porque es tan pequeña con respecto a la resistencia principal del material. Esa resistencia pequeña pudiera ser debido a que alguno de los componentes que conforman este cemento tiene un cambio significativo de tamaño de partícula con respecto a la media de todos los granos de este material. También se podría considerar que la capacitancia varía conforme al tamaño del semicírculo.

Tabla 5.7. 3. Datos de la medición en la muestra M-1

Frequency (Hz)	Z prom	ω Phase	Z'	Z''
1.00E-02	2.54E+08	-2.32E+01	2.33E+08	-9.99E+07
1.26E-02	2.42E+08	-2.51E+01	2.19E+08	-1.03E+08
1.58E-02	2.32E+08	-2.74E+01	2.06E+08	-1.07E+08
2.00E-02	2.24E+08	-2.99E+01	1.94E+08	-1.12E+08
2.51E-02	2.11E+08	-3.25E+01	1.78E+08	-1.13E+08
3.16E-02	1.95E+08	-3.50E+01	1.59E+08	-1.12E+08
3.98E-02	1.75E+08	-3.72E+01	1.39E+08	-1.06E+08
5.01E-02	1.57E+08	-3.95E+01	1.21E+08	-9.97E+07
6.31E-02	1.40E+08	-4.16E+01	1.04E+08	-9.28E+07
7.94E-02	1.25E+08	-4.37E+01	9.03E+07	-8.64E+07
1.00E-01	1.12E+08	-4.61E+01	7.73E+07	-8.05E+07
1.26E-01	9.81E+07	-4.85E+01	6.50E+07	-7.35E+07
1.58E-01	8.58E+07	-5.02E+01	5.49E+07	-6.59E+07
2.00E-01	7.48E+07	-5.23E+01	4.58E+07	-5.92E+07
2.51E-01	6.47E+07	-5.41E+01	3.80E+07	-5.24E+07
3.16E-01	5.60E+07	-5.57E+01	3.16E+07	-4.62E+07
3.98E-01	4.81E+07	-5.71E+01	2.61E+07	-4.04E+07
5.01E-01	4.12E+07	-5.86E+01	2.15E+07	-3.52E+07
6.31E-01	3.53E+07	-6.00E+01	1.76E+07	-3.05E+07
7.94E-01	3.00E+07	-6.12E+01	1.44E+07	-2.63E+07
1.00E+00	2.55E+07	-6.22E+01	1.19E+07	-2.25E+07
1.26E+00	2.16E+07	-6.32E+01	9.72E+06	-1.92E+07
1.58E+00	1.82E+07	-6.40E+01	7.99E+06	-1.64E+07
2.00E+00	1.53E+07	-6.46E+01	6.59E+06	-1.39E+07
2.51E+00	1.29E+07	-6.50E+01	5.46E+06	-1.17E+07
3.16E+00	1.08E+07	-6.52E+01	4.54E+06	-9.84E+06
3.98E+00	9.10E+06	-6.52E+01	3.81E+06	-8.26E+06
5.01E+00	7.63E+06	-6.51E+01	3.22E+06	-6.92E+06
6.31E+00	6.41E+06	-6.46E+01	2.74E+06	-5.79E+06
7.94E+00	5.38E+06	-6.40E+01	2.36E+06	-4.84E+06
1.00E+01	4.53E+06	-6.31E+01	2.05E+06	-4.04E+06
1.26E+01	3.82E+06	-6.19E+01	1.80E+06	-3.37E+06
1.58E+01	3.23E+06	-6.04E+01	1.60E+06	-2.81E+06
2.00E+01	2.75E+06	-5.87E+01	1.43E+06	-2.35E+06
2.51E+01	2.35E+06	-5.67E+01	1.29E+06	-1.96E+06
3.16E+01	2.02E+06	-5.44E+01	1.18E+06	-1.64E+06
3.98E+01	1.75E+06	-5.20E+01	1.08E+06	-1.38E+06
5.01E+01	1.53E+06	-4.93E+01	9.97E+05	-1.16E+06
6.31E+01	1.35E+06	-4.66E+01	9.26E+05	-9.79E+05
7.94E+01	1.20E+06	-4.37E+01	8.66E+05	-8.28E+05
1.00E+02	1.08E+06	-4.08E+01	8.14E+05	-7.03E+05

1.26E+02	9.74E+05	-3.80E+01	7.68E+05	-5.99E+05
1.58E+02	8.90E+05	-3.52E+01	7.27E+05	-5.13E+05
2.00E+02	8.21E+05	-3.25E+01	6.92E+05	-4.41E+05
2.51E+02	7.63E+05	-3.00E+01	6.60E+05	-3.82E+05
3.16E+02	7.14E+05	-2.77E+01	6.32E+05	-3.32E+05
3.98E+02	6.73E+05	-2.57E+01	6.07E+05	-2.91E+05
5.01E+02	6.38E+05	-2.38E+01	5.84E+05	-2.58E+05
6.31E+02	6.08E+05	-2.23E+01	5.63E+05	-2.31E+05
7.94E+02	5.82E+05	-2.10E+01	5.44E+05	-2.09E+05
1.00E+03	5.60E+05	-2.01E+01	5.25E+05	-1.92E+05
1.26E+03	5.39E+05	-1.95E+01	5.08E+05	-1.80E+05
1.58E+03	5.20E+05	-1.92E+01	4.91E+05	-1.71E+05
2.00E+03	5.02E+05	-1.93E+01	4.73E+05	-1.66E+05
2.51E+03	4.84E+05	-1.98E+01	4.55E+05	-1.64E+05
3.16E+03	4.66E+05	-2.06E+01	4.36E+05	-1.64E+05
3.98E+03	4.48E+05	-2.18E+01	4.16E+05	-1.66E+05
5.01E+03	4.28E+05	-2.33E+01	3.93E+05	-1.70E+05
6.31E+03	4.07E+05	-2.52E+01	3.68E+05	-1.74E+05
7.94E+03	3.85E+05	-2.75E+01	3.42E+05	-1.78E+05
1.00E+04	3.61E+05	-3.00E+01	3.13E+05	-1.80E+05
1.26E+04	3.36E+05	-3.27E+01	2.83E+05	-1.82E+05
1.58E+04	3.10E+05	-3.57E+01	2.52E+05	-1.81E+05
2.00E+04	2.83E+05	-3.88E+01	2.20E+05	-1.77E+05
2.51E+04	2.55E+05	-4.19E+01	1.90E+05	-1.70E+05
3.16E+04	2.28E+05	-4.50E+01	1.61E+05	-1.61E+05
3.98E+04	2.02E+05	-4.80E+01	1.35E+05	-1.50E+05
5.01E+04	1.77E+05	-5.09E+01	1.12E+05	-1.38E+05
6.31E+04	1.54E+05	-5.37E+01	9.14E+04	-1.24E+05
7.94E+04	1.33E+05	-5.63E+01	7.39E+04	-1.11E+05
1.00E+05	1.14E+05	-5.88E+01	5.92E+04	-9.77E+04
1.26E+05	9.73E+04	-6.11E+01	4.71E+04	-8.52E+04
1.58E+05	8.23E+04	-6.33E+01	3.70E+04	-7.35E+04
2.00E+05	6.93E+04	-6.52E+01	2.91E+04	-6.29E+04
2.51E+05	5.80E+04	-6.69E+01	2.28E+04	-5.33E+04
3.16E+05	4.84E+04	-6.84E+01	1.78E+04	-4.49E+04
3.98E+05	4.02E+04	-6.97E+01	1.40E+04	-3.77E+04
5.01E+05	3.32E+04	-7.08E+01	1.10E+04	-3.14E+04
6.31E+05	2.74E+04	-7.17E+01	8.62E+03	-2.60E+04
7.94E+05	2.25E+04	-7.24E+01	6.81E+03	-2.14E+04
1.00E+06	1.84E+04	-7.29E+01	5.41E+03	-1.76E+04

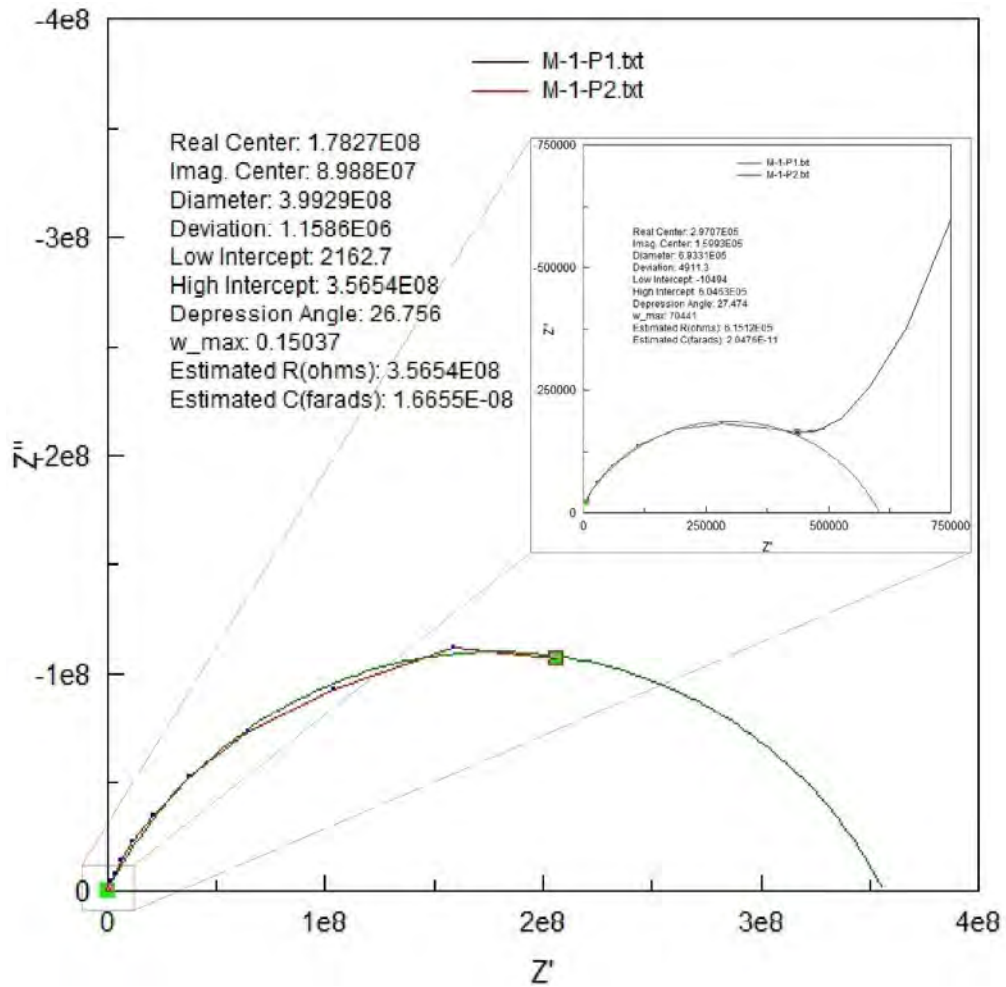


Figura 5.7. 7. Nyquist plot de la muestra M-1.

La figura 5.7.7 describe el comportamiento de la muestra M-1 al variar la frecuencia. Donde se obtuvo una resistencia mayor que en el caso de la muestra M1-L. Esto podría ser debido a la incorporación de nuevos agregados a la muestra, dando una mejor resistencia del material. Las resistencias y capacitancias de este material se pueden observar en la tabla 5.7.12.

Tabla 5.7. 4. Datos de la medición en la muestra M-2.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	7.26E+07	-3.19E+01	6.16E+07	-3.83E+07
1.26E-02	6.73E+07	-3.25E+01	5.68E+07	-3.62E+07
1.58E-02	6.25E+07	-3.35E+01	5.21E+07	-3.45E+07
2.00E-02	5.77E+07	-3.44E+01	4.76E+07	-3.26E+07
2.51E-02	5.30E+07	-3.52E+01	4.33E+07	-3.06E+07
3.16E-02	4.86E+07	-3.58E+01	3.94E+07	-2.84E+07
3.98E-02	4.45E+07	-3.62E+01	3.59E+07	-2.62E+07
5.01E-02	4.08E+07	-3.70E+01	3.26E+07	-2.46E+07
6.31E-02	3.71E+07	-3.80E+01	2.93E+07	-2.29E+07
7.94E-02	3.36E+07	-3.87E+01	2.62E+07	-2.10E+07
1.00E-01	3.06E+07	-3.93E+01	2.36E+07	-1.94E+07
1.26E-01	2.77E+07	-4.05E+01	2.11E+07	-1.80E+07
1.58E-01	2.49E+07	-4.13E+01	1.87E+07	-1.64E+07
2.00E-01	2.25E+07	-4.23E+01	1.67E+07	-1.52E+07
2.51E-01	2.02E+07	-4.34E+01	1.46E+07	-1.38E+07
3.16E-01	1.81E+07	-4.46E+01	1.29E+07	-1.27E+07
3.98E-01	1.61E+07	-4.59E+01	1.12E+07	-1.16E+07
5.01E-01	1.43E+07	-4.70E+01	9.77E+06	-1.05E+07
6.31E-01	1.27E+07	-4.83E+01	8.44E+06	-9.46E+06
7.94E-01	1.12E+07	-4.95E+01	7.27E+06	-8.51E+06
1.00E+00	9.82E+06	-5.06E+01	6.24E+06	-7.58E+06
1.26E+00	8.60E+06	-5.17E+01	5.33E+06	-6.76E+06
1.58E+00	7.49E+06	-5.28E+01	4.53E+06	-5.97E+06
2.00E+00	6.51E+06	-5.37E+01	3.86E+06	-5.24E+06
2.51E+00	5.63E+06	-5.44E+01	3.28E+06	-4.58E+06
3.16E+00	4.87E+06	-5.50E+01	2.79E+06	-3.99E+06
3.98E+00	4.20E+06	-5.54E+01	2.39E+06	-3.46E+06
5.01E+00	3.62E+06	-5.56E+01	2.04E+06	-2.99E+06
6.31E+00	3.12E+06	-5.57E+01	1.76E+06	-2.57E+06
7.94E+00	2.68E+06	-5.55E+01	1.52E+06	-2.21E+06
1.00E+01	2.31E+06	-5.51E+01	1.32E+06	-1.90E+06
1.26E+01	1.99E+06	-5.46E+01	1.16E+06	-1.63E+06
1.58E+01	1.73E+06	-5.38E+01	1.02E+06	-1.39E+06
2.00E+01	1.50E+06	-5.29E+01	9.02E+05	-1.19E+06
2.51E+01	1.30E+06	-5.19E+01	8.04E+05	-1.02E+06
3.16E+01	1.14E+06	-5.07E+01	7.20E+05	-8.78E+05
3.98E+01	9.95E+05	-4.94E+01	6.48E+05	-7.55E+05
5.01E+01	8.75E+05	-4.80E+01	5.86E+05	-6.50E+05
6.31E+01	7.73E+05	-4.65E+01	5.32E+05	-5.60E+05
7.94E+01	6.86E+05	-4.49E+01	4.86E+05	-4.84E+05
1.00E+02	6.11E+05	-4.33E+01	4.45E+05	-4.19E+05

1.26E+02	5.48E+05	-4.16E+01	4.10E+05	-3.63E+05
1.58E+02	4.93E+05	-3.98E+01	3.79E+05	-3.16E+05
2.00E+02	4.46E+05	-3.81E+01	3.51E+05	-2.75E+05
2.51E+02	4.06E+05	-3.63E+01	3.27E+05	-2.41E+05
3.16E+02	3.71E+05	-3.46E+01	3.05E+05	-2.11E+05
3.98E+02	3.41E+05	-3.30E+01	2.86E+05	-1.86E+05
5.01E+02	3.15E+05	-3.14E+01	2.69E+05	-1.64E+05
6.31E+02	2.93E+05	-2.99E+01	2.54E+05	-1.46E+05
7.94E+02	2.73E+05	-2.85E+01	2.40E+05	-1.30E+05
1.00E+03	2.56E+05	-2.72E+01	2.28E+05	-1.17E+05
1.26E+03	2.41E+05	-2.62E+01	2.16E+05	-1.06E+05
1.58E+03	2.27E+05	-2.53E+01	2.05E+05	-9.72E+04
2.00E+03	2.15E+05	-2.47E+01	1.95E+05	-8.97E+04
2.51E+03	2.04E+05	-2.42E+01	1.86E+05	-8.36E+04
3.16E+03	1.93E+05	-2.41E+01	1.77E+05	-7.88E+04
3.98E+03	1.84E+05	-2.42E+01	1.68E+05	-7.52E+04
5.01E+03	1.74E+05	-2.45E+01	1.59E+05	-7.23E+04
6.31E+03	1.65E+05	-2.51E+01	1.50E+05	-7.01E+04
7.94E+03	1.57E+05	-2.59E+01	1.41E+05	-6.85E+04
1.00E+04	1.48E+05	-2.71E+01	1.32E+05	-6.73E+04
1.26E+04	1.39E+05	-2.85E+01	1.22E+05	-6.64E+04
1.58E+04	1.30E+05	-3.02E+01	1.13E+05	-6.55E+04
2.00E+04	1.21E+05	-3.21E+01	1.03E+05	-6.45E+04
2.51E+04	1.12E+05	-3.43E+01	9.27E+04	-6.32E+04
3.16E+04	1.03E+05	-3.66E+01	8.27E+04	-6.15E+04
3.98E+04	9.40E+04	-3.91E+01	7.29E+04	-5.93E+04
5.01E+04	8.51E+04	-4.17E+01	6.35E+04	-5.66E+04
6.31E+04	7.63E+04	-4.44E+01	5.45E+04	-5.33E+04
7.94E+04	6.78E+04	-4.71E+01	4.62E+04	-4.97E+04
1.00E+05	5.98E+04	-4.97E+01	3.87E+04	-4.56E+04
1.26E+05	5.24E+04	-5.23E+01	3.20E+04	-4.14E+04
1.58E+05	4.54E+04	-5.48E+01	2.61E+04	-3.71E+04
2.00E+05	3.91E+04	-5.71E+01	2.12E+04	-3.28E+04
2.51E+05	3.34E+04	-5.93E+01	1.71E+04	-2.87E+04
3.16E+05	2.84E+04	-6.12E+01	1.37E+04	-2.49E+04
3.98E+05	2.40E+04	-6.30E+01	1.09E+04	-2.14E+04
5.01E+05	2.02E+04	-6.45E+01	8.69E+03	-1.83E+04
6.31E+05	1.69E+04	-6.59E+01	6.92E+03	-1.55E+04
7.94E+05	1.41E+04	-6.70E+01	5.51E+03	-1.30E+04
1.00E+06	1.17E+04	-6.80E+01	4.39E+03	-1.09E+04

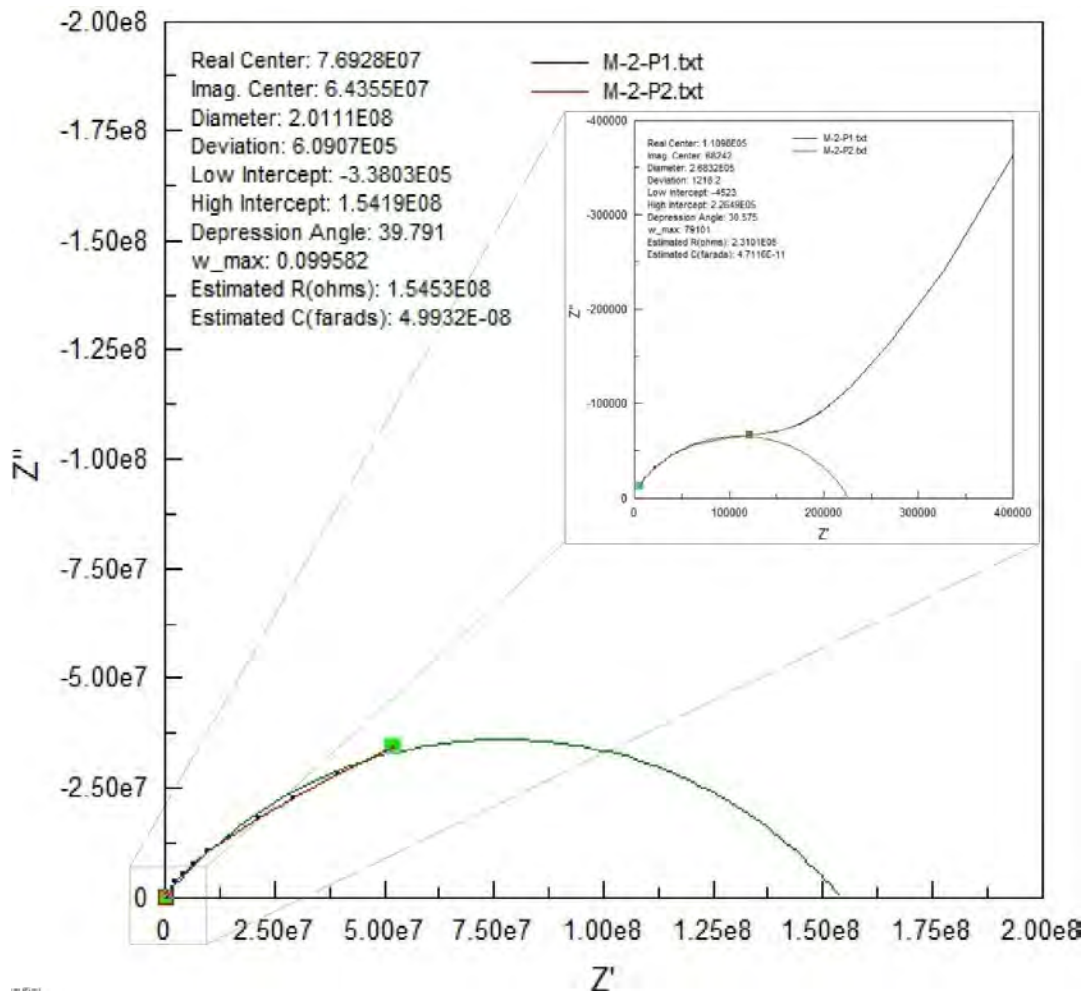


Figura 5.7. 8. Nyquist plot de la muestra M-2.

A diferencia de la muestra M-1, en la muestra M-2 se le agregó óxido de hierro provocando que la resistencia total del material disminuyera y la capacitancia aumentara. Esto es debido a que en la muestra M-1 se tiene mayor cantidad de agregado pétreo que en la muestra M-2. El óxido de hierro tiene menor resistencia eléctrica que el agregado, y si en la muestra M-2 hay menor cantidad de agregado, se tendría como consecuencia una disminución de la resistencia total de la muestra M-2. Por otro lado, podemos hacer una comparación similar la muestra M-1L y la M-2L (figura 5.7.9), y podríamos pensar que la muestra M-2L se esperaría una resistencia eléctrica menor a la muestra M-1L. Sin embargo, esto no es así, debido a que el óxido de hierro es un material que tiene una cierta resistencia eléctrica, y lo que se tiene entre la muestra M-2L y la M-1L es la adición del óxido de hierro de acuerdo a la tabla 5.7.1 y la tabla 5.7.12.

Tabla 5.7. 5. Datos de la medición en la muestra M-2L.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	1.49E+08	-3.83E+01	1.17E+08	-9.20E+07
1.26E-02	1.34E+08	-3.97E+01	1.03E+08	-8.59E+07
1.58E-02	1.22E+08	-4.14E+01	9.12E+07	-8.05E+07
2.00E-02	1.09E+08	-4.30E+01	7.98E+07	-7.46E+07
2.51E-02	9.80E+07	-4.47E+01	6.97E+07	-6.89E+07
3.16E-02	8.72E+07	-4.59E+01	6.07E+07	-6.26E+07
3.98E-02	7.77E+07	-4.74E+01	5.26E+07	-5.72E+07
5.01E-02	6.88E+07	-4.88E+01	4.53E+07	-5.17E+07
6.31E-02	6.05E+07	-5.02E+01	3.87E+07	-4.65E+07
7.94E-02	5.31E+07	-5.13E+01	3.32E+07	-4.14E+07
1.00E-01	4.66E+07	-5.27E+01	2.83E+07	-3.71E+07
1.26E-01	4.06E+07	-5.40E+01	2.39E+07	-3.29E+07
1.58E-01	3.54E+07	-5.54E+01	2.01E+07	-2.91E+07
2.00E-01	3.06E+07	-5.67E+01	1.68E+07	-2.56E+07
2.51E-01	2.64E+07	-5.81E+01	1.39E+07	-2.24E+07
3.16E-01	2.26E+07	-5.95E+01	1.15E+07	-1.95E+07
3.98E-01	1.94E+07	-6.08E+01	9.46E+06	-1.69E+07
5.01E-01	1.65E+07	-6.20E+01	7.73E+06	-1.46E+07
6.31E-01	1.40E+07	-6.31E+01	6.33E+06	-1.25E+07
7.94E-01	1.18E+07	-6.43E+01	5.14E+06	-1.07E+07
1.00E+00	9.96E+06	-6.52E+01	4.19E+06	-9.04E+06
1.26E+00	8.38E+06	-6.59E+01	3.41E+06	-7.65E+06
1.58E+00	7.02E+06	-6.65E+01	2.80E+06	-6.44E+06
2.00E+00	5.88E+06	-6.69E+01	2.31E+06	-5.40E+06
2.51E+00	4.92E+06	-6.70E+01	1.92E+06	-4.53E+06
3.16E+00	4.11E+06	-6.70E+01	1.61E+06	-3.79E+06
3.98E+00	3.44E+06	-6.68E+01	1.35E+06	-3.17E+06
5.01E+00	2.88E+06	-6.65E+01	1.15E+06	-2.64E+06
6.31E+00	2.42E+06	-6.59E+01	9.86E+05	-2.21E+06
7.94E+00	2.03E+06	-6.53E+01	8.51E+05	-1.85E+06
1.00E+01	1.71E+06	-6.44E+01	7.39E+05	-1.55E+06
1.26E+01	1.45E+06	-6.35E+01	6.46E+05	-1.29E+06
1.58E+01	1.23E+06	-6.24E+01	5.68E+05	-1.09E+06
2.00E+01	1.04E+06	-6.12E+01	5.03E+05	-9.13E+05
2.51E+01	8.89E+05	-5.98E+01	4.47E+05	-7.68E+05
3.16E+01	7.61E+05	-5.84E+01	3.99E+05	-6.48E+05
3.98E+01	6.54E+05	-5.69E+01	3.57E+05	-5.48E+05
5.01E+01	5.65E+05	-5.53E+01	3.22E+05	-4.64E+05
6.31E+01	4.90E+05	-5.36E+01	2.91E+05	-3.94E+05
7.94E+01	4.27E+05	-5.18E+01	2.64E+05	-3.35E+05
1.00E+02	3.73E+05	-4.99E+01	2.40E+05	-2.86E+05

1.26E+02	3.28E+05	-4.80E+01	2.20E+05	-2.44E+05
1.58E+02	2.91E+05	-4.60E+01	2.02E+05	-2.09E+05
2.00E+02	2.59E+05	-4.39E+01	1.86E+05	-1.79E+05
2.51E+02	2.32E+05	-4.17E+01	1.73E+05	-1.54E+05
3.16E+02	2.09E+05	-3.96E+01	1.61E+05	-1.33E+05
3.98E+02	1.90E+05	-3.75E+01	1.51E+05	-1.15E+05
5.01E+02	1.73E+05	-3.54E+01	1.41E+05	-1.00E+05
6.31E+02	1.59E+05	-3.34E+01	1.33E+05	-8.78E+04
7.94E+02	1.47E+05	-3.16E+01	1.26E+05	-7.72E+04
1.00E+03	1.37E+05	-2.99E+01	1.19E+05	-6.84E+04
1.26E+03	1.28E+05	-2.84E+01	1.13E+05	-6.10E+04
1.58E+03	1.21E+05	-2.71E+01	1.07E+05	-5.49E+04
2.00E+03	1.14E+05	-2.60E+01	1.02E+05	-4.99E+04
2.51E+03	1.07E+05	-2.52E+01	9.72E+04	-4.58E+04
3.16E+03	1.02E+05	-2.47E+01	9.25E+04	-4.25E+04
3.98E+03	9.66E+04	-2.44E+01	8.80E+04	-3.99E+04
5.01E+03	9.17E+04	-2.43E+01	8.35E+04	-3.78E+04
6.31E+03	8.70E+04	-2.46E+01	7.91E+04	-3.62E+04
7.94E+03	8.25E+04	-2.50E+01	7.47E+04	-3.49E+04
1.00E+04	7.80E+04	-2.58E+01	7.02E+04	-3.39E+04
1.26E+04	7.36E+04	-2.68E+01	6.57E+04	-3.31E+04
1.58E+04	6.92E+04	-2.80E+01	6.11E+04	-3.25E+04
2.00E+04	6.48E+04	-2.94E+01	5.65E+04	-3.18E+04
2.51E+04	6.04E+04	-3.10E+01	5.18E+04	-3.11E+04
3.16E+04	5.60E+04	-3.28E+01	4.71E+04	-3.03E+04
3.98E+04	5.16E+04	-3.47E+01	4.24E+04	-2.94E+04
5.01E+04	4.73E+04	-3.68E+01	3.79E+04	-2.83E+04
6.31E+04	4.30E+04	-3.89E+01	3.35E+04	-2.70E+04
7.94E+04	3.89E+04	-4.09E+01	2.94E+04	-2.55E+04
1.00E+05	3.49E+04	-4.31E+01	2.55E+04	-2.39E+04
1.26E+05	3.12E+04	-4.53E+01	2.19E+04	-2.22E+04
1.58E+05	2.76E+04	-4.75E+01	1.86E+04	-2.04E+04
2.00E+05	2.43E+04	-4.96E+01	1.57E+04	-1.85E+04
2.51E+05	2.12E+04	-5.16E+01	1.32E+04	-1.66E+04
3.16E+05	1.85E+04	-5.35E+01	1.10E+04	-1.48E+04
3.98E+05	1.60E+04	-5.52E+01	9.12E+03	-1.31E+04
5.01E+05	1.37E+04	-5.67E+01	7.54E+03	-1.15E+04
6.31E+05	1.18E+04	-5.82E+01	6.21E+03	-9.99E+03
7.94E+05	1.00E+04	-5.94E+01	5.10E+03	-8.63E+03
1.00E+06	8.49E+03	-6.05E+01	4.18E+03	-7.38E+03

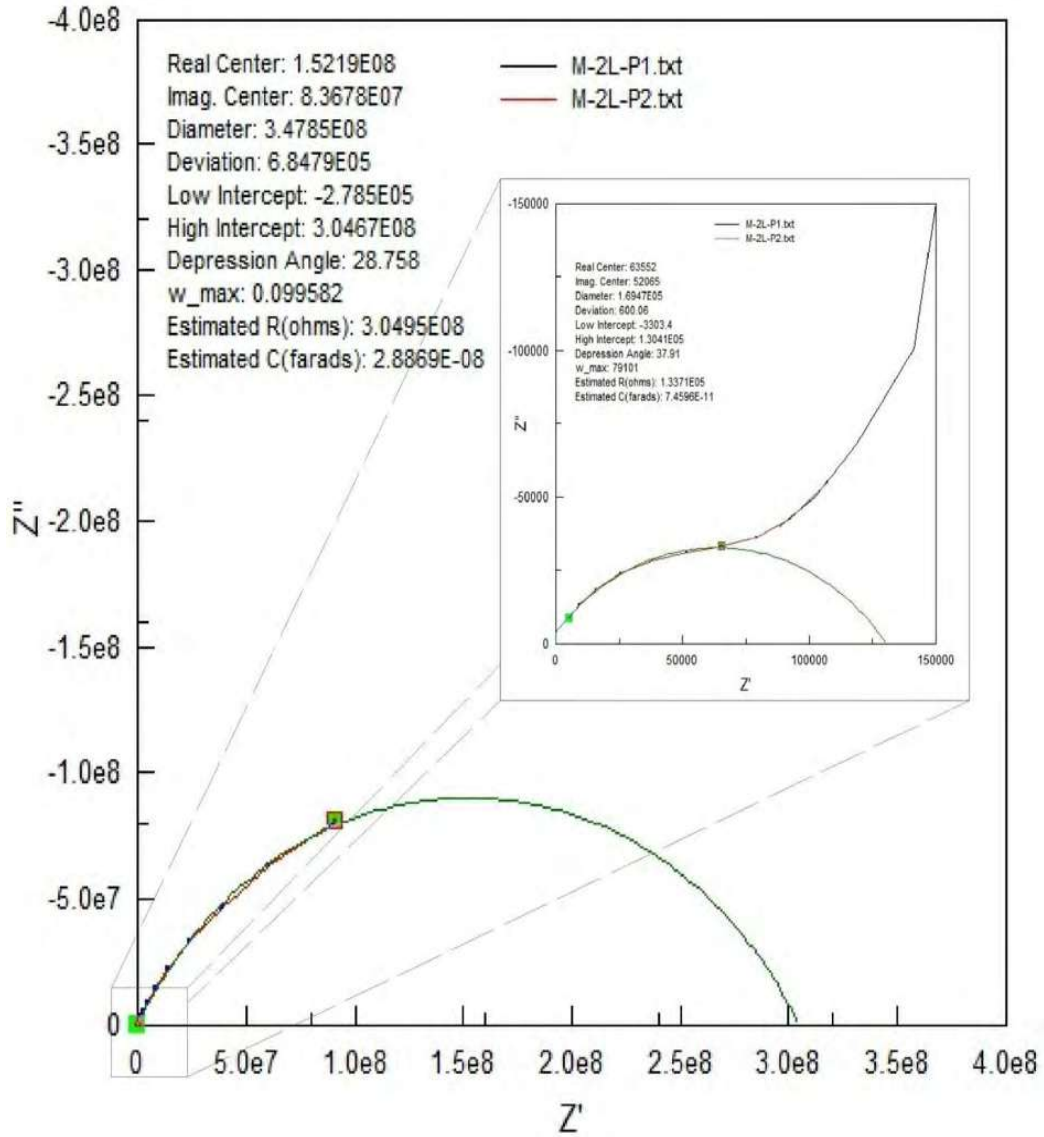


Figura 5.7. 9. Nyquist plot de la muestra M-2L.

Tabla 5.7. 6. Datos de la medición en la muestra M-3L.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	8.34E+06	-1.28E+01	8.13E+06	-1.85E+06
1.26E-02	8.03E+06	-1.34E+01	7.81E+06	-1.86E+06
1.58E-02	7.79E+06	-1.39E+01	7.56E+06	-1.87E+06
2.00E-02	7.52E+06	-1.44E+01	7.28E+06	-1.87E+06
2.51E-02	7.27E+06	-1.50E+01	7.02E+06	-1.89E+06
3.16E-02	7.00E+06	-1.57E+01	6.74E+06	-1.89E+06
3.98E-02	6.72E+06	-1.63E+01	6.44E+06	-1.89E+06
5.01E-02	6.44E+06	-1.69E+01	6.16E+06	-1.87E+06
6.31E-02	6.17E+06	-1.74E+01	5.88E+06	-1.84E+06
7.94E-02	5.91E+06	-1.78E+01	5.63E+06	-1.81E+06
1.00E-01	5.67E+06	-1.84E+01	5.38E+06	-1.79E+06
1.26E-01	5.41E+06	-1.89E+01	5.12E+06	-1.75E+06
1.58E-01	5.15E+06	-1.94E+01	4.86E+06	-1.71E+06
2.00E-01	4.92E+06	-2.00E+01	4.62E+06	-1.68E+06
2.51E-01	4.68E+06	-2.07E+01	4.38E+06	-1.65E+06
3.16E-01	4.45E+06	-2.14E+01	4.15E+06	-1.62E+06
3.98E-01	4.23E+06	-2.22E+01	3.92E+06	-1.60E+06
5.01E-01	4.01E+06	-2.32E+01	3.69E+06	-1.58E+06
6.31E-01	3.81E+06	-2.44E+01	3.47E+06	-1.57E+06
7.94E-01	3.60E+06	-2.58E+01	3.24E+06	-1.57E+06
1.00E+00	3.39E+06	-2.73E+01	3.01E+06	-1.55E+06
1.26E+00	3.17E+06	-2.90E+01	2.77E+06	-1.54E+06
1.58E+00	2.95E+06	-3.10E+01	2.53E+06	-1.52E+06
2.00E+00	2.73E+06	-3.31E+01	2.29E+06	-1.49E+06
2.51E+00	2.51E+06	-3.52E+01	2.05E+06	-1.45E+06
3.16E+00	2.28E+06	-3.75E+01	1.81E+06	-1.39E+06
3.98E+00	2.06E+06	-3.97E+01	1.59E+06	-1.32E+06
5.01E+00	1.85E+06	-4.18E+01	1.38E+06	-1.23E+06
6.31E+00	1.64E+06	-4.36E+01	1.19E+06	-1.13E+06
7.94E+00	1.44E+06	-4.51E+01	1.02E+06	-1.02E+06
1.00E+01	1.27E+06	-4.62E+01	8.75E+05	-9.14E+05
1.26E+01	1.11E+06	-4.69E+01	7.55E+05	-8.07E+05
1.58E+01	9.64E+05	-4.71E+01	6.56E+05	-7.06E+05
2.00E+01	8.41E+05	-4.68E+01	5.76E+05	-6.13E+05
2.51E+01	7.36E+05	-4.61E+01	5.11E+05	-5.30E+05
3.16E+01	6.47E+05	-4.49E+01	4.58E+05	-4.57E+05
3.98E+01	5.73E+05	-4.35E+01	4.15E+05	-3.94E+05
5.01E+01	5.10E+05	-4.19E+01	3.80E+05	-3.41E+05
6.31E+01	4.58E+05	-4.02E+01	3.50E+05	-2.95E+05
7.94E+01	4.14E+05	-3.84E+01	3.24E+05	-2.57E+05
1.00E+02	3.76E+05	-3.66E+01	3.02E+05	-2.25E+05

1.26E+02	3.44E+05	-3.50E+01	2.82E+05	-1.98E+05
1.58E+02	3.17E+05	-3.35E+01	2.64E+05	-1.75E+05
2.00E+02	2.93E+05	-3.21E+01	2.48E+05	-1.56E+05
2.51E+02	2.72E+05	-3.10E+01	2.33E+05	-1.40E+05
3.16E+02	2.53E+05	-3.00E+01	2.20E+05	-1.27E+05
3.98E+02	2.36E+05	-2.91E+01	2.07E+05	-1.15E+05
5.01E+02	2.21E+05	-2.85E+01	1.94E+05	-1.06E+05
6.31E+02	2.07E+05	-2.80E+01	1.83E+05	-9.73E+04
7.94E+02	1.94E+05	-2.77E+01	1.72E+05	-9.03E+04
1.00E+03	1.82E+05	-2.76E+01	1.61E+05	-8.41E+04
1.26E+03	1.70E+05	-2.75E+01	1.51E+05	-7.88E+04
1.58E+03	1.60E+05	-2.77E+01	1.41E+05	-7.41E+04
2.00E+03	1.50E+05	-2.79E+01	1.32E+05	-7.00E+04
2.51E+03	1.40E+05	-2.83E+01	1.23E+05	-6.62E+04
3.16E+03	1.31E+05	-2.88E+01	1.14E+05	-6.29E+04
3.98E+03	1.22E+05	-2.94E+01	1.06E+05	-5.98E+04
5.01E+03	1.13E+05	-3.01E+01	9.81E+04	-5.69E+04
6.31E+03	1.05E+05	-3.09E+01	9.04E+04	-5.42E+04
7.94E+03	9.77E+04	-3.19E+01	8.29E+04	-5.16E+04
1.00E+04	9.03E+04	-3.29E+01	7.58E+04	-4.91E+04
1.26E+04	8.32E+04	-3.41E+01	6.89E+04	-4.67E+04
1.58E+04	7.65E+04	-3.54E+01	6.23E+04	-4.43E+04
2.00E+04	7.00E+04	-3.68E+01	5.61E+04	-4.19E+04
2.51E+04	6.38E+04	-3.83E+01	5.01E+04	-3.95E+04
3.16E+04	5.79E+04	-3.98E+01	4.45E+04	-3.71E+04
3.98E+04	5.23E+04	-4.15E+01	3.92E+04	-3.46E+04
5.01E+04	4.70E+04	-4.32E+01	3.43E+04	-3.22E+04
6.31E+04	4.21E+04	-4.49E+01	2.98E+04	-2.97E+04
7.94E+04	3.74E+04	-4.65E+01	2.57E+04	-2.71E+04
1.00E+05	3.31E+04	-4.83E+01	2.20E+04	-2.47E+04
1.26E+05	2.92E+04	-5.00E+01	1.87E+04	-2.24E+04
1.58E+05	2.55E+04	-5.19E+01	1.58E+04	-2.01E+04
2.00E+05	2.23E+04	-5.35E+01	1.32E+04	-1.79E+04
2.51E+05	1.93E+04	-5.51E+01	1.10E+04	-1.58E+04
3.16E+05	1.67E+04	-5.66E+01	9.17E+03	-1.39E+04
3.98E+05	1.43E+04	-5.79E+01	7.59E+03	-1.21E+04
5.01E+05	1.22E+04	-5.92E+01	6.27E+03	-1.05E+04
6.31E+05	1.04E+04	-6.03E+01	5.16E+03	-9.06E+03
7.94E+05	8.84E+03	-6.13E+01	4.25E+03	-7.76E+03
1.00E+06	7.46E+03	-6.21E+01	3.50E+03	-6.60E+03

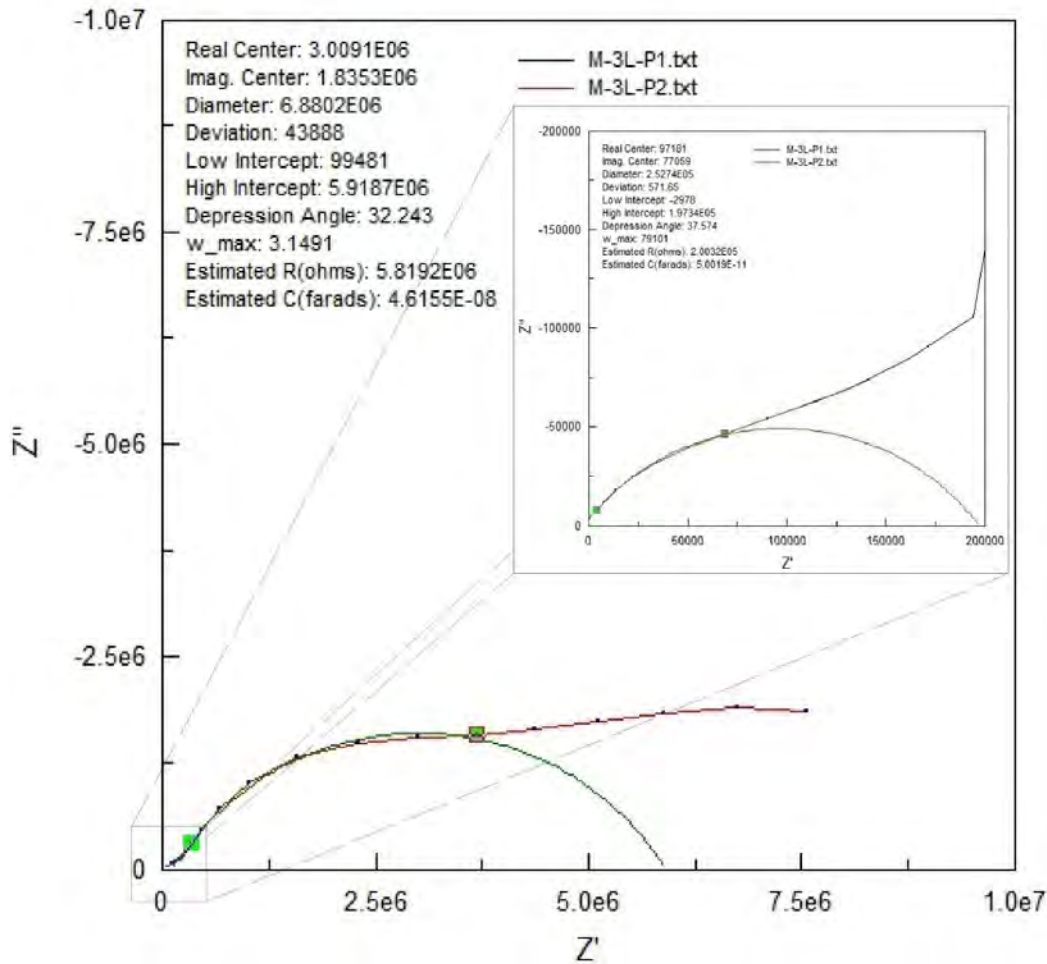


Figura 5.7. 10. Nyquist plot de la muestra M-3L.

En la figura 5.7.10 se tiene la espectroscopía de impedancia de la muestra M-3L, a diferencia de la M-2L y M-1L, se le agregó otro nuevo mineral, que es el Carbón CC en un cierto porcentaje, como se muestra en la tabla 5.7.1. De los resultados obtenidos, se tiene que la resistencia en la muestra M-3L es menor a la muestra M-2L, como se muestra en la tabla 5.7.12. Sin embargo, si hubo un incremento considerable en la Capacitancia del material.

Tabla 5.7. 7. Datos de la medición en la muestra M-4.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	2.92E+06	-1.20E+01	2.86E+06	-6.06E+05
1.26E-02	2.80E+06	-1.23E+01	2.73E+06	-5.98E+05
1.58E-02	2.71E+06	-1.25E+01	2.64E+06	-5.87E+05
2.00E-02	2.62E+06	-1.27E+01	2.55E+06	-5.78E+05
2.51E-02	2.53E+06	-1.30E+01	2.46E+06	-5.68E+05
3.16E-02	2.44E+06	-1.32E+01	2.38E+06	-5.59E+05
3.98E-02	2.36E+06	-1.35E+01	2.29E+06	-5.49E+05
5.01E-02	2.27E+06	-1.36E+01	2.21E+06	-5.36E+05
6.31E-02	2.19E+06	-1.37E+01	2.12E+06	-5.18E+05
7.94E-02	2.11E+06	-1.34E+01	2.05E+06	-4.90E+05
1.00E-01	2.04E+06	-1.35E+01	1.98E+06	-4.75E+05
1.26E-01	1.97E+06	-1.36E+01	1.92E+06	-4.65E+05
1.58E-01	1.90E+06	-1.36E+01	1.84E+06	-4.46E+05
2.00E-01	1.84E+06	-1.34E+01	1.79E+06	-4.26E+05
2.51E-01	1.77E+06	-1.36E+01	1.72E+06	-4.16E+05
3.16E-01	1.71E+06	-1.34E+01	1.67E+06	-3.96E+05
3.98E-01	1.65E+06	-1.32E+01	1.61E+06	-3.79E+05
5.01E-01	1.60E+06	-1.32E+01	1.56E+06	-3.66E+05
6.31E-01	1.55E+06	-1.32E+01	1.51E+06	-3.55E+05
7.94E-01	1.50E+06	-1.33E+01	1.46E+06	-3.44E+05
1.00E+00	1.45E+06	-1.33E+01	1.41E+06	-3.33E+05
1.26E+00	1.41E+06	-1.33E+01	1.37E+06	-3.24E+05
1.58E+00	1.36E+06	-1.35E+01	1.32E+06	-3.17E+05
2.00E+00	1.32E+06	-1.36E+01	1.28E+06	-3.10E+05
2.51E+00	1.27E+06	-1.38E+01	1.24E+06	-3.03E+05
3.16E+00	1.23E+06	-1.40E+01	1.19E+06	-2.98E+05
3.98E+00	1.19E+06	-1.43E+01	1.15E+06	-2.94E+05
5.01E+00	1.15E+06	-1.47E+01	1.11E+06	-2.91E+05
6.31E+00	1.11E+06	-1.51E+01	1.07E+06	-2.88E+05
7.94E+00	1.07E+06	-1.55E+01	1.03E+06	-2.86E+05
1.00E+01	1.03E+06	-1.61E+01	9.86E+05	-2.84E+05
1.26E+01	9.86E+05	-1.66E+01	9.44E+05	-2.82E+05
1.58E+01	9.45E+05	-1.72E+01	9.02E+05	-2.80E+05
2.00E+01	9.04E+05	-1.79E+01	8.60E+05	-2.78E+05
2.51E+01	8.63E+05	-1.86E+01	8.18E+05	-2.75E+05
3.16E+01	8.22E+05	-1.92E+01	7.76E+05	-2.71E+05
3.98E+01	7.81E+05	-1.99E+01	7.34E+05	-2.66E+05
5.01E+01	7.40E+05	-2.05E+01	6.93E+05	-2.59E+05
6.31E+01	7.00E+05	-2.10E+01	6.53E+05	-2.51E+05
7.94E+01	6.61E+05	-2.15E+01	6.15E+05	-2.42E+05
1.00E+02	6.23E+05	-2.19E+01	5.78E+05	-2.32E+05

1.26E+02	5.87E+05	-2.21E+01	5.44E+05	-2.21E+05
1.58E+02	5.53E+05	-2.23E+01	5.12E+05	-2.10E+05
2.00E+02	5.21E+05	-2.24E+01	4.82E+05	-1.98E+05
2.51E+02	4.91E+05	-2.24E+01	4.54E+05	-1.87E+05
3.16E+02	4.63E+05	-2.24E+01	4.29E+05	-1.76E+05
3.98E+02	4.38E+05	-2.23E+01	4.05E+05	-1.66E+05
5.01E+02	4.14E+05	-2.23E+01	3.83E+05	-1.57E+05
6.31E+02	3.91E+05	-2.23E+01	3.62E+05	-1.48E+05
7.94E+02	3.71E+05	-2.24E+01	3.43E+05	-1.41E+05
1.00E+03	3.51E+05	-2.25E+01	3.25E+05	-1.34E+05
1.26E+03	3.33E+05	-2.28E+01	3.07E+05	-1.29E+05
1.58E+03	3.16E+05	-2.32E+01	2.90E+05	-1.24E+05
2.00E+03	2.99E+05	-2.37E+01	2.74E+05	-1.20E+05
2.51E+03	2.83E+05	-2.44E+01	2.58E+05	-1.17E+05
3.16E+03	2.68E+05	-2.53E+01	2.42E+05	-1.14E+05
3.98E+03	2.52E+05	-2.63E+01	2.26E+05	-1.12E+05
5.01E+03	2.37E+05	-2.76E+01	2.10E+05	-1.10E+05
6.31E+03	2.22E+05	-2.91E+01	1.94E+05	-1.08E+05
7.94E+03	2.07E+05	-3.07E+01	1.78E+05	-1.06E+05
1.00E+04	1.92E+05	-3.25E+01	1.62E+05	-1.03E+05
1.26E+04	1.77E+05	-3.45E+01	1.46E+05	-1.01E+05
1.58E+04	1.63E+05	-3.67E+01	1.31E+05	-9.73E+04
2.00E+04	1.48E+05	-3.90E+01	1.15E+05	-9.33E+04
2.51E+04	1.34E+05	-4.13E+01	1.01E+05	-8.86E+04
3.16E+04	1.20E+05	-4.37E+01	8.71E+04	-8.32E+04
3.98E+04	1.07E+05	-4.61E+01	7.45E+04	-7.74E+04
5.01E+04	9.51E+04	-4.85E+01	6.30E+04	-7.12E+04
6.31E+04	8.36E+04	-5.09E+01	5.28E+04	-6.48E+04
7.94E+04	7.30E+04	-5.32E+01	4.37E+04	-5.84E+04
1.00E+05	6.33E+04	-5.54E+01	3.59E+04	-5.21E+04
1.26E+05	5.45E+04	-5.75E+01	2.93E+04	-4.60E+04
1.58E+05	4.66E+04	-5.96E+01	2.36E+04	-4.02E+04
2.00E+05	3.97E+04	-6.15E+01	1.90E+04	-3.49E+04
2.51E+05	3.36E+04	-6.32E+01	1.52E+04	-3.00E+04
3.16E+05	2.83E+04	-6.47E+01	1.21E+04	-2.56E+04
3.98E+05	2.38E+04	-6.60E+01	9.67E+03	-2.17E+04
5.01E+05	1.99E+04	-6.72E+01	7.71E+03	-1.83E+04
6.31E+05	1.66E+04	-6.82E+01	6.15E+03	-1.54E+04
7.94E+05	1.37E+04	-6.90E+01	4.92E+03	-1.28E+04
1.00E+06	1.14E+04	-6.97E+01	3.95E+03	-1.06E+04

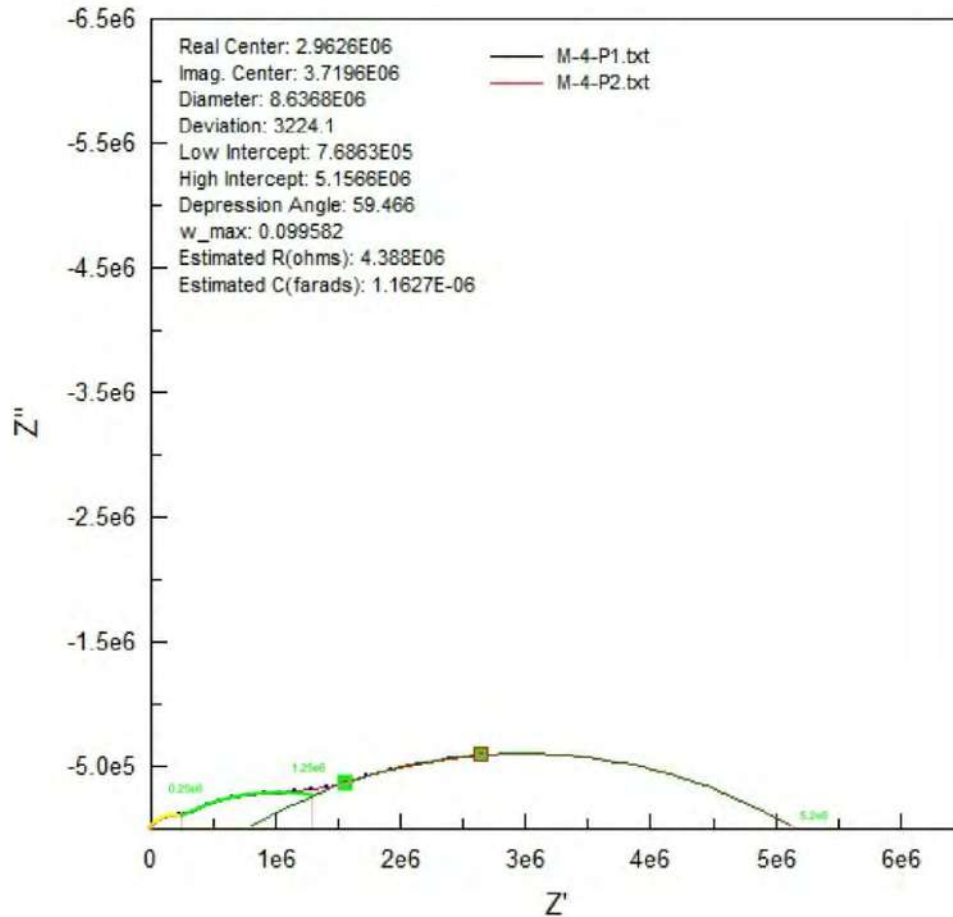


Figura 5.7. 11. Nyquist plot de la muestra M-4.

En la figura 5.7.11 se tienen la espectroscopia de la muestra M-4, donde se puede apreciar un comportamiento muy diferente al de las primeras muestras. Debido a que en esta muestra solamente se tiene la adición del carbón a un porcentaje mayor (ver tabla 5.7.1), la resistencia de la muestra se vio disminuida pero con una capacitancia mayor a las muestras anteriores (ver tabla 5.7.12). Además, haciendo la comparación con la muestra M-4L (ver figura 5.7.12), la muestra M-4 tiene una resistencia mayor, con ello nos damos cuenta que el agregado pétreo le proporciona mayor resistencia a las muestras.

Tabla 5.7. 8. Datos de la medición en la muestra M-4L.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	2.10E+06	-1.36E+01	2.04E+06	-4.94E+05
1.26E-02	2.02E+06	-1.38E+01	1.96E+06	-4.84E+05
1.58E-02	1.96E+06	-1.41E+01	1.90E+06	-4.77E+05
2.00E-02	1.89E+06	-1.44E+01	1.83E+06	-4.70E+05
2.51E-02	1.83E+06	-1.47E+01	1.77E+06	-4.65E+05
3.16E-02	1.76E+06	-1.50E+01	1.70E+06	-4.56E+05
3.98E-02	1.69E+06	-1.54E+01	1.63E+06	-4.49E+05
5.01E-02	1.63E+06	-1.56E+01	1.57E+06	-4.38E+05
6.31E-02	1.56E+06	-1.58E+01	1.50E+06	-4.24E+05
7.94E-02	1.49E+06	-1.57E+01	1.44E+06	-4.04E+05
1.00E-01	1.44E+06	-1.56E+01	1.39E+06	-3.87E+05
1.26E-01	1.39E+06	-1.58E+01	1.33E+06	-3.77E+05
1.58E-01	1.32E+06	-1.59E+01	1.27E+06	-3.63E+05
2.00E-01	1.27E+06	-1.56E+01	1.23E+06	-3.42E+05
2.51E-01	1.22E+06	-1.57E+01	1.18E+06	-3.32E+05
3.16E-01	1.18E+06	-1.53E+01	1.14E+06	-3.12E+05
3.98E-01	1.13E+06	-1.52E+01	1.09E+06	-2.97E+05
5.01E-01	1.09E+06	-1.51E+01	1.05E+06	-2.83E+05
6.31E-01	1.05E+06	-1.50E+01	1.02E+06	-2.73E+05
7.94E-01	1.01E+06	-1.50E+01	9.80E+05	-2.62E+05
1.00E+00	9.78E+05	-1.50E+01	9.45E+05	-2.52E+05
1.26E+00	9.46E+05	-1.50E+01	9.14E+05	-2.44E+05
1.58E+00	9.14E+05	-1.52E+01	8.82E+05	-2.39E+05
2.00E+00	8.83E+05	-1.54E+01	8.51E+05	-2.35E+05
2.51E+00	8.52E+05	-1.58E+01	8.20E+05	-2.33E+05
3.16E+00	8.22E+05	-1.64E+01	7.89E+05	-2.32E+05
3.98E+00	7.92E+05	-1.71E+01	7.57E+05	-2.33E+05
5.01E+00	7.62E+05	-1.80E+01	7.24E+05	-2.35E+05
6.31E+00	7.30E+05	-1.90E+01	6.90E+05	-2.38E+05
7.94E+00	6.96E+05	-2.02E+01	6.53E+05	-2.40E+05
1.00E+01	6.61E+05	-2.14E+01	6.15E+05	-2.41E+05
1.26E+01	6.24E+05	-2.27E+01	5.75E+05	-2.41E+05
1.58E+01	5.85E+05	-2.39E+01	5.35E+05	-2.37E+05
2.00E+01	5.46E+05	-2.50E+01	4.95E+05	-2.30E+05
2.51E+01	5.07E+05	-2.58E+01	4.56E+05	-2.20E+05
3.16E+01	4.69E+05	-2.62E+01	4.21E+05	-2.07E+05
3.98E+01	4.33E+05	-2.64E+01	3.88E+05	-1.93E+05
5.01E+01	4.01E+05	-2.61E+01	3.60E+05	-1.77E+05
6.31E+01	3.72E+05	-2.56E+01	3.35E+05	-1.61E+05
7.94E+01	3.47E+05	-2.49E+01	3.14E+05	-1.46E+05
1.00E+02	3.24E+05	-2.40E+01	2.96E+05	-1.32E+05

1.26E+02	3.05E+05	-2.30E+01	2.81E+05	-1.19E+05
1.58E+02	2.88E+05	-2.21E+01	2.67E+05	-1.08E+05
2.00E+02	2.73E+05	-2.12E+01	2.55E+05	-9.88E+04
2.51E+02	2.60E+05	-2.04E+01	2.44E+05	-9.08E+04
3.16E+02	2.48E+05	-1.98E+01	2.33E+05	-8.42E+04
3.98E+02	2.37E+05	-1.94E+01	2.24E+05	-7.87E+04
5.01E+02	2.27E+05	-1.91E+01	2.15E+05	-7.43E+04
6.31E+02	2.18E+05	-1.89E+01	2.06E+05	-7.08E+04
7.94E+02	2.09E+05	-1.90E+01	1.98E+05	-6.80E+04
1.00E+03	2.01E+05	-1.92E+01	1.89E+05	-6.60E+04
1.26E+03	1.92E+05	-1.96E+01	1.81E+05	-6.45E+04
1.58E+03	1.84E+05	-2.02E+01	1.73E+05	-6.35E+04
2.00E+03	1.76E+05	-2.09E+01	1.64E+05	-6.27E+04
2.51E+03	1.67E+05	-2.18E+01	1.55E+05	-6.21E+04
3.16E+03	1.59E+05	-2.29E+01	1.46E+05	-6.17E+04
3.98E+03	1.50E+05	-2.40E+01	1.37E+05	-6.12E+04
5.01E+03	1.42E+05	-2.53E+01	1.28E+05	-6.07E+04
6.31E+03	1.33E+05	-2.68E+01	1.19E+05	-6.01E+04
7.94E+03	1.25E+05	-2.83E+01	1.10E+05	-5.92E+04
1.00E+04	1.16E+05	-3.00E+01	1.01E+05	-5.81E+04
1.26E+04	1.08E+05	-3.17E+01	9.17E+04	-5.67E+04
1.58E+04	9.95E+04	-3.36E+01	8.29E+04	-5.50E+04
2.00E+04	9.13E+04	-3.55E+01	7.44E+04	-5.30E+04
2.51E+04	8.33E+04	-3.74E+01	6.62E+04	-5.06E+04
3.16E+04	7.56E+04	-3.94E+01	5.84E+04	-4.80E+04
3.98E+04	6.81E+04	-4.14E+01	5.11E+04	-4.50E+04
5.01E+04	6.11E+04	-4.33E+01	4.44E+04	-4.19E+04
6.31E+04	5.45E+04	-4.53E+01	3.83E+04	-3.88E+04
7.94E+04	4.84E+04	-4.73E+01	3.28E+04	-3.56E+04
1.00E+05	4.27E+04	-4.93E+01	2.79E+04	-3.23E+04
1.26E+05	3.75E+04	-5.12E+01	2.35E+04	-2.92E+04
1.58E+05	3.27E+04	-5.31E+01	1.96E+04	-2.61E+04
2.00E+05	2.83E+04	-5.49E+01	1.63E+04	-2.32E+04
2.51E+05	2.45E+04	-5.65E+01	1.35E+04	-2.04E+04
3.16E+05	2.10E+04	-5.81E+01	1.11E+04	-1.78E+04
3.98E+05	1.80E+04	-5.94E+01	9.13E+03	-1.55E+04
5.01E+05	1.53E+04	-6.07E+01	7.48E+03	-1.33E+04
6.31E+05	1.30E+04	-6.18E+01	6.12E+03	-1.14E+04
7.94E+05	1.10E+04	-6.28E+01	5.01E+03	-9.74E+03
1.00E+06	9.20E+03	-6.36E+01	4.09E+03	-8.24E+03

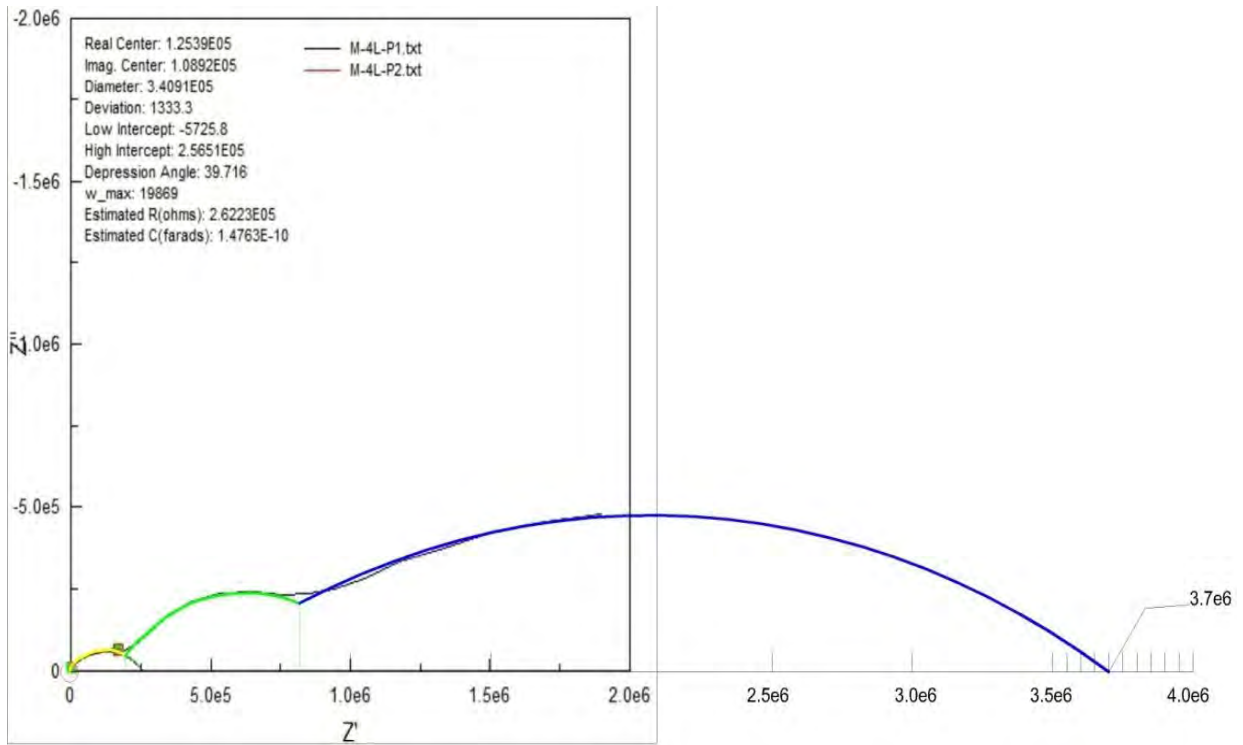


Figura 5.7. 12. Nyquist plot de la muestra M-4L.

Tabla 5.7. 9. Resumen de valores de R y C de la muestra M-4L.

Tabla 5.7. 10. Datos de la medición en la muestra M-7.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	1.78E+08	-3.01E+01	1.54E+08	-8.94E+07
1.26E-02	1.66E+08	-3.22E+01	1.41E+08	-8.83E+07
1.58E-02	1.55E+08	-3.43E+01	1.28E+08	-8.73E+07
2.00E-02	1.42E+08	-3.66E+01	1.14E+08	-8.50E+07
2.51E-02	1.30E+08	-3.91E+01	1.01E+08	-8.20E+07
3.16E-02	1.18E+08	-4.16E+01	8.80E+07	-7.80E+07
3.98E-02	1.05E+08	-4.41E+01	7.57E+07	-7.33E+07
5.01E-02	9.35E+07	-4.64E+01	6.44E+07	-6.78E+07
6.31E-02	8.26E+07	-4.86E+01	5.46E+07	-6.19E+07
7.94E-02	7.26E+07	-5.06E+01	4.61E+07	-5.61E+07
1.00E-01	6.36E+07	-5.28E+01	3.85E+07	-5.06E+07
1.26E-01	5.50E+07	-5.48E+01	3.17E+07	-4.50E+07
1.58E-01	4.74E+07	-5.67E+01	2.61E+07	-3.96E+07
2.00E-01	4.06E+07	-5.84E+01	2.13E+07	-3.46E+07
2.51E-01	3.47E+07	-5.99E+01	1.74E+07	-3.00E+07
3.16E-01	2.95E+07	-6.12E+01	1.42E+07	-2.58E+07
3.98E-01	2.50E+07	-6.23E+01	1.16E+07	-2.21E+07
5.01E-01	2.11E+07	-6.31E+01	9.54E+06	-1.88E+07
6.31E-01	1.78E+07	-6.38E+01	7.86E+06	-1.60E+07
7.94E-01	1.59E+07	-6.42E+01	6.93E+06	-1.43E+07
1.00E+00	1.26E+07	-6.45E+01	5.41E+06	-1.14E+07
1.26E+00	1.06E+07	-6.46E+01	4.54E+06	-9.55E+06
1.58E+00	8.88E+06	-6.44E+01	3.84E+06	-8.01E+06
2.00E+00	7.46E+06	-6.39E+01	3.28E+06	-6.70E+06
2.51E+00	6.27E+06	-6.32E+01	2.83E+06	-5.60E+06
3.16E+00	5.29E+06	-6.22E+01	2.47E+06	-4.68E+06
3.98E+00	4.47E+06	-6.09E+01	2.17E+06	-3.91E+06
5.01E+00	3.79E+06	-5.94E+01	1.93E+06	-3.26E+06
6.31E+00	3.23E+06	-5.75E+01	1.73E+06	-2.72E+06
7.94E+00	2.77E+06	-5.54E+01	1.57E+06	-2.28E+06
1.00E+01	2.39E+06	-5.30E+01	1.44E+06	-1.91E+06
1.26E+01	2.08E+06	-5.04E+01	1.32E+06	-1.60E+06
1.58E+01	1.82E+06	-4.76E+01	1.23E+06	-1.34E+06
2.00E+01	1.61E+06	-4.46E+01	1.15E+06	-1.13E+06
2.51E+01	1.44E+06	-4.16E+01	1.08E+06	-9.58E+05
3.16E+01	1.30E+06	-3.85E+01	1.02E+06	-8.12E+05
3.98E+01	1.19E+06	-3.56E+01	9.67E+05	-6.92E+05
5.01E+01	1.10E+06	-3.28E+01	9.21E+05	-5.93E+05
6.31E+01	1.02E+06	-3.01E+01	8.81E+05	-5.11E+05
7.94E+01	9.53E+05	-2.77E+01	8.44E+05	-4.42E+05
1.00E+02	8.99E+05	-2.55E+01	8.12E+05	-3.86E+05

1.26E+02	8.52E+05	-2.35E+01	7.82E+05	-3.40E+05
1.58E+02	8.12E+05	-2.18E+01	7.54E+05	-3.02E+05
2.00E+02	7.77E+05	-2.04E+01	7.28E+05	-2.71E+05
2.51E+02	7.46E+05	-1.93E+01	7.04E+05	-2.46E+05
3.16E+02	7.18E+05	-1.84E+01	6.81E+05	-2.26E+05
3.98E+02	6.92E+05	-1.77E+01	6.59E+05	-2.10E+05
5.01E+02	6.67E+05	-1.72E+01	6.37E+05	-1.98E+05
6.31E+02	6.44E+05	-1.70E+01	6.16E+05	-1.88E+05
7.94E+02	6.22E+05	-1.70E+01	5.95E+05	-1.81E+05
1.00E+03	6.00E+05	-1.71E+01	5.73E+05	-1.77E+05
1.26E+03	5.79E+05	-1.75E+01	5.52E+05	-1.74E+05
1.58E+03	5.57E+05	-1.81E+01	5.30E+05	-1.73E+05
2.00E+03	5.36E+05	-1.88E+01	5.07E+05	-1.73E+05
2.51E+03	5.14E+05	-1.97E+01	4.83E+05	-1.73E+05
3.16E+03	4.91E+05	-2.09E+01	4.59E+05	-1.75E+05
3.98E+03	4.68E+05	-2.22E+01	4.33E+05	-1.77E+05
5.01E+03	4.44E+05	-2.37E+01	4.07E+05	-1.78E+05
6.31E+03	4.20E+05	-2.53E+01	3.80E+05	-1.80E+05
7.94E+03	3.95E+05	-2.72E+01	3.51E+05	-1.80E+05
1.00E+04	3.69E+05	-2.91E+01	3.23E+05	-1.80E+05
1.26E+04	3.43E+05	-3.12E+01	2.94E+05	-1.78E+05
1.58E+04	3.17E+05	-3.34E+01	2.65E+05	-1.75E+05
2.00E+04	2.91E+05	-3.56E+01	2.36E+05	-1.70E+05
2.51E+04	2.65E+05	-3.79E+01	2.09E+05	-1.63E+05
3.16E+04	2.40E+05	-4.02E+01	1.83E+05	-1.55E+05
3.98E+04	2.16E+05	-4.25E+01	1.59E+05	-1.46E+05
5.01E+04	1.93E+05	-4.48E+01	1.37E+05	-1.36E+05
6.31E+04	1.71E+05	-4.71E+01	1.17E+05	-1.25E+05
7.94E+04	1.51E+05	-4.93E+01	9.85E+04	-1.15E+05
1.00E+05	1.33E+05	-5.15E+01	8.25E+04	-1.04E+05
1.26E+05	1.16E+05	-5.36E+01	6.85E+04	-9.31E+04
1.58E+05	9.99E+04	-5.58E+01	5.62E+04	-8.26E+04
2.00E+05	8.60E+04	-5.77E+01	4.59E+04	-7.27E+04
2.51E+05	7.36E+04	-5.95E+01	3.73E+04	-6.34E+04
3.16E+05	6.27E+04	-6.12E+01	3.02E+04	-5.49E+04
3.98E+05	5.31E+04	-6.27E+01	2.43E+04	-4.72E+04
5.01E+05	4.47E+04	-6.41E+01	1.95E+04	-4.03E+04
6.31E+05	3.75E+04	-6.54E+01	1.57E+04	-3.41E+04
7.94E+05	3.13E+04	-6.65E+01	1.25E+04	-2.87E+04
1.00E+06	2.60E+04	-6.74E+01	9.97E+03	-2.40E+04

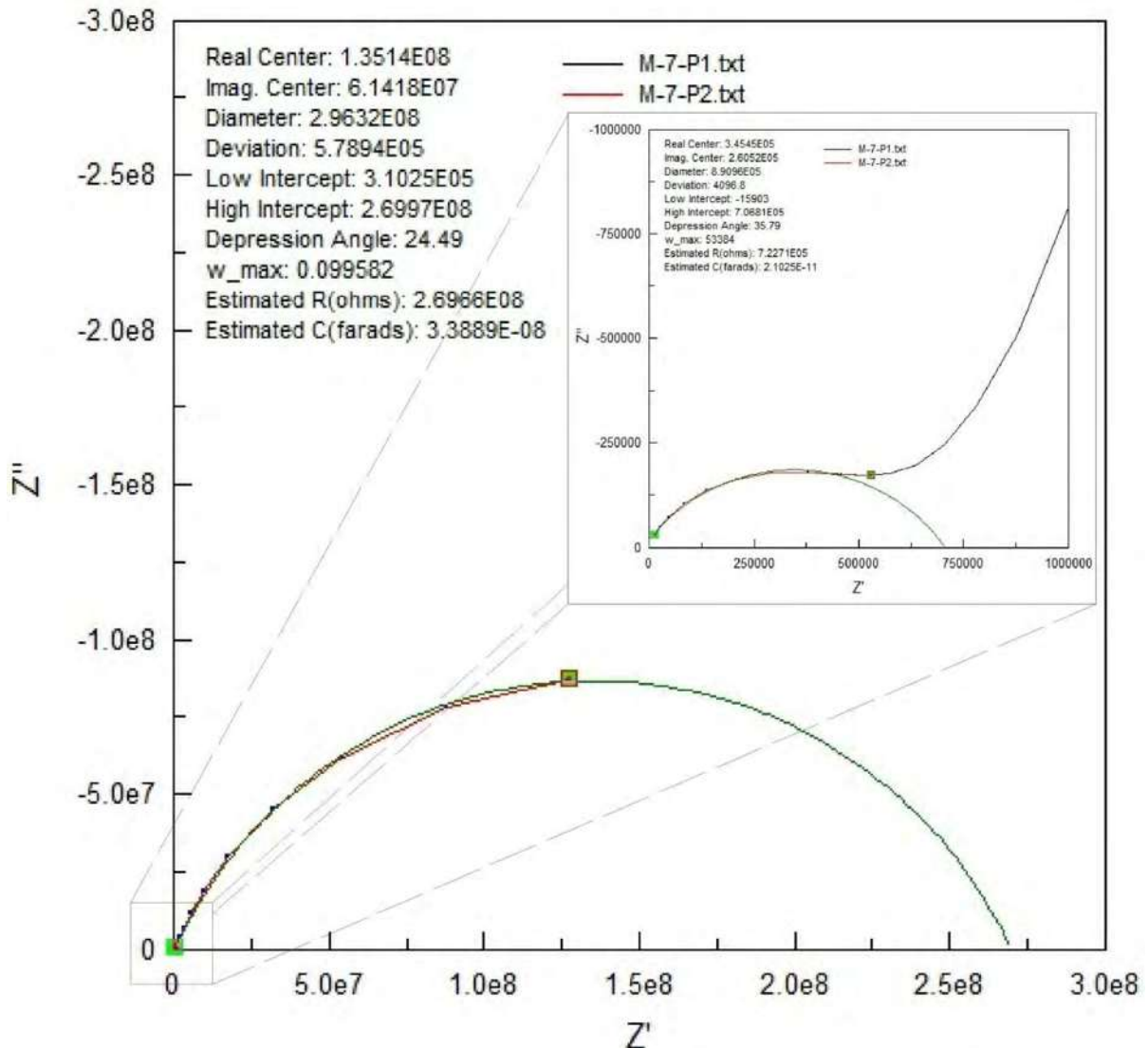


Figura 5.7. 13. Nyquist plot de la muestra M-7.

En la figura 5.7.13 se observa la espectroscopia de impedancia de la muestra M-7. En esta muestra ya no se utilizó agregado pétreo, en sustitución a ella se utilizó Perlita tipo C2 a un cierto porcentaje con relación al peso del cemento (ver tabla 5.7.1). En este caso, se tuvo una resistencia mayor a las muestras que contienen óxido y carbón (ver tabla 5.7.12). Además, se estudió la muestra M-8 (ver figura 5.7.14), la cual es similar a la M-7, pero en este caso se le agregó un cierto porcentaje de Cross (neumático molido). De acuerdo a la gráfica de espectroscopia de impedancia de la muestra M-8, se obtuvo una resistencia menor que la muestra M-7 (ver tabla 5.7.12).

Tabla 5.7. 11. Datos de la medición en la muestra M-8.

Frequency (Hz)	Z PROM	ω PHASE	Z'	Z''
1.00E-02	4.22E+07	-3.18E+01	3.58E+07	-2.23E+07
1.26E-02	3.90E+07	-3.33E+01	3.26E+07	-2.14E+07
1.58E-02	3.56E+07	-3.46E+01	2.93E+07	-2.03E+07
2.00E-02	3.25E+07	-3.59E+01	2.63E+07	-1.90E+07
2.51E-02	2.95E+07	-3.71E+01	2.35E+07	-1.78E+07
3.16E-02	2.67E+07	-3.80E+01	2.10E+07	-1.64E+07
3.98E-02	2.40E+07	-3.86E+01	1.87E+07	-1.50E+07
5.01E-02	2.17E+07	-3.92E+01	1.68E+07	-1.37E+07
6.31E-02	1.95E+07	-3.96E+01	1.50E+07	-1.24E+07
7.94E-02	1.75E+07	-3.98E+01	1.35E+07	-1.12E+07
1.00E-01	1.58E+07	-3.99E+01	1.21E+07	-1.01E+07
1.26E-01	1.43E+07	-4.02E+01	1.09E+07	-9.21E+06
1.58E-01	1.28E+07	-4.05E+01	9.73E+06	-8.30E+06
2.00E-01	1.15E+07	-4.01E+01	8.82E+06	-7.43E+06
2.51E-01	1.04E+07	-4.04E+01	7.91E+06	-6.73E+06
3.16E-01	9.36E+06	-4.00E+01	7.17E+06	-6.02E+06
3.98E-01	8.40E+06	-3.97E+01	6.46E+06	-5.37E+06
5.01E-01	7.57E+06	-3.95E+01	5.84E+06	-4.81E+06
6.31E-01	6.84E+06	-3.92E+01	5.30E+06	-4.32E+06
7.94E-01	6.17E+06	-3.88E+01	4.81E+06	-3.86E+06
1.00E+00	5.56E+06	-3.82E+01	4.37E+06	-3.44E+06
1.26E+00	5.04E+06	-3.76E+01	3.99E+06	-3.08E+06
1.58E+00	4.57E+06	-3.69E+01	3.66E+06	-2.74E+06
2.00E+00	4.16E+06	-3.60E+01	3.36E+06	-2.45E+06
2.51E+00	3.79E+06	-3.52E+01	3.10E+06	-2.18E+06
3.16E+00	3.47E+06	-3.43E+01	2.86E+06	-1.95E+06
3.98E+00	3.18E+06	-3.34E+01	2.65E+06	-1.75E+06
5.01E+00	2.92E+06	-3.26E+01	2.46E+06	-1.57E+06
6.31E+00	2.69E+06	-3.17E+01	2.29E+06	-1.41E+06
7.94E+00	2.49E+06	-3.09E+01	2.14E+06	-1.28E+06
1.00E+01	2.30E+06	-3.00E+01	1.99E+06	-1.15E+06
1.26E+01	2.14E+06	-2.93E+01	1.87E+06	-1.05E+06
1.58E+01	1.99E+06	-2.85E+01	1.75E+06	-9.50E+05
2.00E+01	1.86E+06	-2.78E+01	1.64E+06	-8.66E+05
2.51E+01	1.73E+06	-2.72E+01	1.54E+06	-7.92E+05
3.16E+01	1.62E+06	-2.66E+01	1.45E+06	-7.26E+05
3.98E+01	1.52E+06	-2.61E+01	1.36E+06	-6.68E+05
5.01E+01	1.42E+06	-2.56E+01	1.28E+06	-6.16E+05
6.31E+01	1.34E+06	-2.52E+01	1.21E+06	-5.69E+05
7.94E+01	1.26E+06	-2.48E+01	1.14E+06	-5.28E+05
1.00E+02	1.18E+06	-2.45E+01	1.08E+06	-4.91E+05

1.26E+02	1.12E+06	-2.42E+01	1.02E+06	-4.58E+05
1.58E+02	1.05E+06	-2.41E+01	9.61E+05	-4.29E+05
2.00E+02	9.93E+05	-2.40E+01	9.07E+05	-4.03E+05
2.51E+02	9.37E+05	-2.39E+01	8.56E+05	-3.80E+05
3.16E+02	8.84E+05	-2.40E+01	8.08E+05	-3.60E+05
3.98E+02	8.35E+05	-2.42E+01	7.62E+05	-3.42E+05
5.01E+02	7.88E+05	-2.44E+01	7.17E+05	-3.26E+05
6.31E+02	7.43E+05	-2.48E+01	6.74E+05	-3.11E+05
7.94E+02	7.00E+05	-2.53E+01	6.33E+05	-2.99E+05
1.00E+03	6.58E+05	-2.59E+01	5.92E+05	-2.87E+05
1.26E+03	6.18E+05	-2.66E+01	5.53E+05	-2.77E+05
1.58E+03	5.80E+05	-2.74E+01	5.15E+05	-2.67E+05
2.00E+03	5.42E+05	-2.84E+01	4.77E+05	-2.58E+05
2.51E+03	5.06E+05	-2.94E+01	4.41E+05	-2.48E+05
3.16E+03	4.71E+05	-3.06E+01	4.05E+05	-2.39E+05
3.98E+03	4.36E+05	-3.19E+01	3.71E+05	-2.30E+05
5.01E+03	4.03E+05	-3.33E+01	3.37E+05	-2.21E+05
6.31E+03	3.71E+05	-3.48E+01	3.05E+05	-2.11E+05
7.94E+03	3.40E+05	-3.64E+01	2.74E+05	-2.01E+05
1.00E+04	3.10E+05	-3.81E+01	2.44E+05	-1.92E+05
1.26E+04	2.82E+05	-3.99E+01	2.16E+05	-1.80E+05
1.58E+04	2.54E+05	-4.17E+01	1.90E+05	-1.69E+05
2.00E+04	2.28E+05	-4.35E+01	1.65E+05	-1.57E+05
2.51E+04	2.03E+05	-4.54E+01	1.43E+05	-1.45E+05
3.16E+04	1.81E+05	-4.72E+01	1.23E+05	-1.33E+05
3.98E+04	1.59E+05	-4.91E+01	1.04E+05	-1.20E+05
5.01E+04	1.40E+05	-5.08E+01	8.85E+04	-1.09E+05
6.31E+04	1.23E+05	-5.26E+01	7.44E+04	-9.74E+04
7.94E+04	1.07E+05	-5.43E+01	6.22E+04	-8.67E+04
1.00E+05	9.24E+04	-5.60E+01	5.17E+04	-7.66E+04
1.26E+05	7.97E+04	-5.76E+01	4.27E+04	-6.73E+04
1.58E+05	6.84E+04	-5.91E+01	3.51E+04	-5.87E+04
2.00E+05	5.85E+04	-6.06E+01	2.87E+04	-5.09E+04
2.51E+05	4.98E+04	-6.19E+01	2.34E+04	-4.40E+04
3.16E+05	4.23E+04	-6.32E+01	1.90E+04	-3.77E+04
3.98E+05	3.57E+04	-6.44E+01	1.54E+04	-3.22E+04
5.01E+05	3.01E+04	-6.55E+01	1.25E+04	-2.74E+04
6.31E+05	2.53E+04	-6.65E+01	1.01E+04	-2.32E+04
7.94E+05	2.11E+04	-6.75E+01	8.09E+03	-1.95E+04
1.00E+06	1.75E+04	-6.83E+01	6.49E+03	-1.63E+04

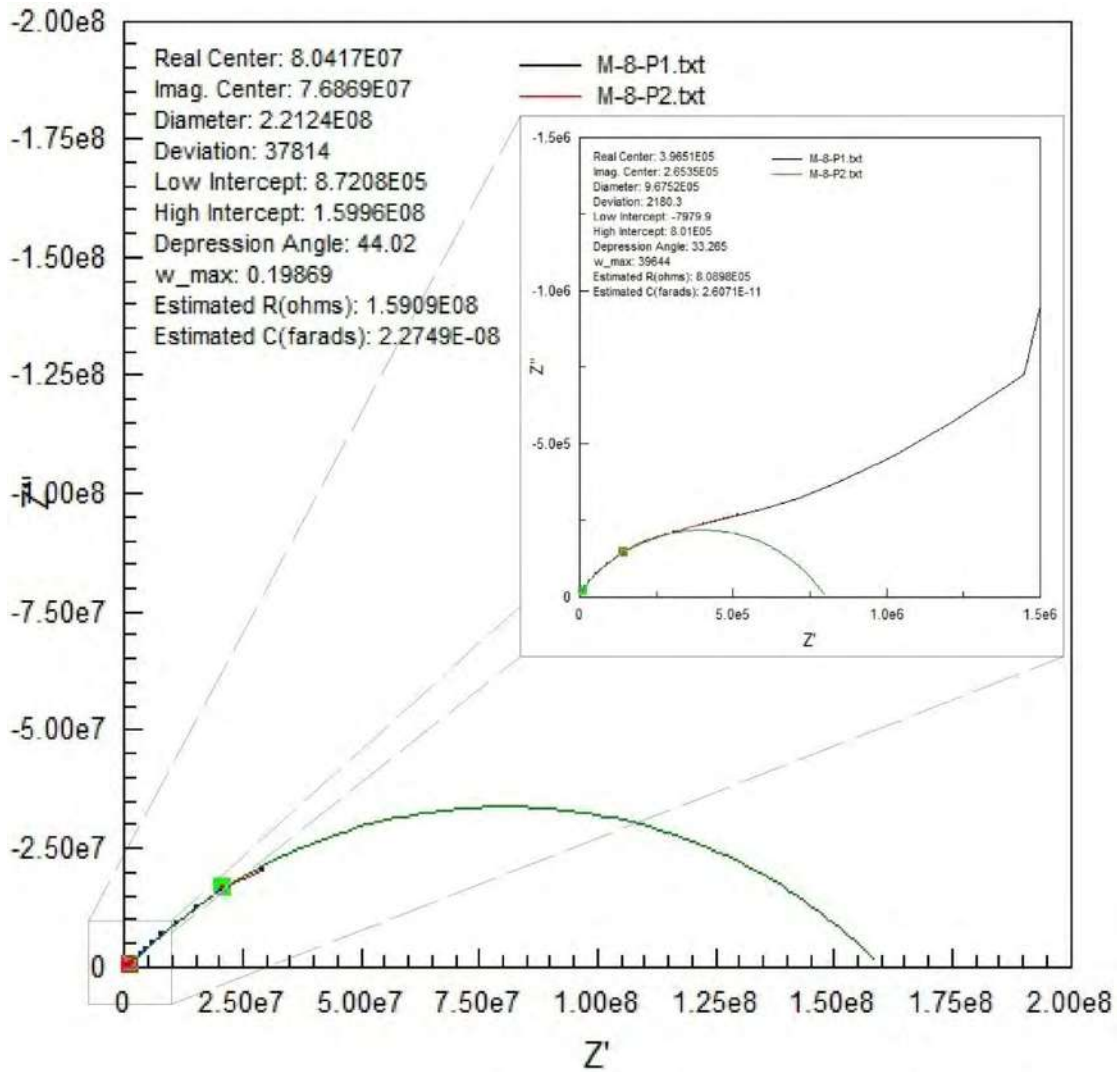


Figura 5.7. 14. Nyquist plot de la muestra M-7.

Una vez visto las graficas de impedancia de cada una de las muestras, a continuación se presenta en la tabla 5.7.12 la resistencia y capacitancia de cada uno de las muestras.

Tabla 5.7. 12. Resistencias y capacitancias de las muestras

MUESTRA	N° (SEMICIRCULOS)	F _{rmax} (Hz)	RESISTENCIA (Ohms)	CAPACITANCIA	
				F	nF
M-1L	1	1.70E-02	2.78E+08	3.36E-08	33.641
	2	7.50E+04	7.13E+04	2.98E-11	0.030
M-2L	1	1.81E-02	3.05E+08	2.89E-08	28.870
	2	1.60E+04	1.34E+05	7.46E-11	0.075
M-3L	1	5.93E-01	5.82E+06	4.62E-08	46.155
	2	1.59E+04	2.00E+05	5.00E-11	0.050
M-4L	1	1.58E-02	3.14E+06	3.20E-06	3203.175
	2	7.94E+00	3.65E+05	5.49E-08	54.894
	3	1.58E+03	2.00E+05	5.02E-10	0.502
M-4	1	1.58E-02	3.95E+06	2.54E-06	2542.267
	2	7.94E+00	1.00E+06	2.00E-08	20.036
	3	6.31E+03	2.50E+05	1.01E-10	0.101
M-7	1	1.74E-02	2.70E+08	3.39E-08	33.889
	2	1.05E+04	7.23E+05	2.10E-11	0.021
M-8	1	4.40E-02	1.59E+08	2.28E-08	22.757
	2	7.55E+03	8.09E+05	2.61E-11	0.026

Una vez visto las resistencias y capacitancias de cada uno de las muestras, ahora para poder visualizar mejor las diferencias entre cada muestra, se muestran dos graficas de impedancia (figura 5.7.15 y 5.7.16).

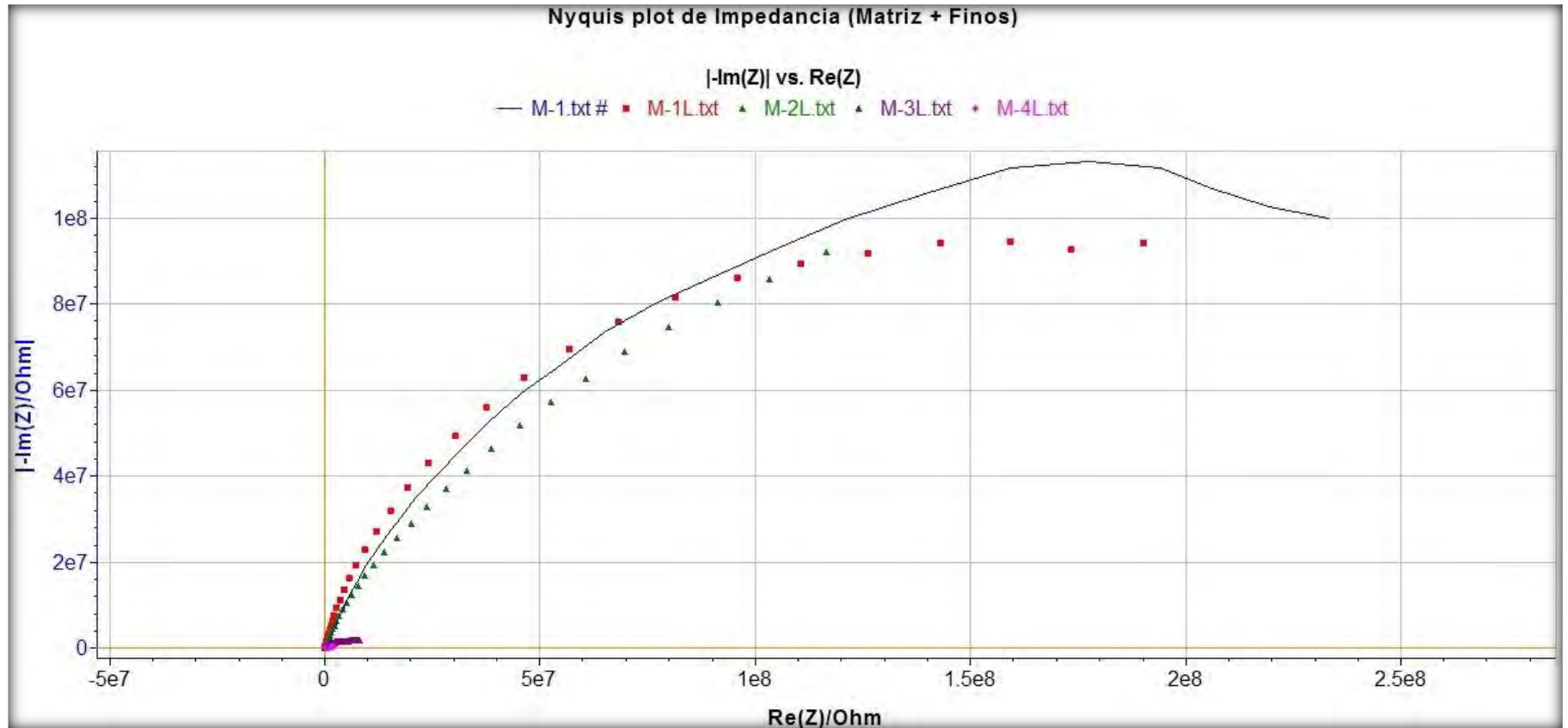


Figura 5.7. 15. Comparación de resistencias de las muestras M-1, M-1L, M-2L, M-3 y M-4L, en el Nyquist plot.

De la figura 5.7.15, se puede ver que la muestra M-1 es la que presenta una resistencia mayor a las demás, y en cambio, la muestra M-4L presenta una resistencia muy baja, por lo que la muestra M-4L tiene como agregado el carbón al 15% en relación al peso del cemento.

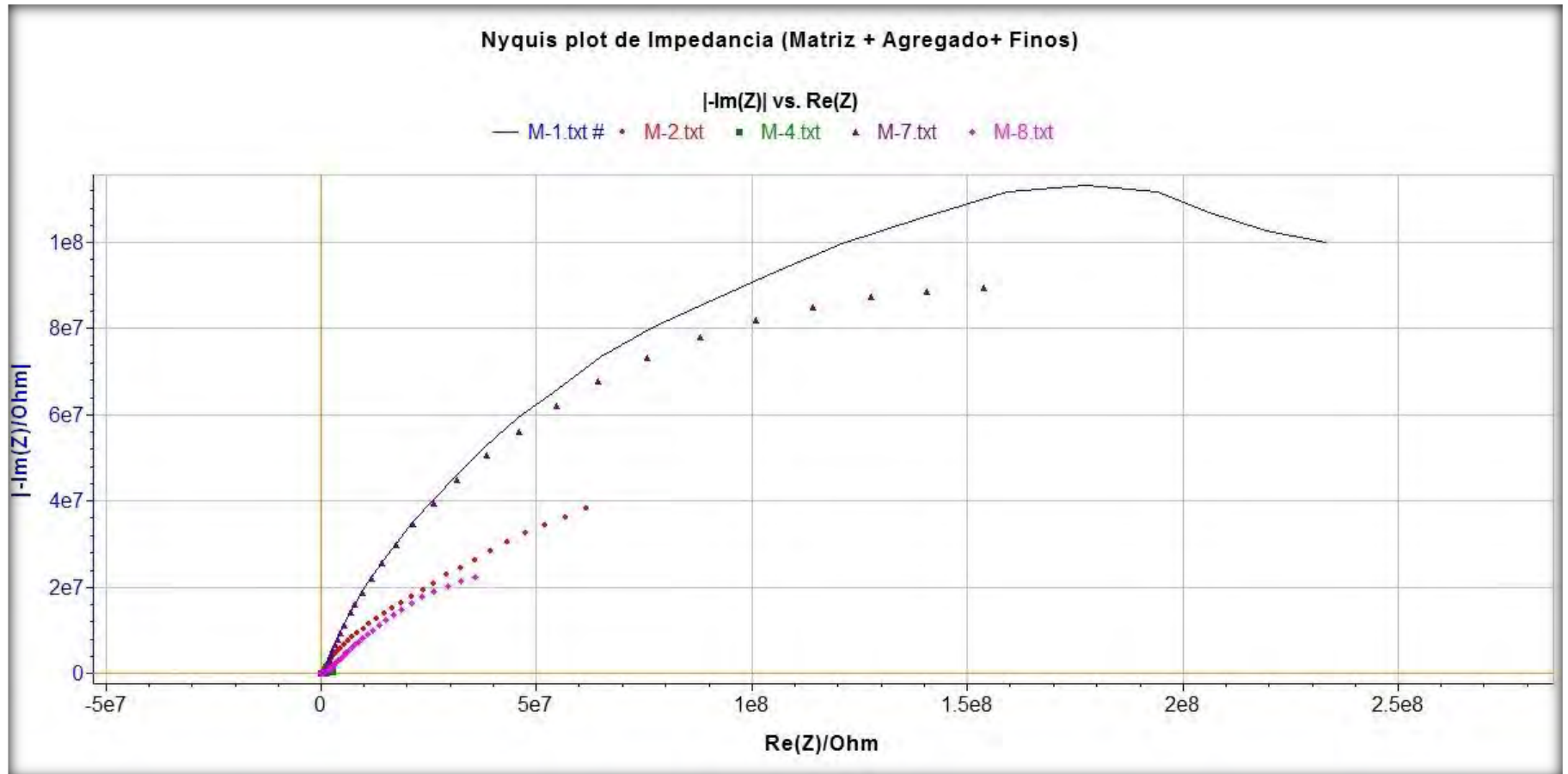


Figura 5.7. 16. Comparación de resistencias de las muestras M-1, M-2, M-4, M-7 y M-8, en el Nyquist plot.

En la figura 5.7.16 se puede notar que la muestra M-1 sigue siendo el que presenta una resistencia superior a las demás y la muestra M-4 la que presenta una resistencia menor.

6. CONCLUSIONES

- De las propiedades de fluidez los MAC M-1, M-2, M-3, M-4, M-5 y M-6, tienen una buena fluidez, a pesar de las bajas relaciones a/c empleadas. Pero en el caso de los MAC M-7 y M-8 estos no podrían ser considerados micro-concretos autocompactables porque no presentan fluidez alguna, aun empleando mayor cantidad de relación a/c.
- Dentro de nuestros micro-concretos autocompactables podemos encontrar dos tipos de densidades: normal y ligero; pero con referente a la absorción, se tienen los tres tipos de categorías: alta, mediana y baja.
- Los MAC M-1, M-2, M-3, M-4, presentan resistencias a la compresión altas del orden de 800 a 950 kg/cm², al momento de incorporar el neumático molido (MAC M-5, M-6), la resistencia baja a un rango de 200 a 500kg/cm² dependiendo del porcentaje de neumático molido, la parte importante de este tipo de MAC es el modo de falla.
- Las durezas Vickers (HV) de los MAC andan en un rango de 30 a 90 kgf/mm² tanto en la matriz como en el agregado. Haciendo una comparación de los MAC con el piso cerámico y el cristal, se pudo observar un comportamiento diferente, ya que en los MAC no se presentaron grietas radiales aún sabiendo que en el caso de los MAC M-1, M-2, M-3 y M-4 tienen una resistencia a la compresión alta.
- Del estudio microestructural de los MAC realizado en el microscopio electrónico de barrido, para el caso del MAC M-1 se pudo observar una buena interface entre la matriz y el agregado en el caso de los MAC, con esto se puede correlacionar con su alto comportamiento mecánico. En comparación con los MAC que contienen carbón, hay una reducción de la resistencia mecánica, esto es debido a la estructura porosa del carbón, pero se vio que hay buena interface con la matriz de la pasta de cemento. Para el caso de los que contienen Cross (neumático molido) se vio que hay una mala interface entre la matriz y los filamentos de neumático, además, en este caso ya se tiene la presencia de agujas de etringita.
- En el estudio nano-estructural realizado en el microscopio electrónico de transmisión (TEM), se logró ver en el cemento anhidro la formación de monocristales. Los cristales encontrados fueron: el **hemihidrato de yeso (CaSO₄-0.5H₂O)** y **alumino ferrita de tetracalcio (4CaO-Al₂O₃-Fe₂O₃)** ambos con una estructura **ortorrómbica**, por lo que el cemento anhidro si es cristalino. Para el caso del cemento hidratado se tiene la formación de policristales. La fase cristalina encontrada fue la del **gel de Tobermorita (S-C-H) con una**

estructura cristalina ortorrómbica, con ello podemos decir que el cemento hidratado también es cristalino.

- Para el análisis de propiedades eléctricas de muestras de concreto, se utilizó la técnica de espectroscopia de impedancia en la cual se utilizó un voltaje de 200mV como constante y la frecuencia se vario desde un valor mínimo de 10mHz hasta 1MHz. De acuerdo a los resultados obtenidos, la muestra M-1L presenta una mayor resistencia eléctrica que las otras muestras que no contienen agregado, como son: M-2L, M-3L, M-4L. Por otro lado, en el caso de las muestras que tienen agregado, la muestra M-1 presentó mayor resistencia eléctrica que las muestras M-2, M-4, M-7, M-8. En el caso de las muestras que contenían carbón (M-4 y M-4L), son las que presentan resistencias muy bajas.
- Si consideramos el tamaño de partícula de los componentes que se utilizaron para la preparación de las muestras (ver sección 4.1), se podría considerar que las diferencias de tamaño de partícula influirían en la formación de nuevos semicírculos. También, podríamos suponer que como los nuevos componentes que son adicionados en la elaboración de las muestras solo forman nuevas mezclas, esto contribuiría en la formación de nuevos semicírculos, debido al tiempo de transferencia de electrones en las fronteras de grano.
- Del diseño de un pavimento con estos MAC, se utilizó un módulo ruptura relacionado con su resistencia a la compresión y la densidad de cada una de ellas. En el caso de los MAC M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, utilizando la correlación con su resistencia a la compresión para la obtención del módulo de ruptura, se obtuvieron módulos de ruptura muy altos.
- Seguirá este trabajo abierto para un mejor estudio, ya que apenas estamos en la primera etapa de esta línea de investigación, por lo que se recomiendan algunos puntos que se mencionaran a continuación:
 - ✓ Elaborar vigas de cada uno de los MACs para someterlos a una carga a flexión a una edad de hidratación a los 28 días y, así obtener su módulo de ruptura adecuado para hacer un buen diseño de pavimento.
 - ✓ Obtener los módulos de elasticidad y de Poisson.
 - ✓ Para el estudio de sus propiedades eléctricas, hacer las pruebas a unas edades de hidratación más tempranas, para ver cómo va cambiando la resistencia eléctrica, además, hacer una búsqueda más profunda en la literatura sobre espectroscopias de impedancia en concretos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O'Reilly Días, Vitero A. Métodos para dosificar concretos de elevado desempeño, IMCyC. 2007.
- [2] Muñoz, Rudy Artemio Chután. Concreto autocompactado experimentación en Guatemala. Guatemala : Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos Guatemala, Noviembre 2004.
- [3] Núñez, Ester B. Bermejo. Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación, Tesis doctoral. Madrid : Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid., 2009.
- [4] Fava, Carlos A. P. Hormigón Autocompactante, Desarrollo y Caracterización, Tesis maestría. s.l. : Facultad de Ingeniería, U. N. C. P. B. A., Agosto, 2003.
- [5] Parapinski dos Santos, Ana Carolina. Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular, Tesis doctoral. Barcelona : Departamento de Ingeniería y Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Junio, 2010.
- [6] Smith, William F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. s.l. : McGraw-Hill, 1992.
- [7] Brian Marroquin, Jason. Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolonas en morteros endurecidos de cemento. Guatemala : Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Abril 2008.
- [8] Sidney, Mindess y Young, J. Francis. Concrete. s.l. : Prentice-Hall.
- [9] Característica de los materiales, N CMT 2 02 002/02.
- [10] Imeco, s.a. Canteras. ESPECIFICACIONES TCNICAS - MARMOLINA. s.l. : Industria Mediavilla Cordero, S.A. - IMECO, 2009.
- [11] Acevedo Sandoval, Otilio, y otros. El papel de óxidos de hierro en los suelos. s.l. : Redalyc Sistema de Información Científica, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 2004.
- [12] Nordberg, Gunnar. Metales: Propiedades químicas y toxicidad.
- [13] Castaño, J.G. y Arroyave, C. La funcionalidad de los óxidos de hierro. Medellín, Colombia : Consejo Superior de INvestigaciones Científicas. Licencia Creative Commons 3.0 España, Abril 1997.
- [14] Bruce Wallace, Robert. El Carbón en México. Agosto 2009.
- [15] Fernández Rodríguez, Aramis, y otros. Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. La Habana, Cuba : Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Octubre 2006.
- [16] Cano Serrano, Encarnación, Cerozo García, Lidia y Urbina Fraile, Marina. Valorización Material y Energética de neumáticos fuera de uso. s.l. : cimtan,

Confederación empresarial CEIM, Comunidad de Madrid (Dirección General Universidades e Investigaciones).

[17] ARAMAYO CRUZ, GABRIEL, y otros. HORMIGONES CON AGREGADOS LIVIANOS. s.l.: DEPARTAMENTO DE MECÁNICA APLICADA Y ESTRUCTURAS, 2003.

[18] Mundaca, Rebeca Paz Aguilar. Determinación de la Influencia de las Nanomoléculas de Sílice en el Concreto Frente a un Factor que afecta su Durabilidad. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, 2007.

[19] Preisler, César Augusto Hernández. Plastificantes para el Hormigón. Valdivia: Escuela de construcción civil, Universidad Austral de Chile, 2005.

[20] Aranda, Amanda Rubio. Los aditivos del mundo del hormigón. s.l.: Escuela Politécnica Superior, Universidad Politécnica de Catalunya, Junio 2007.

[21] Balzamo, Humberto, y otros. Hormigones Autocompactantes con Bajo contenido de Polvo: Los materiales de construcción del futuro. 2009.

[22] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. May, 2005.

[23] Balzamo, Humberto, y otros. Optimización de hormigones autocompactables con bajo contenido de polvo. Degussa Argentina: s.n.

[24] M. Hunger, A.G. Entrop, I. Mandilaras, H.J.H. Brouwers, M. Founti. The behavior of self-compacting concrete containing micro-capsuled Phase Change materials. s.l.: Cement & Concrete Composites, ELSEVIER, 2009.

[25] OUCHI, Másahiro. Self compacting concrete. Development, applications and investigations.

[26] Orozco, Juan Orlando López. Porosidad del concreto, Tesis. Guatemala: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Enero, 2004.

[27]. Carmona, José Mena. Variación en las características de fluidez en mezclas de concreto mediante la modificación de aditivo y agua para la obtención de un concreto autocompactable. Costa Rica: Escuela de Ingeniería en construcción, Instituto Tecnológica de Costa Rica, Septiembre 2004.

[28]. González Cuevas, Oscar M. Aspectos fundamentales del Concreto Reforzado. México, D. F.: LIMUSA, 3a Edición, 1996.

[29]. Brown, Danny, Tia, Mang y Liu, Yanjun. Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete. Gainesville, Florida: Department of Civil & Coastal Engineering, University of Florida, May, 2005.

[30]. ASTM C469-02. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.

[31]. Permy, Javier Pajón. Teoría de las estructuras, Cálculo estructural, Construcción y Normativa.

[32]. BETON, COMITE EURO-INTERNATIONAL DU. CEB-FIP MODEL CODE 1990, DESIGN CODE. s.l.: THOMÁS TELFORD, 1990.

- [33]. Garcia, Omar Aguilar. Desarrollo de una porcelana tipo STONEWARE de alta resistencia mecánica adicionando materiales no convencionales. Morelia, Michoacán : Institución de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Agosto 2009.
- [34]. DAMBAKIZI, Franck. Strategies for 3d finite element simulations of indentation experiments at microstructural scales. Febrero, 2005.
- [35]. Botero, Maryory Astrid Gómez. Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros, Tesis Doctoral. Barcelona : Departamento de física aplicada, Universitat de Barcelona, Diciembre, 2005.
- [36]. Meza, Juan Manuel, Chavez, Cesar A. y Vélez, Juan Manuel. Indentation Techniques Mechanical Properties Measurement of Ceramics. Medellín : Grupo Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Diciembre, 2005.
- [37]. ASTM C1327-03. Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics. s.l. : ASTM International.
- [38]. Caño, José Ygnacio Pastor. Fractura de Materiales Cerámicos Estructurales Avanzados. Madrid : Departamneto de Ciencia de Materiales ATSI de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, 1993.
- [39]. Grágeda Zerraga, Mario y Montesinos, Susana. Aplicaciones de microscopía electronica de barrido y análisis de frectura de una aleación de Cu-10Al. s.l. : Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [40]. Nemati, Kamran M. Fracture Analysis of Concrete Using Scanning Electron Microscopy. California : Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, California, USA, 1997.
- [41]. Stutzman, Paul E. Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography. Gaithersburg, USA : National Institute of Standards and Technology, US Department of Concrete, Noviembre, 2000.
- [42]. Naik Kardile, Arun. Fundamentos del microscopio electrónico y su aplicación en la investigación textil. s.l. : Universidad Politecnica de Catalunya, 2004.
- [43]. Cottis, Robert y Turgoose, Stephen. Electrochemical Impedance and Noise. United states of America : NACE International, 1999.
- [44]. Perea-Bedolla, E, Amano-Toyomoto, E y Huanosta Tera, A. Espectroscopía de impedancias. s.l. : Interes general, 1995.
- [45]. Gabrielli, Claude. Use and applications of electrochemical impedance techniques, technical report number 24. s.l. : Solartron Analytical, April 1997.
- [46]. Huanosta, A. Mediciones de AC en electrolitos sólidos policristalinos. México, D.F. : Revista mexicana de Física. Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autonoma de México, Febrero, 1988.
- [47]. Schiebl, A., y otros. Assesing the moisture profile of drying concrte using impedance spectroscopy. s.l. : RILEM Publications S.A.R.L.

- [48]. Christense, Bruce J., y otros. Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application. s.l. : Journal of the American Ceramic Society, July 27, 1994.
- [49]. Young-Min, Kim, Jon-Heun, Lee y Seong-Hyeon, Hong. Study of Alenite cement hydration by impedance spectroscopy. s.l. : Cement and Concrete Research, April, 2002.
- [50] The application of Impedance Spectroscopy to Cementitious Systems. Technical Report 29. Solartron Instruments. May 1995
- [51]. Giraldo M., Manuel Alejandro y Tobón, Jorge Iván. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Medellín, Colombia : Revista de la Facultad de Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Marzo 2006.
- [52] Navarro Sánchez, Luis M., Martínez Molina, Wilfrido y Espinoza Mandujano, José A. Análisis de Materiales. Morelia, Michoacán, México : s.n., 2000.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [1E]<http://www.acuarios-marinos.com/forums/showthread.php?2066-Marmolina-dolomita-calcita>.
- [2E]<http://huguetmallorca.com/es/prod/mr/historia.htm>.
- [3E]<http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-carbonato-de-calcio-8240.htm>.
- [4E]<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/341452.durango-rey-en-marmol.html>.
- [5E]http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xidos_de_hierro.
- [6E]<http://es.wikipedia.org/wiki/Carb%C3%B3n>.
- [7E]http://es.wikipedia.org/wiki/Carb%C3%B3n_activado.
- [8E]<http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/>.
- [9E]<http://vehiculosautomoviles.blogspot.com/2010/02/estructura-de-un-neumatico.html>.
- [10E]http://www.paisajelimpio.com/ayuda_neumaticos.htm.
- [11E]<http://es.wikipedia.org/wiki/Neum%C3%A1tico>.
- [12E] <http://www.cannarias.com/foros/showthread.php?t=2619>.
- [13E] 29. WIKIPEDIA, La enciclopedia libre. [En línea] [Citado el: 18 de Octubre de 2011.] 70-75% dióxido de silicio: SiO₂.
- [14E]<http://www.quiminet.com/articulos/que-es-la-perlita-mineral-61160.htm>.
- [15E]<http://www.cita.es/perlita/>.
- [16E]<http://www.youtube.com/watch?v=CSZxjQwDKF0&feature=related>.
- [17E]<http://inciarco.com/foros/showthread.php?p=22358&page=2>.
- [18E]<http://www.fhwa.dot.gov/publications/focus/05nov/01.cfm>.
- [19E]http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson.

[20E]<http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>.

[21E] <http://investigacion.us.es/scisi/sgi/servicios/area-de-rayosx/equipamiento>.

[22E]<http://imagenologia-siram607.blogspot.com/2011/04/microscopia-electronica-de-transmision.html>.

[23E]http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_transmisi%C3%B3n.

[24E]CEMEX. Manual de diseño y construcción.
http://www.cemexmexico.com/co/co_pa_dp.html.

[25E]<http://www.elvec.com.mx/pages/agregados.html>.

[26E]http://www.laqq.com/INSUMOS_listado.asp?rubro_id=2&categoria=MATERIAL%20DE%20VIDRIO%20CERTIFICADO%20&categoria_ID=26&SUBCATEGORIA=PROBETAS&SUBCATEGORIA_ID=182.

8. ANEXOS**8.1. Ficha técnica del aditivo hiperfluidificante PLASTOL 4000**

PLASTOL 4000

ADITIVO HIPERFLUIDIFICANTE BASE POLICARBOXILATOS

DESCRIPCIÓN

PLASTOL 4000 es un aditivo hiperfluidificante base policarboxilatos formulado específicamente para concretos con baja relación agua/cementante. Cumple con la norma ASTM-494 tipo F como reductor de agua de alto rango. El PLASTOL 4000 no contiene iones cloruro adicionados.

APLICACIONES PRINCIPALES

PLASTOL 4000 está especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto de alta fluidez.
- Concretos para pisos con baja relación Agua/Cementante.
- Concretos autoconsolidables.
- Concretos bombeados.

BENEFICIOS

- Mantiene la trabajabilidad cuando se combina con aditivos base lignosulfonato y es ajustable de acuerdo a los requerimientos de obra.
- Mejora la durabilidad en el concreto debido a que reduce la permeabilidad.
- Facilita la colocación del concreto en sitio.
- De acuerdo a la dosis se pueden disminuir los tiempos de acabado en pisos industriales.
- No contiene cloruros ni agentes corrosivos.

ESPECIFICACIONES

- Está formulado para cumplir con las especificaciones para aditivos ASTM C-494 Tipo F y la ASTM C-1017 como tipo I.

APARIENCIA

- Es un líquido color ámbar.
- Gravedad específica 1.09 Kg/L.
- Contenido de sólidos 30% materia activa.

INSTRUCCIONES DE USO

- Cuando se usa como reductor de agua o agente de flujo la dosis recomendada de PLASTOL 4000 es de 2 a 15 cc. por kilo de cemento.
- PLASTOL 4000 puede ser adicionado a pie de obra.
- Como fluidificante adiciona el aditivo a una mezcla de consistencia normal para obtener unas características de concreto bombeable.
- Como reductor de agua (hasta un 20 o 40%) dosifican en el agua de mezcla final.

Para cualquiera de las anteriores aplicaciones es fundamental que el tiempo de mezclado una vez adicionado el aditivo sea como mínimo de 5 a 10 minutos. Esto con el fin de permitir que el aditivo trabaje.

Figura 8.1. 1. Ficha técnica del Aditivo

ENVASE


- A granel.
- Cubetas de 19 L.
- Tambores de 200 L.

Se recomienda mantener el aditivo siempre tapado en los envases de The Euclid Chemical Company.

PRECAUCIONES/RESTRICCIONES




- El producto **PLASTOL 4000** requiere agitación en su envase original antes de usarse.
- Cuando se emplee producto a granel, los tanques de almacenamiento deben contar con sistema de mezclado (agitador o bomba sumergible). El sistema debe activarse para mezclar el producto por 2 minutos antes de emplearse.
- Cuando el producto almacenado no ha tenido consumo durante 1 mes, agite y realice pruebas de desempeño en laboratorio antes de su utilización.
- En combinación con aditivos base lignosulfonato puede incrementarse considerablemente la inclusión de aire.
- Es muy sensible cuando se combina con inclusores de aire ya que puede incrementarse significativamente cuando aumenta el tiempo de mezclado.
- Se recomienda aplicarlo a pie de obra para dar la fluidez requerida.
- Puede verse reducido su desempeño con arenas contaminadas con arcillas, incrementándose fuertemente la dosis requerida.
- Cuando se emplea como fluidificante a pie de obra adicionar a concretos con revenimientos mayores a 5 cm para optimizar su desempeño.
- Se recomienda realizar las mezclas de prueba para determinar la compatibilidad del aditivo con el cemento y materiales a emplear, al igual que para determinar las dosis apropiadas.
- En concretos fluidos se debe ajustar el diseño para mantener la homogeneidad de la mezcla y evitar segregación.
- Mezcla con **PLASTOL 4000** en exceso puede incluir aire.
- Los cambios en los tipos de cemento, agregados y la temperatura modifican el desempeño de los aditivos en la mezcla de concreto variando resultados en el concreto fresco o endurecido. En coordinación con el Asesor Técnico Comercial Euclid-México de la región, es fundamental efectuar pruebas de desempeño de los aditivos bajo las condiciones propias de cada obra. De ésta manera, se podrá definir la solución que ofrezca un mejor costo-beneficio a nuestros clientes.
- Agite el producto antes de usar.
- El producto debe almacenarse en su envase original, bien cerrado, bajo techo, en un lugar fresco y seco.

Vida útil: 12 meses en el envase original cerrado.



EUCLID CHEMICAL

The Euclid Chemical Company
 01 800 8 EUCLID, Centro (55) 5864 9970
 Norte (81) 8048 0810, Occidente (33) 3633 6031
www.eucomex.com.mx

No. 20003232 QM08

Figura 8.1. 2. Ficha técnica del aditivo, continuación

8.2. DISEÑO DE PAVIMENTO CON EL MÉTODO DE LA PCA (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION)

8.2.1. UBICACIÓN DEL TRAMO

En el presente trabajo se realizará el diseño de pavimento del tramo Ucareo-Tócuaro, tramo Ucareo en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato ubicado en el km 0+000 al km 6+140 con origen en Ucareo, Michoacán.

- Macro localización



Figura 8.2. 1. Macro localización del tramo en estudio. Fuente Google EARTH

- Micro localización



Figura 8.2. 2. Micro localización del tramo en estudio.

8.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO

De los datos de aforo del tramo en estudio se obtuvo un TDPA (tránsito diario promedio anual) de 700 vehículos de acuerdo con la SCOP (Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas), con una tasa de crecimiento de 4% anual. La composición del tráfico se mostrará en la tabla 8.2.1:

Tabla 8.2. 1. Composición del tráfico

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO		
TIPO DE VEHÍCULO	%	NÚMERO DE VEHÍCULOS
A	89	623
B2	5	35
B3	0	0
C3	5	35
T3-S3	1	7
T3-S2-R4	0	0
TOTAL	100	700

8.2.3. MÉTODO PCA

A continuación se describen los lineamientos generales del método del Portland Cement Association (PCA).^[24E]

- **PROCEDIMIENTO DE DISEÑO**

Para el desarrollo del método de la PCA es necesario conocer los siguientes datos:

- El tráfico esperado, como lo es el tránsito diario promedio anual,
- La composición vehicular del tráfico y de esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el período de diseño.
- Tipo de junta y acotamiento.
- Resistencia a la flexión del concreto (MR) a 28 días.
- El valor del módulo de reacción K del terreno de apoyo.

El método considera dos criterios de diseño:

- **Fatiga**
- **Erosión**

➤ **Análisis por fatiga**

El Análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) influye principalmente en el diseño de pavimentos de tráfico ligero (calles residenciales y caminos secundarios independientemente de si las juntas tienen ó o pasajuntas) y pavimentos con tráfico mediano con pasajuntas en las juntas.

Se emplean las mismas tablas y figuras para pavimentos con ó sin pasajuntas, mientras que la única variable es si se cuenta ó no con apoyo lateral. **Para nuestro caso si tenemos apoyo lateral, por lo que solo se presentan la tabla y figura adecuada, mostrados en la tabla 8.2.2 y a figura 8.2.3.**

Tabla 8.2. 2. Esfuerzo equivalente para pavimentos con apoyo lateral. (13)

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	368	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	339	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	309	246	342	295	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	99	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	99	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	119	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	75	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

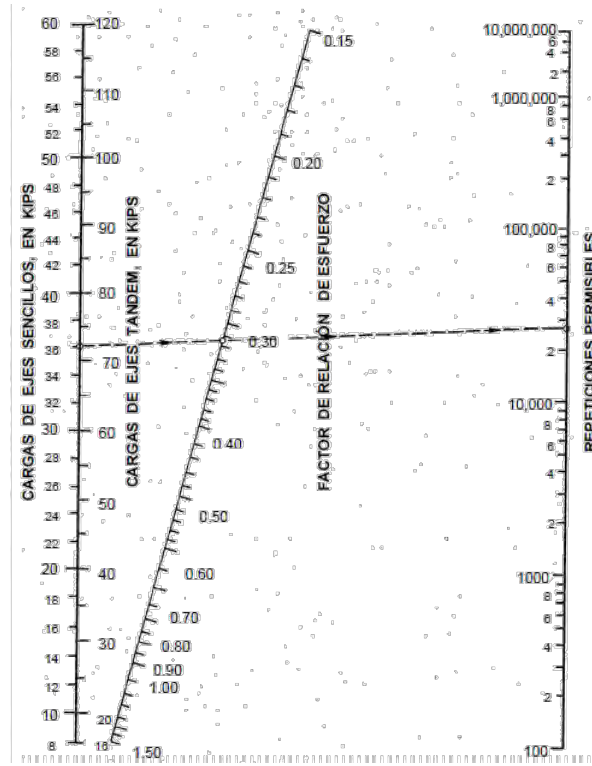


Figura 8.2. 3. Análisis de fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con ó sin apoyo lateral) (13)

➤ Análisis por erosión

El análisis por erosión (el responsable de controlar la erosión del terreno de soporte, bombeo y diferencia de elevación de las juntas) influye principalmente el diseño de pavimentos con tráfico mediano a pesado con transferencia de carga por trabazón de agregados (sin pasajuntas) y pavimentos de tráfico pesado con pasajuntas.

Para pavimentos que tienen una mezcla normal de pesos de ejes, las cargas en los ejes sencillos son usualmente más severas en el análisis por fatiga y las cargas en ejes tandem son más severas en el análisis por erosión. De la misma forma que la anterior, se tienen condiciones de uso de los nomogramas. Para nuestro caso tenemos que si hay apoyo lateral con pasajuntas, por lo que se debe de emplear la tabla 8.2.3 y la figura 8.2.4 para nuestro diseño por erosión.

Tabla 8.2. 3. Factores de erosión, para pavimentos con pasajuntas y con apoyo lateral

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.03	3.10	3.05	3.00	2.93	3.04	2.95	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.97
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.93	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.95	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.81	2.79	2.74	2.74	2.78	2.68	2.67	2.73	2.63	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.73	2.71	2.73	2.68	2.63	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.49	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.66	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.45	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.38	2.44	2.51	2.33	2.34	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.15	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.13	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.98	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.90	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.89	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.90	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.96	1.95	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.96	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.93	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.90	1.91	1.61	1.74	1.83

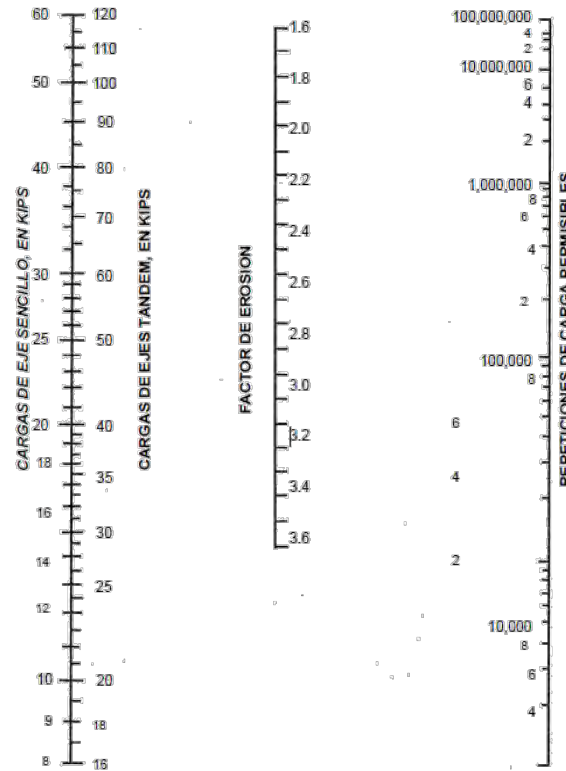


Figura 8.2. 4. Análisis de erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión con apoyo lateral).

8.2.3.1. DISEÑO CON UN CONCRETO NORMALTabla 8.2. 4. Datos del proyecto, tomando un **MR=48kg/cm² (682.7 PSI)**

DATOS		
Vialidad urbana de 2 sentidos	1 carril por sentido	
Módulo de ruptura (MR) del concreto	682.7	PSI
Módulo de reacción K de la subrasante	334.2	PCI
Espesor inicial de la losa	10	in
Factor de seguridad de carga, LSF	1.1	
Período de diseño	20	años
Pasa juntas	SI	
Apoyo lateral	SI	
Espesor de la sub-base	0	in
K de la Sub-base	0	PSI
Tasa de crecimiento anual del tránsito	4	%

Tabla 8.2. 5. Aforo vehicular

Aforo vehicular para 2 sentidos				
Tipo de vehículo	Total diarios	% del TDPA	Cargados (%)	Vacíos (%)
A	623.00	89.00	100.00	0.00
B2	35.00	5.00	60.00	40.00
C2	0.00	0.00	60.00	40.00
C3	35.00	5.00	60.00	40.00
T3S2	0.00	0.00	60.00	40.00
T3S3	7.00	1.00	60.00	40.00
T3S2R4	0.00	0.00	60.00	40.00
TOTAL	700.00	100.00		

Tabla 8.2. 6. Número de repeticiones esperadas durante la vida útil y sus respectivos ESAL'S

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Cargados (%)	Total diarios	Repeticiones al año	Repeticiones en la vida útil
A	Sencillo	2.20	100.00	623.00	113,697.50	3,385,693.09
	Sencillo	2.20	100.00		113,697.50	3,385,693.09
B2	Sencillo	12.10	60.00	35.00	3,832.50	114,124.49
	Sencillo	22.00	60.00		3,832.50	114,124.49
	Sencillo	7.70	40.00		2,555.00	76,082.99
	Sencillo	15.40	40.00		2,555.00	76,082.99

C3	Sencillo	12.10	60.00	35.00	3,832.50	114,124.49
	Sencillo	39.60	60.00		3,832.50	114,124.49
	Tandem	8.80	40.00		2,555.00	76,082.99
	Tandem	9.90	40.00		2,555.00	76,082.99
T3S3	Sencillo	12.10	60.00	7.00	766.50	22,824.90
	Sencillo	39.60	60.00		766.50	22,824.90
	Tandem	49.50	60.00		766.50	22,824.90
	Tandem	8.80	40.00		511.00	15,216.60
	Tridem	8.80	40.00		511.00	15,216.60
	Tridem	11.00	40.00		511.00	15,216.60

La relación de esfuerzos equivalentes se obtuvo mediante una interpolación utilizando la siguiente figura.

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	640	534	431	559	465	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	265	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	366	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	126	122	86	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Figura 8.2. 5. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 7. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga

Análisis por fatiga		
Esfuerzo equivalente	Relación de esfuerzos	
Eje Sencillo	135.29	0.1982
Eje Tandem	116.119	0.1701
Eje Tridem	89.803	0.1315

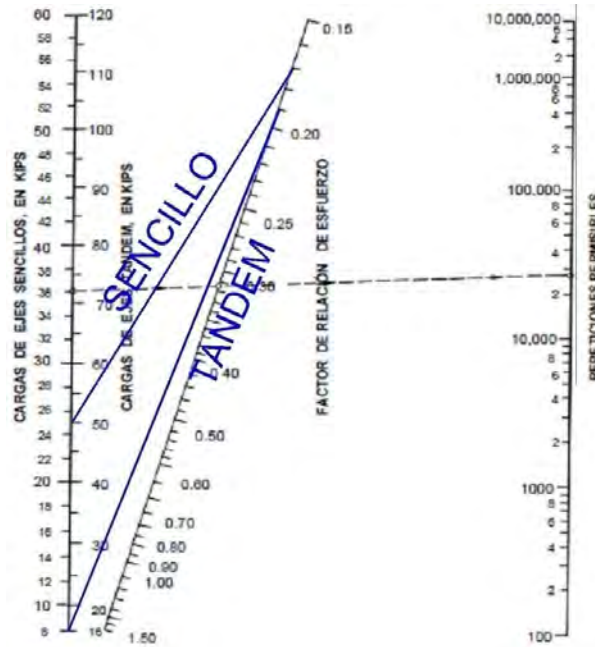


Figura 8.2. 6. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.

Los factores por erosión salieron de la interpolación de la siguiente figura.

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri
4.0	3.26	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.10	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.05	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.80	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.16	2.25	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.78	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.45	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Figura 8.2. 7. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 8. Valores de factor de erosión.

Análisis por erosión	
Factor de erosión	
Eje Sencillo	2.06316
Eje Tandem	2.16461
Eje Tridem	2.24119

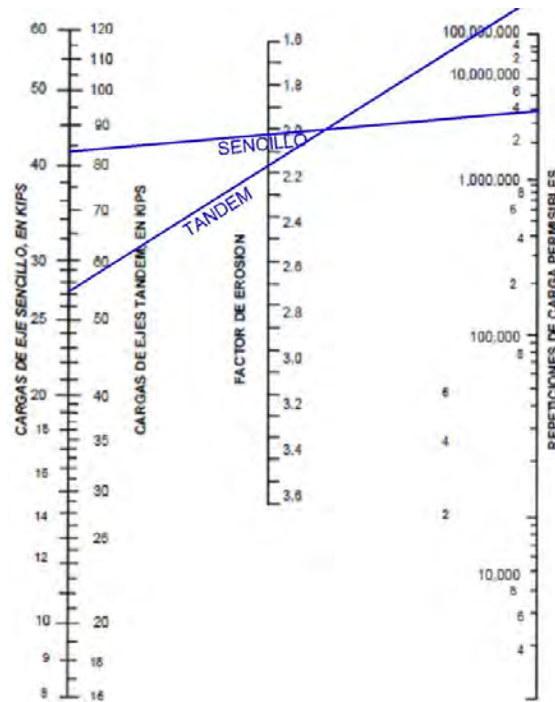


Figura 8.2. 8. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.

Tabla 8.2. 9. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Peso por LSF	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
				Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
A	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
B2	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	22.00	24.20	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	7.70	8.47	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	15.40	16.94	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
C3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	4000000	2.85
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
	Tandem	9.90	10.89	Ilimitada	0.00		
T3S3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00		
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	4000000	0.57
	Tandem	49.50	54.45	Ilimitada	0.00	Ilimitada	
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
	Tridem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
	Tridem	11.00	12.10	Ilimitada	0.00		
				TOTAL	0.00%	TOTAL	3.42 %



Figura 8.2. 9. Sección calculada para un concreto estándar.

8.2.3.2. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-1

Para conocer el MR (módulo de ruptura) del micro-concreto, se supuso el 15% del $f'c$, quedando así un módulo de ruptura de **MR=147.98 kg/cm² (2104.6928 PSI)**.

Tabla 8.2. 10. Datos del proyecto, tomando un **MR=147.98 kg/cm² (2104.69 PSI)**

DATOS		
Vialidad urbana de 2 sentidos	1 carril por sentido	
Módulo de ruptura (MR) del concreto	2104.69	PSI
Módulo de reacción K de la subrasante	334.2	PCI
Espesor inicial de la losa	7.5	in
Factor de seguridad de carga, LSF	1.1	
Período de diseño	20	años
Pasa juntas	SI	
Apoyo lateral	SI	
Espesor de la sub-base	0	in
K de la Sub-base	0	PSI
Tasa de crecimiento anual del tránsito	4	%

La relación de esfuerzos equivalentes se obtuvo mediante una interpolación utilizando la siguiente figura.

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri			
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	216	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	229	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	136
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	136	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Figura 8.2. 10. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 11. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga

Análisis por fatiga		
Esfuerzo equivalente	Relación de esfuerzos	
Eje Sencillo	198.264	0.0942
Eje Tandem	248.677	0.1182
Eje Tridem	133.632	0.0635

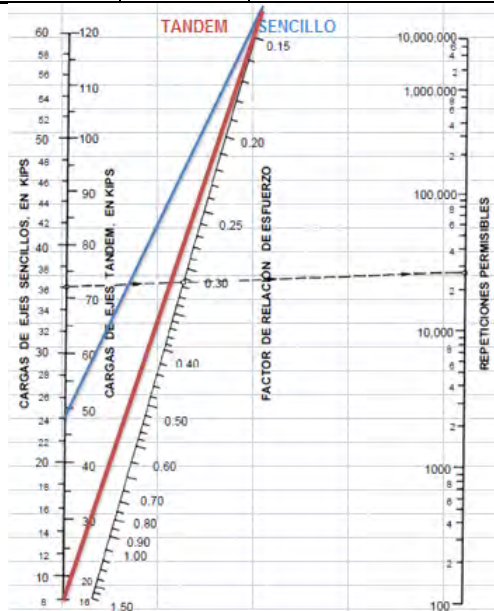


Figura 8.2. 11. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa. (pulgadas)	k de la subrasante. pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.08	3.00	2.98	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.96	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.78	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.36	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.36	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Figura 8.2. 12. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.
Tabla 8.2. 12. Valores de factor de erosión.

Análisis por erosión	
Factor de erosión	
Eje Sencillo	2.40487
Eje Tandem	2.42632
Eje Tridem	2.4529

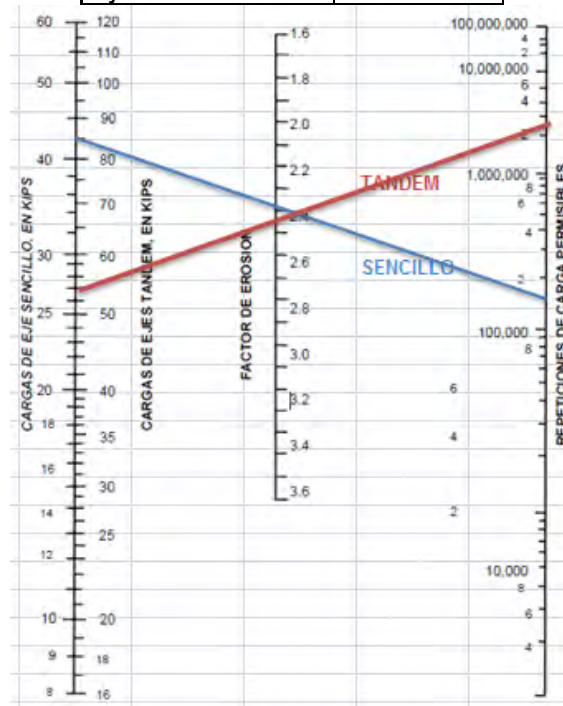


Figura 8.2. 13. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Peso por LSF	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
				Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
A	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
B2	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	22.00	24.20	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	7.70	8.47	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	15.40	16.94	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
C3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	150000	76.08
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	9.90	10.89	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
T3S3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	150000	15.22
	Tandem	49.50	54.45	Ilimitada	0.00	2800000	0.82
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tridem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
	Tridem	11.00	12.10	Ilimitada	0.00		
TOTAL					0.00%	TOTAL	91.30 %

Tabla 8.2. 13. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión

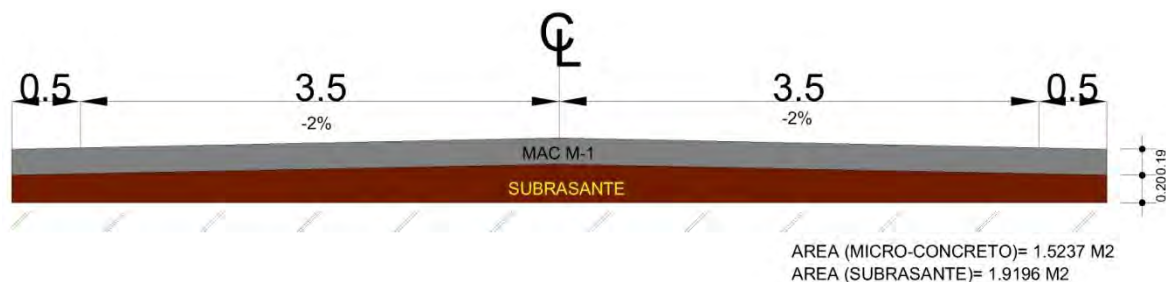


Figura 8.2. 14. Sección calculada para un MAC M-1

Para el caso de los otros micro-concretos, como M-2, M-3, M-4, M-5, se tiene el mismo espesor de pavimento que el M-1. Ya que en el diseño, utilizando los nomogramas y tablas, el módulo de ruptura solo influye en los daños ocasionados por fatiga.

8.2.3.3. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-6

Para conocer el MR (módulo de ruptura) del micro-concreto, se supuso el 15% del f'c, quedando así un módulo de ruptura de **MR=42.29 kg/cm2 (601.43 PSI)**.

Tabla 8.2. 14. Datos del proyecto, tomando un **MR=42.29 kg/cm2 (601.43 PSI)**

DATOS		
Vialidad urbana de 2 sentidos	1 carril por sentido	
Módulo de ruptura (MR) del concreto	601.43	PSI
Módulo de reacción K de la subrasante	334.2	PCI
Espesor inicial de la losa	8.0	in
Factor de seguridad de carga, LSF	1.1	
Período de diseño	20	años
Pasa juntas	SI	
Apoyo lateral	SI	
Espesor de la sub-base	0	in
K de la Sub-base	0	PSI
Tasa de crecimiento anual del tránsito	4	%

La relación de esfuerzos equivalentes se obtuvo mediante una interpolación utilizando la siguiente figura.

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri
4.0	640	534	431	559	468	362	517	430	377	469	422	389	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	287	242
5.5	418	360	279	368	309	249	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	219	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	179
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	196	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	204	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	145	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	79	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	106	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Figura 8.2. 15. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 15. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga

Análisis por fatiga		
Esfuerzo equivalente		Relación de esfuerzos
Eje Sencillo	182.435	0.3033
Eje Tándem	152.777	0.2540
Eje Tridem	121.803	0.2025

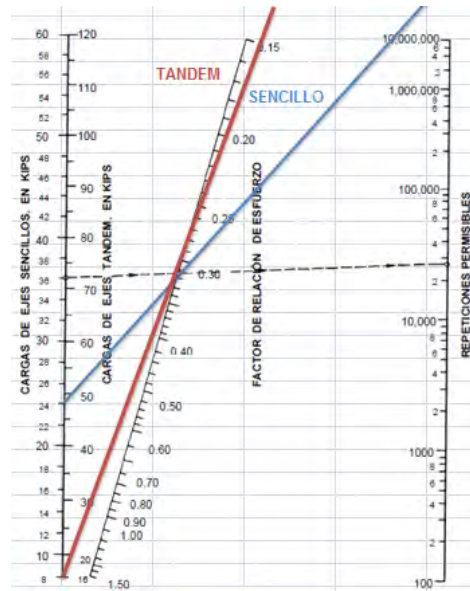


Figura 8.2. 16. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.96	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.36	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.06	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Figura 8.2. 17. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 16. Valores de factor de erosión.

Análisis por erosión	
Factor de erosión	
Eje Sencillo	2.32487
Eje Tándem	2.36632
Eje Tridem	2.4029

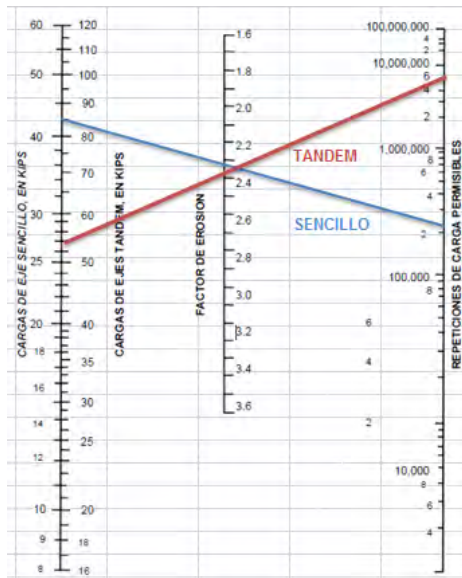


Figura 8.2. 18. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.

Tabla 8.2. 17. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Peso por LSF	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
				Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
A	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
B2	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	22.00	24.20	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	7.70	8.47	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	15.40	16.94	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
C3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	230000	49.62
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	9.90	10.89	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
T3S3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	230000	9.92

Tandem	49.50	54.45	Ilimitada	0.00	6000000	0.38
Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
Tridem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
Tridem	11.00	12.10	Ilimitada	0.00		
TOTAL				0.00%	TOTAL	59.54 %

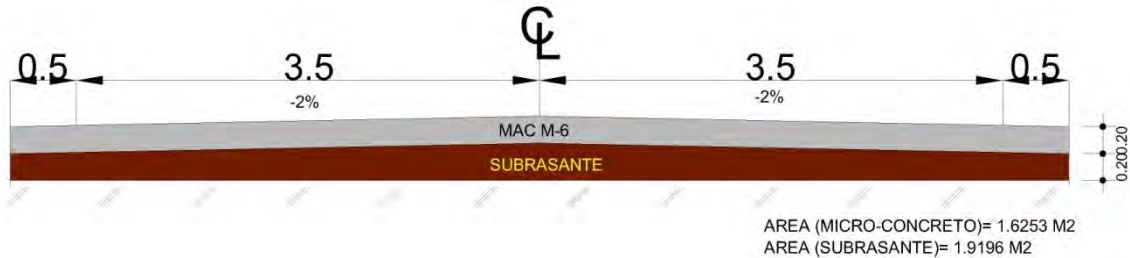


Figura 8.2. 19. Sección calculada para un MAC M-6

8.2.3.4. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-7

Para conocer el MR (módulo de ruptura) del micro-concreto, se supuso el 15% del $f'c$, quedando así un módulo de ruptura de **MR=18.54 kg/cm² (263.7 PSI)**.

Tabla 8.2. 18. Datos del proyecto, tomando un **MR=18.54 kg/cm² (263.7 PSI)**

DATOS		
Vialidad urbana de 2 sentidos	1 carril por sentido	
Módulo de ruptura (MR) del concreto	263.7	PSI
Módulo de reacción K de la subrasante	334.2	PCI
Espesor inicial de la losa	12	in
Factor de seguridad de carga, LSF	1.1	
Período de diseño	20	años
Pasa juntas	SI	
Apoyo lateral	SI	
Espesor de la sub-base	0	in
K de la Sub-base	0	PSI
Tasa de crecimiento anual del tránsito	4	%

La relación de esfuerzos equivalentes se obtuvo mediante una interpolación utilizando la siguiente figura.

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.09	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.25	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.28	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Figura 8.2. 22. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.
Tabla 8.2. 20. Valores de factor de erosión.

Análisis por erosión	
Factor de erosión	
Eje Sencillo	1.84487
Eje Tandem	2.00461
Eje Tridem	2.11119

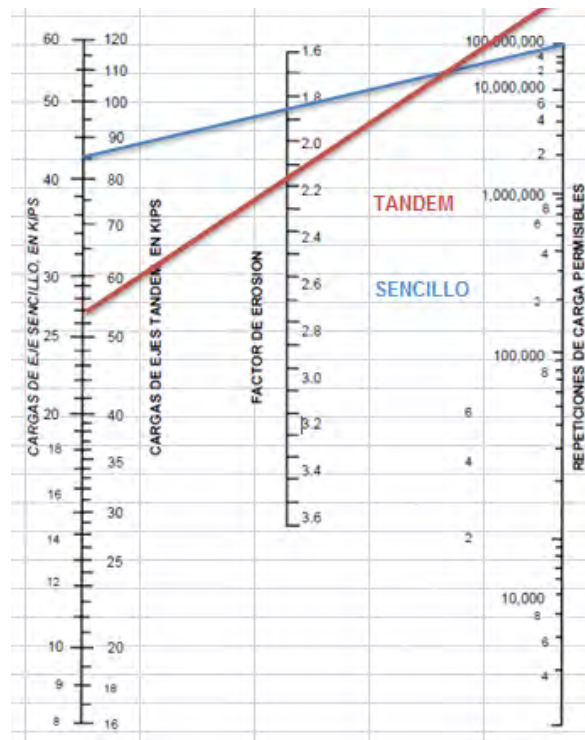


Figura 8.2. 23. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.

Tabla 8.2. 21. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Peso por LSF	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
				Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
A	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
B2	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	22.00	24.20	200000	57.06	Ilimitada	0.00
	Sencillo	7.70	8.47	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	15.40	16.94	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
C3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	100000000	0.11
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	9.90	10.89	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
T3S3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	100000000	0.02
	Tandem	49.50	54.45	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tridem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
	Tridem	11.00	12.10	Ilimitada	0.00		
TOTAL					57.06 %	TOTAL	0.14 %

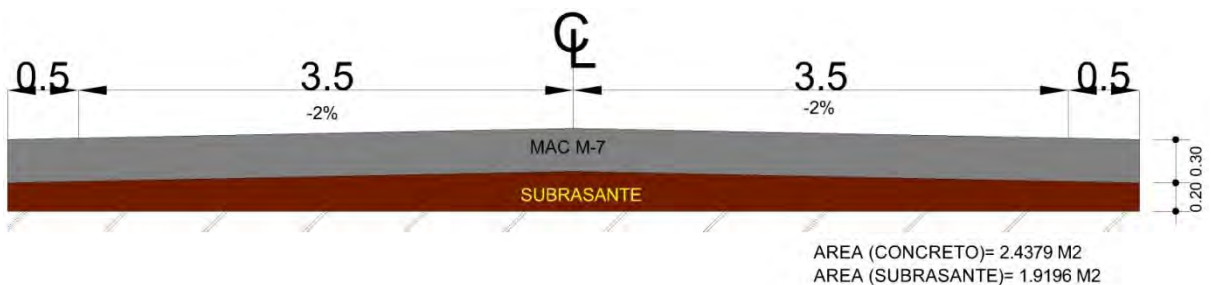


Figura 8.2. 24. Sección calculada para un MAC M-7

8.2.3.5. DISEÑO CON EL MICRO-CONCRETO M-8

Para conocer el MR (módulo de ruptura) del micro-concreto, se supuso el 15% del f'c, quedando así un módulo de ruptura de **MR=16.59 kg/cm2 (236.02 PSI)**.

Tabla 8.2. 22. Datos del proyecto, tomando un **MR=18.54 kg/cm2 (263.7 PSI)**

DATOS		
Vialidad urbana de 2 sentidos	1 carril por sentido	
Módulo de ruptura (MR) del concreto	236.02	PSI
Módulo de reacción K de la subrasante	334.2	PCI
Espesor inicial de la losa	13	in
Factor de seguridad de carga, LSF	1.1	
Período de diseño	20	años
Pasa juntas	SI	
Apoyo lateral	SI	
Espesor de la sub-base	0	in
K de la Sub-base	0	PSI
Tasa de crecimiento anual del tránsito	4	%

La relación de esfuerzos equivalentes se obtuvo mediante una interpolación utilizando la siguiente figura.

Esfuerzo equivalente - Con Apoyo Lateral.
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																							
	50			100			150			200			300			500			700					
	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri	Sen	Tan	Tri			
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359			
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291			
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	287	242			
5.5	418	360	279	366	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206			
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178			
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156			
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138			
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124			
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112			
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	126	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102			
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94			
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87			
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81			
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76			
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71			
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	88	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67			
12.0	145	146	97	128	122	86	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	68	95	81	63			
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60			
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	76	60	85	73	57			
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54			
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51			

Figura 8.2. 25. Valores de esfuerzo equivalente con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 23. Relación de esfuerzos para el análisis por fatiga

Análisis por fatiga			
Esfuerzo equivalente		Relación de esfuerzos	
Eje Sencillo	94.803	0.4017	
Eje Tándem	84.632	0.3586	
Eje Tridem	64.145	0.2718	

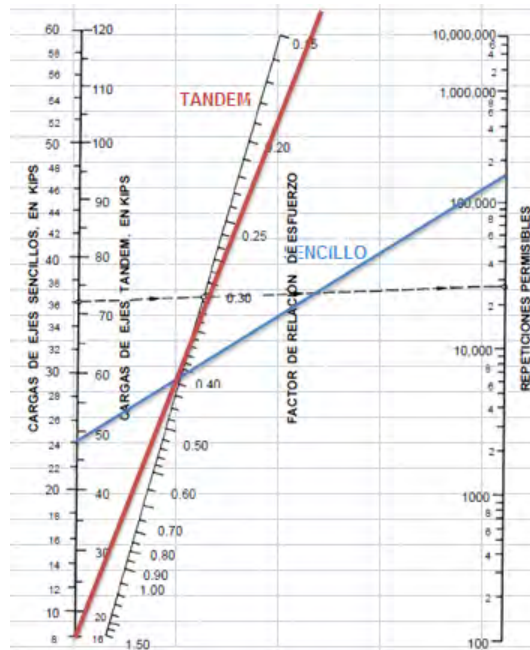


Figura 8.2. 26. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por fatiga.

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Con Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.96	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.78	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.66	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.16	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.96	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Figura 8.2. 27. Valores de factores de erosión con pasajuntas y con apoyo lateral.

Tabla 8.2. 24. Valores de factor de erosión.

Análisis por erosión	
Factor de erosión	
Eje Sencillo	1.75316
Eje Tándem	1.93461
Eje Tridem	2.05948

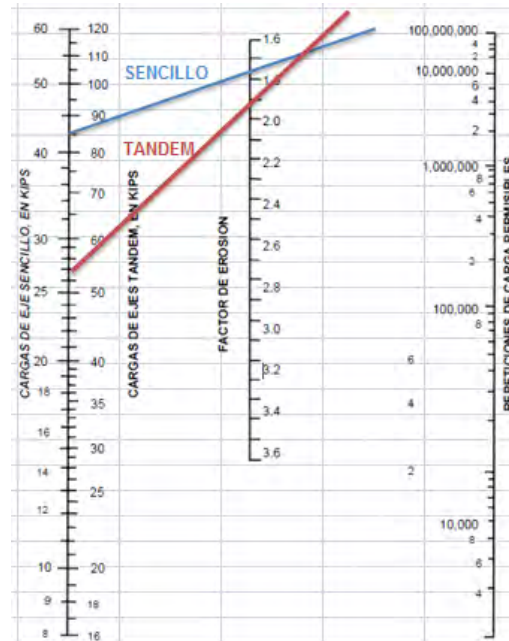


Figura 8.2. 28. Nomograma para obtener repeticiones permisibles por erosión.

Tabla 8.2. 25. Porcentajes finales por análisis por fatiga y erosión

Tipo de vehículo	Tipo de eje	Peso en kips	Peso por LSF	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
				Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
A	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	2.20	2.42	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
B2	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	22.00	24.20	150000	76.08	Ilimitada	0.00
	Sencillo	7.70	8.47	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	15.40	16.94	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
C3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
	Tandem	9.90	10.89	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
T3S3	Sencillo	12.10	13.31	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00

Sencillo	39.60	43.56	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
Tandem	49.50	54.45	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
Tandem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00	Ilimitada	0.00
Tridem	8.80	9.68	Ilimitada	0.00		
Tridem	11.00	12.10	Ilimitada	0.00		
TOTAL				76.08 %	TOTAL	0.00 %

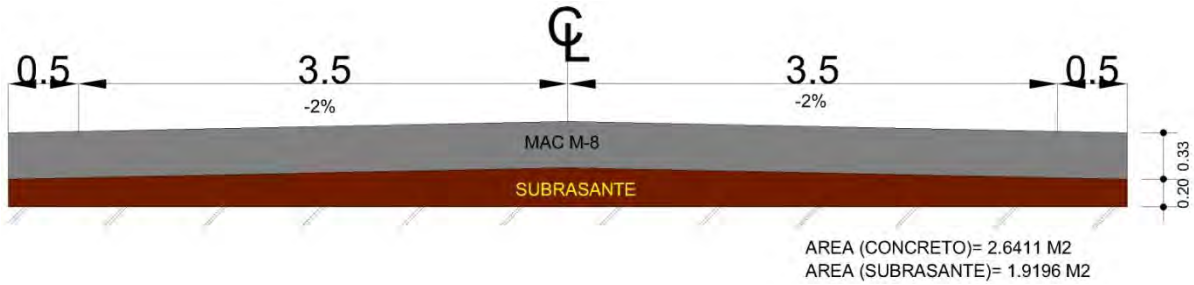


Figura 8.2. 29. Sección calculada para un MAC M-8