



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN
MIXTOS MODIFICADOS FÍSICAMENTE PARA SU
USO COMO MATERIALES DE SUSTITUCIÓN
PARCIAL DE CEMENTO PORTLAND EN NUEVOS
CEMENTOS SUSTENTABLES PARA LA
CONSTRUCCIÓN**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

María Isabel Urrutia Segura

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Tatiana Lilia Ávalos Rendón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, María de Lourdes Segura Aguirre y Alejandro Urrutia Buenrostro, por su apoyo incondicional y confianza, por impulsarme a alcanzar mis metas y a ser mejor cada día. Gracias por ayudarme a convertirme en la persona que soy.

A mi familia, por los momentos compartidos y por estar a mi lado en mis triunfos y tropiezos. A mis amigos por acompañarme en este camino, por escucharme y aconsejarme en todo momento y por compartir mis sueños.

Al Capítulo Estudiantil ASCE FI UNAM por enseñarme el valor del trabajo en equipo y ser parte fundamental de mi formación personal y profesional.

A mi directora de tesis, Dra. Tatiana Ávalos Rendon, por su dedicación y compromiso con el proyecto y sus estudiantes.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, por brindarme una educación de excelencia y múltiples oportunidades de crecimiento.

AGRADECIMIENTOS TÉCNICOS

Este proyecto de tesis de licenciatura fue realizado en el laboratorio de Estructuras y Materiales en el edificio 3 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la dirección de la Dra. Tatiana Lilia Ávalos Rendón. Se contó con el apoyo financiero del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica IA101917-PAPIIT. Agradezco tanto el apoyo como las facilidades otorgadas.

Además, agradezco las recomendaciones que enriquecieron este trabajo de tesis, las cuales fueron realizadas por el M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, M.I. Fernando Monroy Miranda, Ing. Marcos Trejo Hernández y M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose. Así como el apoyo técnico recibido de la M. C. Adriana Tejeda Cruz, M.C. Víctor Hugo Lara Corona, M.I. Francisco Hernández Díaz, Ing. Víctor Hugo Torres Romero e Ing. Yusef Zavalza Cabello.

Finalmente, agradezco a la empresa Concretos Reciclado S.A. de C.V. por la donación de los residuos de construcción y demolición para el desarrollo de la investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
NOMENCLATURA.....	XI
ÍNDICE DE NORMAS	XII
RESUMEN.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
1 ANTECEDENTES	3
1.1 INDUSTRIA DEL CEMENTO Y EL CONCRETO	3
1.1.1 Cemento	3
1.1.1.1 Componentes del cemento.....	3
1.1.1.2 Proceso de fabricación del cemento	4
1.1.1.3 Hidratación del cemento.....	5
1.1.1.4 Correlación entre la microestructura y las propiedades macroestructurales de los materiales cementicios	6
1.1.1.5 Clasificación de los cementos	8
1.1.1.6 Estadísticas de la producción de cemento	10
1.1.2 Concreto	13
1.1.2.1 Componentes del concreto.....	13
1.1.2.2 Clasificación del concreto en México	14
1.1.2.3 Ciclo de vida de una estructura de concreto	17
1.2 MATERIALES PUZOLÁNICOS	19
1.2.1 Clasificación de los materiales puzolánicos	20
1.2.2 Principales materiales puzolánicos	21
1.2.3 Actividad puzolánica.....	22
1.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL	23
1.3.1 Industria del cemento	23
1.3.2 Industria de la construcción.....	25
1.3.3 Propuestas de solución	26
1.4 SUSTENTABILIDAD	27
1.5 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).....	28
1.5.1 Normatividad	29
1.5.2 Reciclado de residuos de construcción y demolición.....	34
1.5.3 Uso de los RCD como agregados	37
1.5.3.1 Agregado grueso.....	37

1.5.3.2	<i>Agregado fino</i>	38
1.5.4	Uso de RCD en México	39
1.6	HIPÓTESIS	40
1.7	OBJETIVOS	40
2	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	41
2.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	41
2.1.1	Cemento	41
2.1.2	Residuos de construcción y demolición (RCD)	41
2.1.2.1	<i>Análisis granulométrico</i>	41
2.1.2.2	<i>Tratamiento físico</i>	42
2.1.2.3	<i>Propiedades químicas y actividad puzolánica</i>	43
2.2	NUEVOS CEMENTOS SUSTENTABLES	44
2.2.1	Mezclas	44
2.2.2	Especímenes	46
2.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	48
2.3.1	Difracción de rayos X (DRX)	48
2.3.2	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	48
2.3.3	Análisis termogravimétrico (ATG)	48
2.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	49
2.5	POROSIDAD	49
2.6	DURABILIDAD	50
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
3.1	PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS	51
3.1.1	Cemento	51
3.1.1.1	<i>Propiedades químicas</i>	51
3.1.1.2	<i>Propiedades físicas</i>	52
3.1.1.3	<i>Caracterización</i>	52
3.1.2	Residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M)	54
3.1.2.1	<i>Propiedades químicas</i>	54
3.1.2.2	<i>Propiedades físicas</i>	55
3.1.2.3	<i>Granulometría</i>	56
3.1.2.4	<i>Caracterización</i>	57
3.2	NUEVOS CEMENTOS SUSTENTABLES	60
3.2.1	Resistencia a la compresión	60
3.2.2	Porosidad	65
3.2.3	Durabilidad	68
3.2.4	Técnicas de caracterización	77

3.2.4.1	<i>Difracción de rayos X</i>	77
3.2.4.2	<i>Microscopía electrónica de barrido (MEB)</i>	85
3.2.4.3	<i>Análisis termogravimétrico</i>	92
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
	REFERENCIAS	99

APÉNDICE

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

POROSIDAD POR EL MÉTODO DE INMERSIÓN DE ARQUÍMEDES

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (ATG)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso de fabricación del cemento Portland.	5
Figura 1.2 Participación por regiones en la producción de cemento, 2015	12
Figura 1.3 Ciclo de vida de edificaciones e infraestructura	18
Figura 1.4 Diagrama de flujo de energía y emisiones en la fabricación del cemento	25
Figura 1.5 Clasificación de desechos reutilizables	27
Figura 1.6 Esquema normativo del plan de manejo de residuos de construcción y demolición (PM-RCD).	29
Figura 1.7 Proceso de tratamiento de los residuos de construcción y demolición en la planta de “Concretos reciclados”	36
Figura 2.1 Proceso para la obtención de la curva granulométrica de los RCD-M. 1) Cuarteo; 2) Secado al horno durante 24 h a 110°C ± 10°C; 3) Obtención del peso de los tamices; 4) Cribado mecánico; 5) Peso del material retenido en cada tamiz; 6) Cálculo de la curva.	42
Figura 2.2 Proceso de modificación del tamaño de partícula de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M) mediante medios mecánicos.	43
Figura 2.3 Proceso de elaboración de pastas de acuerdo con la norma mexicana NMX-C- 085-ONNCCE.	45
Figura 2.4 Tipos de especímenes elaborados con CPC 30R RS/BRA y RCD-M como sustituyente.	47
Figura 2.5 Prueba de resistencia a la compresión.	49
Figura 3.1 Patrón de DRX del cemento Portland CPC 30R RS/BRA.	53
Figura 3.2 Micrográficas electrónicas de barrido del CPC 30R RS/BRA a) 2500X b) 5000X.	53
Figura 3.3 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del CPC 30R RS/BRA.	54
Figura 3.4 Curva granulométrica de los residuos de construcción mixtos RCD-M.	57
Figura 3.5 Patrón de DRX del residuo de construcción y demolición mixto de 75 µm.	58
Figura 3.6 Micrográficas del microscopio electrónico de barrido del RCD-M200 a) 5,000X b) 10,000X.	58
Figura 3.7 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M200.	59
Figura 3.8 Resistencia a la compresión simple de pastas elaboradas con el material RCD- M100.	61

Figura 3.9 Resistencia a la compresión simple del material RCD-M200.	62
Figura 3.10 Resistencia a la compresión simple del material RCD-M325.	63
Figura 3.11 Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión simple de las pastas con 20% de RCD-M con una variación del tamaño de partícula de 150 (M100), 75 (M200) y 45 μm (M325).	65
Figura 3.12 Porosidad de materiales tipo RCD-M100.	66
Figura 3.13 Porosidad de materiales tipo RCD-M200.	66
Figura 3.14 Porosidad de materiales tipo RCD-M325.	67
Figura 3.15 Testigo CPC 30 RS/BRA en solución de sulfato de sodio a diferentes edades (edad en días).	69
Figura 3.16 Pasta RCD-M200-20 en solución de sulfato de sodio.	70
Figura 3.17 Pasta RCD-M200-80 en solución de sulfato de sodio.	71
Figura 3.18 Cambio de peso de los especímenes elaborados con RCD-M100 en solución de sulfato de sodio.....	72
Figura 3.19 Cambio de peso de los especímenes elaborados con RCD-M200 en solución de sulfato de sodio.....	72
Figura 3.20 Resistencia a la compresión de los especímenes en solución de sulfato de sodio.....	74
Figura 3.21 Resistencia a la compresión de las pastas RCD-M100 antes (\square) y después (\blacksquare) de la inmersión en la solución de sulfato de sodio.....	75
Figura 3.22 Resistencia a la compresión de las pastas RCD-M200 antes y después de la inmersión en la solución de sulfato de sodio.....	76
Figura 3.23 Difractogramas de los cementos con RCD-M100, a 7 días de edad.	78
Figura 3.24 Difractogramas de los materiales RCD-M200, a 7 días de edad.	79
Figura 3.25 Difractogramas de los materiales con RCD-M325, a 7 días de edad.	80
Figura 3.26 Contenido de hidróxido de calcio a los 7 días de edad.....	81
Figura 3.27 Difractogramas de los materiales RCD-M100, a 28 días de edad.	82
Figura 3.28 Difractogramas de los materiales RCD-M200, a 28 días de edad.	83
Figura 3.29 Difractogramas de los materiales RCD-M325, a 28 días de edad.	84
Figura 3.30 Contenido de hidróxido de calcio en pastas a 28 días de edad.....	85
Figura 3.31 Imágenes del microscopio electrónico de barrido de los cementos a) CPC 30R RS/BRA, b) RCD-M100-20, c) RCD-M200-20 y d) RCD-M325-20 a 28 días de edad a 10,000X. 1. CSH, 2.CH, 3. Etringita	87

Figura 3.32 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del CPC 30R RS/BRA.	88
Figura 3.33 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M100-20-28.....	89
Figura 3.34 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M200-20-28.....	90
Figura 3.35 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M325-20-28.....	91
Figura 3.36 Curva ATG correspondiente a los cementos testigo y con 20% de residuo con diferentes tamaños de partícula, a los 7 días de edad.	92
Figura 3.37 Curva ATG correspondiente a los cementos testigo y con 20% de residuo con diferentes tamaños de partícula, a los 28 días de edad.	93
Figura 3.38 Derivadas del peso respecto a la temperatura de los cementos con 20% de RCD-M a 7 días.	94
Figura 3.39 Derivadas del peso respecto a la temperatura para las pastas con 20% de residuo a 28 días.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación entre la microestructura y las propiedades de los materiales a base de cemento Portland	7
Tabla 1.2 Clasificación de los cementos de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014	9
Tabla 1.3 Indicadores de la industria del cemento en México. Periodo 2005-2015	10
Tabla 1.4 Producción de cemento en millones de toneladas en América Latina	11
Tabla 1.5 Clasificación del concreto según su resistencia	15
Tabla 1.6 Clasificación del concreto según su peso volumétrico	16
Tabla 1.7 Clasificación del concreto según su consistencia	17
Tabla 1.8 Requerimientos químicos de los materiales puzolánicos.....	20
Tabla 1.9 Requerimientos físicos de los materiales puzolánicos.....	21
Tabla 1.10 Porcentajes de reemplazo de cemento de las puzolanas más comunes	22
Tabla 1.11 Composición de los residuos de construcción y demolición	28
Tabla 1.12 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso. NADF-007-RNAT-2013.	30
Tabla 2.1 Tipo de adiciones utilizadas en el proyecto.	43
Tabla 2.2 Proporcionamiento de las pastas elaboradas.....	44
Tabla 3.1 Propiedades químicas del cemento CPC 30R RS/BRA.....	51
Tabla 3.2 Propiedades físicas del cemento CPC 30R RS/BRA.....	52
Tabla 3.3 Propiedades químicas del residuo RCD-M200.....	55
Tabla 3.4 Propiedades físicas del residuo RCD-M200.....	55
Tabla 3.5 Composición granulométrica del residuo mixto.	56
Tabla 3.6 Rango de temperatura y fases presente en un análisis térmico diferencial de cemento	94

NOMENCLATURA

COMPUESTO	FÓRMULA QUÍMICA	FÓRMULA CONVENCIONAL	ABREVIATURA
Dióxido de carbono	CO ₂	-	-
Óxido de calcio	CaO	-	-
Silicato bicálcico	Ca ₂ SiO ₄	2CaO · SiO ₂	C ₂ S
Silicato tricálcico	Ca ₃ SiO ₅	3CaO · SiO ₂	C ₃ S
Aluminato tricálcico	Ca ₃ Al ₂ O ₆	3CaO · Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Sulfato de calcio	CaSO ₄ · 2H ₂ O	-	CS
Hidróxido de calcio	Ca (OH) ₂	-	CH
Silicato de calcio hidratado	-	CaO · SiO ₂ · H ₂ O	CSH
Óxido de silicio	SiO ₂	SiO ₂	S
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	A
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	F
Agua	H ₂ O	H ₂ O	-

ÍNDICE DE NORMAS

NADF-NRAT-2013	Normal Ambiental para el Distrito Federal NADF-NRAT-2013, Clasificación y Especificaciones de Manejo para Residuos de la Construcción y Demolición, en el Distrito Federal
NOM-161-SEMARNAT-2011	Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, Criterios para clasificar los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo especial
NMX-B-231-1990	Norma Mexicana NMX-B-231-1990, Cribas para la clasificación de materiales granulares
NMX-X-061-ONNCCE-2015	Norma Mexicana NMX-X-061-ONNCCE-2015, Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos
NMX-C-077-ONNCCE-1997	Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE-1997, Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Prueba
NMX-C-085-ONNCCE-2015	Norma Mexicana NMX-C-085-ONNCCE-2015, Industria de la construcción–Método de mezclado mecánico de pastas y morteros de cementantes hidráulicos
NMX-C-111-ONNCCE-2014	Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo
NMX-C-131-ONNCCE-2016	Norma Mexicana NMX-C-131-ONNCCE-2016, Industria de la Construcción – Cementantes hidráulicos -Determinación del análisis químico
NMX-C-132-ONNCCE-2015	Norma Mexicana NMX-C-132-ONNCCE-2015, Industria de la Construcción – Cementantes hidráulicos -Determinación del fraguado falso del cemento hidráulico (Método de pasta)
NMX-C-170-ONNCCE-1997	Norma Mexicana NMX-C-170-ONNCCE-1997, Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas
NMX-C-179-ONNCCE-2013	Norma Mexicana NMX-C-179-ONNCCE-2013, Ceniza volante o puzolana natural para usarse como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland - Muestreo y pruebas

NMX-C-414-ONNCE-2017	Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción – Cementantes hidráulicos – Especificaciones y métodos de ensayo
ASTM C150/C150M-18	American Society for Testing and Materials C 150/C150M-18, Standard Specification for Portland Cement
ASTM C311/C311M-17	American Society for Testing and Materials C 311/C311M-17, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete
ASTM C595/C595M-18	American Society for Testing and Materials C595/C595M-18, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
ASTM C618-17a	American Society for Testing and Materials C618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
ASTM C1157/C1157M-17	American Society for Testing and Materials C1157/C1157M-17, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se obtuvieron y estudiaron nuevos cementos sustentables a base de cemento Portland con residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M). Se utilizó un cemento Portland Compuesto (CPC 30 R RS/BRA) como cemento de referencia y residuos de construcción y demolición mixtos con tres diferentes tamaños de partícula (150, 75 y 45 μm) correspondientes a las mallas número 100, 200 y 325, respectivamente. Los cementos sustentables, fueron elaborados a base de cemento Portland, con diferentes porcentajes de RCD-M utilizados como materiales de remplazo del CPC en diferentes proporciones (20, 40, 60 y 80%).

El capítulo 1, presenta un panorama general de la industria del cemento, el proceso de obtención de este material, su composición, así como el proceso de hidratación. Posteriormente, se plantea la problemática ambiental que representan las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) generadas durante la fabricación de cemento Portland. Además, se analiza a la industria de la construcción como un gran consumidor de materias primas y un generador de residuos. Para cerrar este capítulo, se aborda el tema de los materiales puzolánicos como una opción para reducir el consumo de cemento Portland y el impacto ambiental que representa su uso.

En el capítulo 2, se especifican los materiales utilizados para la elaboración de los cementos sustentables, así como los proporcionamientos de las pastas. Así mismo, se describen los procedimientos para la elaboración de los especímenes y de las pruebas mecánicas y de durabilidad a las que fueron sometidos. Finalmente, se mencionan las condiciones a las que se realizaron las técnicas de caracterización (difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y análisis termogravimétrico) en los cementos obtenidos.

El capítulo 3, se divide en dos grandes apartados. En la primera parte, se presentan los resultados y el análisis de la caracterización de las materias primas empleadas en la elaboración de los cementos sustentables. En la segunda parte, se presentan los resultados y el análisis de las pruebas mecánicas, de porosidad y durabilidad de los cementos sustentables obtenidos. Así como, de las técnicas de caracterización que se realizaron en los materiales cementicios sustentables.

Finalmente, en el capítulo 4, se presentan las conclusiones derivadas de la investigación y algunas recomendaciones para dar continuidad al trabajo realizado.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha sido reconocida como uno de los sectores más importantes como indicador del desarrollo económico de un país, ya que juega un papel trascendental en la mejora de la calidad de vida de la población y es parte del proceso de modernización, proporcionando instalaciones físicas e infraestructura. Además, por la gran cantidad de mano de obra requerida, es una de las principales fuentes de empleos [1,2]. En contraste, el sector de la construcción también se caracteriza por su alto consumo de recursos no renovables como los agregados pétreos, la generación de desechos y la contaminación del agua y el aire, por lo que tiene un impacto significativo y adverso en el medio ambiente [3].

El material de construcción más utilizado a nivel mundial es el concreto, su fabricación requiere grandes cantidades de recursos naturales. Se requieren más de 20,000 millones de toneladas de materias primas cada año, demanda que se duplicará en los próximos 20-30 años. Adicionalmente, en la producción de cemento Portland, la principal materia prima del concreto, se generan del 5–7% de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO_2) [4].

El CO_2 , es uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Es decir, al aumento en la temperatura promedio de la atmósfera y los océanos de la Tierra. Los gases de efecto invernadero pueden ser liberados por fenómenos naturales, como erupciones volcánicas o por actividades antropogénicas (humanas) como la deforestación, la agricultura, la ganadería y la quema de combustibles fósiles para vehículos, fabricar productos y generar energía [5].

Actualmente, la industria de la construcción enfrenta el reto de desarrollarse de manera sustentable, minimizando el impacto ambiental mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y los niveles de contaminantes. Así mismo, este sector debe implementar estrategias de reutilización y renovación en todas las etapas de la construcción para la conservación de los recursos naturales [6].

Las actividades relacionadas con la construcción pueden, desde una perspectiva ambiental y económica, tener un impacto positivo si se desarrollan considerando la reutilización y reciclado, no solo de los residuos producidos durante las mismas, sino también de los subproductos generados durante otras actividades. Todos estos residuos y subproductos pueden ser usados en la generación de nuevos materiales de construcción alternativos o

suplementarios para reemplazar total o parcialmente el cemento Portland y mitigar la problemática ambiental [7].

Una tendencia importante y predecible sobre el futuro del concreto, es la creciente utilización de desechos industriales, subproductos de otras actividades y materiales reciclados como materias primas para la elaboración de mezclas de concreto. Una alternativa ampliamente estudiada para reducir el impacto de la industria de la construcción en el ambiente es el uso de materiales con propiedades puzolánicas; los cuales también pueden aportar beneficios adicionales a las propiedades del concreto y/o reducir costos [8]. Ejemplos de estos materiales son la ceniza volante y el humo de sílice, el primero es un subproducto de la combustión de carbón en centrales termoeléctricas, que mejora la trabajabilidad y la cohesión del concreto. En cambio, el humo de sílice es un producto de desecho de la fabricación de aleaciones de ferrosilicio cuyo uso en el concreto reduce la porosidad, aumenta la resistencia y disminuye la permeabilidad [9]. Sin embargo, también se han utilizado otro tipo de materiales como cenizas de arroz, residuos de madera e incluso residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales continúan bajo investigación para conocer las ventajas y desventajas de su uso en el concreto.

1 ANTECEDENTES

1.1 INDUSTRIA DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

1.1.1 Cemento

El cemento Portland es un aglutinante hidráulico que al entrar en contacto con el agua se endurece, proceso denominado hidratación. El cemento Portland, es el principal componente del concreto y permite que una mezcla no cohesiva se convierta en una masa sólida. El cemento, se obtiene quemando una mezcla de piedra caliza y arcilla con pequeñas cantidades de mineral de hierro, produciendo así un compuesto conocido como clínker. Este compuesto, se muele y se mezcla con sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) originando lo que conocemos como cemento Portland [10].

1.1.1.1 Componentes del cemento

El cemento Portland, es una mezcla de varios compuestos, los cuales se forman por combinación química de las materias primas durante el proceso de calcinación en los hornos rotatorios.

Los principales componentes del cemento Portland son [11,12]:

- **Silicato tricálcico (C_3S)** denominado alita. Esta fase constituye alrededor del 20 al 80% del peso del cemento, es el componente responsable del inicio del proceso de fraguado y de las resistencias a edades tempranas, hasta 28 días, ya que es la sustancia que se hidrata y endurece más rápidamente.
- **Silicato bicálcico (C_2S)** conocido como belita. Este componente se encuentra en cantidades entre 10 y 55%, se hidrata y endurece lentamente, por lo que es la fase responsable de las resistencias a edades avanzadas (más allá de 7 días).
- **Aluminato tricálcico (C_3A)** ó celita. Esta fase se encuentra presente del 1 al 15% del peso del cemento, es el componente que reacciona más temprano con el agua, liberando una gran cantidad de calor en las primeras etapas. Además, es responsable de la trabajabilidad del mortero, de la formación de grietas y es el componente más vulnerable al ataque de los iones de sulfatos. Es necesario para bajar la temperatura de fundición del clínker.
- **Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)** ó felita. Este compuesto se hidrata rápidamente, pero ayuda poco a la resistencia. Su presencia en el cemento varía entre el 5 y el 15%. El color gris del cemento se debe a la presencia de hierro en este compuesto.

- **El sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)** ó yeso se añade en cantidades de hasta un 5% después de que se ha obtenido el clínker para controlar el proceso de fraguado.

1.1.1.2 *Proceso de fabricación del cemento*

En la figura 1.1, se observa el proceso de fabricación del cemento Portland. A continuación, se describe cada una de las etapas que se llevan a cabo durante dicho proceso [13,14]:

1. **Extracción de materias primas:** Las plantas de cemento, suelen ubicarse cerca de bancos de materiales naturales como la piedra caliza, la marga o la tiza, que se extraen de las canteras y proporcionan carbonato de calcio (CaCO_3). Pueden ser necesarias cantidades muy pequeñas de materiales, como mineral de hierro, bauxita, pizarra, arcilla o arena para proporcionar los ingredientes minerales adicionales: óxido de hierro (Fe_2O_3), alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2) necesarios para producir el clínker con la composición requerida.
2. **Trituración:** La materia prima, se extrae y se transporta hasta las trituradoras primarias y secundarias, donde se disminuye el tamaño de los materiales hasta 10 cm, aproximadamente.
3. **Molienda:** En este proceso, las materias primas se mezclan y se muelen juntas para producir la “harina cruda”. Para asegurar una alta calidad del cemento, la composición química de las materias primas y de la harina cruda se monitorean y controlan cuidadosamente.
4. **Producción de clínker en el horno rotatorio:** La mezcla ingresa al horno a temperaturas de alrededor de 1000 °C. El combustible (generalmente combustibles fósiles como carbón y petróleo), se quema directamente en el horno rotatorio a una temperatura de hasta 2000 °C, para garantizar que las materias primas alcancen temperaturas del material de hasta 1,450 °C. El horno, es un tubo de metal de entre 3-5 metros de diámetro y 30-60 metros de largo según los requerimientos, el cual se encuentra revestido de ladrillos refractarios. El horno tiene la capacidad de girar alrededor de 3-5 veces por minuto. La materia prima, fluye hacia abajo a través de las zonas progresivamente más calientes. Las altas temperaturas propician reacciones químicas y físicas que convierten la mezcla en clínker.
5. **Enfriamiento:** Desde el horno, el clínker caliente se enfría usando grandes cantidades de aire. Los enfriadores son esenciales para la formación de las fases

minerales del clinker que definen el rendimiento del cemento y las propiedades requeridas.

6. **Molienda del cemento:** Se adiciona yeso (4-5 %) al clinker obtenido, para controlar el tiempo de fraguado del cemento final. La mezcla enfriada de clinker y el yeso, se muelen y homogenizan hasta obtener un polvo gris llamado cemento Portland (CPO), adicionalmente se pueden agregar otros componentes minerales para producir cementos con características especiales.
7. **Almacenamiento en silos de cemento:** El producto final se homogeniza y se almacena en silos de cemento. Posteriormente, se envía a una estación de empaque (para cemento en sacos), a un silo para su transporte o para la elaboración de concreto, según sea el caso.

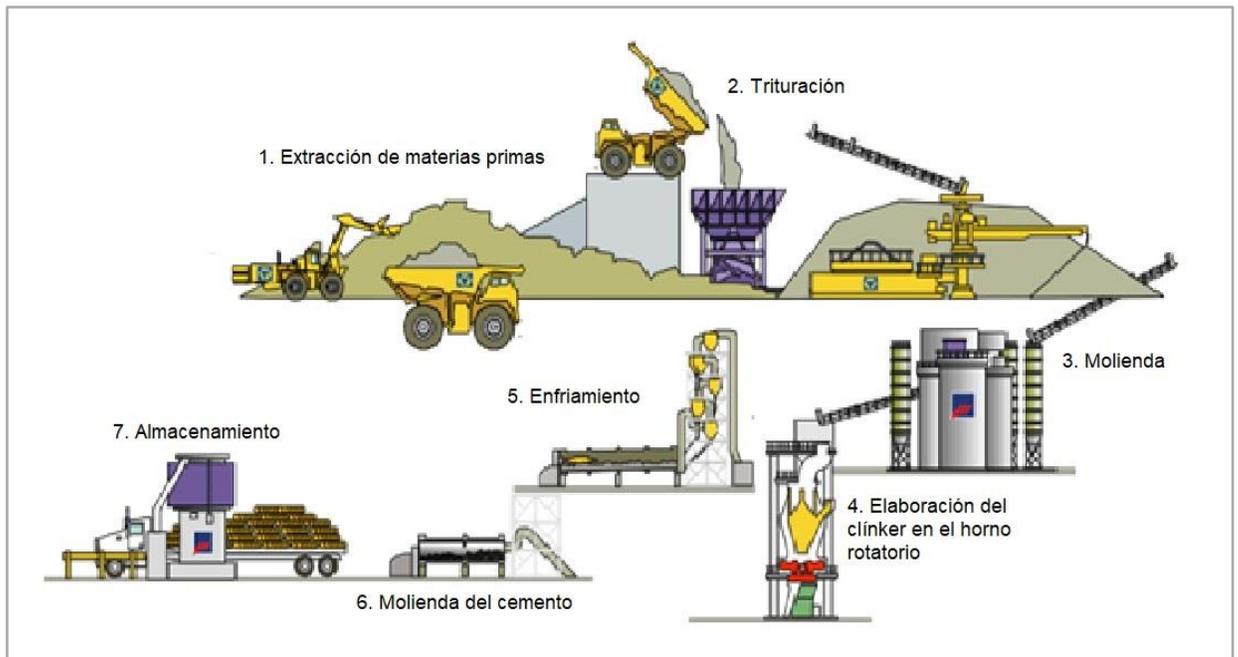


Figura 1.1 Proceso de fabricación del cemento Portland.

1.1.1.3 Hidratación del cemento

El cemento Portland es un material hidráulico que, cuando entra en contacto con el agua, se presenta una serie de reacciones denominadas hidratación. Estas reacciones químicas ocurren a ritmos diferentes y se influyen mutuamente, lo que conlleva a cambios químicos, físicos y mecánicos. Los compuestos hidratados se unen entre sí, otorgando propiedades adhesivas y cohesivas al cemento. A escala macroscópica, el proceso de hidratación conduce a la conversión del sistema agua/cemento en una matriz sólida, la cual microscópicamente es irregular y porosa [15].

Los compuestos fundamentales formados en la hidratación del cemento son los silicatos de calcio hidratados (CSH), que se forman de la hidratación de la alita (C_3S) y la belita (C_2S). Los CSH, constituyen el 50-60% de las fases presentes en las pastas de cemento Portland endurecido. Los silicatos de calcio hidratados, son los principales responsables de las propiedades de unión y la alta resistencia mecánica desarrollada por estos materiales. También, durante la hidratación se forma hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$, CH) conocido como portlandita, el segundo compuesto más abundante en pastas de cemento Portland hidratado; este compuesto no aporta un beneficio a la acción mecánica de la matriz cementante. Sin embargo, mantiene un ambiente alcalino (pH alto) necesario para proteger de la corrosión al acero de refuerzo en el concreto armado, también presenta algunos efectos negativos en la durabilidad del concreto, debido a que reacciona con los sulfatos dando lugar a procesos de expansión y ruptura [16,17].

Los cambios microestructurales y mineralógicos que ocurren durante el proceso de hidratación del cemento, se pueden resumir de la siguiente manera. En primer lugar, los compuestos se disuelven parcialmente y la solución se vuelve alcalina porque se satura rápidamente con hidróxido de calcio. Se forman cristales aciculares de etringita y cristales prismáticos o tabulares de portlandita. Es decir, aparece el hidróxido de calcio, el cual representa del 20 al 25% del volumen de la pasta de cemento. Posteriormente, se desarrolla una fina capa de gel sobre las partículas del cemento, el gel consiste principalmente en aluminatos de calcio hidratados e hidróxido de calcio precipitado en el agua. La velocidad de reacción se controla mediante la adición de yeso, que actúa como retardante. Aproximadamente, 5 horas después, debido a la hidratación de los silicatos de calcio, la red de microfibras crece y se interconecta para comenzar a obtener resistencia inicial. Más tarde, estructuras amorfas de CSH comienzan a llenar el espacio vacío, anteriormente ocupado por agua. Los CSH, no son cristalinos ni compuestos bien definidos, su composición puede variar considerablemente con la temperatura, la edad de hidratación y la relación agua/cemento utilizada. Los silicatos de calcio hidratados constituyen del 50 al 60% del volumen de la pasta de cemento y su morfología varía desde fibras diminutas hasta una red [18].

1.1.1.4 Correlación entre la microestructura y las propiedades macroestructurales de los materiales cementicios [19]

La microestructura de los materiales a base de cemento Portland, está esencialmente determinada por las fases formadas durante la reacción de hidratación de los constituyentes

del clinker. El mecanismo de hidratación del cemento depende de diferentes factores, tales como: el tipo de cemento utilizado, en términos de su composición química, mineralógica y finura, la relación agua/cemento empleada, el procedimiento de mezclado, las condiciones ambientales y la naturaleza, número y tamaño de los agregados, así como de los aditivos utilizados.

Las propiedades de escala macroscópicas, como la resistencia a la compresión, la estabilidad dimensional y la durabilidad, están determinadas por la microestructura. En la tabla 1.1, se presentan los principales compuestos en la matriz cementicia, la porosidad y la influencia de la relación agua/cemento en la resistencia, la estabilidad dimensional y las propiedades de durabilidad.

Tabla 1.1 Relación entre la microestructura y las propiedades de los materiales a base de cemento Portland [19].

Constituyente	Resistencia a la compresión	Estabilidad dimensional	Durabilidad
CSH (Silicato de calcio hidratado)	Este constituyente es el principal responsable de la resistencia mecánica, debido a las interacciones de Van der Waals que aseguran la cohesión y la adhesión entre las fases sólidas	En la pasta endurecida de cemento, induce contracción, estableciendo interacciones adicionales de Van der Waals (después de la eliminación de agua de los microporos)	Su porosidad intrínseca final afecta la difusión de sustancias endógenas y exógenas, lo que influye en la aparición de reacciones perjudiciales
CH (Hidróxido de calcio)	Esta fase rellena los poros de la matriz, lo que contribuye a la reducción de la porosidad y en consecuencia a una mayor resistencia mecánica	Fase cristalina dimensionalmente estable, que restringe los cambios volumétricos asociados con CSH amorfos	Al llenar los poros disminuye la difusión de sustancias endógenas y exógenas
	La microestructura de la portlandita presenta planos hexagonales capaces de deslizarse por lo que pueden contribuir a la disminución de la resistencia mecánica		En presencia de agua se disuelve aumentando la porosidad con el paso del tiempo
Porosidad	Factor determinante de la resistencia	Particularmente, los poros pequeños	Afecta la difusión de sustancias tanto endógenas

Constituyente	Resistencia a la compresión	Estabilidad dimensional	Durabilidad
	mecánica: la resistencia disminuye al aumentar la porosidad	asociados con la fase de gel CSH juegan un papel crítico en la contracción (debido a la pérdida de agua de los poros)	como exógenas y, por lo tanto, influye en la aparición de reacciones perjudiciales
Agua/Cemento	Una alta relación agua/cemento se ve reflejada en el aumento de porosidad y una disminución de la resistencia mecánica.	La eliminación de agua del sistema de poros asociado con la fase de gel CSH induce contracción (debido a la formación de interacciones de Van der Waals).	La proporción de agua/cemento alta da como resultado una mayor porosidad y, por lo tanto, una mayor permeabilidad que ocasiona la migración de iones en la matriz cementicia, afectando la durabilidad

1.1.1.5 Clasificación de los cementos

Los cementos, pueden clasificarse de acuerdo con sus componentes en cementos puros (ordinarios) y en cementos mezclados. Los cementos puros, están compuestos principalmente por clínker + yeso, norma ASTM C-150. Los cementos mezclados, están compuestos por clínker + yeso + adiciones. Las adiciones están presentes en diferentes porcentajes acorde al desempeño y características especiales deseadas, Norma ASTM C-595, ASTM 1157, Norma UNE 171 y Norma NMX C-414.

El cemento en México, está sujeto a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014, que clasifica a los cementos tomando en cuenta tres elementos principales:

Tipo – Definido por la mezcla de sus componentes.

Clase – Definido por la resistencia a la compresión a una edad específicas (3 y/o 28 días).

Características especiales – Definido por su comportamiento en pruebas de resistencia a los sulfatos, reacción álcali agregado, calor de hidratación y blancura.

De conformidad con la norma, los cementos se deben identificar por el tipo y clase resistente. Si un cemento tiene especificada una resistencia a 3 días se añadirá la letra R (resistencia rápida). En el caso de que un cemento tenga alguna de las características especiales señaladas en la tabla 1.2, su designación se completa con la nomenclatura indicada en dicha tabla, de presentar dos características especiales, la designación se hace siguiendo el orden descendente de la tabla 1.2, separándose con una diagonal. Cada clase de cemento posee características específicas mencionadas a continuación [20,21]:

- **Cemento Portland ordinario (CPO).** Es el cemento producido a base de la molienda de clínker y sulfato de calcio. Es excelente para construcciones en general, y es ideal para la elaboración de productos prefabricados.
- **Cemento Portland Puzolánico (CPP).** Es el cemento que resulta de la integración de clínker, materiales puzolánicos y sulfato de calcio. Está especialmente diseñado para la construcción sobre suelos salinos y es el mejor para obras expuestas a ambientes químicamente agresivos. Además, proporciona alta durabilidad en prefabricados para alcantarillados.
- **Cemento Portland Compuesto (CPC).** Es el cemento resultante de la integración de clínker, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. Es compatible con todos los materiales de construcción convencionales como arenas, gravas, piedras, cantera, mármol, etc.; así como con los pigmentos y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomienden sus fabricantes. Presenta excelente durabilidad en prefabricados y a los concretos les proporciona una mayor resistencia química y menor desprendimiento de calor.
- **Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno (CEPG).** Es el cemento que resulta de la integración de clínker, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.
- **Cemento Portland con Humo de Sílice (CPS).** Es el cemento que resulta de la integración de clínker, humo de sílice y sulfato de calcio.
- **Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG).** Es producido mediante la molienda conjunta de clínker, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno.

Tabla 1.2 Clasificación de los cementos de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014 [20].

TIPO	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistencia a los sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado

TIPO	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

1.1.1.6 Estadísticas de la producción de cemento

En México y en el mundo, las grandes obras de infraestructura como puentes y edificios demandan enormes cantidades de cemento Portland cada año. La industria del cemento mexicana, produce tres principales productos, el cemento Portland que representa el 80% de la producción total, el cemento blanco con el 2% y el mortero, es decir, la mezcla de cemento con arena que representa alrededor del 8%. En la tabla 1.3, pueden apreciarse algunos indicadores de la producción de los principales productos de la industria cementera desde 2005 hasta 2015. Como se observa en la tabla 1.3, la producción total paso de 39.7 millones de toneladas a 44.9 en diez años. Sin embargo, el crecimiento no fue lineal ya que, en el año 2010 la producción total presentó una disminución del 1.4% respecto con el año anterior [22].

Tabla 1.3 Indicadores de la industria del cemento en México. Periodo 2005-2015 [22].

Año	Producción total (millones de toneladas)	Portland (%)	Blanco (%)	Mortero (%)
2005	39.7	90.7	2.0	7.4
2006	42.7	84.2	2.0	7.4
2007	43.4	82.8	2.0	7.8
2008	42.3	85.1	1.9	8.2
2009	40.9	87.9	1.6	8.4
2010	39.2	91.8	1.8	6.7
2011	40.6	88.6	1.9	8.7
2012	41.6	86.5	2.1	9.1

Año	Producción total (millones de toneladas)	Portland (%)	Blanco (%)	Mortero (%)
2013	39.8	90.4	2.4	9.0
2014	41.9	85.8	2.7	9.0
2015	44.9	80.2	2.0	9.3

En América Latina, según estadísticas de la Federación Interamericana del Cemento publicadas en la revista Cemento y Concreto 2016 (tabla 1.4). La producción total de cemento paso de 178,421 millones de toneladas en 2012 a 184,166 millones de toneladas en 2015. En el 2015, México ocupaba el segundo lugar en producción de cemento con 38,600 millones de toneladas anuales, solo después de Brasil que produjo 65,283 millones de toneladas, y en tercer lugar se encontraba Colombia con 13,153 millones de toneladas [23].

Tabla 1.4 Producción de cemento en millones de toneladas en América Latina [23].

País	2012	2013	2014	2015
Brasil	68,809	70,161	71,254	65,283
México	36,200	34,600	36,600	38,600
Colombia	10,925	11,525	12,384	13,153
Argentina	10,716	11,892	11,408	12,193
Perú	10,005	10,804	11,058	10,764
Venezuela	8,110	8,460	8,230	8,260
Ecuador	6,025	6,670	6,580	6,140
República Dominicana	4,000	4,400	5,000	5,200
Chile	4,950	4,880	4,250	4,400
Bolivia	2,714	3,061	3,337	3,250
Guatemala	2,768	2,703	2,861	3,004
Caribe	1,910	2,410	2,520	2,605
Panamá	2,252	2,318	2,122	1,935
Cuba	1,850	1,900	1,800	1,780
Costa Rica	1,400	1,460	1,550	1,590
Hondura	1,600	1,550	1,520	1,580

País	2012	2013	2014	2015
Paraguay	800	960	1,030	1,050
Uruguay	870	850	890	1,001
El Salvador	1,007	1,015	954	998
Nicaragua	620	650	670	670
Puerto Rico	740	590	580	550
Surinam	150	150	160	160
Total	178,421	183,009	186,758	184,166

En la figura 1.2, se presenta una gráfica con los porcentajes de producción de cemento por regiones globales en el año 2015. Se observa que Asia es el continente con la mayor producción anual con un 80.2%. De acuerdo con la Federación Interamericana del Cemento, del total de la producción asiática, el 51.3% corresponde a China, 5.9% a India, 1.3% a Japón y el 21.7% al resto de Asia. En el caso del continente americano, del 6.5% total producido, 1.8% corresponde a Estados Unidos, 1.7 a Brasil, el 1% a México y el 2% al resto del continente.

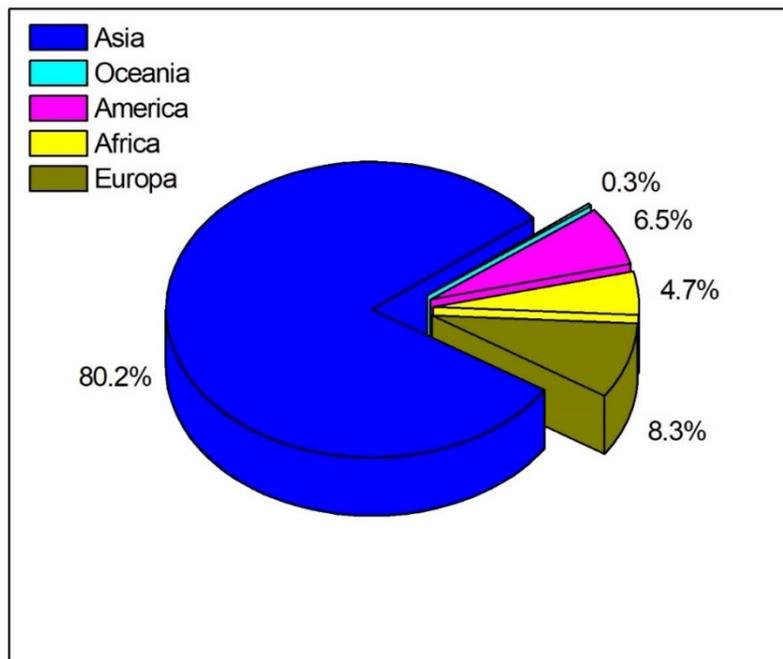


Figura 1.2 Participación por regiones en la producción de cemento, 2015 [23].

1.1.2 Concreto

El concreto, es el material de construcción más utilizado a nivel mundial y el segundo material de mayor consumo en el planeta, después del agua. Esto se debe a su bajo costo, facilidad de uso, versatilidad de sus características y a sus buenas propiedades mecánicas.

1.1.2.1 Componentes del concreto

Los cuatro componentes básicos del concreto son el cemento Portland, el agua, el agregado grueso (grava o piedra triturada) y el agregado fino (arena). Además, hay muchos otros materiales o adiciones que a menudo se agregan al concreto para mejorar sus propiedades en estado fresco y endurecido. Las adiciones comúnmente utilizadas como materiales cementicios suplementarios son cenizas volantes, humo de sílice, cenizas de arroz, metacaolín, escorias, entre otros. Así mismo, se pueden agregar al concreto otros materiales como aditivos químicos y fibras poliméricas, metálicas, etc. [24,25].

Agregados

Todos los materiales granulares utilizados en el concreto se denominan agregados, y pueden ser naturales, artificiales, recuperados o producto de materiales reciclados utilizados anteriormente en la construcción.

Las funciones principales de los agregados son actuar como relleno, reducir costos en el concreto, proporcionar resistencia y durabilidad. Así mismo, contribuyen controlando los cambios en el volumen ocasionados por los procesos de hidratación y fraguado del concreto.

La calidad del concreto, se encuentra condicionada por las características de los agregados debido a que son el material que se encuentran en mayor proporción de volumen. Sus características minerales afectan las propiedades físicas del concreto endurecido, y sus características geométricas influyen en el comportamiento en estado fresco del concreto. Cuando los agregados son reactivos a los álcalis, pueden actuar químicamente afectando la integridad del concreto [26].

Aditivos [24, 27]

Los aditivos son productos que se agregan a la mezcla de concreto en cantidades menores al 5% para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido.

Los aditivos se pueden clasificar como modificadores de reología, modificadores de los tiempos de fraguado, agentes incorporadores de aire y repelentes de agua.

Entre los modificadores de reología, es decir, las propiedades de deformación y fluidez en estado fresco, destacan los reductores de agua y modificadores de la viscosidad. Los reductores de agua, plastificantes y superplastificantes son los más utilizados, ya que permiten reducir el contenido de agua en el concreto sin afectar la consistencia, o permiten aumentar la fluidez de un concreto sin aumentar la dosificación de agua.

Los aditivos modificadores de los tiempos de fraguado son acelerantes y retardantes que influyen en el tiempo en que el concreto pasa de un estado plástico a un estado endurecido. Así mismo, existen aditivos que aumentan la velocidad de desarrollo de la resistencia inicial del concreto, con o sin cambio en los tiempos de fraguado.

Los aditivos incorporadores de aire, permiten incorporar una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire durante el proceso de mezclado, que se distribuyen uniformemente en la mezcla y permanecen tras el endurecimiento.

El uso de aditivos repelentes de agua tiene por objetivo reducir la absorción de agua por acción capilar en el concreto endurecido.

1.1.2.2 Clasificación del concreto en México

Los concretos se pueden clasificar según su resistencia mecánica, peso volumétrico o consistencia. De acuerdo con el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCyC), cada concreto tiene características especiales que lo hacen ideal para diferentes aplicaciones [28].

La tabla 1.5, muestra la clasificación según la resistencia de los concretos, se dividen en concretos de baja resistencia, utilizados para elementos sin requisitos estructurales; concretos de resistencia moderada, sugeridos para edificaciones pequeñas de tipo habitacional; concretos de resistencia normal, empleados para todo tipo de estructuras; concretos de muy alta resistencia, necesarios para la construcción de edificios muy altos, puentes con claros muy largos o elementos presforzados; y concretos de alta resistencia temprana cuyo uso se sugiere para pisos, pavimentos, elementos prefabricados o para minimizar los tiempos de construcción.

Por su resistencia

Tabla 1.5 Clasificación del concreto según su resistencia [28].

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Baja resistencia	Losas aligeradas. Elementos de concreto sin requisitos estructurales.	Bajo costo. Propiedades elementales.	Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales. Resistencia a la compresión < 150 kg/cm ² .
Resistencia moderada	Edificaciones de tipo habitacional de pequeña altura. Edificaciones sencillas.	Bajo costo.	Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales. Resistencia a la compresión entre 150 y 250 kg/cm ² .
Normal	Todo tipo de estructuras de concreto.	Funcionalidad. Disponibilidad.	Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales. Resistencia a la compresión entre 250 y 420 kg/cm ² .
Muy alta resistencia	Columnas de edificios muy altos. Secciones de puentes con claros muy largos. Elementos presforzados. Disminución en los espesores de los elementos.	Mayor área aprovechable en plantas bajas de edificios altos. Elementos presforzados más ligeros. Elementos más esbeltos.	Alta cohesividad en estado fresco. Tiempos de fraguado similares a los concretos normales. Altos revenimientos. Resistencia a la compresión entre 400 y 800 kg/cm ² . Baja permeabilidad. Mayor protección al acero de refuerzo.
Alta resistencia temprana	Pisos. Pavimentos. Elementos presforzados. Elementos prefabricados Construcción en clima frío. Minimizar tiempo de construcción.	Elevada resistencia temprana. Mayor avance de obra. Optimización del uso de cimbra. Disminución de costos.	Se garantiza lograr el 80% de la resistencia solicitada a 1 o 3 días. Para resistencias superiores a los 300 kg/cm ² se requiere analizar el diseño del elemento.

Por su peso volumétrico

Los concretos también se pueden clasificar de acuerdo con su peso volumétrico (P.V.), en ligeros, normales y pesados como se muestra en la tabla 1.6. Los ligeros son utilizados cuando no se quiere aumentar la carga muerta de las estructuras; los normales son aplicables en construcciones en general; los pesados cuando se busca disminuir el espesor de los elementos o en estructuras especiales como protección contra radiaciones.

Tabla 1.6 Clasificación del concreto según su peso volumétrico [28].

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Ligero Celular (Alta trabajabilidad)	Capas de nivelación en pisos y losas. Para construcción de vivienda tipo monolítica.	Mejora al aislamiento termoacústico. Alta trabajabilidad. Disminución de carga muerta. Proporciona mayor confort al usuario. Fácil de aserrar y clavar. Mayor resistencia al fuego.	P.V. de 1,500 a 1,920 kg/m ³ . Resistencia a la compresión de hasta 175 kg/cm ² a los 28 días.
Normal	Todo tipo de estructuras en general. Elementos prefabricados. Estructuras voluminosas.	Mantiene una densidad en atención al funcionamiento de la estructura.	Propiedades en estado fresco y endurecido similares a las obtenidas en los concretos convencionales. P.V. entre 2,200 y 2,400 kg/m ³ . Resistencia a la compresión entre 100 y 350 kg/cm ² .
Pesado (Mejor relación resistencia/peso)	Estructura de protección contra radiaciones. Elementos que sirven como lastre.	Elevado peso volumétrico. Mejor relación resistencia/peso. Disminución de espesor en los elementos.	P.V. entre 2,400 y 3,800 kg/m ³ . Resistencia a la compresión igual a la obtenida en los concretos normales.

Por su consistencia

Los diferentes métodos constructivos requieren concretos con diferentes características de consistencia. La tabla 1.7, presenta la clasificación de los concretos de acuerdo con su consistencia. Observamos que los concretos fluidos son necesarios en estructuras con abundante acero de refuerzo o que requieran bombeo; el concreto convencional es utilizado en todo tipo de estructuras y el concreto masivo permite la realización de colados de grandes dimensiones.

Tabla 1.7 Clasificación del concreto según su consistencia [28].

TIPO	USOS	BENEFICIOS	INFORMACIÓN TÉCNICA
Fluido	Rellenos. Estructuras con abundante acero de refuerzo. Bombeo a grandes alturas.	Facilita las operaciones de colocación y acabado. Facilita las operaciones de bombeo. Propicia el ahorro en mano de obra.	Revenimiento superior a 19 cm, es decir tiene una consistencia fluida. Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales.
Normal o convencional	Todo tipo de estructuras de concreto.	Tener una consistencia de mezcla adecuada para cada tipo de estructura, en atención a su diseño.	Revenimiento entre 2.5 y 19 cm, lo cual considera las zonas de consistencia semi-fluida /12.5 a 19 cm, plástica / 7.5 a 12.5 cm, semi-plástica 2.5 a 7.5 cm.
Masivo	Colados en elementos de gran dimensión.	Ahorro en materia prima y mano de obra. Bajo desarrollo en el calor de hidratación.	Revenimiento entre 2.5 y 5 cm. Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales.

1.1.2.3 Ciclo de vida de una estructura de concreto

El análisis del ciclo de vida, es un método frecuentemente utilizado para la evaluación del impacto ambiental y de sustentabilidad de un producto o proceso. El ciclo de vida de una estructura de concreto es complejo, debido a que en el intervienen diversos factores como la calidad de los materiales empleados o el uso que se le dio a la estructura durante su vida útil. La figura 1.3, muestra el ciclo de vida de una estructura de concreto, dicho ciclo

comienza con la extracción de materias primas. Posteriormente, se lleva a cabo la producción del concreto que se utiliza en la construcción de los elementos que componen la estructura. La siguiente etapa del ciclo, es probablemente la más larga, y representa los años de funcionamiento de la estructura; durante este periodo, se debe dar un mantenimiento adecuado para alargar la vida útil. Al final de la vida útil de una estructura, se procede a su demolición. Actualmente, esta representa la etapa final del proceso. Sin embargo, en la figura se muestra además una etapa adicional, el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición como materias primas para concreto. La reutilización y el reciclado son parte fundamental del camino hacia la sustentabilidad de la industria de la construcción [29,30].



Figura 1.3 Ciclo de vida de edificaciones e infraestructura [29].

La fabricación de estructuras de concreto, tiene varios efectos negativos en el medio ambiente. Por un lado, la fabricación de cemento requiere grandes cantidades de materias primas como piedra caliza. Adicionalmente, los residuos de construcción y demolición se han convertido en uno de los flujos de residuos más grandes del mundo [30].

1.2 MATERIALES PUZOLÁNICOS

Las puzolanas, son materiales naturales o artificiales, silíceos o silicoaluminosos con pequeñas cantidades de magnesio, hierro, potasio o sodio, que por sí solos no poseen ningún valor cementante. Sin embargo, si estos materiales se encuentran en forma finamente dividida, en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (producido por el cemento Portland hidratado) para formar compuestos que poseen propiedades cementantes [31].

Los materiales puzolánicos, pueden modificar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, como son la cohesión, consistencia o trabajabilidad, segregación, sangrado o tiempo de fraguado. Contribuyen a las propiedades del concreto de dos maneras, el efecto de relleno y la reacción puzolánica.

El efecto físico o de relleno, se define como la disposición adecuada de partículas pequeñas que aumentan la densidad y la resistencia a la compresión sin ninguna reacción química. Estas partículas llenan los vacíos y como resultado producen concretos más resistentes, en comparación con puzolanas de tamaños mayores. Por otro lado, el efecto puzolánico genera una reacción química entre las puzolanas y uno de los productos de la hidratación del cemento (CH). El remplazo parcial de cemento con puzolanas, inicialmente reduce la resistencia, pero a edades posteriores, la resistencia es similar a la de un cemento Portland o más alta, debido a que estos materiales tardan de 4 a 6 semanas en reaccionar con el hidróxido de calcio.

Los materiales puzolánicos, se han utilizado por años como materiales cementicios complementarios, para fines económicos o para mejorar alguna propiedad del concreto. Recientemente, la preocupación por el impacto ambiental generado por la industria de la construcción ha dado lugar a la búsqueda de mayores beneficios, al remplazar un porcentaje del peso del cemento Portland y reducir su consumo.

Con el fin de utilizar las propiedades puzolánicas de algunos materiales, los desechos o residuos, a menudo se activan a través de medios físicos y/o químicos o la combinación de ambos. La activación, es utilizada para contribuir al desarrollo de la resistencia en edades tempranas y acelerar la reactividad puzolánica de los residuos.

La activación mecánica implica la molienda de los materiales a partículas finas para aumentar la finura y en consecuencia el área superficial efectiva. La activación química es

la adición o utilización de sustancias químicas para activar las propiedades puzolánicas de los materiales [32-34].

1.2.1 Clasificación de los materiales puzolánicos

Existen distintos sistemas de clasificación para las puzolanas, de acuerdo con su composición química y mineralógica, según sus propiedades físicas y su reactividad o el más común, según su origen natural o artificial. Las puzolanas naturales, son principalmente rocas volcánicas, encontramos las cenizas volcánicas, tobas y zeolitas. Las puzolanas artificiales, se obtienen como subproductos de distintos procesos industriales y agrícolas, entre estos materiales destacan las cenizas volantes, microsílíce (humo de sílice), ceniza de cascara de arroz y escoria de alto horno.

La norma internacional ASTM C 618 clasifica las puzolanas en tres grupos, clase F, clase C y clase N.

- Clase N, corresponde a puzolanas naturales como tierras diatomeas, pizarras o cenizas volcánicas.
- Clase F, corresponde a cenizas volantes procedentes de la quema de antracita o carbón bituminoso.
- Clase C, cenizas volantes que normalmente se producen a partir de lignito o carbón sub-bituminoso.

De acuerdo con la norma, los requerimientos para cada tipo de puzolana se presentan en las tablas 1.8 y 1.9.

Tabla 1.8 Requerimientos químicos de los materiales puzolánicos.

ESPECIFICACIÓN	CLASE F	CLASE N	CLASE C
Dióxido de silicio (SiO ₂) + Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) + Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃) %min	70	70	50
Trióxido de azufre (SO ₃) % max	5.0	4.0	4.0
Perdida por calcinación % max	6.0	10.0	6.0
Humedad % max	3.0	3.0	3.0
Álcalis disponibles (Na ₂ O) % max	1.5	1.5	1.5

Tabla 1.9 Requerimientos físicos de los materiales puzolánicos.

ESPECIFICACIÓN	CLASE F	CLASE N	CLASE C
Índice de actividad puzolánica mínimo % control a 7 días	75	75	75
Índice de actividad puzolánica mínimo % de control a 28 días	75	75	75
Expansión en autoclave, % max	0.8	0.8	0.8

1.2.2 Principales materiales puzolánicos [35, 36]

A continuación, se describen las puzolanas más conocidas y utilizadas, así como sus principales características.

Ceniza volante

La ceniza volante, es un material cristalino constituido principalmente por partículas esféricas que se originan por la combustión del carbón pulverizado. Se utiliza a nivel mundial para modificar las propiedades del concreto, por su repercusión económica y ambiental, ya que se trata de un subproducto industrial de las centrales termoeléctricas. Influye en las propiedades del concreto, en estado fresco reduce la demanda de agua, mejora la trabajabilidad y la cohesión, disminuye la segregación y el sangrado. En concreto endurecido puede mejorar la durabilidad, reducir la permeabilidad y contribuir a la resistencia a largo plazo.

Escoria de alto horno

La escoria de alto horno es un residuo de la industria metalúrgica, producido durante la obtención de materias primas para el acero. Los cementos que contienen escoria de alto horno, tienen algunas características adicionales a las del cemento Portland sin adiciones como menor calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y al agua salada.

Humo de sílice

El humo de sílice, también llamado microsílíce o sílice activa, es un producto inorgánico (amorfo) constituido por agregados de pequeñas partículas de gran finura. Esta adición, se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metálico y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco.

El uso de humo de sílice permite obtener concretos de alta resistencia y alta durabilidad. Sin embargo, su uso también incrementa la demanda de agua y reduce la trabajabilidad.

Ceniza de la cáscara de arroz

La cáscara de arroz, es un desecho agroindustrial que se produce en altos volúmenes en los lugares donde se siembra y se procesa la planta de arroz. Se ha demostrado que su uso como remplazo de cemento mejora las propiedades mecánicas y disminuye el peso volumétrico del concreto.

Metacaolín

El metacaolín es un aluminosilicato activado térmicamente, ya que se produce al calcinar caolín a temperaturas alrededor de 500°C y 600°C. El uso de metacaolín produce un material con algunas ventajas sobre el cemento Portland como es el incremento de la resistencia a pruebas mecánicas a edades tempranas, reducción del calor de hidratación, disminución de la porosidad y permeabilidad, así como protección a la corrosión del acero de refuerzo.

Actualmente, las puzolanas descritas anteriormente se utilizan en el concreto en las proporciones que muestra la tabla 1.10.

Tabla 1.10 Porcentajes de reemplazo de cemento de las puzolanas más comunes [35].

Puzolana	Porcentaje de remplazo [%]
Ceniza volante	15 – 35
Escoria de alto horno	20 – 25
Metacaolín	10 – 20
Ceniza de cáscara de arroz	5 – 15
Humo de sílice	5 – 10

1.2.3 Actividad puzolánica

Se define la actividad puzolánica de un material, como la capacidad de fijar hidróxido de calcio a temperatura ambiente y en presencia de agua.

La actividad puzolánica, se mide de acuerdo con la norma internacional ASTM C311, Métodos de prueba estándar para el muestreo y la prueba de cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto de Cemento Portland o con la norma mexicana NMX-C-179 Ceniza volante o puzolana natural para usarse como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland - Muestreo y pruebas, de acuerdo con estas normas se deberá evaluar el índice de actividad y realizar un análisis químico.

- Índice de actividad de resistencia: Se utiliza para determinar si la ceniza volante o la puzolana natural, da como resultado un nivel aceptable de desarrollo de resistencia cuando se utiliza con cemento hidráulico en concreto.
- Pruebas químicas: Las determinaciones de los componentes químicos y los límites impuestos a cada uno de ellos, no predicen el rendimiento de una ceniza volante o puzolana natural con cemento hidráulico en concreto, pero colectivamente ayudan a describir la composición y la uniformidad del material.

1.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

1.3.1 Industria del cemento

La fabricación de cemento Portland, es un proceso que consume mucha energía y genera emisiones importantes de dióxido de carbono (CO_2). El cemento, representa el menor volumen de un concreto y aporta aproximadamente 90% de las emisiones de CO_2 asociadas con su producción. En gran parte, el CO_2 producto de la fabricación de cemento, se genera a partir de dos fuentes diferentes: la calcinación de piedra caliza y la quema de combustibles [37].

Calcinación

El clínker de cemento Portland, se produce en grandes hornos mediante el calentamiento de las materias primas (piedra caliza, arenas, arcillas y minerales de hierro). Estas materias primas, experimentan una conversión química a altas temperaturas formando el clínker. El óxido de calcio es el principal componente del clínker, comprende aproximadamente el 65% de su peso, y provienen comúnmente de la piedra caliza (CaCO_3), la cual durante su paso por el horno se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), proceso conocido como calcinación.

La descomposición química de la piedra caliza ocurrida en la calcinación es la fuente principal de CO₂ durante la fabricación de cemento. La calcinación genera 0.48 kg de CO₂ por cada kilogramo de cemento producido [37].

Emisiones durante la quema de combustibles

Para generar las condiciones suficientes para la conversión química de las materias primas en clínker, los hornos deben calentarse aproximadamente a 1450°C. La energía suministrada para generar temperaturas tan altas se obtiene de la quema de combustible. El carbón es la principal fuente de energía, pero también se utiliza petróleo, gas natural y combustibles residuales como neumáticos o solventes.

La quema de combustible, produce emisiones de CO₂ como resultado directo de la oxidación del carbono durante la combustión, y es responsable de aproximadamente 40% de las emisiones provenientes de la industria del cemento. Debido a que la cantidad de CO₂ liberada durante la quema de combustible varía, no solo con el tipo de combustible, sino también con el tipo de horno, es difícil evaluar las emisiones con un solo número. Sin embargo, se estiman 0.41 kg de CO₂ por kg de cemento generados por la quema de combustibles.

Como se dijo anteriormente, las dos fuentes principales de CO₂ en la fabricación del cemento son la calcinación de piedra caliza y la quema de combustible, estos procesos generan 0.48 y 0.41 kg de CO₂, respectivamente. Lo que equivale a 0.89 kg de CO₂ por cada kg de cemento que se produce. Se estima que anualmente se producen 1.2 billones de toneladas de cemento en el mundo [37].

La figura 1.4, representa el proceso de producción de cemento, indicando las etapas que generan emisiones de gases y las que requieren energía. Se observa que hay otros procesos vinculados a la producción de cemento que también requieren el uso de energía y como consecuencia emiten CO₂. Algunos de ellos son la extracción y transporte de materias primas, la electricidad para la operación de las plantas y la molienda del clínker con yeso para producir cemento [38].

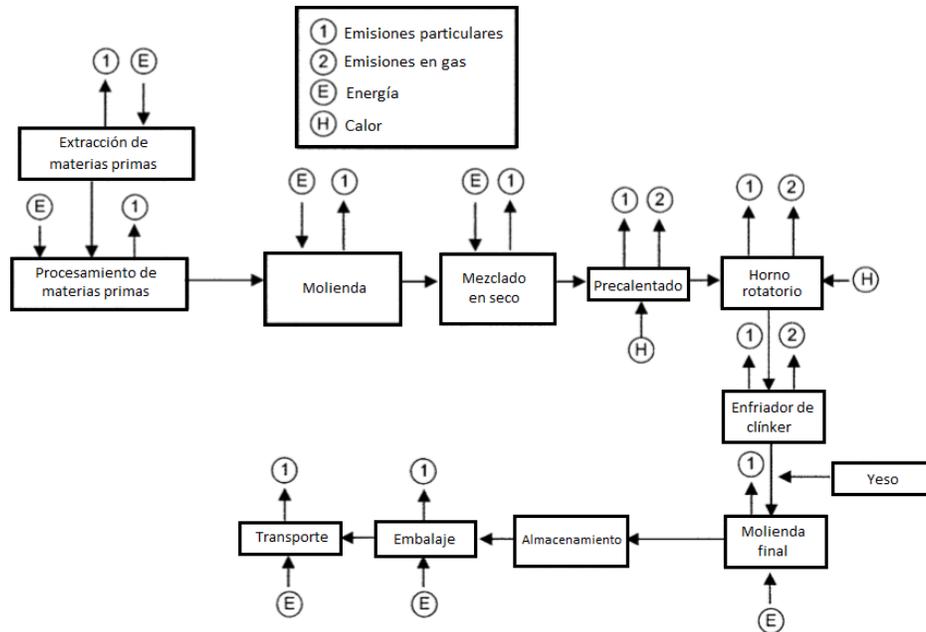


Figura 1.4 Diagrama de flujo de energía y emisiones en la fabricación del cemento [38].

1.3.2 Industria de la construcción

El alto consumo de energía, el agotamiento de los recursos naturales, la degradación ambiental y la contaminación son algunos de los numerosos impactos de la industria de la construcción. Estos se deben principalmente a las prácticas de construcción insostenibles empleadas a nivel mundial.

En términos globales, la industria de la construcción seguirá creciendo a un ritmo acelerado. Desde el punto de vista medioambiental, esta industria representa el 30% de las emisiones de dióxido de carbono. Además, la industria de la construcción mundial consume más materias primas que cualquier otra actividad económica, aproximadamente 3000 Mt/año, casi el 50% en peso del total producidas [37].

A nivel mundial, la gestión de los desechos sólidos plantea un gran reto para los países desarrollados y en desarrollo debido al crecimiento industrial, los auges de la construcción, la rápida urbanización y el estilo de vida de los consumidores.

La disposición sin separación ni tratamiento, frecuentemente en sitios clandestinos, de una mezcla de material de excavación, restos de ladrillo, azulejos, mortero, concreto, yeso, madera, plásticos, solventes y restos de pintura, metales, entre otros materiales utilizados

en los procesos constructivos de obras, generan un impacto ambiental relevante, además de problemas de imagen urbana y salud [39].

1.3.3 Propuestas de solución

La industria de la construcción, se encuentra en la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías emergentes que permitan hacer del concreto, un material sostenible mediante la reducción de su huella de carbono. Se han planteado diferentes áreas de acción para enfrentar la problemática actual [31,40].

1. Mejorar la eficiencia energética en el proceso de fabricación del cemento.
2. Ampliar el uso de combustibles y materias primas alternativas.
3. Involucrar a toda la cadena de valor de la construcción de infraestructura y edificación mediante el reúso y reciclado.
4. Desarrollo de nuevos cementos con menor cantidad de emisiones de dióxido de carbono, CO₂. Un ejemplo de cementos alternativos es el de belita, el cual se caracteriza por estar compuesto por cantidades aproximadamente inversas de belita (C₂S) y alita (C₃S), con respecto al cemento Portland ordinario (CPO). El proceso de fabricación de cemento de belita produce ahorros de energía y reducción de emisiones de CO₂ en comparación con la producción de cemento Portland. Esto se atribuye a un menor contenido de caliza y una menor temperatura de clinkerización (es decir, aproximadamente 1260 °C en comparación con 1450 °C utilizados en la fabricación de CPO). Sin embargo, debido a la menor reactividad de belita en comparación con la alita, el tiempo de fraguado y el desarrollo de la fuerza de la edad temprana del cemento se ven afectados [26].
5. Reducción del contenido de cemento Portland, mediante el remplazo parcial con materiales puzolánicos provenientes de desechos industriales, agrícolas o municipales. En la figura 1.5, se observa el potencial de algunos residuos para ser reutilizados como materiales puzolánicos (ceniza volante, matacaolín, ceniza de la cáscara de arroz, escoria de alto horno, humo de sílice etc.)



Figura 1.5 Clasificación de desechos reutilizables [31].

1.4 SUSTENTABILIDAD

En 1987, la Comisión Mundial sobre medio ambiente y desarrollo, presentó en su informe titulado “Nuestro futuro común” el termino desarrollo sustentable. El cual definió como un modelo de desarrollo que busca un equilibrio entre crecimiento económico, calidad de vida y preservación ambiental a mediano y largo plazo sin aumentar el consumo de recursos naturales más allá de la capacidad de la Tierra [41, 42].

Actualmente, nuestra sociedad se enfrenta a muchos problemas relacionados con la gestión ambiental, como la conservación de los recursos naturales, la gestión de residuos y la reducción de la cantidad de contaminantes liberados en la atmósfera. La sustentabilidad, tiene como objetivo equilibrar el bienestar de la humanidad y los impactos ambientales derivados de él.

Las industrias del cemento y de la construcción, deberán adoptar a corto plazo objetivos de desarrollo sustentable; basados en el uso eficiente de recursos, la producción de infraestructura y servicios a precios competitivos, que satisfagan la calidad de vida de la población y al mismo tiempo que disminuya los impactos ambientales generados por sus actividades.

Los concretos verdes o eco-concretos con bajo contenido de cemento representan una oportunidad para fomentar la sustentabilidad del concreto, independientemente de los

materiales cementicios suplementarios usados. Sin embargo, evaluar la sustentabilidad de estos materiales no solo implica tener en cuenta los impactos ecológicos por su composición sino también sus propiedades mecánicas, físicas y químicas [43].

1.5 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

El término residuos de construcción y demolición (RCD), se ha utilizado ampliamente para referirse a los residuos sólidos producidos durante la construcción, renovación y demolición de edificios y estructuras [44, 45].

La composición de los residuos de construcción y demolición está influenciada por los diferentes tipos de construcción y sus componentes, en general se componen de concreto, asfalto, ladrillo y materiales cerámicos como se muestra en la tabla 1.11 [46].

Tabla 1.11 Composición de los residuos de construcción y demolición [46].

Grupo	Subproducto	Porcentaje	
Material de Excavación	Material de relleno	39	
Concreto	Concreto: Bases hidráulicas, concretos hidráulicos, adocretos, adopastos, bordillos, postes de cemento, arena, morteros	24	
	Asfaltos: Carpetas asfálticas	0.3	
Elementos mezclados, prefabricados y pétreos	Piedra, block-tabique, tabicones, morteros, adoquines, tabicones, tubos de albañal, mamposterías, tabiques, ladrillos	24	
Otros	Yeso, muro falso, madera, cerámica, metales, cerámica, plástico, metales, lámina, vidrios, papel y cartón	12	
	Residuos orgánicos		Hojas, ramas, troncos
	Productos de despilme		Raíces
	TOTAL	100	

Los desechos de demolición y construcción son un problema creciente en todo el mundo. Sin embargo, hay pocas estadísticas confiables sobre su generación ya que en muchos países este tipo de residuos se vierten ilegalmente. Actualmente, los residuos de construcción y demolición son depositados en su mayoría en sitios inadecuados; por

ejemplo, barrancas, predios abandonados y vía pública. Otra parte se deposita en rellenos sanitarios, donde por sus características de volumen, provocan que se acorte la vida útil de estos sitios. Estos materiales, representan una gran parte de todos los residuos sólidos generados en todo el mundo, se estima que alrededor del 13-30% de la disposición de desechos sólidos en rellenos sanitarios y vertederos corresponden a residuos de construcción y demolición [47,48].

En México, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en el 2012 la producción de RCD representaba el 17.5% de los residuos sólidos urbanos y se generaban cerca de 16,742.71 toneladas por día. Es decir, 6.1 millones de toneladas por año. Según proyecciones realizadas en el 2013 por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), en el 2018 se producirán entre 9.2 y 9.9 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición [49].

1.5.1 Normatividad

Existen leyes, reglamentos y normas que regulan el marco jurídico y normativo, de los residuos de construcción y demolición. El esquema del fundamento legal aplicable a los RCD se presenta en la figura 1.6.

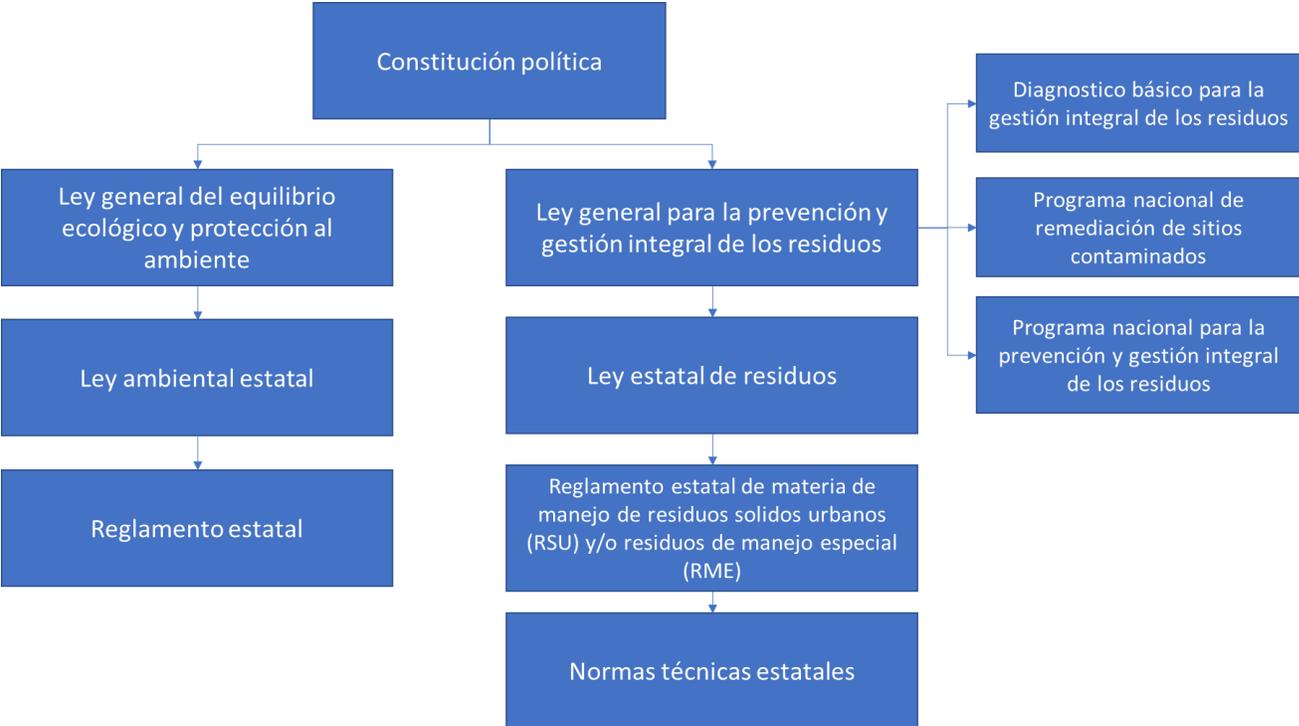


Figura 1.6 Esquema normativo del plan de manejo de residuos de construcción y demolición (PM-RCD).

Ley general para la prevención y gestión de los residuos

El artículo 19 del Título Tercero “Clasificación de Residuos” de la Ley general para la prevención y gestión de los residuos, clasifica a los residuos de construcción y demolición como residuos de manejo especial. Es decir, aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos, como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. De acuerdo con la misma ley, un gran generador es una persona física o moral que genera una cantidad igual o superior a 10 toneladas en peso bruto total de residuos al año. Adicionalmente, con el objetivo de minimizar la generación y maximizar el reciclado estos materiales deben estar sujetos a un plan de manejo especial [49].

Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-007-NRAT-2013

En la Ciudad de México, la norma ambiental NADF-007-NRAT-2013 establece la siguiente clasificación de los residuos de construcción y demolición de acuerdo con su origen.

- **Provenientes de concretos hidráulicos y morteros**, elementos estructurales y no estructurales, prefabricados o sobrantes de concreto en obra o prefabricados.
- **Materiales mezclados**, residuos de concreto hidráulico, blocks, tabicones o materiales cerámicos.
- **Provenientes de concreto asfáltico**, carpetas asfálticas o bases negras, residuos de excavación; como suelos no contaminados y materiales arcillosos.
- **Residuos sólidos urbanos**, como papel, cartón y madera.
- **Otros**, residuos de impermeabilizantes, asbesto o lodos bentoníticos.

Adicionalmente, la norma presenta alternativas de uso para cada tipo de residuo, presentados en la tabla 1.12.

Tabla 1.12 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso. NADF-007-RNAT-2013.

TIPO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO
A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS	
Elementos prefabricados	Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos
Elementos estructurales y no estructurales.	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones

TIPO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO
Sobrantes de concreto en obra y premezclado	Elaboración de productos prefabricados (blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena)
	Bases para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas
	Construcción de andadores y trotapistas
	Sub-bases en caminos y estacionamientos
	Construcción de terraplenes
	Construcción de pedraplenes
	Material para relleno o para la elaboración de suelo-cemento
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas
	Material para la conformación de terrenos
	Relleno en cimentaciones
	Mobiliario urbano
Construcción de muros divisorios	
B. MEZCLADOS	
Concretos hidráulicos	Sub-bases en caminos y estacionamientos
Morteros	Construcción de terraplenes
Blocks	Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios
Tabicones	Construcción de andadores y trotapistas
Adoquines	Base para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas
Tubos de albañal	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas
Cerámicos	Construcción de pedraplenes
Mampostería	Material para la conformación de terrenos
Prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, etc.)	Relleno en jardineras
Piedra braza	Relleno en cimentaciones
Agregados pétreos	
C. PROVENIENTES DE CONCRETO ASFÁLTICO	
Carpeta asfáltica	Bases asfálticas o negras
Bases negras	Concretos asfálticos elaborados en caliente
	Concretos asfálticos templados o tibios
	Concretos asfálticos elaborados en frío
D. RESIDUOS DE EXCAVACIÓN	
Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje
E. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	

TIPO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO
Papel y Cartón Madera Metales Plástico Residuos de poda, tala y jardinería. Vidrio	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje
F. OTROS	
Residuos de Impermeabilizantes, tablaroca, instalaciones eléctricas, asbesto, herrería, lodos bentoníticos	Deberá privilegiarse su reciclaje

Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011

La norma oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, de observancia obligatoria en todo México, tiene por objetivo establecer los criterios y procedimientos para la elaboración de los planes de manejo a los que están sujetos los residuos de manejo especial, que la misma norma enlista en su anexo normativo.

Los planes de manejo, buscan facilitar la gestión de los residuos y mejorar su manejo en todo el país. En algunos casos, también se busca el aprovechamiento de los residuos mediante la reutilización, reciclado o recuperación de materiales secundarios.

De acuerdo con la norma, los residuos de construcción, mantenimiento y demolición se consideran de manejo especial, cuando se generan en una cantidad mayor a 80 m³ en una obra.

Plan de manejo de Residuos de la Construcción y Demolición (PM-RCD) [50]

El Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición publicado por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), tiene por objetivo promover la construcción sustentable, minimizando la generación de RCD y maximizando su aprovechamiento; bajo el concepto de corresponsabilidad entre los tres órdenes de gobierno y los distintos actores que participan en la cadena de valor.

En el proceso de generación de RCD, se han identificado dentro de la cadena productiva diferentes actores de los tres grandes sectores de la economía.

En el sector primario “Extractivo y Materiales de Construcción”, se ubican los proveedores de insumos, desde materiales pétreos, maderas y accesorios para acabados.

En el sector secundario, se identifican los actores cuya actividad se encuentra relacionada con la construcción y servicios relacionados.

Finalmente, en el sector terciario, los actores cuyas labores son de soporte e incluyen a los comerciantes y proveedores de servicios, incluso técnicos y financieros.

De acuerdo con documento de la CMIC, la gestión en material de residuos de construcción y demolición en México presenta serias deficiencias, pues son pocas las entidades que cuentan con infraestructura adecuada para el manejo de los RCD. La disposición sin separación ni tratamiento, frecuentemente en sitios clandestinos, genera diversos problemas ambientales, de imagen urbana y salud como: obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas, afectaciones al drenaje natural, azolve de las partes bajas e inundación en las zonas aledañas en temporada de lluvias, focos de contaminación por mezcla de residuos, contaminación de suelo, subsuelo y acuíferos, afectación de zonas de recarga de agua subterránea, impacto visual en el entorno, proliferación de polvo, y proliferación de fauna nociva.

Finalmente, el plan de manejo hace la recomendación de implementar las siguientes estrategias para el manejo de residuos.

EN LA PLANEACIÓN

- Identificación de residuos e indicadores de manejo para reciclaje, aprovechamiento, reúso y disposición final por tipo de obra.

DENTRO DE LA OBRA

- Minimización en la generación, sistemas de reducción de residuos, empleo de materiales que se puedan reciclar.
- Separación de residuos por tipo de aprovechamiento, materiales de excavación, concretos, escombros, otros.
- Reúso de materiales, empleo de materiales reciclados, identificar infraestructura de reciclaje, especificaciones mínimas para el uso de reciclados.

FUERA DE LA OBRA

- Acopio y transporte, control documental de traslados, medidas para evitar dispersión de finos, empleo de transportistas acreditados.
- Disposición final únicamente en sitios autorizados.

Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México [51]

La Ciudad de México, por ser la capital del país, se ha consolidado como uno de los centros económicos y culturales más importantes debido a la producción, distribución y consumo de bienes y servicios, actividades que inciden de manera directa en uno de los principales retos ambientales que enfrenta: el manejo de residuos.

El inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México, brinda una visión integral del comportamiento de los residuos sólidos de la ciudad, y tiene como propósito establecer mecanismos y líneas de acción para la creación de políticas públicas que contribuyan a su manejo.

De acuerdo con el inventario, en el año 2016 se reportó una generación de 16,568 toneladas de residuos de la construcción provenientes de las delegaciones Benito Juárez, Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero, Iztacalco y Coyoacán; así como del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y la Dirección de Mantenimiento e Infraestructura Urbana (DMIU) de la Secretaría de Obras y Servicios.

Para el aprovechamiento de los residuos, la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México cuenta con una planta itinerante para el procesamiento de estos materiales, la cual puede ser solicitada por las delegaciones para su uso.

1.5.2 Reciclado de residuos de construcción y demolición

Los residuos de Construcción y Demolición son reciclados en plantas de tratamiento donde son procesados para producir nuevos materiales. En la Ciudad de México, existe una empresa dedicada al reciclaje de estos materiales denominada “Concretos Reciclados S.A. de C.V.” que se encuentra ubicada en Av. Del Árbol No. 106 Col. El Triángulo, Delegación Iztapalapa, Ciudad de México. La planta tiene una capacidad de producción de 2,000 toneladas diarias y cuenta con una superficie aproximada de 8 hectáreas, las cuales se encuentran 40 metros por debajo del nivel de calle en una depresión natural que es aprovechada como medida de mitigación del impacto ambiental. La empresa ofrece materiales finos y gruesos de dos tipos, producto de concreto hidráulico y materiales mixtos.

En la planta de "Concretos Reciclados S.A. de C.V." los residuos de construcción y demolición pasan por el proceso que se describe a continuación y se ilustra en la figura 1.7 [52]:

1. **Recepción de escombros:** Los residuos se reciben libres de basura, materiales orgánicos o cualquier otro contaminante como aceites, asbestos, baterías, llantas, papel, plásticos, tablaroca/yeso o lodos.
2. **Almacenamiento:** Los residuos se almacenan de acuerdo con su composición como provenientes de:
 - Concreto hidráulico
 - Materiales mixtos
 - Arenas y arcillas producto de excavación
 - Fresado de carpetas asfálticas
3. **Trituración:** de acuerdo con la granulometría deseada se procede a la trituración primaria y secundaria por medio de trituradoras de quijada sobre orugas con electroimán para la separación del acero y un sistema de aspersion para la estabilización de polvos.
4. **Cribado:** Se utilizan cribadoras computarizadas sobre orugas que permite generar agregados de cuatro curvas granulométricas.
 - Material de 3"
 - Material de 3" a finos
 - Material 1"
 - Material de 1/4" a finos o arena reciclada



Figura 1.7 Proceso de tratamiento de los residuos de construcción y demolición en la planta de "Concretos reciclados" [49].

1.5.3 Uso de los RCD como agregados

La integración de los residuos de construcción y demolición en la cadena de producción, se realiza mediante un conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, reciclado y/o recuperación. El reciclaje juega un papel significativo en la economía, incrementando su competitividad, creando nuevas oportunidades de negocios e incluso creando empleos. La tasa de reciclaje de residuos varía mucho de un país a otro, ya que depende de factores tales como la disponibilidad de recursos naturales, la situación económica y tecnológica del país y la distancia a bancos de materias primas naturales [53].

La constante demanda de materiales por parte del sector de la construcción, la generación de residuos producidos por el mismo y el compromiso por transformarse en una industria sustentable, han generado interés en el reciclado y reuso de los desechos de construcción y demolición. Los agregados reciclados son adecuados para el remplazo parcial del agregado virgen en concreto, su uso podría ahorrar alrededor del 60% de los recursos de piedra caliza.

Su utilización tiene gran importancia, sin embargo, los resultados de las investigaciones indican que, dependiendo de su origen y composición, los agregados reciclados son más porosos que los naturales y presentan mayor absorción, lo que da como resultado concreto de bajo rendimiento, afectando las propiedades de resistencia y durabilidad [54, 55].

1.5.3.1 Agregado grueso

Los agregados gruesos reciclados, tienen una textura de superficie más alargada, irregular y áspera, presentan mayor porosidad que los agregados naturales, estas características se reflejan directamente en la absorción de agua, además de la disminución de la trabajabilidad de las mezclas de concreto [56, 57].

Diversos estudios indican que el uso de agregado grueso reciclado de materiales mixtos provoca en el concreto una disminución en su resistencia a la compresión que varía del 25 al 40% cuando se utiliza únicamente agregado reciclado, cuando el remplazo fue menor al 15% no se observaron cambios significativos en la resistencia [58-60].

En general, el uso de agregados gruesos reciclados representa una disminución en la calidad del concreto y sus propiedades, se recomienda su empleo para usos no estructurales [59, 60].

1.5.3.2 Agregado fino

Los agregados finos reciclados pueden contener grandes cantidades de polvos finos, mortero adherido e impurezas como asfalto, papel, madera, vidrio, plástico u otros desechos de construcción. Los polvos finos reducen la trabajabilidad del concreto en estado fresco y las propiedades mecánicas del concreto endurecido debido a su mayor absorción de agua. Adicionalmente, el mortero adherido absorbe cantidades relativamente grandes de agua de mezcla. Generalmente los agregados finos reciclados son más porosos que los naturales y presentan mayor absorción de agua, lo que conduce a concretos con bajos rendimientos, afectando las propiedades de durabilidad y resistencia [61].

Los concretos elaborados con arena reciclada, producto de residuos de concreto hidráulico, presentan una reducción sistemática de la resistencia mecánica de hasta 30% cuando se reemplaza completamente el agregado natural. Si el reemplazo es únicamente del 25%, la reducción en la resistencia es solo del 15% [62, 63].

En el caso de los concretos elaborados con agregado fino de residuos mixtos, no se presentaron reducciones importantes con un alto porcentaje de reemplazo del agregado natural. Con la mitad de agregado reciclado la resistencia es similar a la obtenida con agregado natural únicamente, mientras que con 100% de reemplazo la reducción es menor al 10% [62, 63].

Algunos investigadores, han planteado el uso de procedimientos físicos y químicos para mejorar las propiedades de los agregados reciclados, finos y gruesos. Se cree que reduciendo la cantidad de polvos finos adheridos a la superficie y el nivel de impurezas se puede mejorar la calidad de los agregados reciclados. Estos métodos incluyen el uso de soluciones de ácido sulfúrico y/o ácido clorhídrico, para el lavado de los agregados o procesos térmicos. Se ha concluido que el uso de estas técnicas mejora la resistencia del concreto con agregados finos reciclados en hasta un 25% en comparación con los que no son tratados [64, 65].

El concreto producido con agregados reciclados en comparación con el concreto fabricado con agregados naturales resulta de menor densidad. Sin embargo, generalmente son concretos poco trabajables y con un alto porcentaje de porosidad. Las investigaciones han concluido que, los agregados reciclados pueden ser utilizados en concretos no estructurales o elementos prefabricados [56-65].

Muchos países tienen esquemas de reciclaje para recuperar los residuos de construcción y demolición que pueden utilizarse como agregados para concreto, en algunos casos el reciclaje de concreto es una industria bien establecida y los residuos se trituran y reutilizan. La tasa de recuperación de RCD varían de casi el 100% en algunas partes del mundo a casi cero en los países donde la mayoría de los residuos de construcción terminan en el vertedero [66].

1.5.4 Uso de RCD en México

En México, el reciclaje de residuos de construcción y demolición se ha enfocado en triturar los residuos y convertirlos en agregados finos y gruesos, de tipo hidráulicos o mixtos.

En la actualidad, se ha buscado introducir el uso de agregados reciclados, procedentes de los residuos de construcción y demolición en las diversas obras de ingeniería civil. Sin embargo, los ingenieros, propietarios, constructores, contratistas y autoridades descartan su utilización argumentando que no son adecuados o que no cumplen con los requisitos de calidad necesarios. En consecuencia, solo 10% de los residuos de construcción y demolición se envían a reciclaje y 10% de estos agregados reciclados son aprovechados en obras de ingeniería. Estos agregados reciclados, se han utilizado principalmente como sub-bases y bases hidráulicas [67].

Por otro lado, investigadores del Instituto de Ingeniería fabricaron ladrillos ecológicos en los cuales se utiliza el RCD como agregado y no como una adición puzolánica como es el caso del presente trabajo de investigación. Estos ladrillos, cumplen con la resistencia a la compresión y la absorción de agua requerida por la normatividad nacional. Sin embargo, su uso no se ha comercializado pues al material aún se encuentra en investigación [68].

1.6 HIPÓTESIS

Los residuos de construcción y demolición mixtos, modificados mediante un tratamiento físico que permita disminuir su tamaño de partícula y aumentar su área superficial, podrán tener una finura adecuada para su uso como puzolanas y como materiales de sustitución parcial de cemento Portland en nuevos cementos sustentables para la construcción; sin afectar de manera significativa las propiedades mecánicas y de durabilidad en la matriz cementicia.

1.7 OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar cementos sustentables con residuos de construcción y demolición mixtos como materiales de sustitución de cemento Portland en la matriz cementicia, para disminuir el impacto ambiental generado por las industrias del cemento y de la construcción, ofreciendo de esta manera una alternativa de uso para estos materiales.

Objetivos específicos

- Ofrecer una alternativa de uso para los residuos de construcción y demolición.
- Producir cementos sustentables a partir del remplazo parcial del cemento Portland con RCD tipo mixto.
- Analizar la influencia del tamaño de partícula de los residuos mixtos en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales obtenidos.
- Estudiar la microestructura y composición química de los cementos sustentables elaborados.
- Proponer una aplicación para los materiales cementicios sustentables elaborados de acuerdo con las propiedades obtenidas.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo, se describen las materias primas utilizadas para la obtención de los cementos sustentables estudiados en este trabajo de investigación. Se especifica la metodología experimental que se siguió, para determinar las propiedades de las materias primas y de los cementos sustentables generados, así como los procedimientos de elaboración de los especímenes utilizados en todas las pruebas. Finalmente, se hace mención de las técnicas de caracterización utilizadas para conocer la composición de las fases químicas y la morfología en los materiales cementicios obtenidos.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

2.1.1 Cemento

Para la elaboración de todos los especímenes estudiados, se utilizó un Cemento Portland Compuesto (CPC) con clase resistente 30R, resistente a los sulfatos (RS) y baja reactividad álcali agregado (BRA) clasificado de acuerdo con la norma NMX-C-411-ONNCCE-2014.

Las propiedades fisicoquímicas del cemento, se determinaron mediante pruebas mecánicas de resistencia a la compresión (NMX-C-061-ONNCCE-2015), medición de tiempos de fraguado (NMX-C-059-ONNCCE-2013 y NMX-C-132-ONNCCE-2015), consistencia normal (NMX-C-057-ONNCCE-2015) y análisis químico (NMX-C-131-ONNCCE-2016), para verificar el cumplimiento con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014, la cual indica las especificaciones y requisitos de los cementos en México.

2.1.2 Residuos de construcción y demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición mixtos (NADF-007-NRAT-2013) fueron proporcionados por la planta de “Concretos Reciclados S.A. de C.V.” que se encuentra ubicada en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México.

2.1.2.1 Análisis granulométrico

En el laboratorio, se realizó el cuarteo de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M) de acuerdo con la norma NMX-C-170-ONNCCE-1997. El análisis granulométrico, se realizó para obtener una muestra representativa del material y conocer los tamaños de partícula del residuo. Con el objetivo de determinar el porcentaje de material menor a malla 100 (150 μm), es decir, el material con la finura adecuada para su aprovechamiento como material puzolánico.

La figura 2.1, ilustra el proceso que se siguió de acuerdo con las normas para obtener la curva granulométrica de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M). Inicialmente, se realizó el proceso de cuarteo de todo el material recibido de la planta, después la muestra representativa fue secada en el horno a 110°C durante 24 horas. Posteriormente, se pesaron todos los tamices requeridos según la normatividad. El siguiente paso, consistió en el cribado por medios mecánicos de una muestra del material. Finalmente, se obtuvieron nuevamente los pesos de los tamices con el material retenido en cada malla y se realizaron los cálculos necesarios para obtener la curva granulométrica.



Figura 2.1 Proceso para la obtención de la curva granulométrica de los RCD-M. 1) Cuarteo; 2) Secado al horno durante 24 h a 110°C \pm 10°C; 3) Obtención del peso de los tamices; 4) Cribado mecánico; 5) Peso del material retenido en cada tamiz; 6) Cálculo de la curva.

2.1.2.2 Tratamiento físico

Se realizó un tratamiento físico, para reducir el tamaño de partícula de los RCD-M recibidos de la planta. El material se separó en diferentes tamaños de partícula de acuerdo con las mallas número 100, 200 y 325 (NMX-B-231-1990), correspondientes a 150, 75 y 45 μ m, respectivamente.

Como se muestra en la figura 2.2, el proceso de modificación física consistió en el secado del material en un horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. Posteriormente, el material se tamizó por medios mecánicos para guardar los materiales retenidos en los tamices 100, 200 y 325 a los cuales se les asignó la nomenclatura M100, M200 y M325, respectivamente.

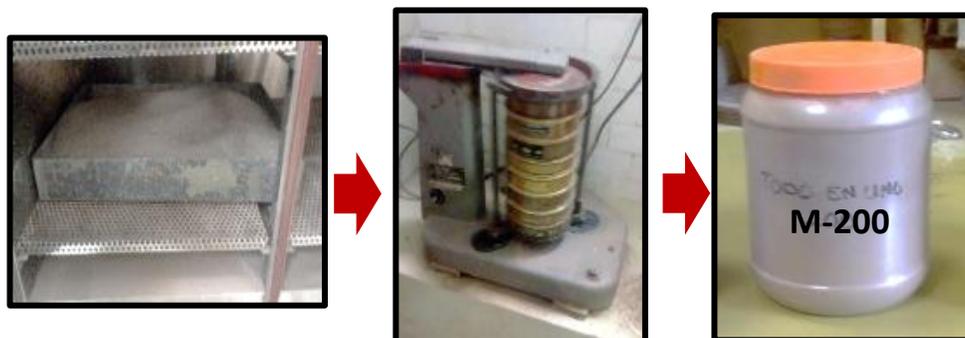


Figura 2.2 Proceso de modificación del tamaño de partícula de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M) mediante medios mecánicos.

El tamaño de los materiales obtenidos y la nomenclatura asignada, se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tipo de adiciones utilizadas en el proyecto.

Nomenclatura del material	No. De malla	Tamaño de partícula [μm]
M100	100	150
M200	200	75
M325	325	45

2.1.2.3 Propiedades químicas y actividad puzolánica

Las propiedades químicas y los índices de actividad puzolánica de los residuos de construcción y demolición, se obtuvieron conforme a las normas mexicana NMX-C-273-ONNCCE-2010 e internacional ASTM-C-311.

El análisis químico, contempla la determinación del contenido de humedad secando una muestra al horno y pesándola para determinar el porcentaje de pérdida de peso. Por otro lado, se calcula el contenido químico de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3), trióxido de azufre (SO_3) y los álcalis disponibles (Na_2O). El resultado se expresa como un porcentaje del peso total de la muestra.

El índice de actividad puzolánica, es la relación entre la resistencia a la compresión promedio de los cubos de una mezcla que contiene puzolanas y la resistencia a la compresión promedio de una mezcla libre de puzolanas.

2.2 NUEVOS CEMENTOS SUSTENTABLES

2.2.1 Mezclas

Inicialmente, se trabajó con un cemento Portland Compuesto, clase resistente 30R resistente a los sulfatos y baja reacción álcali agregado, el cual sirvió como parámetro de comparación con los cementos obtenidos en este trabajo. Los nuevos materiales, se caracterizaron por tener diferentes porcentajes de sustitución de cemento Portland con residuos de construcción mixtos (RCD-M) tipo M100, M200 o M325, según el tamaño de partícula del residuo.

Se elaboraron doce tipos de pastas (agua + cemento), considerando diferentes porcentajes de sustitución de cemento Portland por RCD-M. La tabla 2.2, presenta un listado de las pastas elaboradas, el tipo de adición según su tamaño de partícula, el porcentaje de cemento Portland utilizado y el porcentaje de remplazo correspondiente.

Tabla 2.2 Proporcionamiento de las pastas elaboradas.

NOMENCLATURA	CEMENTO PORTLAND [%]	ADICIÓN RCD-M [%]
M-0 (Testigo)	100	0
M100-20	80	20
M100-40	60	40
M100-60	40	60
M100-80	20	80
M200-20	80	20
M200-40	60	40
M200-60	40	60
M200-80	20	80
M325-20	80	20
M325-40	60	40
M325-60	40	60
M325-80	20	80

Todos los materiales cementicios, se realizaron con una relación agua/cemento (A/C) igual a 0.4 siguiendo la norma NMX-C-085-ONNCCE, para el mezclado de morteros y pastas como se observa en la figura 2.3.

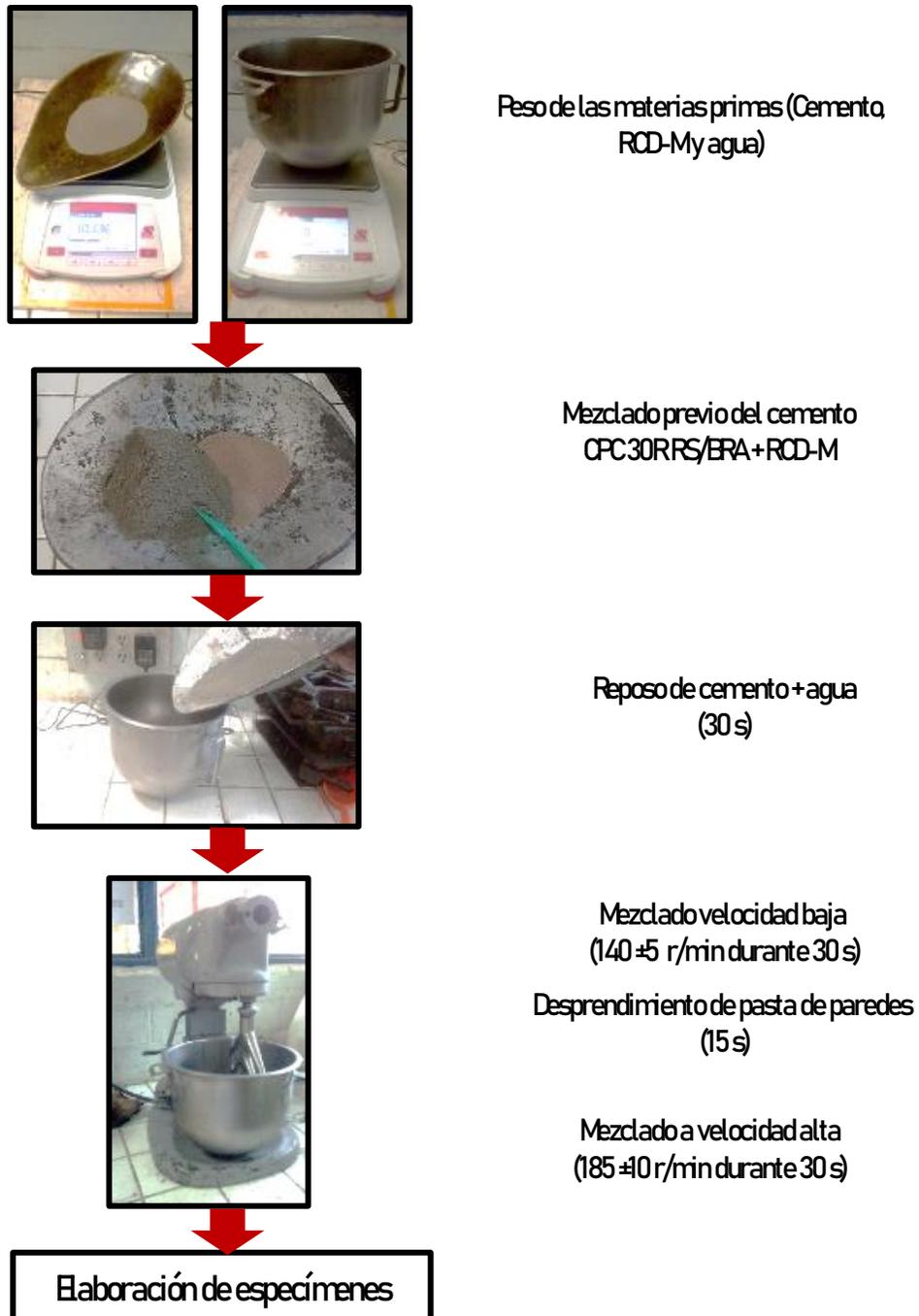


Figura 2.3 Proceso de elaboración de pastas de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-085-ONNCCE.

2.2.2 Especímenes

Cubos

Se elaboraron especímenes cúbicos conforme a la norma NMX-X-061-ONNCCE-2015, Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos. Los especímenes, fueron elaborados en dos capas de 25 mm de espesor y se compactaron por medio de 32 golpes por capa con un pisón rectangular. De acuerdo con la norma, la compactación se llevó a cabo en un tiempo máximo de 2.5 minutos en el caso de un molde de tres especímenes cúbicos.

Los cubos elaborados, fueron utilizados para las pruebas de resistencia a la compresión simple y de durabilidad en solución salina de sulfato de sodio (Na_2SO_4), respectivamente.

Cilindros

Se elaboraron especímenes cilíndricos con una relación diámetro – altura de 1:2 de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002, los cuales fueron compactados en dos capas por medio de 8 golpes en cada una con una varilla de vidrio, estos especímenes fueron destinados a las pruebas de porosidad de los materiales cementantes por el método de inmersión de Arquímedes.

Pequeñas muestras de cada material cementante, fueron guardadas para detener su proceso de hidratación en nitrógeno líquido (N_2) a las edades de 7,14, 28 y 90 días. Posteriormente, fueron trituradas en un mortero de ágata hasta obtener un tamaño de 75 μm . Estos especímenes, fueron utilizados en las pruebas de caracterización de difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (ATG) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

La figura 2.4, muestra los tres tipos de especímenes que se elaboraron de cementos sustentables y todas las pruebas a las que fueron sometidos, respectivamente.

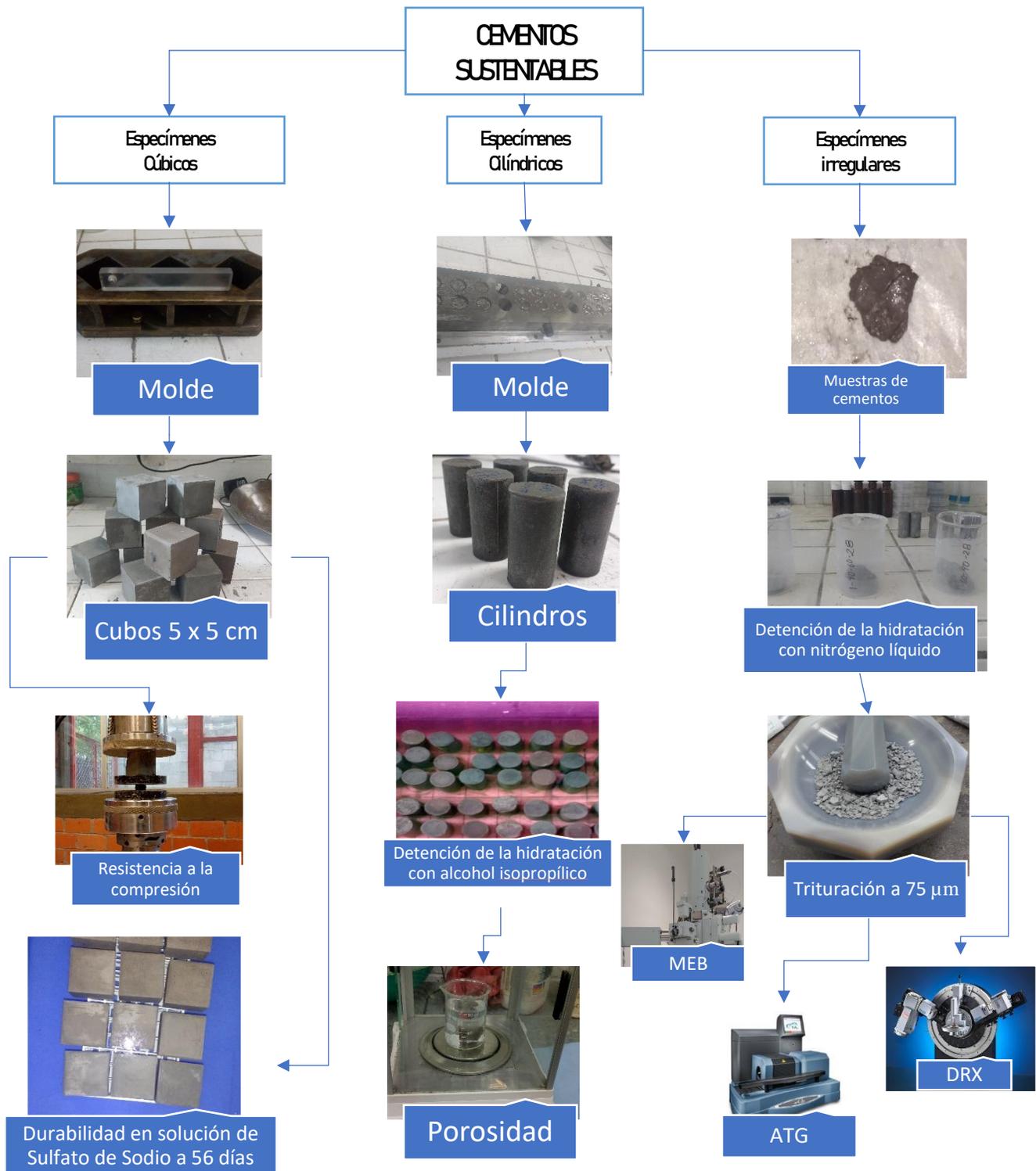


Figura 2.4 Tipos de especímenes elaborados con CPC 30R RS/BRA y RCD-M como sustituyente.

2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Todos los materiales cementicios obtenidos, fueron caracterizados por medio de Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Análisis Termogravimétrico (ATG), las especificaciones de los equipos utilizados se describen a continuación.

2.3.1 Difracción de rayos X (DRX)

Se realizó la caracterización por medio de Difracción de Rayos X (DRX), con el objetivo de conocer las fases químicas cristalinas presentes en los cementos sustentables obtenidos.

El cemento CPC 30R RS/BRA y el residuo RCD-M200, se caracterizaron en un difractómetro de polvos Bruker AXS D8 Advance. La identificación, se realizó con la base de datos PDF-2 (Powder Diffraction File-2) de la International Centre for Diffraction Data 2016 (ICDD).

En el caso de los materiales cementicios, se utilizó un difractómetro de rayos X SIEMENS D500 con lambda de cobre (Cu), monocromador de haz primario y secundario. Para la identificación de fases, se usó la base de datos del Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS).

2.3.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido, se utilizó para conocer la morfología de las materias primas y de los materiales cementicios obtenidos.

El equipo utilizado para obtener las imágenes, fue un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F con aumentos de hasta 1,000,000X con 1nm de resolución. La fuente de electrones es un emisor de ZrO/W.

Adicionalmente, para conocer la composición elemental de las muestras se realizó un análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) con un detector de energía dispersiva OXFORD INCA X-ACT.

2.3.3 Análisis termogravimétrico (ATG)

Se realizó el análisis termogravimétrico (ATG), de los cementos testigo a base de cemento Portland y con 20% de contenido de residuo RCD-M como sustituyente, a las edades de 7 y 28 días. Para conocer el grado de hidratación de los materiales cementantes, así como los compuestos que se forman durante este proceso; principalmente, la presencia de hidróxido de calcio como un indicador de la reacción puzolánica ocurrida en la matriz

cementicia. El análisis se llevó a cabo en un analizador simultáneo SDT Q600 TGA-DSC de TA Instruments.

Se utilizó una rampa de calentamiento de 10 a 1000 °C/min y una atmosfera de nitrógeno (N₂) con 100 mL/min.

2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

El ensayo a compresión simple, se realizó para determinar la influencia de los residuos en las propiedades mecánicas de los materiales cementicios. Se ensayaron 3 especímenes cúbicos de 5×5 cm, a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, en un equipo MTS (figura 2.5) con capacidad de 25 toneladas para pruebas de fatiga, con una velocidad de carga de 4 ton/min.



Figura 2.5 Prueba de resistencia a la compresión.

2.5 POROSIDAD

Las pruebas de porosidad, se llevaron a cabo para determinar la influencia de los residuos de construcción y demolición como materiales de relleno en la matriz cementante. La prueba se realizó mediante el método de inmersión de Arquímedes en dos especímenes cilíndricos por cada cemento obtenido.

Inicialmente, la hidratación de las muestras cilíndricas se detuvo a las edades de 7, 14, 28 y 90 días, mediante su inmersión en alcohol isopropílico durante, aproximadamente 30 días, hasta que ya no se observó un cambio en el peso de los especímenes.

Las muestras obtenidas, se secaron al horno a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas, para obtener el peso con el poro seco libre de agua. Para saturar el espacio de los poros de las muestras, estas se sumergieron en agua durante 24 horas a presión atmosférica. Las muestras se pesaron primero saturadas y después saturadas suspendidas en agua para el cálculo de la porosidad.

2.6 DURABILIDAD

Se realizó la prueba de durabilidad, mediante la inmersión de los materiales cementicios obtenidos en una solución salina de sulfato de sodio. Con el objetivo de comparar la durabilidad de los especímenes de cemento Portland con la de los materiales cementicios sustentables elaborados. Tres especímenes cúbicos de cada mezcla fueron elaborados y curados hasta los 28 días de edad, posteriormente, fueron sumergidos durante 56 días, en una solución salina de sulfato de sodio al 5%. Posteriormente, se monitorearon los cambios de peso y físicos en los especímenes periódicamente. Después del periodo establecido (56 días), los especímenes se probaron a compresión para evaluar los efectos de la solución en cada material cementicio.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización y las pruebas realizadas a las materias primas utilizadas durante el desarrollo experimental de este trabajo.

3.1.1 Cemento

3.1.1.1 Propiedades químicas

Las propiedades químicas del cemento se muestran en la tabla 3.1, donde se observa que sus principales componentes fueron cal combinada (CaO) y sílice (SiO₂). Además, también se determinó la presencia de otros componentes en menores cantidades como alúmina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃), magnesio (MgO), trióxido de azufre (SO₃), óxido de sodio (Na₂O) y óxido de potasio (K₂O). Se calcularon los porcentajes de las fases potenciales de Bogue en el cemento. Se determinó que el cemento estaba constituido por un 59% de alita (C₃S), 14% de belita (C₂S), 4% de aluminato tricálcico (C₃A) y 13% de ferroaluminato tetracálcico (C₄AF), respectivamente. Estos contenidos suman 90% de la composición del cemento y nos indican que es un cemento Portland compuesto (CPC), de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017, la cual indica que este porcentaje debe estar entre 50 y 94% en el caso de un CPC.

Tabla 3.1 Propiedades químicas del cemento CPC 30R RS/BRA.

Componentes		CPC 30R RS/BRA
SiO ₂ – Sílice	%	20.3
Al ₂ O ₃ – Alúmina	%	4.08
Fe ₂ O ₃ – Óxido férrico	%	4.12
CaO – Cal combinada	%	62.4
CaO – Cal libre	%	0.7
MgO – Magnesio	%	1.0
SO ₃ – Trióxido de azufre	%	2.76
Residuo Insoluble	%	0.72
Pérdida por calcinación	%	3.4
Suma		99.48
Álcalis		
Na ₂ O – Óxido de sodio	%	0.19
K ₂ O – Óxido de potasio	%	0.29
Total, de álcalis (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	%	0.38

Fases de Bogue		
C ₃ S – Silicato tricálcico	%	59
C ₂ S – Silicato dicálcico	%	14
C ₃ A – Aluminato tricálcico	%	4
C ₄ AF – Ferroaluminato tetracálcico	%	13

3.1.1.2 Propiedades físicas

En la tabla 3.2, se observan las propiedades físicas del cemento Portland, el cual presentó una consistencia normal de 24,2%, con un tiempo de fraguado inicial y final de 130 y 345 minutos, respectivamente. Así mismo, la resistencia a la compresión alcanzada a la edad de 28 días fue de 37,6 MPa con una relación agua-cemento de 0.5.

Tabla 3.2 Propiedades físicas del cemento CPC 30R RS/BRA.

Propiedades físicas	
Consistencia normal (% agua)	24.2
Superficie específica de Blaine m ² /kg	351
Tiempo de fraguado (min)	
Inicial	130
Final	345
Resistencia a la compresión (MPa)	
28 días	37.6
Relación A/C	0.5

3.1.1.3 Caracterización

Difracción de rayos X

La identificación de las fases cristalinas en el cemento Portland, se obtuvo por medio de difracción de rayos X (DRX). En el difractograma que se presenta en la figura 3.1, se observa la presencia de picos definidos de alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y sulfato de calcio (CS), de acuerdo con las fichas JCPDS 96-153-8414, 96-231-0676, 96-401-4360 y 96-101-0982, respectivamente.

Los resultados anteriores, confirman la composición del cemento Portland, obtenida anteriormente mediante análisis químico.

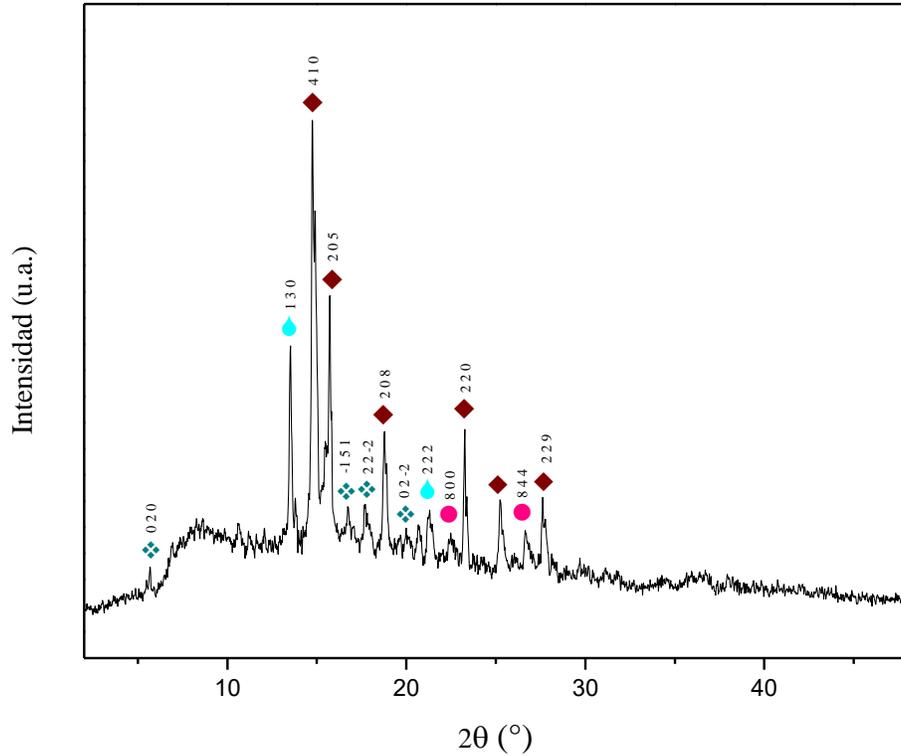


Figura 3.1 Patrón de DRX del cemento Portland CPC 30R RS/BRA.

◆ Silicato tricálcico (alita) ◆ Silicato bicálcico (belita) ◆ Sulfato de calcio ● Aluminato tricálcico

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Las micrografías electrónicas de barrido del cemento Portland CPC 30R RS/BRA, se muestran en la figura 3.2, a 2500 y 5000 aumentos. En la figura 3.2a, se aprecia la morfología irregular del material y partículas de aproximadamente 10 μm con bordes angulosos. En la figura 3.2b, se pueden observar partículas de menor tamaño (1μm), acumuladas sobre las más grandes.

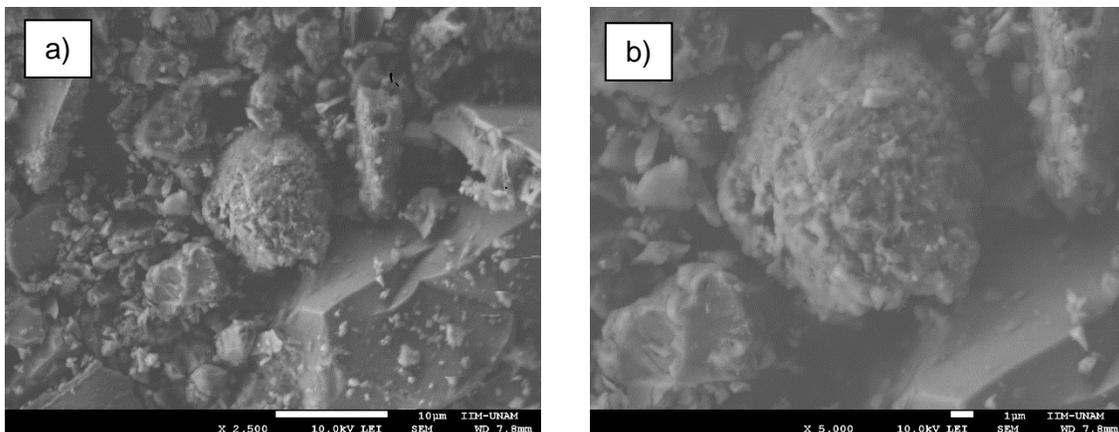


Figura 3.2 Micrografías electrónicas de barrido del CPC 30R RS/BRA a) 2500X b) 5000X.

En la figura 3.3, se presenta el espectro del análisis químico elemental obtenido mediante espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS). En el espectro, se observa que predominan picos de oxígeno (O), calcio (Ca) y silicio (Si), como era de esperarse para un cemento Portland. Así mismo, también encontramos potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg) y aluminio (Al) en menores cantidades, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el análisis químico.

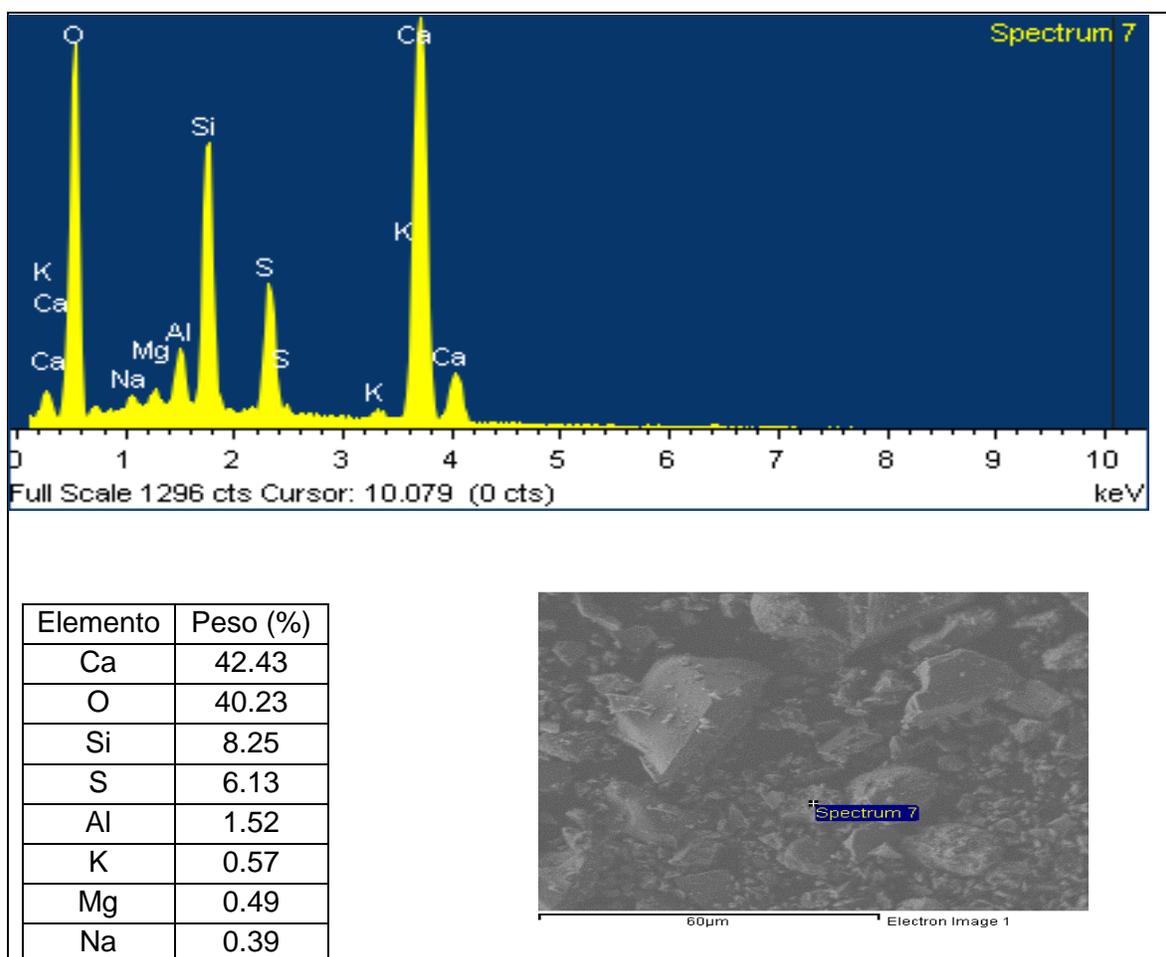


Figura 3.3 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del CPC 30R RS/BRA.

3.1.2 Residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M)

3.1.2.1 Propiedades químicas

En la tabla 3.3, se presentan los resultados del análisis químico de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M). Así mismo, también aparecen los

requerimientos químicos para puzolanas según la normatividad para fines comparativos. Se observa que en cuanto a la sumatoria del contenido de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) correspondiente a 67.1%, el RCD-M cumple con el mínimo requerido para clasificarse como una puzolana clase C. Sin embargo, este valor no está muy por debajo de las puzolanas clase F y N que requieren un 70% mínimo. El RCD-M contiene un 2.7% de trióxido de azufre, por lo que se encuentra dentro de lo permitido para las tres clases de puzolanas. En cambio, la pérdida por calcinación, la humedad y los álcalis disponibles sobrepasan los límites establecidos.

Tabla 3.3 Propiedades químicas del residuo RCD-M200.

Especificación	RCD-M200	Clase F [%]	Clase N [%]	Clase C [%]
Dióxido de silicio (SiO_2) + óxido de aluminio (Al_2O_3) + óxido de hierro (Fe_2O_3), min %	67.1	70	70	50
Trióxido de azufre (SO_3), max %	2.7	5	4.0	5.0
Pérdida por calcinación, max %	11.4	6	10.0	6.0
Humedad, max %	19.1	3	3.0	3.0
Álcalis disponibles (Na_2O), max %	3.4	1.5	1.5	1.5

3.1.2.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los residuos de construcción y demolición mixtos se presentan en la tabla 3.4. Se observa que, a los 7 y 28 días, el RCD-M200 presentó un índice de actividad puzolánica mucho mayor al mínimo solicitado por las normas y una densidad de 2.4 g/cm^3 .

Tabla 3.4 Propiedades físicas del residuo RCD-M200.

Especificación	RCD-M200	Clase F [%]	Clase N [%]	Clase C [%]
Índice de actividad puzolánica mínimo % del control a 7 días	109	75	75	75
Índice de actividad puzolánica mínimo % del control a 28 días	104	75	75	75
Densidad g/cm^3	2.4			

De acuerdo con los resultados anteriores, según sus índices de actividad puzolánica, el RCD-M se puede considerar como un material puzolánico.

3.1.2.3 Granulometría

En tabla 3.5, se muestran los resultados del análisis granulométrico de los residuos de construcción y demolición mixtos. Se presenta la abertura de cada tamiz en pulgadas, milímetros y micrómetros; así como la cantidad de material retenido en cada tamiz, y sus respectivos porcentajes. En las columnas siguientes se presentan el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje de material que pasa, el cual fue el que se utilizó para elaborar la gráfica de la figura 3.4. En la última columna de la tabla, se presentan los límites inferior y superior entre los que debe estar la composición granulométrica de una arena según la norma mexicana NMX-C-077-ONNCCE.

En la figura 3.4, se presenta la curva granulométrica. Se observa en color rojo la curva para los residuos de construcción y demolición mixtos, y en color negro los límites granulométricos. De acuerdo con lo anterior, el RCD-M no cumple con la granulometría requerida para ser utilizado como agregado en el concreto por su alto contenido de materiales finos. Sin embargo, en esta investigación el material no fue utilizado como agregado sino como una adición puzolánica. Es decir, los materiales de interés para este proyecto fueron los RCD-M con un tamaño de partícula de entre 150 y 45 μm . De acuerdo con lo anterior, para la elaboración de los cementos sustentables se utilizaron los materiales retenidos en las mallas 100, 200 y 325, correspondientes al 23% del material del banco.

Tabla 3.5 Composición granulométrica del residuo mixto.

No. Malla [Pulgadas]	Abertura [mm]	Abertura [micras]	Retenido [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Acumulado [%]	Porcentaje que pasa [%]	Límites NMX-C- 077-ONNCCE
4 (0.187)	4.76	4760	88.50	5.90	6	94	95-100
8 (0.0937)	2.38	2380	195.50	13.04	13	81	80-100
16 (0.0469)	1.16	1160	230.19	15.30	15	65	50-85
30 (0.0234)	0.595	595	231.66	15.45	15	50	25-60
50 (0.0117)	0.297	297	226.36	15.09	15	35	10-30
100 (0.0059)	0.149	149	191.13	12.74	13	23	2-10
Charola			336.26	22.49	23	0	
SUMAS			1499.61	100	100		

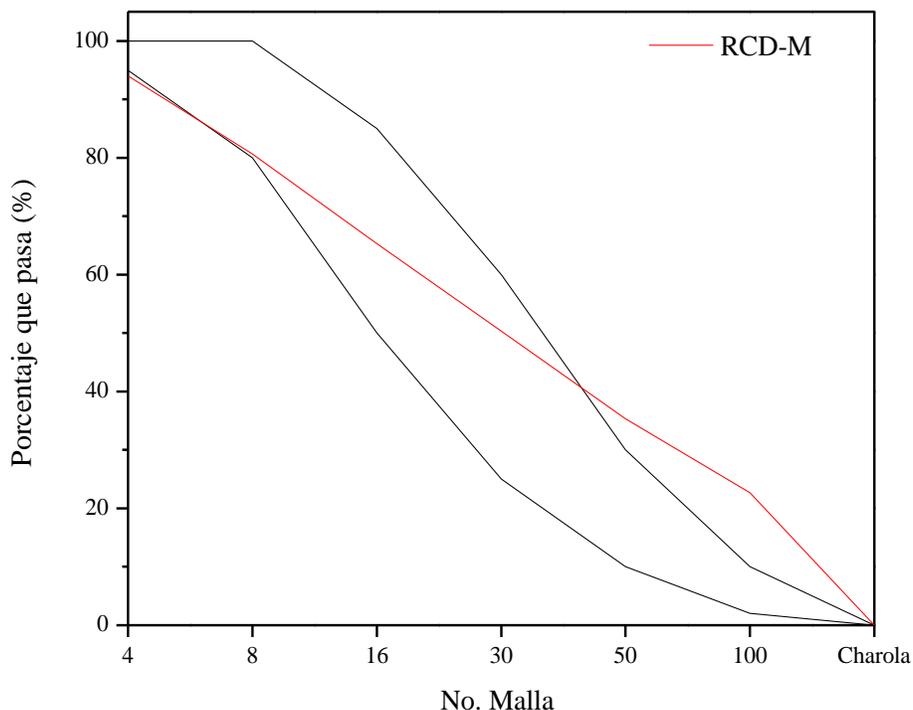


Figura 3.4 Curva granulométrica de los residuos de construcción mixtos RCD-M.

3.1.2.4 Caracterización

Difracción de rayos X (DRX)

Se realizó el análisis por difracción de rayos x de los residuos de construcción y demolición mixtos, para conocer la composición química de estos residuos. En la figura 3.5, se presenta el patrón de difracción de rayos X del residuo RCD-M200, donde se identificaron las siguientes fases cristalinas: aluminosilicato de calcio, carbonato de calcio, óxido de silicio y sulfato de calcio, las cuales corresponden a las fichas JCPDS 00-016-1202, 01-072-1937, 00-004-1245, 00-006-0047, respectivamente.

En los picos más intensos del difractograma, encontramos la presencia de fases aluminosas y silíceas resultados que coinciden con los del análisis químico, esto es importante, porque como se comentó anteriormente, las puzolanas son materiales silíceos o silicoaluminosos, y son estos compuestos los que permiten que se lleve a cabo la reacción puzolánica.

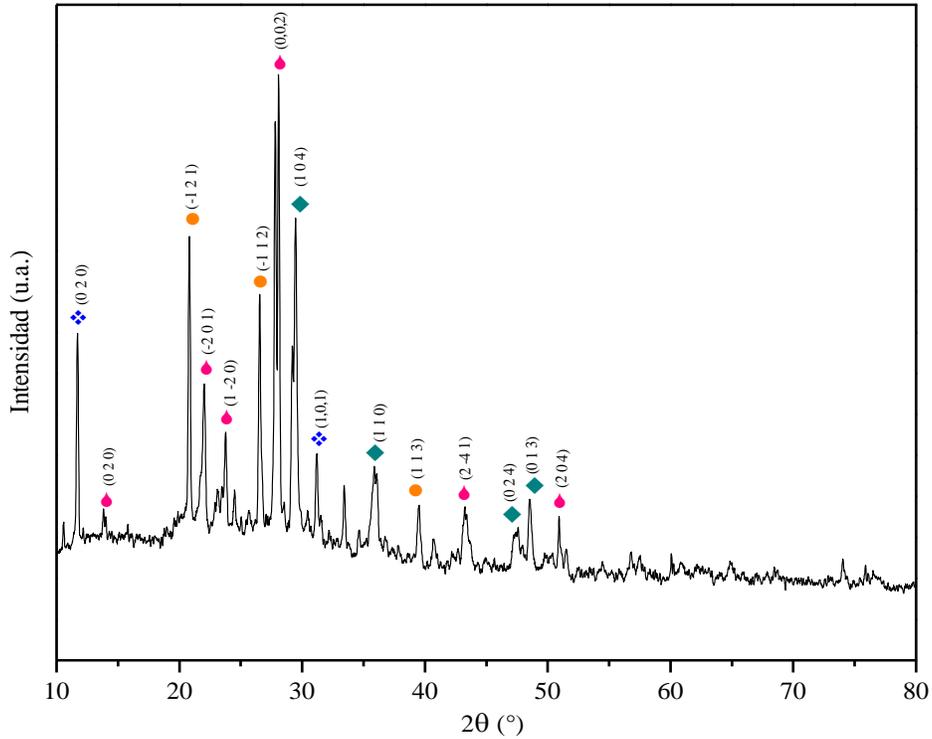


Figura 3.5 Patrón de DRX del residuo de construcción y demolición mixto de 75 μ m.

● Óxido de silicio ◆ Aluminosilicato de calcio ◆ Carbonato de calcio ◆ Sulfato de calcio

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se obtuvieron las micrografías electrónicas de barrido del RCD-M, para conocer la morfología del material. El RCD-M, presenta una morfología irregular y estructura porosa. Las partículas se caracterizan por tener formas de agujas y tipo tabulares de hasta 10 μ m (figura 3.6a), así como algunos aglomerados de partículas pequeñas de 1 μ m (figura 3.6b).

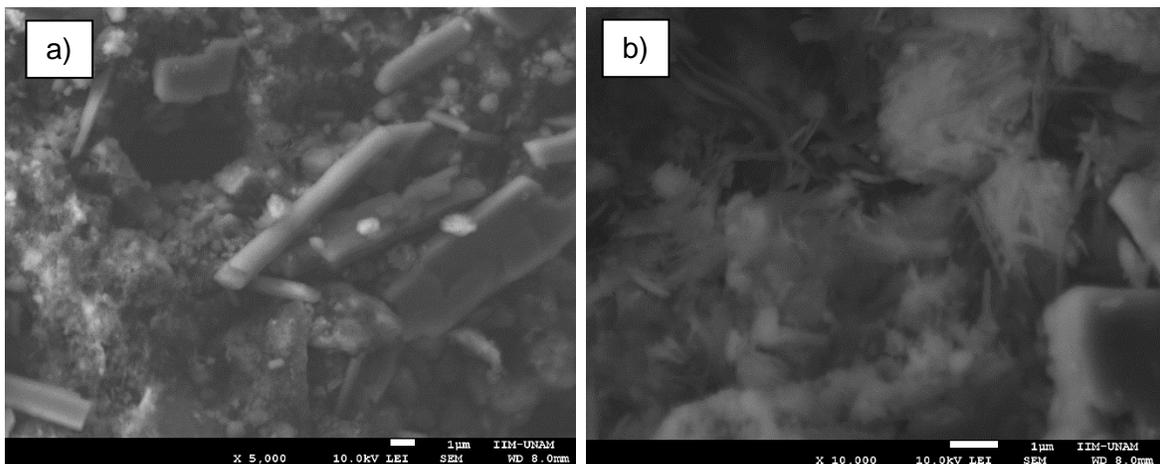


Figura 3.6 Micrografías del microscopio electrónico de barrido del RCD-M200 a)5,000X b)10,000X.

En la figura 3.7, se presenta el análisis químico elemental de los residuos obtenidos por espectrometría de dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés). Se observa que en el espectro predominan picos de silicio (Si) y oxígeno (O) y en menores cantidades se presentan picos de calcio (Ca), Sodio (Na), magnesio (Mg), aluminio (Al), potasio (K) y níquel (Ni), este último, proveniente probablemente del acero inoxidable utilizado en la construcción. Cabe señalar, que estos resultados concuerdan con los obtenidos en las pruebas de composición química y de difracción de rayos x, confirmando que los residuos de construcción y demolición son materiales con altos contenidos de compuestos aluminosilíceos.

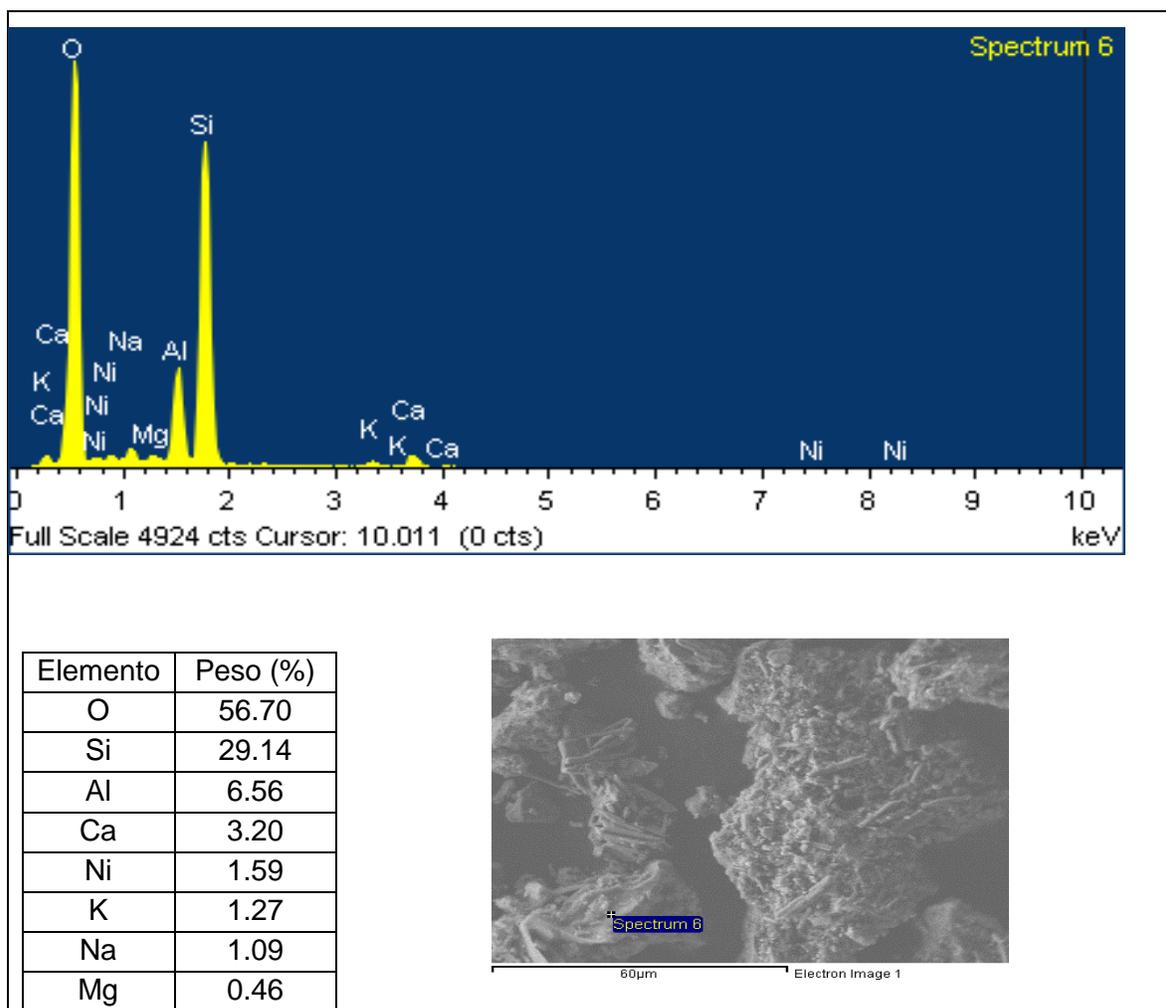


Figura 3.7 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M200.

3.2 NUEVOS CEMENTOS SUSTENTABLES

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los materiales cementicios sustentables obtenidos en el presente trabajo.

3.2.1 Resistencia a la compresión

Los resultados mostrados, corresponden a las pruebas de resistencia a la compresión simple de los especímenes cúbicos de 5 cm a las edades de 3, 7, 28 y 90 días. Cada dato, es resultado de la resistencia a compresión de un promedio de tres especímenes ensayados, debido a las variaciones que se presentan en los resultados individuales de las muestras.

En la figura 3.8, se presenta la resistencia a la compresión de los cementos testigo (CPC) y de las pastas obtenidas con diferentes porcentajes de RCD-M100 como material de sustitución del cemento Portland.

En color azul, se observa la pasta testigo elaborada únicamente con CPC 30R RS/BRA, la cual presentó una resistencia aproximada de 320.38 kg/cm² a la edad de 3 días. Como era de esperarse, su resistencia fue aumentando conforme a la edad, con 7 días los especímenes alcanzaron 389.13 kg/cm² y a los 28 y 90 días, 538.32 y 628.10 kg/cm², respectivamente.

Posteriormente, observamos los resultados de las pastas con RCD-M100. En general, se presentó pérdida de resistencia conforme aumentó el porcentaje de remplazo de cemento Portland con RCD-M100. De tal forma, que las pastas con 20% de residuo (RCD-M100-20) alcanzaron a los 3 días de edad, 192.13 kg/cm²; a los 7 días, 263.12 kg/cm²; a los 28 días, 392.45 kg/cm² y a los 90 días, 628.10 kg/cm², respectivamente. De acuerdo con lo anterior, se observa que estos cementos presentaron un decremento en la resistencia en comparación con el testigo a los 3, 7, 28 y 90 días del 40, 35, 27 y 17%, respectivamente. Es decir, la resistencia disminuyó en menor porcentaje a mayores edades debido a la acción puzolanica.

Aumentar el porcentaje de remplazo de CPC por residuos a 40%, representó para los cementos sustentables una mayor pérdida de resistencia. Los materiales tipo RCD-M100-40, alcanzaron los 90 kg/cm² a los 3 días de edad, resistencia que aumentó a 163.36 kg/cm² con 7 días de edad, 283.29 kg/cm² a los 28 días y 519.30 kg/cm² a los 90 días. Es decir, los especímenes presentaron pérdidas de resistencia del 71, 58, 47 y 39% a las diferentes edades respecto a los testigos de CPC. Estas pérdidas de resistencia son mayores en

comparación con los cementos que tienen solamente un 20% de sustitución con el mismo tamaño de partícula (RCD-M100-20).

Los cementos elaborados con un 60% de sustitución de residuos (RCD-M100-60), presentaron una pérdida de resistencia mayor que los cementos anteriores con menor porcentaje de RCD-M100. Alcanzaron solo 42.27, 68.21, 152.47 y 242.36 kg/cm² a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente.

Por último, dentro del grupo de los cementos elaborados con RCD-M100, la pasta RCD-M100-80 fue la menos favorable. El cemento alcanzo únicamente 11.41 kg/cm² a los 3 días, así como 24.37, 44.29 y 111.87 kg/cm² a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. Es decir, se presentaron pérdidas de resistencia respecto al cemento testigo, de 96% a edades tempranas (3 días) al 81% a los 90 días.

Analizando los resultados anteriores, los cementos elaborados con residuos mixtos con un tamaño de partícula de 150 µm (RCD-M100), que tenían 20% de residuos como remplazo del CPC, fueron los que presentaron mejores resultados. Es decir, la pérdida de resistencia fue menor comparada con las resistencias de las pastas con mayores contenidos de RCD-M100.

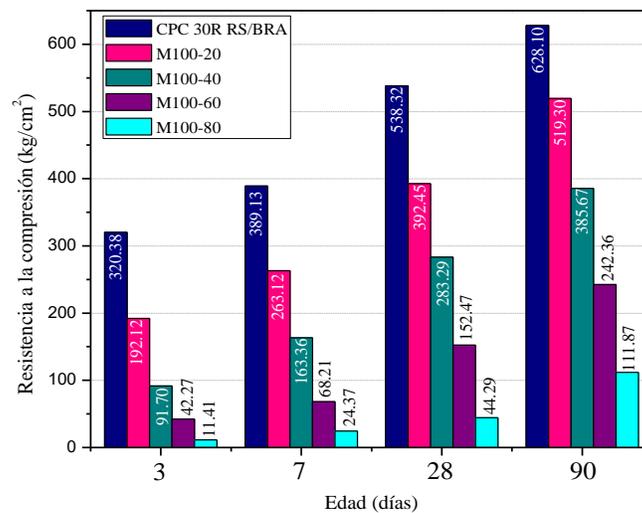


Figura 3.8 Resistencia a la compresión simple de pastas elaboradas con el material RCD-M100.

En la figura 3.9, se presentan los resultados de resistencia a la compresión de los cementos elaborados con RCD-M200, es decir con un tamaño de partícula de 75 µm.

Como se mencionó anteriormente, las resistencias más altas a cada edad corresponden a la pasta testigo, analizada anteriormente. Se observa en todos los casos, que la resistencia

aumentó conforme a la edad. En cambio, la resistencia fue disminuyendo conforme aumentó la cantidad de residuos en la matriz cementicia.

El cemento con 20% de residuo como sustitución (RCD-M200-20), presentó resistencias de 179.06, 290.92, 473.91 y 526.03 kg/cm² a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente. Lo que equivale a 44, 25, 12 y 16% de pérdida de resistencia con respecto al testigo de cemento Portland.

Al aumentar el contenido de residuo en la matriz cementicia a 40% (RCD-M200-40), se presentaron resistencias de 103.20, 155.03, 262.71 y 401.74 kg/cm² a los 3, 7, 28 y 90 días. Es decir, se observaron pérdidas en la resistencia de 68, 60, 51 y 36%, respectivamente; en comparación con los testigos de CPC.

El siguiente cemento que se presenta es el RCD-M200-60, el cual presentó resistencias de 41.71, 81.36, 166.68 y 276.77 kg/cm² a los 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente. Estas resistencias decrecieron en comparación con las del cemento testigo en un 87, 79, 69 y 56%, respectivamente con las edades.

El último cemento sustentable mostrado en la figura 3.9 es el RCD-M200-80, este material alcanzó resistencias de 21.07 kg/cm² a los 3 días, 39.66 kg/cm² a los 7 días, 121.69 kg/cm² a los 28 días y 151.11 kg/cm² a los 90 días de edad. Estas resistencias indican una alta pérdida de resistencia de 93, 90, 77 y 76% respecto al cemento Portland.

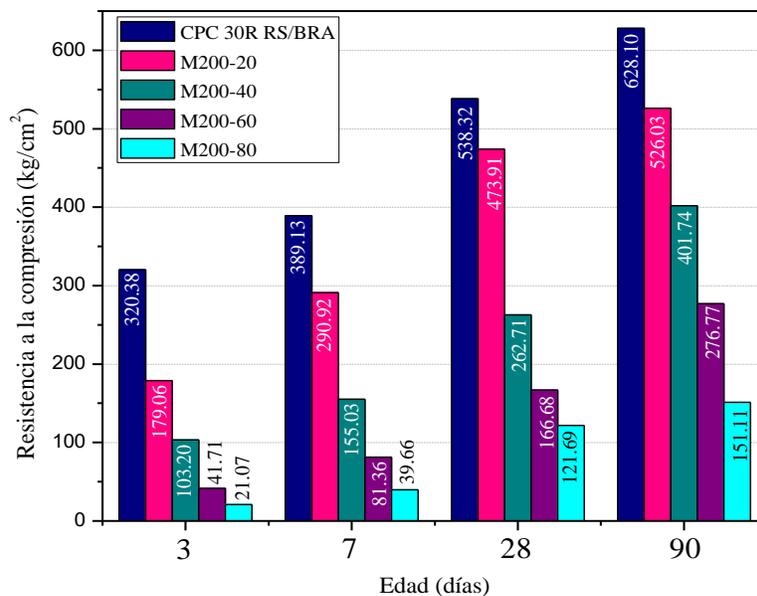


Figura 3.9 Resistencia a la compresión simple del material RCD-M200.

En la figura 3.10, se presentan los cementos sustentables elaborados con residuos que se caracterizan por tener un tamaño de partícula de 45 μm (RCD-M325) y con 20, 40, 60 y 80% de sustitución por cemento Portland.

Analizando el comportamiento del cemento elaborado con 20% de sustitución de residuo (RCD-M325-20), este cemento presentó resistencias de 194.98, 332.32, 475.14 y 537.10 kg/cm^2 a los 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente lo que representa pérdidas de resistencia del 39, 15, 12 y 14%, de acuerdo con cada edad.

Los especímenes con 40% de adición (RCD-M325-40), perdieron respecto al CPC 30R RS/BRA un 66% de resistencia a los 3 días es decir alcanzaron 108.68 kg/cm^2 , a los 7 días la resistencia fue de 241.47 kg/cm^2 equivalente a 38% de pérdida, con 28 días la resistencia fue de 297.51 kg/cm^2 lo que corresponde al 45% de pérdida de resistencia y a los 90 días, la resistencia fue de 411.71 kg/cm^2 es decir 34% de pérdida respecto al testigo.

Con 60% de residuo (RCD-M325-60) las resistencias fueron de 51.23, 104.67, 248.32 y 310.35 kg/cm^2 lo que corresponde al 84, 73, 54 y 51% de pérdida a los 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente.

Finalmente, los cementos con 80% de residuo (RCD-M325-80), fueron los más desfavorecidos de esta serie, presentando resistencias de 9.94, 39.88, 132.93 y 152.25 kg/cm^2 , es decir, presentaron pérdidas de 97, 90, 75 y 76% a los 3, 7, 28 y 90 días, respectivamente.

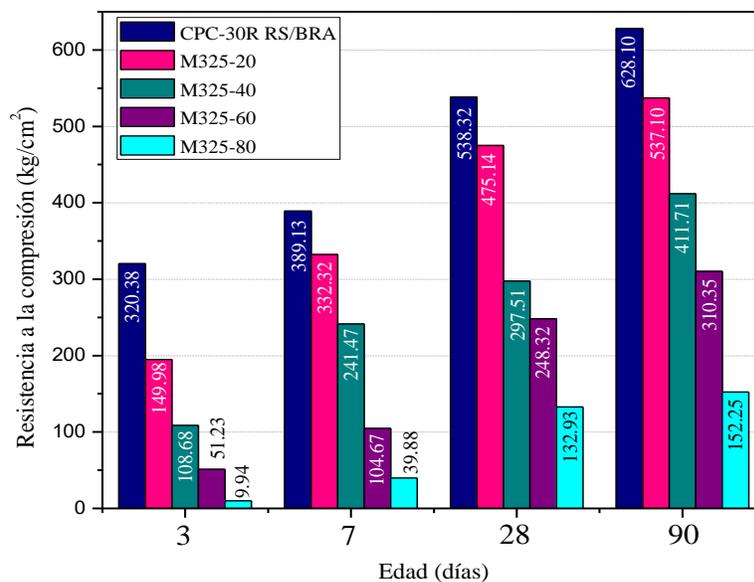


Figura 3.10 Resistencia a la compresión simple del material RCD-M325.

De acuerdo con los resultados anteriores, se observó que la resistencia fue aumentando con el incremento de la edad y fue disminuyendo conforme se incrementó el porcentaje de remplazo de cemento Portland con RCD-M. Por otro lado, los mejores resultados obtenidos fueron los correspondientes a los cementos elaborados con RCD-M325 de 45 μm . Sin embargo, no presentaron cambios significativos respecto a los cementos tipo RCD-M200 de 75 μm . Los resultados menos favorables corresponden al material tipo RCD-M100 de 150 μm .

En las tres series de cementos sustentables, el mejor resultado obtenido corresponde a los cementos con 20% de sustitución de cemento Portland, estos resultados se comparan y analizan de manera detallada a continuación.

En la figura 3.11, se presenta la comparación del comportamiento de las pastas con 20% de residuo y una variación en el tamaño de partícula del residuo de 150 a 45 μm . Se observa una diferencia en las resistencias de los cementos a edades tempranas, ocasionada por el tamaño de partícula. Las pastas tipo RCD-M200 y RCD-M325 al tener mayor área superficial de contacto, tuvieron mejor comportamiento que las pastas RCD-M100. Con 28 días de edad, las adiciones RCD-M200 y RCD-M325 presentaron resistencias muy similares y el RCD-M100 quedó por debajo. Esto se debe a que el RCD-M100 tiene un mayor tamaño de partícula, por lo que se esperaría una menor área superficial que ocasiona que la reacción puzolánica sea más lenta en estos materiales. Sin embargo, a los 90 días las tres pastas alcanzaron resistencias similares. Es decir, después de 90 días de edad están completamente activadas las reacciones puzolánicas en todos los cementos sustentables, ya que las resistencias son similares. Adicionalmente, como se mencionó anteriormente las adiciones pueden funcionar de dos formas distintas, como material de relleno o como puzolanas. De acuerdo con esto, el material RCD-M100 de 150 μm por tener un tamaño de partícula mayor podría no estar cumpliendo su función como material de relleno y además se le podría atribuir una reacción puzolánica más lenta a edades tempranas, lo cual se ve reflejado en sus resistencias.

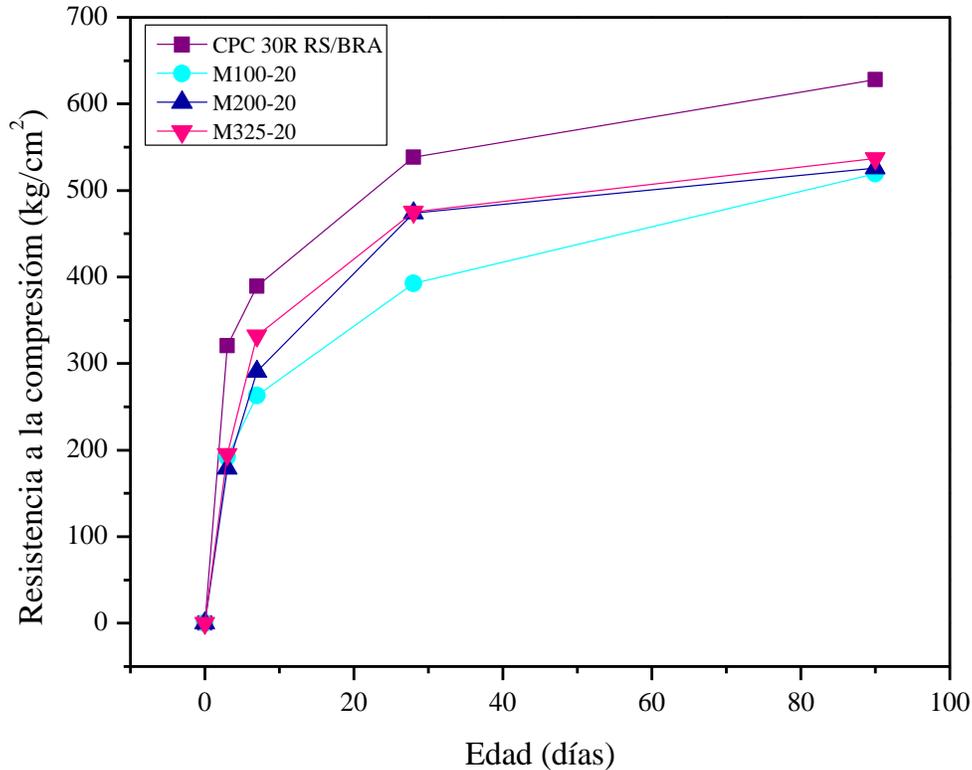


Figura 3.11 Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión simple de las pastas con 20% de RCD-M con una variación del tamaño de partícula de 150 (M100), 75 (M200) y 45 μm (M325).

3.2.2 Porosidad

Los resultados obtenidos de las pruebas de porosidad por el método de inmersión de Arquímedes se presentan a continuación.

En la figura 3.12, se presenta el porcentaje de porosidad de los especímenes elaborados con el material RCD-M100 a diferentes edades. Se aprecia, que con el aumento de la edad la porosidad disminuyó, siendo la pasta menos porosa la elaborada con CPC 30R RS/BRA y el material con mayor porosidad el que contiene 80% de residuos en la matriz cementicia.

Recapitulando lo mencionado anteriormente, estos cementos fueron elaborados con materiales con un tamaño de partícula de 150 μm , es decir, con la adición con un mayor tamaño de partícula. En este caso, las partículas de cemento por ser de menor tamaño (aproximadamente 10 μm) rellenaban los espacios entre las partículas del residuo, de tal forma que, al disminuir la cantidad de cemento en la pasta, la porosidad aumentó.

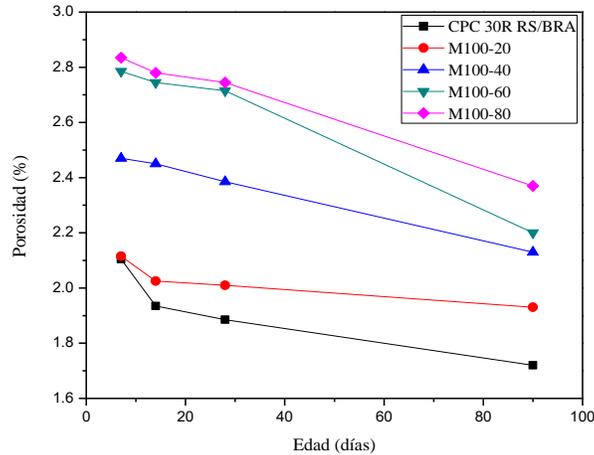


Figura 3.12 Porosidad de materiales tipo RCD-M100.

La figura 3.13, presenta los resultados de porosidad para los cementos que contiene residuos tipo M200. Al igual que en el caso anterior, se observa que la porosidad disminuyó con el aumento de la edad y aumentó con el incremento del porcentaje de remplazo de cemento con residuos. El material cementante que mayor porosidad presentó fue el que contenía 80% de residuo.

En este caso, el tamaño de partícula del RCD-M fue de 75 μm , por lo que nuevamente, los especímenes que contenían menos cemento presentaron mayor porosidad.

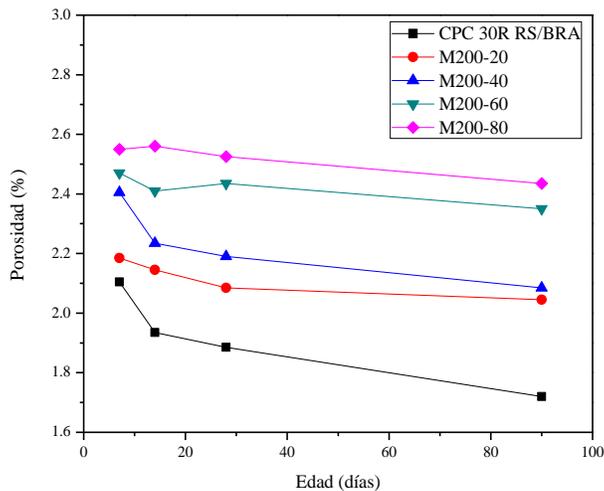


Figura 3.13 Porosidad de materiales tipo RCD-M200.

En la figura 3.14, se presentan los porcentajes de porosidad obtenidos por medio del método de inmersión de Arquímedes de los cementos elaborados con residuo retenido en la malla 325. Siguiendo la tendencia de los especímenes mencionados anteriormente, el

porcentaje de porosidad disminuyó al aumentar la edad de las pastas, nuestro testigo presentó menor porosidad que las otras pastas y al aumentar el porcentaje de residuo el porcentaje de porosidad también incremento. Sin embargo, en este caso se observa que la diferencia del porcentaje de porosidad es menor que el observado con partículas de mayor tamaño.

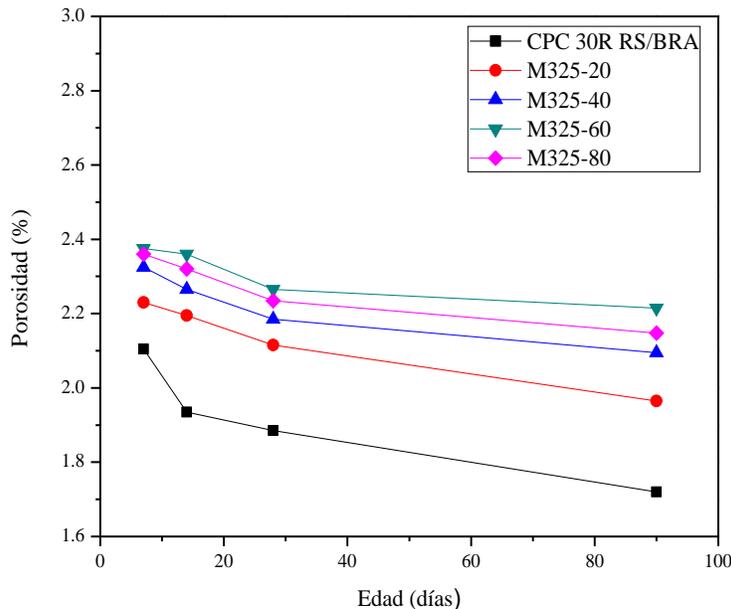


Figura 3.14 Porosidad de materiales tipo RCD-M325.

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el tamaño de partícula de los residuos de construcción y demolición fue un factor importante que influyó en la porosidad de los especímenes. En general, las pastas elaboradas con RCD-M100 presentaron porosidades mayores a las que presentaron las pastas RCD-200 y RCD-325. Como se mencionó anteriormente, los residuos de construcción y demolición mixtos están actuando como materiales de relleno por lo que el tamaño de partícula fue determinante en la porosidad de los especímenes.

Por otro lado, en las pastas elaboradas con 20% de residuo, el tamaño de partícula no fue determinante, ya que, los tres casos reportaron resultados similares, entre 1.9 y 2.4% de porosidad. Se puede atribuir este comportamiento al bajo porcentaje de remplazo de cemento Portland en las pastas. Adicionalmente, es importante mencionar, que el método de porosidad por inmersión de Arquímedes, nos permite obtener valores aproximados de la porosidad de la matriz cementicia relacionados con el poro abierto. Sin embargo, con

este método no se puede medir los poros en las interfases o interconectados, por lo que los valores obtenidos nos dan una idea cualitativa de la porosidad en el material.

3.2.3 Durabilidad

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas del análisis visual de los especímenes sumergidos en una solución de sulfato de sodio al 5% para analizar su durabilidad. La figura 3.15, presenta la evolución física de los especímenes testigo CPC 30R RS/BRA.

Se puede observar que, los primeros días en la solución el espécimen no sufrió cambios detectables a simple vista. Con el paso de los días, se comenzó a presentar pérdida de material, así mismo observamos que a partir de los 56 días los especímenes comenzaron a presentar cambios de coloración.

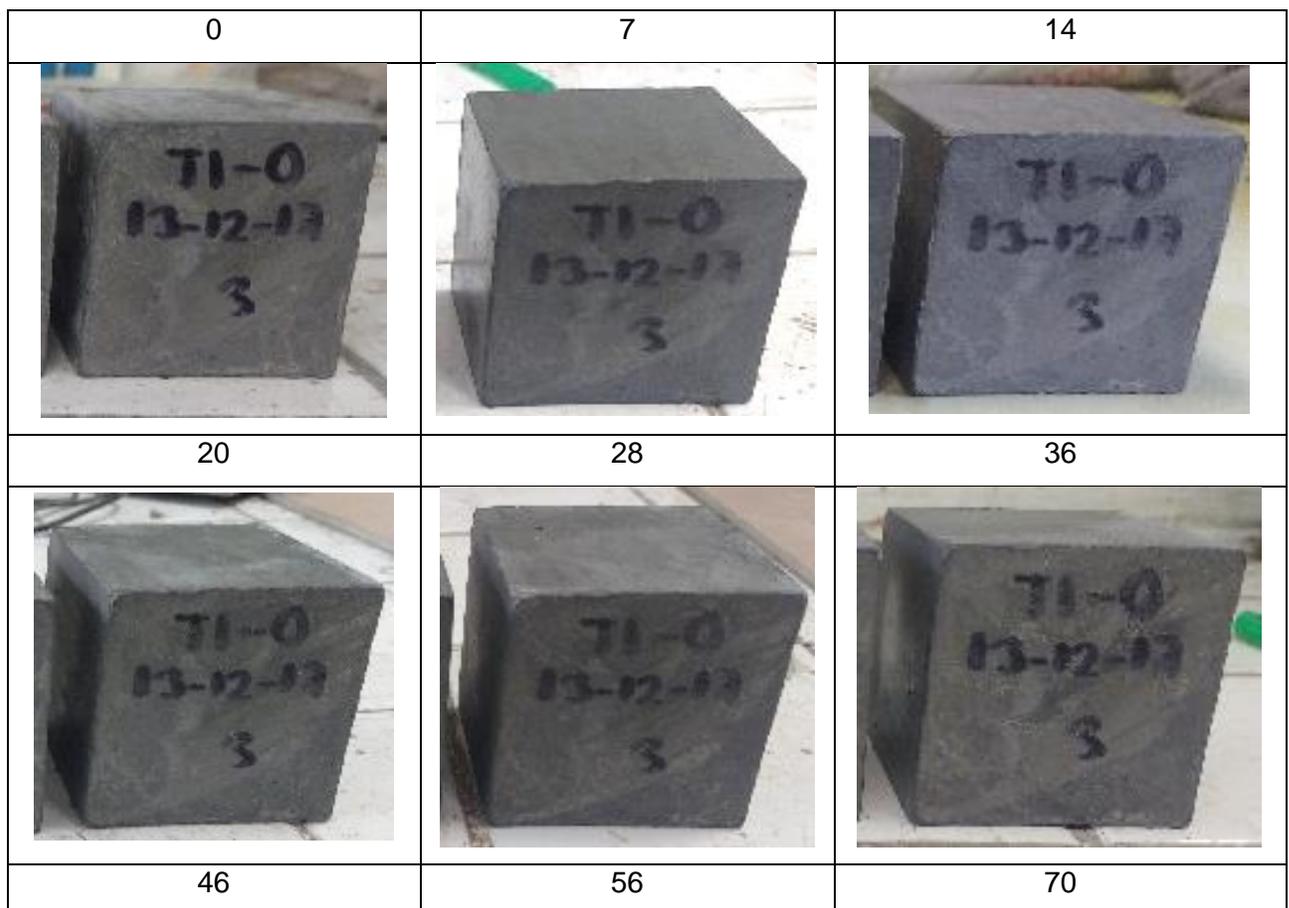




Figura 3.15 Testigo CPC 30 RS/BRA en solución de sulfato de sodio a diferentes edades (edad en días).

La figura 3.16, presenta las imágenes de los especímenes elaborados con RCD-M200 con 20% de adición y 80% de cemento Portland. Las pastas no presentaron cambios detectables a simple vista los primeros días de la prueba. Sin embargo, a los 70 días, los especímenes comenzaron a presentar un ligero cambio en la coloración mediante la presencia de manchas.

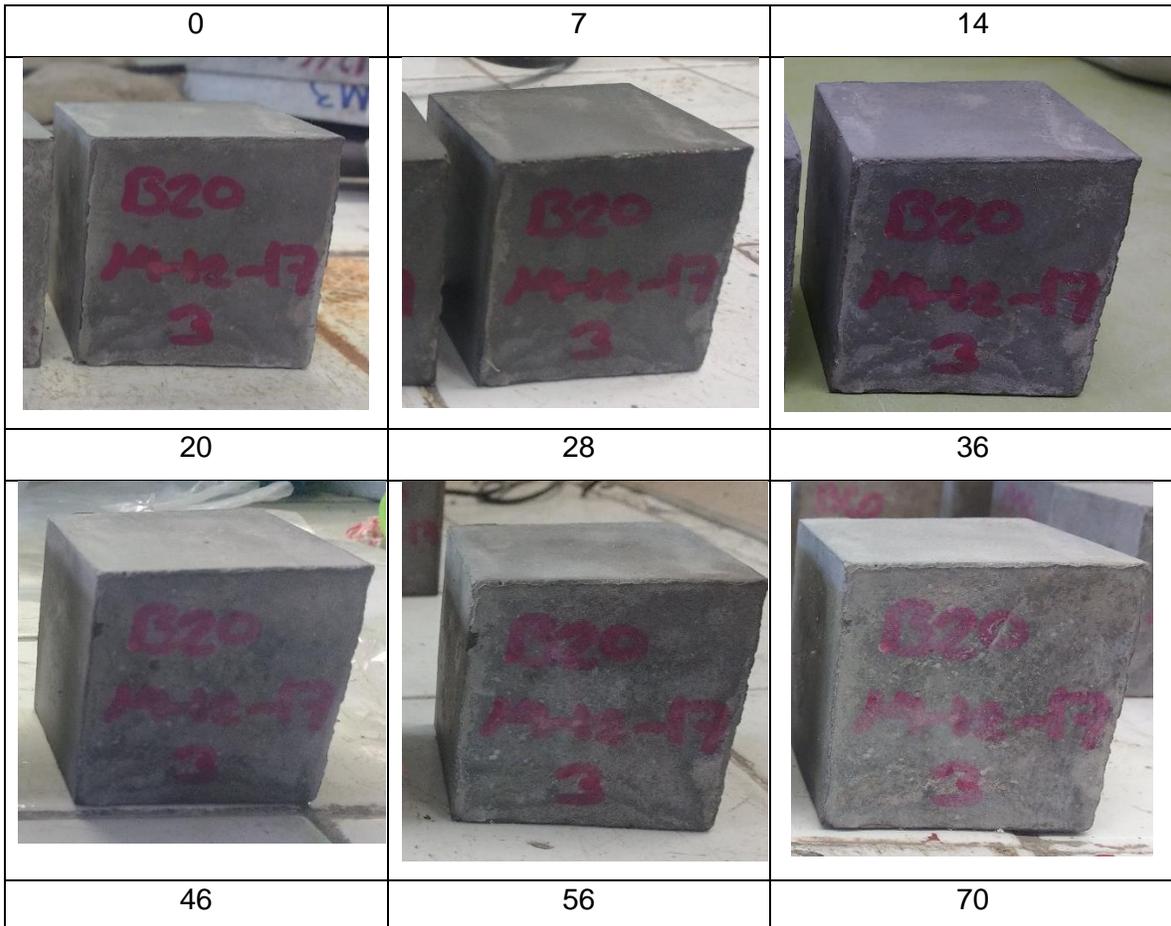




Figura 3.16 Pasta RCD-M200-20 en solución de sulfato de sodio.

En la figura 3.17, se observa la evolución de los especímenes RCD-M200-80, es decir, los elaborados con la adición de 75 μm y el mayor porcentaje de remplazo de la serie. En las imágenes se aprecia que los especímenes no presentaron cambios hasta los 46 días, edad en la que se empezó a observar una pigmentación en tonos rojizos y marrones, a diferencia de los especímenes RCD-M200-20, los cuales presentaron estos cambios hasta los 76 días.

Por otro lado, en los recipientes donde se realizó la prueba de durabilidad se observó que los especímenes estaban presentando pérdida de material, el cual se acumulaba en el agua de la solución. Como se mencionó anteriormente, esto también ocurrió en las muestras del cemento testigo.

0	7	14
		
20	28	36

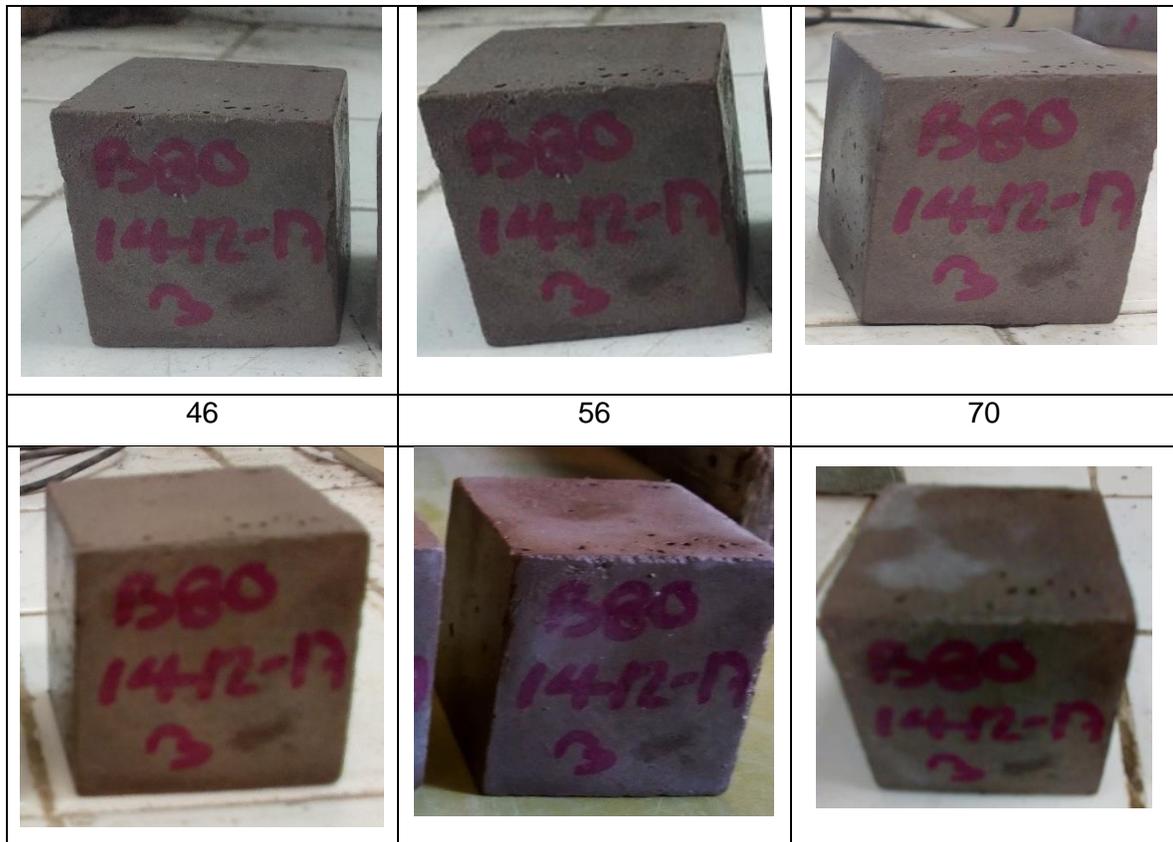


Figura 3.17 Pasta RCD-M200-80 en solución de sulfato de sodio.

En la Fig. 3.18, se compara el cambio de peso de los especímenes elaborados con la adición RCD-M100. Se puede observar que, al paso de los días, los especímenes comenzaron a absorber el agua de la solución e incrementaron su peso. Los especímenes testigo, fueron los que menor incremento presentaron respecto a su peso inicial y los elaborados con M100-80 fueron los que mayor incremento de peso presentaron. Para explicar este comportamiento, debemos recordar que el RCD-M es un material que presenta un alto nivel de absorción de agua, por lo tanto, entre mayor contenido de RCD-M tuvo el cemento, mayor fue el nivel de absorción de agua y mayor fue el incremento de peso. Por otro lado, los especímenes que contenían 20 y 40% de adición presentaron resultados muy similares al cemento testigo, a pesar de que ambos cementos ya contenían RCD.

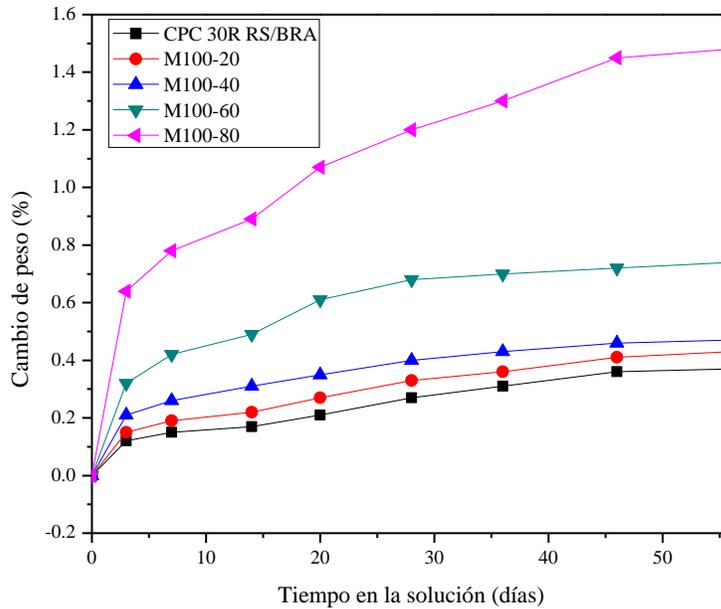


Figura 3.18 Cambio de peso de los especímenes elaborados con RCD-M100 en solución de sulfato de sodio.

La Fig. 3.19, presenta el cambio de peso de peso de los especímenes elaborados con la adición RCD-M200. Se puede observar nuevamente, que entre más contenido de adición mayor fue el incremento de peso. De la misma manera que en el caso anterior, los especímenes con contenidos de 20 y 40% de RCD-M200 presentaron un comportamiento similar a los testigos. Sin embargo, todos los cementos presentaron un menor cambio de peso en comparación con los cementos de residuos RCD-M100.

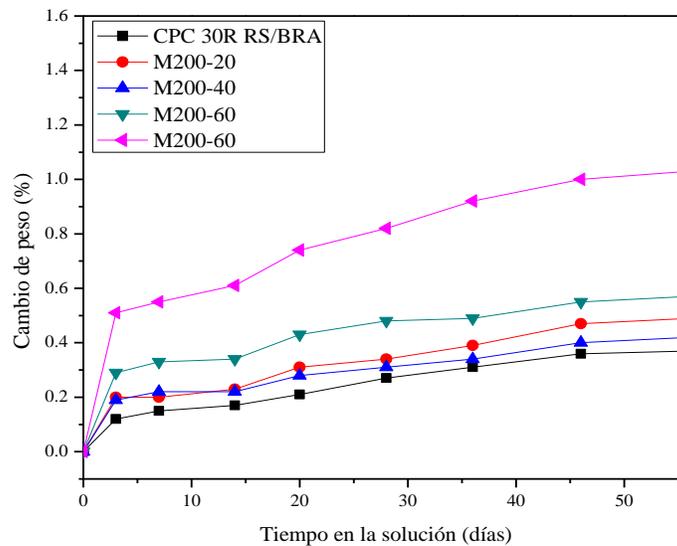


Figura 3.19 Cambio de peso de los especímenes elaborados con RCD-M200 en solución de sulfato de sodio.

Analizando los resultados anteriores, se puede observar que el material RCD-M200 ocasionó una menor absorción que el material RCD-M100 con mayor tamaño de partícula. De acuerdo con lo anterior, los cementos con residuos de 75 μm no absorben tanta agua debido a que las partículas están activadas realizando la reacción puzolánica en la matriz cementicia de manera inicial. En cambio, los cementos con partículas más grandes (150 μm) al tener menor área superficial están menos activas para la reacción puzolánica y reaccionan inicialmente absorbiendo más agua.

En ambos casos, los especímenes elaborados con 20 y 40% de sustitución de cemento Portland, presentaron resultados muy similares a los especímenes testigo, además de tener comportamientos parecidos independientemente de si se trató de adición RCD-M100 o RCD-M200. Sin embargo, en el caso de las pastas que contenían 60% de residuo, los especímenes elaborados con RCD-M100 presentaron una absorción mayor que su similar de material RCD-M200. El caso de las muestras con 60% de RCD fue aún mayor la diferencia presentada entre los dos tipos de materiales.

Todos los especímenes estuvieron 56 días en la solución salina de sulfato de sodio. Posteriormente, fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión para determinar de manera indirecta la migración de iones sulfato (SO_4^{2-}) al interior de la matriz cementicia por la formación de microestructuras que reducen las propiedades mecánicas.

En la figura 3.20, se observan dos líneas correspondientes a las resistencias a compresión de los cementos sustentables con residuos tipo RCD-M100 y RCD-M200. Las resistencias fueron obtenidas después de que los especímenes estuvieron inmersos 56 días en la solución de sulfato de sodio. Así mismo, se presenta un punto con el resultado del cemento testigo, bajo las mismas condiciones. En ambos casos, la tendencia marca menor resistencia conforme aumentó el contenido de adición en los cementos. Es de especial interés, el punto correspondiente al 20% del material RCD-M200-20, el cual alcanzó 547.56 kg/cm^2 . Es decir, el cemento con 20% de sustitución con residuos de 75 μm , alcanzó una resistencia similar a la del testigo de cemento Portland que registró 556.04 kg/cm^2 . Lo anterior, nos indica que al disminuir el cemento Portland en 20% y remplazarlo con RCD-M200 no se está sacrificando la durabilidad, lo cual se observó también en el monitoreo de los especímenes, los cuales no sufrieron daños significativos en comparación con los testigos.

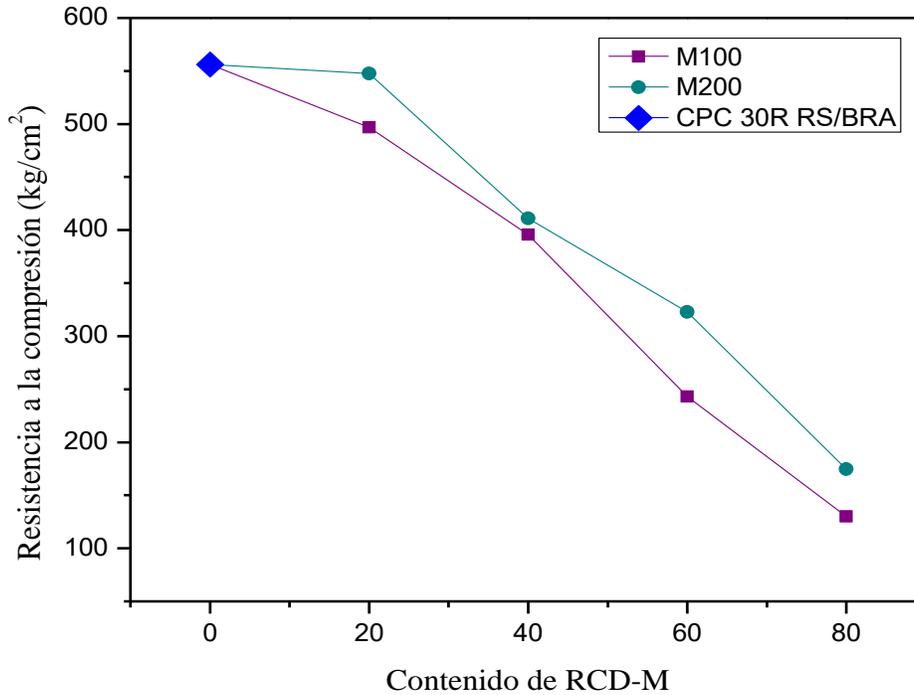


Figura 3.20 Resistencia a la compresión de los especímenes en solución de sulfato de sodio.

En la gráfica 3.21, se observan las curvas del desarrollo de la resistencia a compresión de los especímenes elaborados con RCD-M100. En la misma figura, se sobrepusieron puntos que muestran las resistencias a compresión alcanzadas por los especímenes después de ser expuestos a la solución de sulfato de sodio. Es importante mencionar que estos especímenes tenían una edad de 84 días contados desde su elaboración (28 días de curado y 56 días en la solución). En la figura, se puede apreciar que, comparada con la resistencia máxima alcanzada en las pruebas de resistencia a la compresión, la resistencia obtenida después de permanecer 56 días en una solución de sulfato de sodio no afectó la resistencia mecánica de los cementos sustentables. Sin embargo, el testigo si presentó una reducción de 12% en su resistencia.

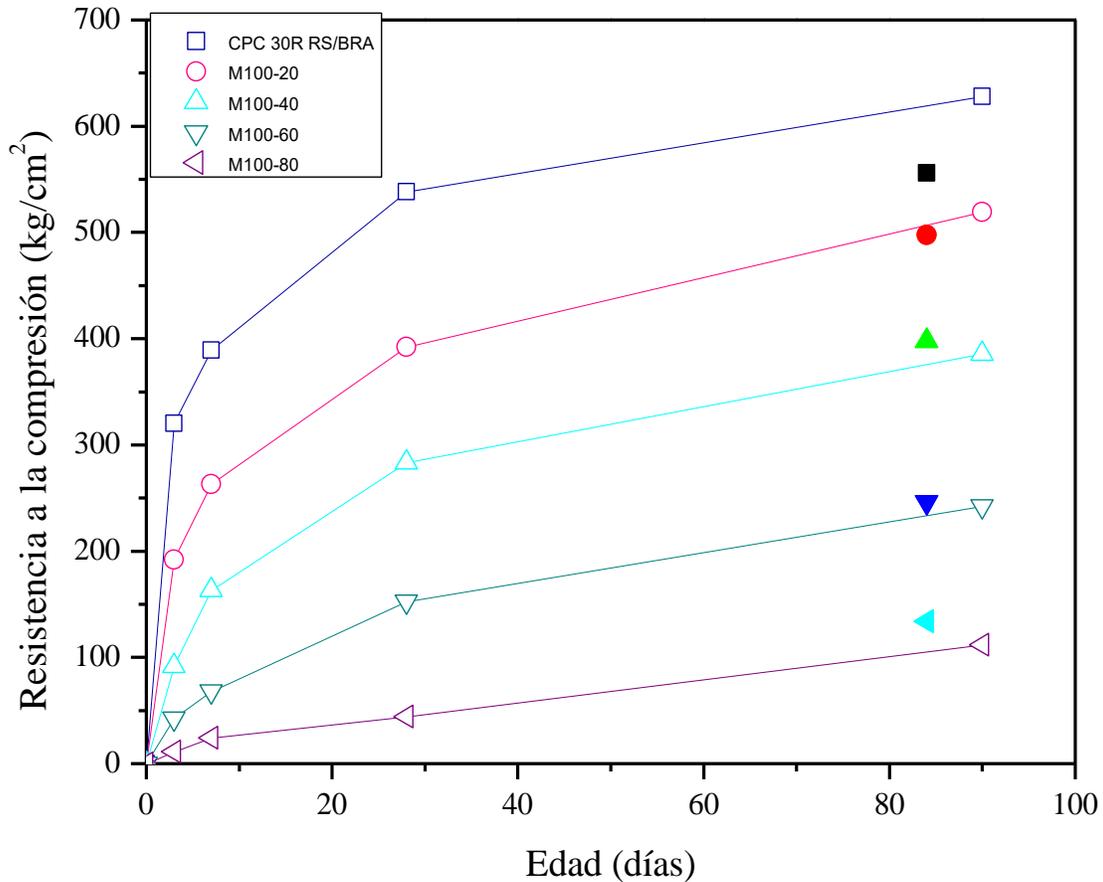


Figura 3.21 Resistencia a la compresión de las pastas RCD-M100 antes (□) y después (■) de la inmersión en la solución de sulfato de sodio.

La grafica 3.22, muestra los resultados de resistencia a compresión de los cementos elaborados con RCD-M200, así como los resultados de estos mismos materiales después de las pruebas de durabilidad. Al igual que en el caso anterior, se puede observar que el resultado alcanzado por los especímenes después de estar expuestos a la solución de sulfato de sodio, es similar a la máxima resistencia medida de los mismos especímenes, incluso la resistencia fue mayo. El testigo de cemento Portland, presentó nuevamente una reducción del 12% en su resistencia.

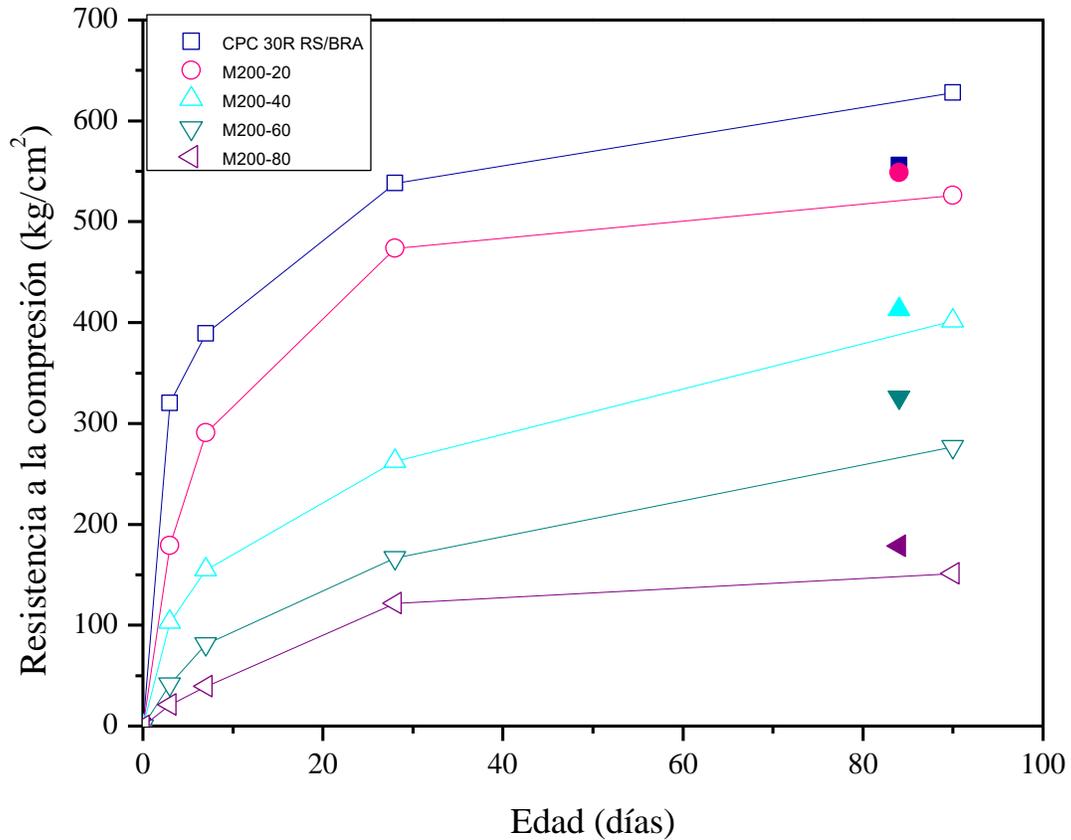


Figura 3.22 Resistencia a la compresión de las pastas RCD-M200 antes y después de la inmersión en la solución de sulfato de sodio.

Para explicar el comportamiento antes descrito, es importante recordar que las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio para formar CSH. Así mismo, el hidróxido de calcio es un compuesto que tiene efectos negativos en la durabilidad del concreto. Es decir, es un compuesto que reacciona con los sulfatos dando lugar a procesos de expansión y ruptura de la matriz cementicia por la formación de etringita, microestructuras nocivas en la matriz cementicia, por lo tanto, los especímenes elaborados con cementos que contenían RCD-M, en teoría contienen menos hidróxido de calcio debido a la reacción puzolánica, lo cual mejoró sus propiedades de durabilidad evitando la pérdida de resistencia mecánica.

3.2.4 Técnicas de caracterización

3.2.4.1 Difracción de rayos X

En las figuras 3.23, 3.24 y 3.25, se presentan los patrones de difracción de rayos X de los materiales cementicios sustentables a 7 días de edad, donde se observa de manera específica la presencia de picos de hidróxido de calcio o portlandita (CH) y del silicato de calcio o alita (C_3S) correspondientes con las fichas 02-0969 y 01-1024 de la base de datos JCPDS.

En las gráficas, observamos presencia de alita que aún no se ha hidratado y de portlandita como producto de la hidratación del cemento. La alita, será la responsable de generar más CSH a mayores edades. Adicionalmente, la portlandita también producirá CSH extra al reaccionar con el RCD-M debido a la reacción puzolánica en la matriz cementicia. Es por este motivo que, a mayor porcentaje de residuos en el cemento, se observan picos menos intensos de CH, debido a que se formó CH adicional.

Los difractogramas de los cementos tipo RCD-M100, se presentan en la figura 3.23. Como se mencionó anteriormente, se observa que los picos correspondientes a la portlandita disminuyen al aumentar el contenido de RCD-M. Al contrario, se observa que a mayor contenido de RCD-M hay más alita sin hidratarse. Esto podría deberse, a que cuando la superficie de la partícula se hidrata se produce CH y CSH, por lo que los RCD-M como materiales puzolánicos, comienzan a reaccionar con la portlandita formando una cubierta o cáscara sobre las partículas de cemento. De acuerdo con lo anterior, la cubierta resultante actúa como una barrera entre el agua de hidratación y las partículas de alita, por lo que a mayor cantidad de residuos en la matriz cementicia, se presenta una cinética más lenta de hidratación, motivo por el cual se tienen picos más intensos de alita.

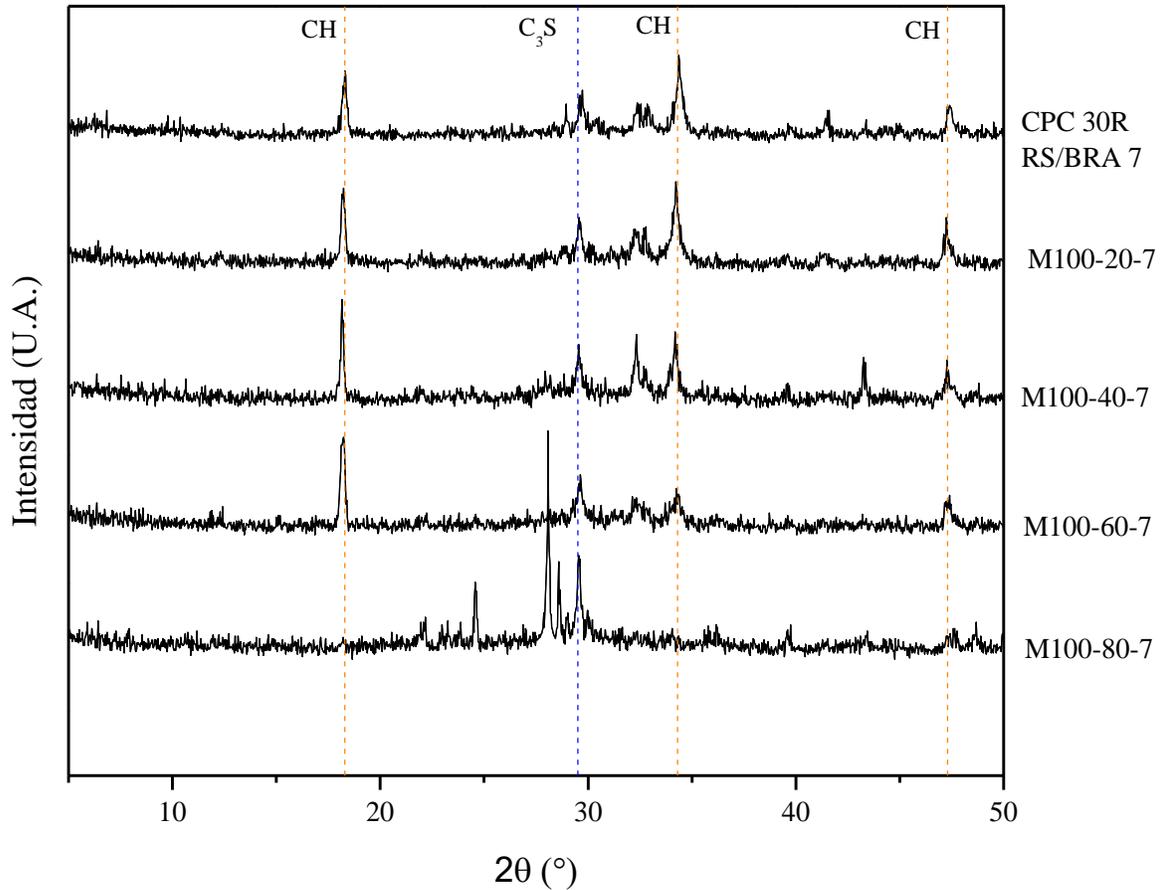


Figura 3.23 Difractogramas de los cementos con RCD-M100, a 7 días de edad.

La identificación del hidróxido de calcio y de la alita de las pastas elaboradas con materiales tipo RCD-M200, se muestran en la figura 3.24. Nuevamente, observamos un comportamiento similar al descrito con residuos M100. Conforme aumentó la cantidad de residuos de construcción y demolición mixtos en la pasta de cemento, la intensidad de los picos de portlandita disminuyó. Así mismo, la intensidad presentada por los picos de alita fue mayor con el incremento del porcentaje de sustitución. Sin embargo, también se observa que los picos de alita son menos intensos, por lo que el proceso de hidratación no se está viendo tan afectado como en el caso anterior.

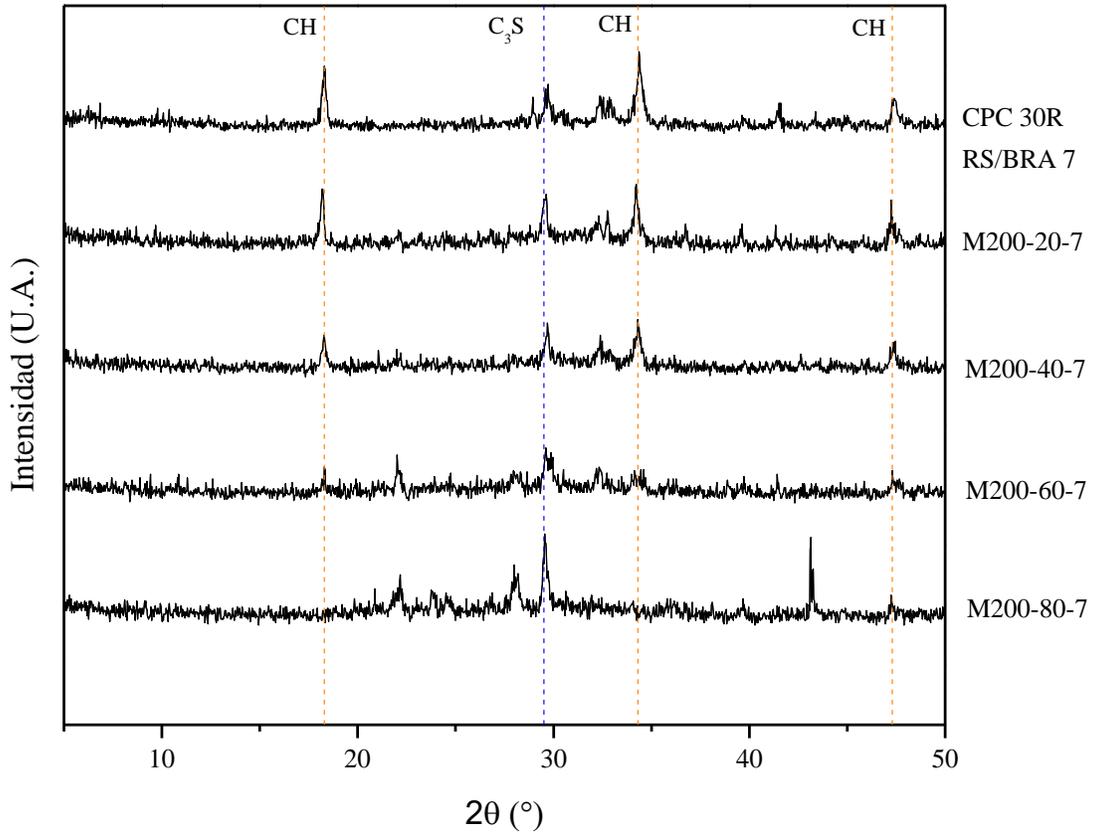


Figura 3.24 Difractogramas de los materiales RCD-M200, a 7 días de edad.

La figura 3.25, muestra los patrones de difracción de rayos X de las pastas con material tipo RCD-M325. Observamos que con el aumento del porcentaje de remplazo de cemento Portland, la intensidad de los picos de alita que no había reaccionado fue mayor. Como en los casos anteriores, los picos de hidróxido de calcio fueron disminuyendo con el aumento de RCD-M en la pasta.

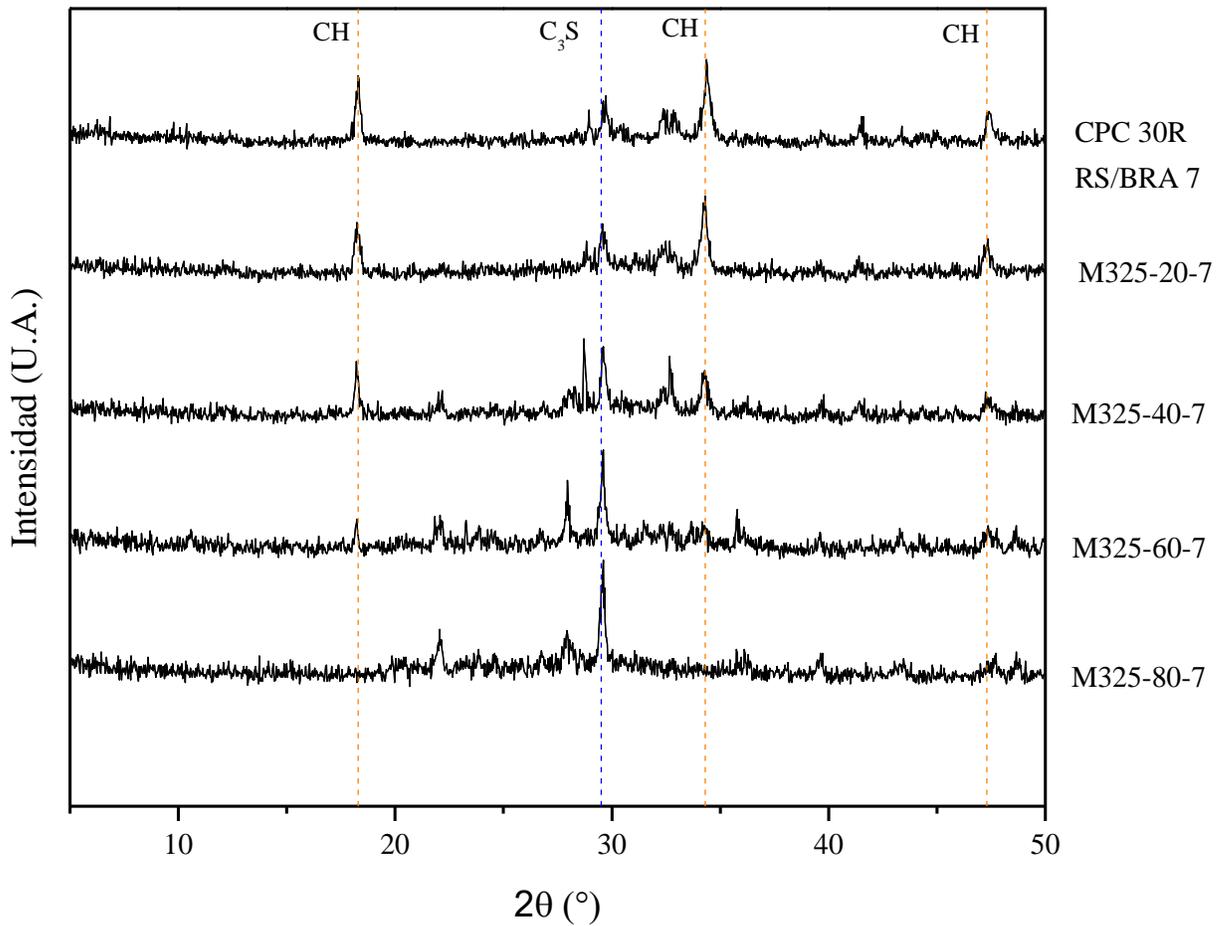


Figura 3.25 Difractogramas de los materiales con RCD-M325, a 7 días de edad.

En la figura 3.26, se muestra el contenido de hidróxido de calcio (CH) presente en las pastas a 7 días. Podemos observar que con 20% de residuo, las pastas con RCD-M100 presentaron un incremento del 6% en la cantidad de hidróxido de calcio respecto a la muestra testigo. En cambio, el contenido de CH en los cementos con RCD-M200 y RCD-M325 es muy similar al testigo. En todos los casos, con el aumento de la adición, la cantidad de CH disminuyó a excepción del material tipo RCD-M100 con 60% de residuo, la cual presentó un aumento del porcentaje de CH.

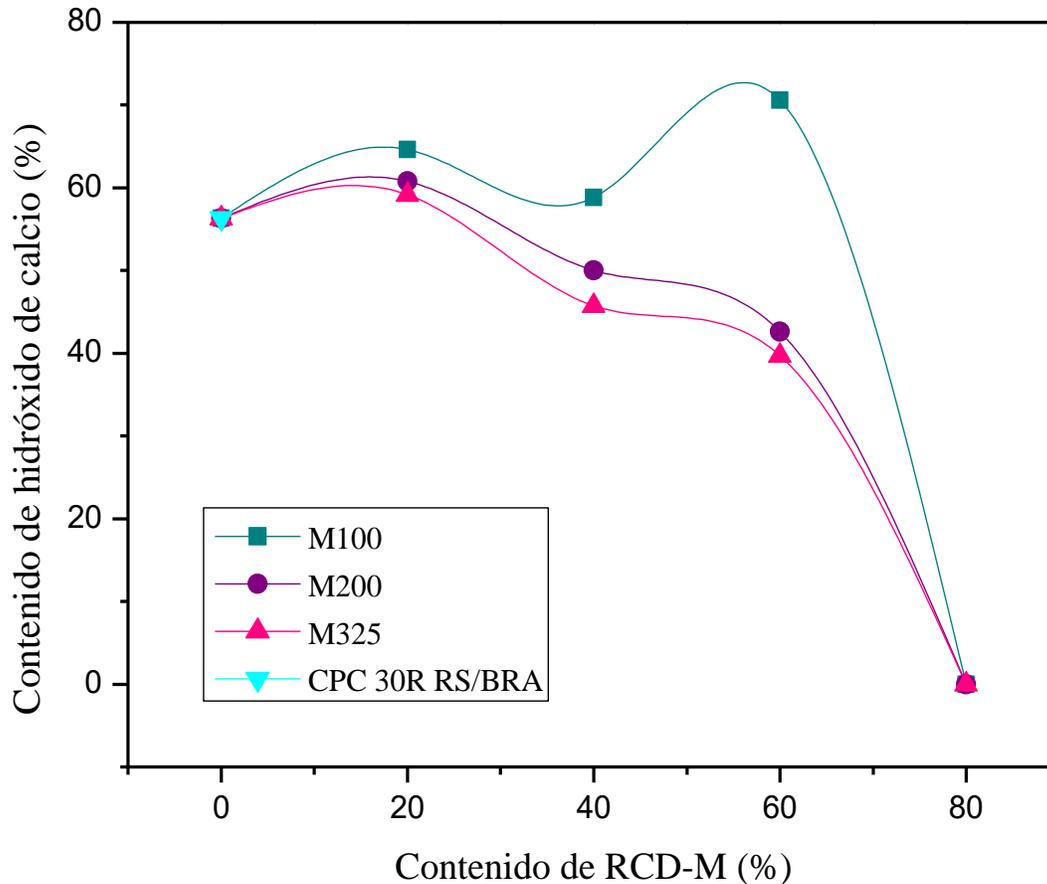


Figura 3.26 Contenido de hidróxido de calcio a los 7 días de edad.

En las figuras 3.27, 3.28 y 3.29, se presentan los patrones de difracción de rayos X de los materiales RCD-M100, RCD-M200 y RCD-M325 a 28 días. Se observa que mientras la cantidad de residuo en la matriz aumente, la intensidad de los picos de hidróxido de calcio disminuye.

En el caso de la figura 3.27, se puede apreciar que los tres picos de hidróxido de calcio (CH) identificados fueron disminuyendo al aumentar el porcentaje de remplazo del cemento hasta desaparecer con 80% de RCD-M. Así mismo, el pico de alita aumentó su intensidad a mayor cantidad de residuo.

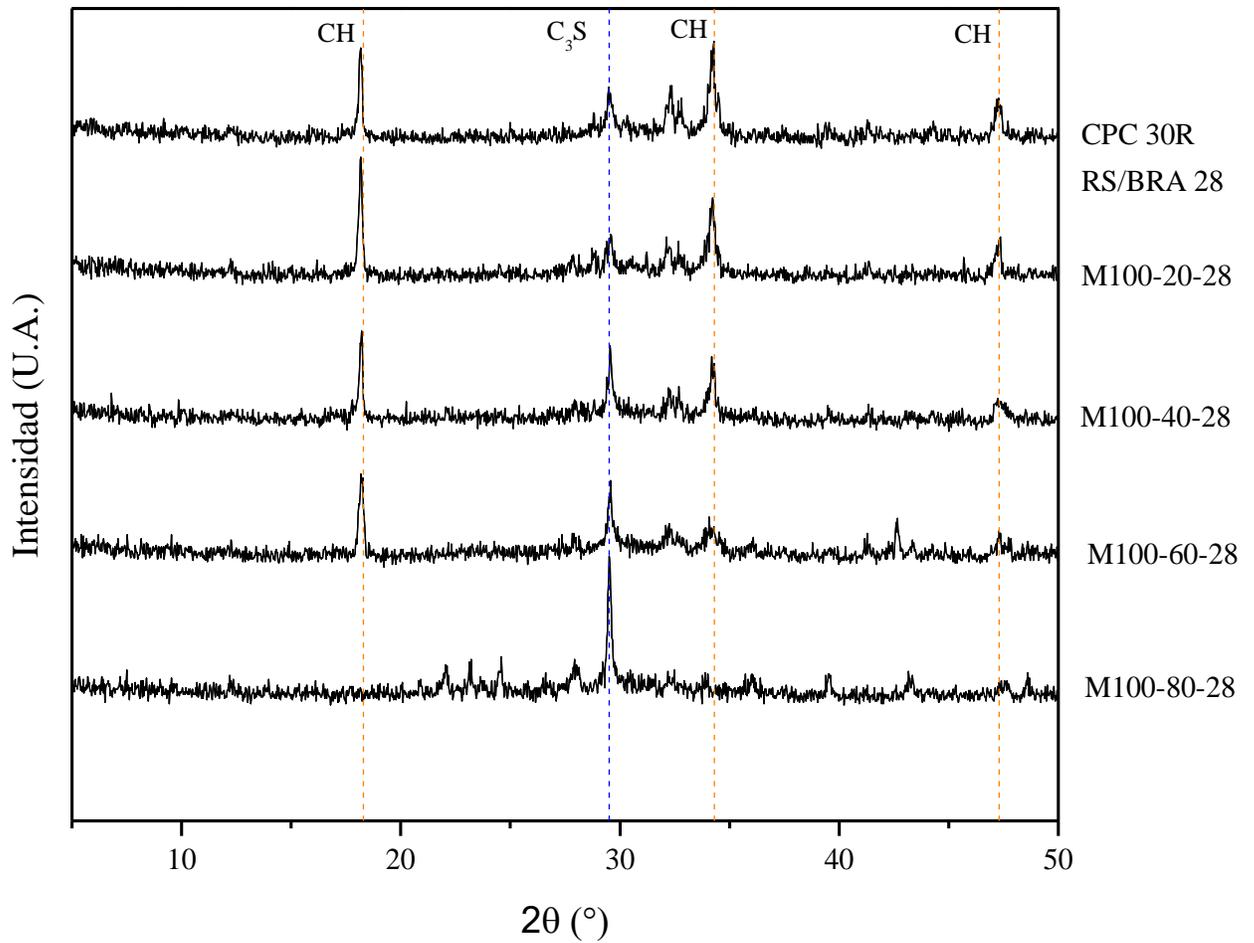


Figura 3.27 Difractogramas de los materiales RCD-M100, a 28 días de edad.

En la figura 3.28, correspondiente a los difractogramas de los materiales tipo RCD-M200, se observa que mientras los picos de hidróxido de calcio (CH) van disminuyendo con el aumento de residuo en la pasta de cemento, la alita presenta picos más intensos.

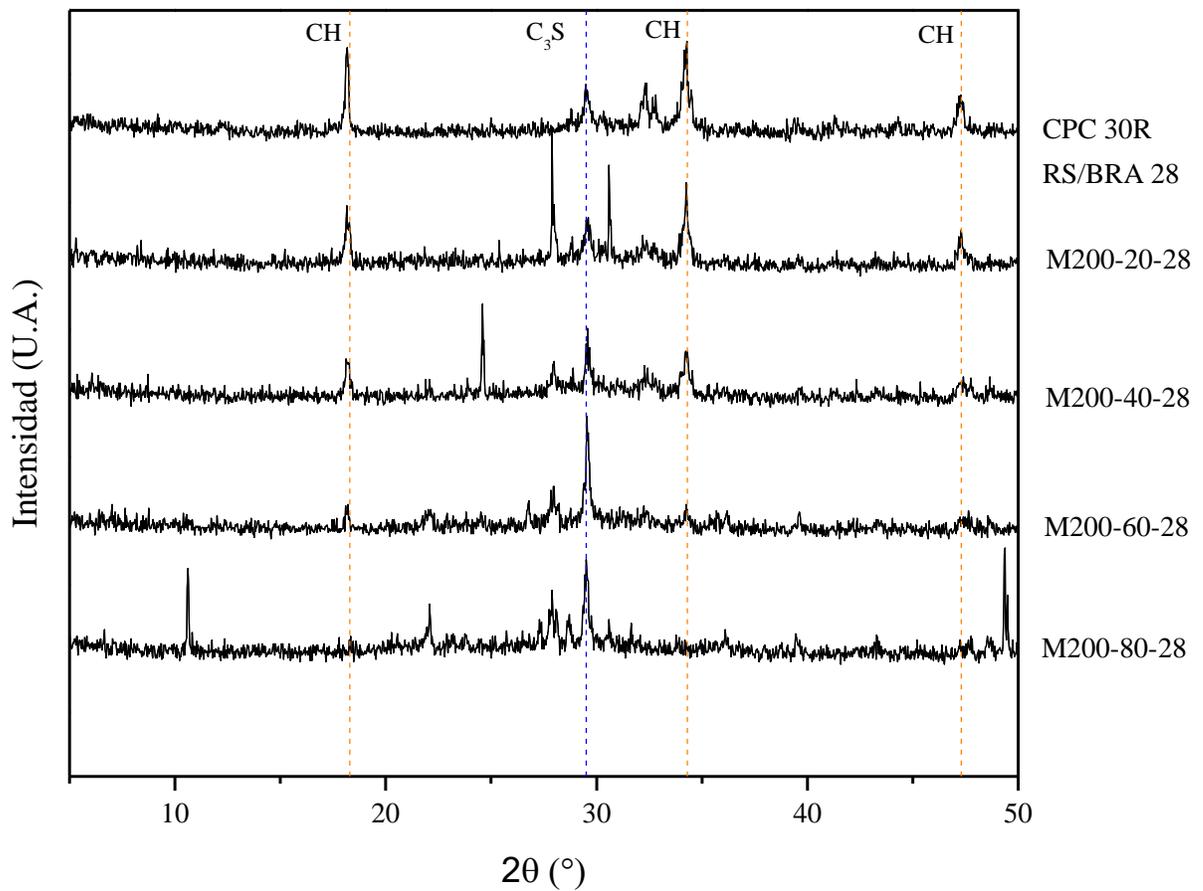


Figura 3.28 Difractogramas de los materiales RCD-M200, a 28 días de edad.

El caso de las pastas elaboradas con materiales tipo RCD-M325, se presenta en la figura 3.29. Nuevamente se observa que con el aumento del porcentaje de remplazo de cemento la intensidad de los picos correspondientes a la alita aumenta mientras que el contenido de hidróxido de calcio (CH) disminuye.

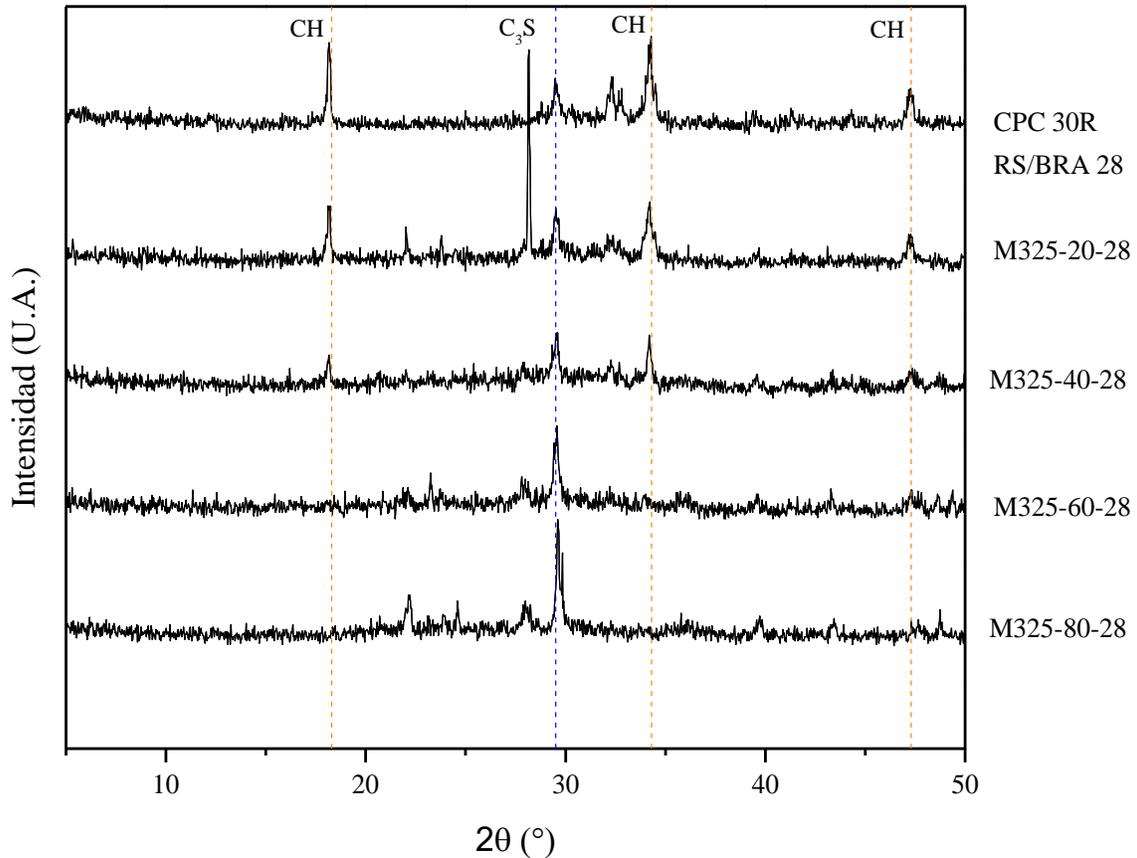


Figura 3.29 Difractogramas de los materiales RCD-M325, a 28 días de edad.

La figura 3.30 presenta los contenidos de hidróxido de calcio de las pastas con 28 días de edad. En el caso del material RCD-M100 observamos que con 20% de residuo el contenido no vario respecto a la muestra testigo. En cambio, con 40% disminuyó ligeramente y presentó una mayor reducción con 60%, llegando a 0% de CH al agregar 80% de RCD.

En el caso del material RCD-M200, a partir del 20% de residuo se presentó una disminución en el contenido de CH, la cual para esta serie no llego a cero. Con la adición RCD-M325 la disminución con 20% de residuo fue menor que con la adición tipo RCD-M200, pero mayor al aumentar el RCD a 60%. En este caso, observamos que el hidróxido de calcio no tuvo presencia en las pastas con 60 y 80% de residuos.

La ausencia de hidróxido de calcio en los cementos RCD-M100 y RCD-M325 con 80% de residuo son un indicador de que el tamaño de las partículas de los residuos efectivamente esta influyendo en las propiedades de los cementos. En este caso los residuos están

actuando como barreras de hidratación impidiendo la formación de CH y CSH, esta situación se relaciona con la caída de las resistencias a compresión registradas por estos cementos. En cambio, los cementos con RCD-M200 en ningún caso presentaron contenidos de CH menores al 40%, de acuerdo con esto, los residuos de 75 μm tienen el tamaño ideal que permite que los procesos de hidratación del cemento Portland sigan ocurriendo al mismo tiempo que se desarrolla la reacción puzolánica.

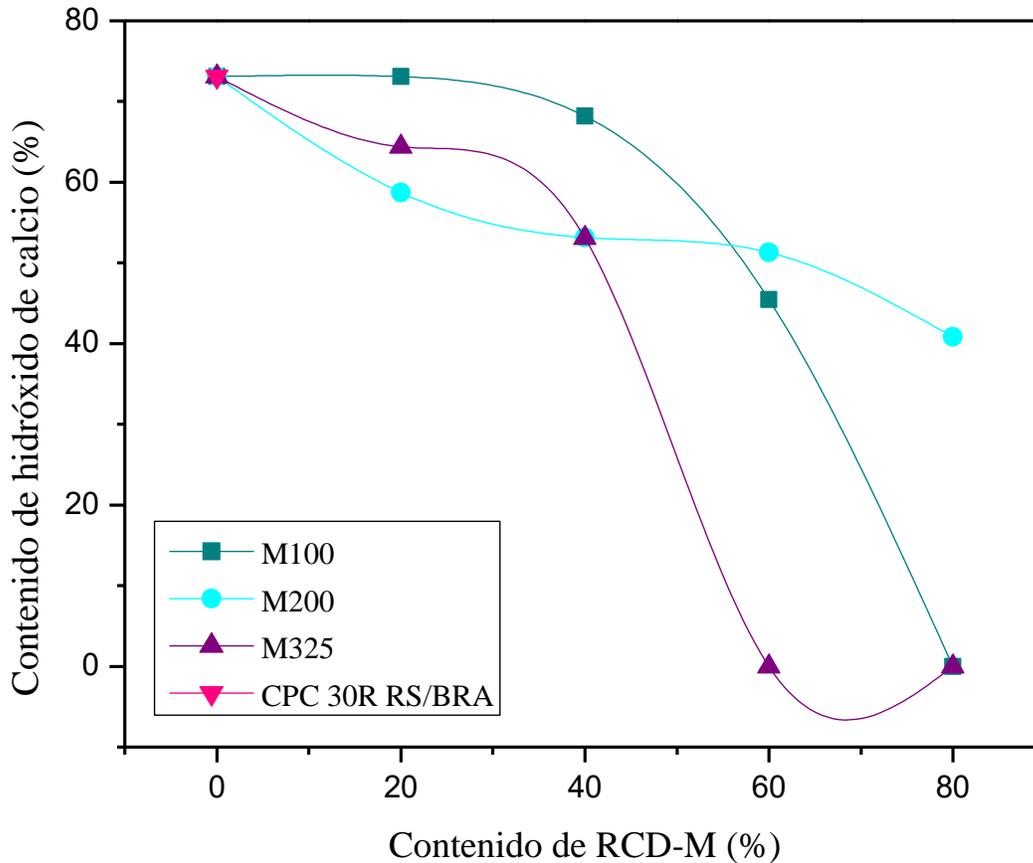


Figura 3.30 Contenido de hidróxido de calcio en pastas a 28 días de edad.

3.2.4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido del cemento testigo (CPC 30R RS/BRA) y de los cementos con 20% de adición RCD-M200 a 28 días de edad. La numeración se representa como sigue: 1) silicatos de calcio (CSH), 2) portlandita (CH) y 3) etringita. Todas estas fases fueron identificadas usando como referencia microfotografías de otras investigaciones [67-70].

En la figura 3.31a, correspondiente al CPC 30R RS/BRA con 28 días de edad, se observa que predominan las formaciones de silicato de calcio hidratado (CSH), portlandita (CH) y agujas de etringita de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$.

La micrografía del cemento elaborado con RCD-M100 se presenta en la figura 3.31b. Se observa la presencia de silicato de calcio (CSH), así como estructuras planas de hidróxido de calcio (CH) de $2\ \mu\text{m}$. Al centro de la imagen, se aprecian formaciones de etringita de cerca de $0.05\ \mu\text{m}$.

Posteriormente, en la figura 3.31c se aprecia la morfología de los cementos obtenidos al utilizar RCD-M200. En la imagen, se observa el silicato de calcio (CSH), menor presencia de estructuras de portlandita y algunas formaciones de etringita con aproximadamente $0.05\ \mu\text{m}$ de longitud.

En cambio, la figura 3.31d, corresponde al cemento con un tipo de adición RCD-M325. En este caso se observa abundante presencia de silicatos de calcio (CSH) y de etringita de $0.05\ \mu\text{m}$.

De acuerdo con lo anterior, en los cementos sustentables, se observó mayor presencia de silicato de calcio que en el cemento testigo CPC 30R RS/BRA. Lo que podría deberse al CSH superficial que no está contribuyendo de manera importante a las resistencias. Es decir, en ese punto tienen que comenzar a activarse ciertos procesos difusivos de hidratación para la formación de CSH en toda la matriz cementicia, ya que como se mencionó anteriormente, la presencia de los residuos con mayores tamaños de partícula ocasiona una cinética lenta en los procesos de hidratación. El hidróxido de calcio se encontró de manera más abundante en el cemento testigo y RCD-M100, lo que se debe a la presencia de la reacción puzolánica en la matriz cementicia. Finalmente, en el caso de la etringita, se observó de un tamaño más grande de las agujas en el CPC 30R RS/BRA, que, en el resto de los cementos, por lo que cabría esperar buenos resultados en las pruebas de durabilidad.

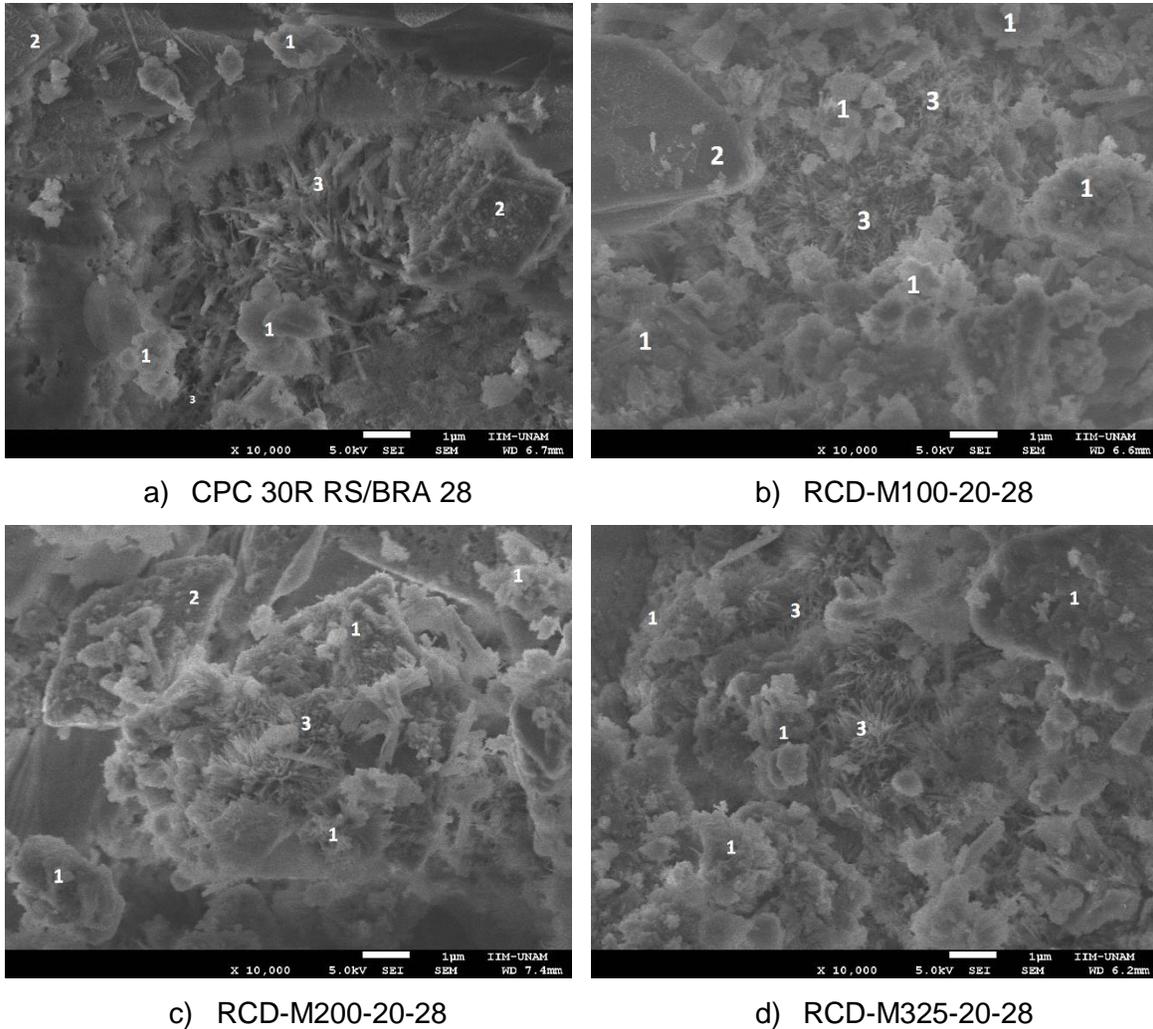


Figura 3.31 Imágenes del microscopio electrónico de barrido de los cementos a) CPC 30R RS/BRA, b) RCD-M100-20, c) RCD-M200-20 y d) RCD-M325-20 a 28 días de edad a 10,000X. 1. CSH, 2. CH, 3. Etringita

Los resultados de espectroscopía de dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés) se presentan a continuación.

En la figura 3.32, se observan los resultados del cemento testigo CPC 30R RS/BRA hidratado a 28 días, el cual presentó un porcentaje en peso de 46.77% de oxígeno (O), 35.42% de calcio (Ca), 13.63 de silicio (Si), 1.64 de carbono (C), 1.29 de aluminio (Al), 0.78% de azufre (S) y 0.47% de magnesio (Mg). Es decir, una composición común en este tipo de cemento.

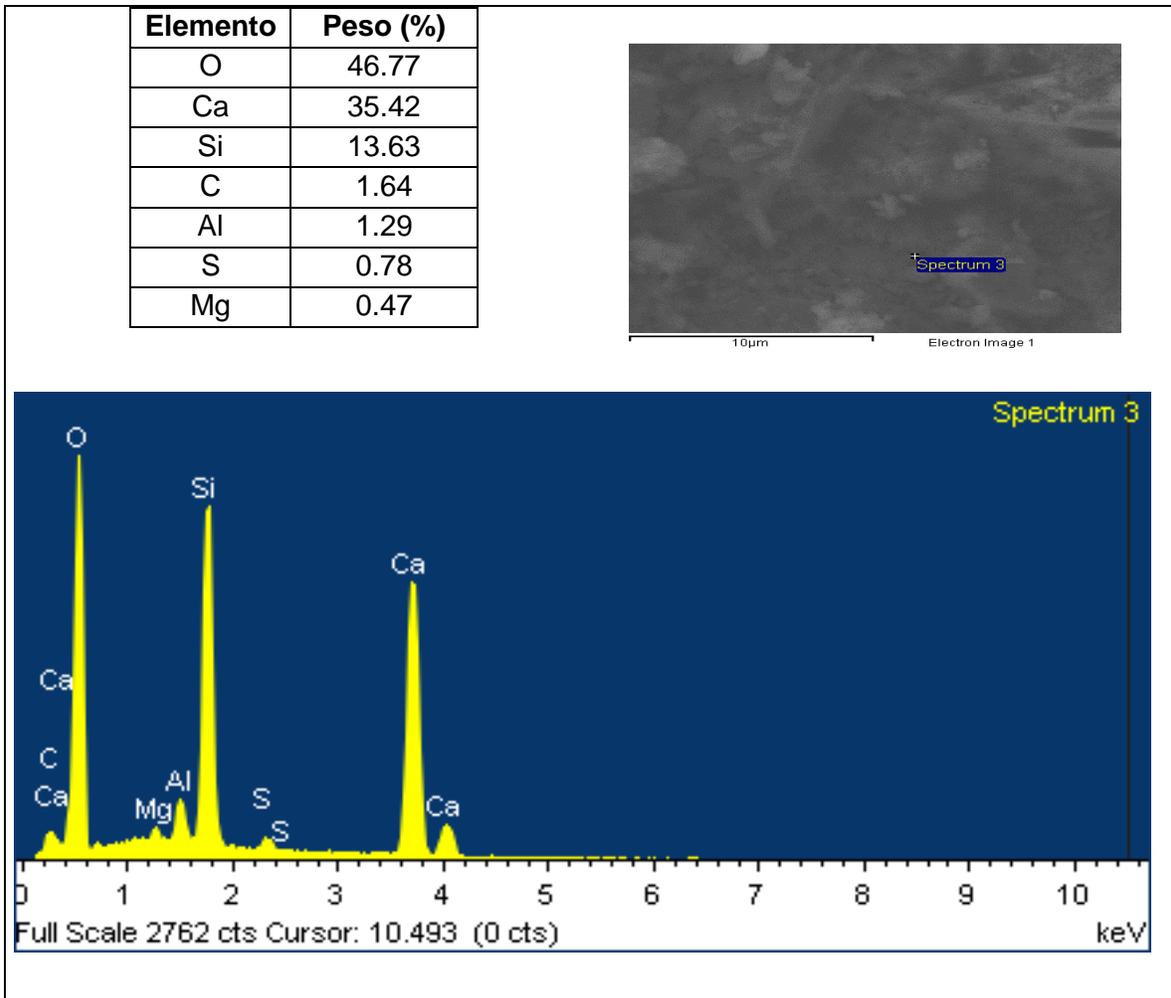


Figura 3.32 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del CPC 30R RS/BRA.

El análisis químico elemental del cemento hidratado durante 28 días, RCD-M100-20-28, se presenta en la figura 3.33. Se encontró que este cemento contiene un porcentaje en peso 45.40% de oxígeno (O), 31.11% de calcio (Ca) y 11.75% de silicio (Si). Además, en menor proporción se encontró la presencia de hierro (Fe) con un 3.71%, carbono (C) con 3.39%, azufre (S) con 1.64%, aluminio (Al) con 1.51% y magnesio con 1.41%, respectivamente.

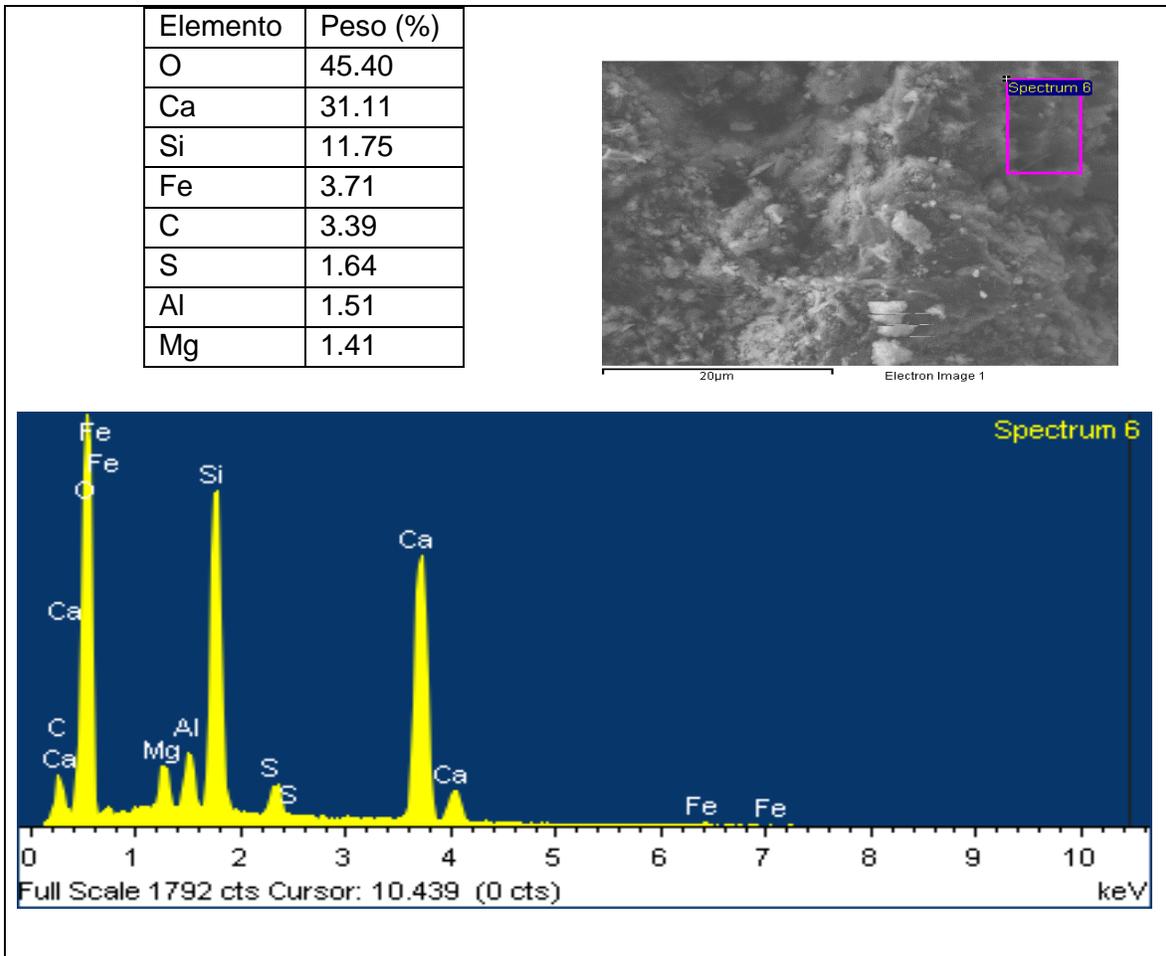


Figura 3.33 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M100-20-28.

En la figura 3.34, se presentan los resultados de espectroscopía de dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés) del cemento RCD-M200-20-28, con 28 días de edad. De acuerdo con el análisis, el cemento se encuentra compuesto a nivel elemental por 40.95% de calcio, 39.24% de oxígeno, 13.11% de silicio, 1.86% de carbono, 1.86% de aluminio, 1.85% de azufre y 1.14 % de magnesio.

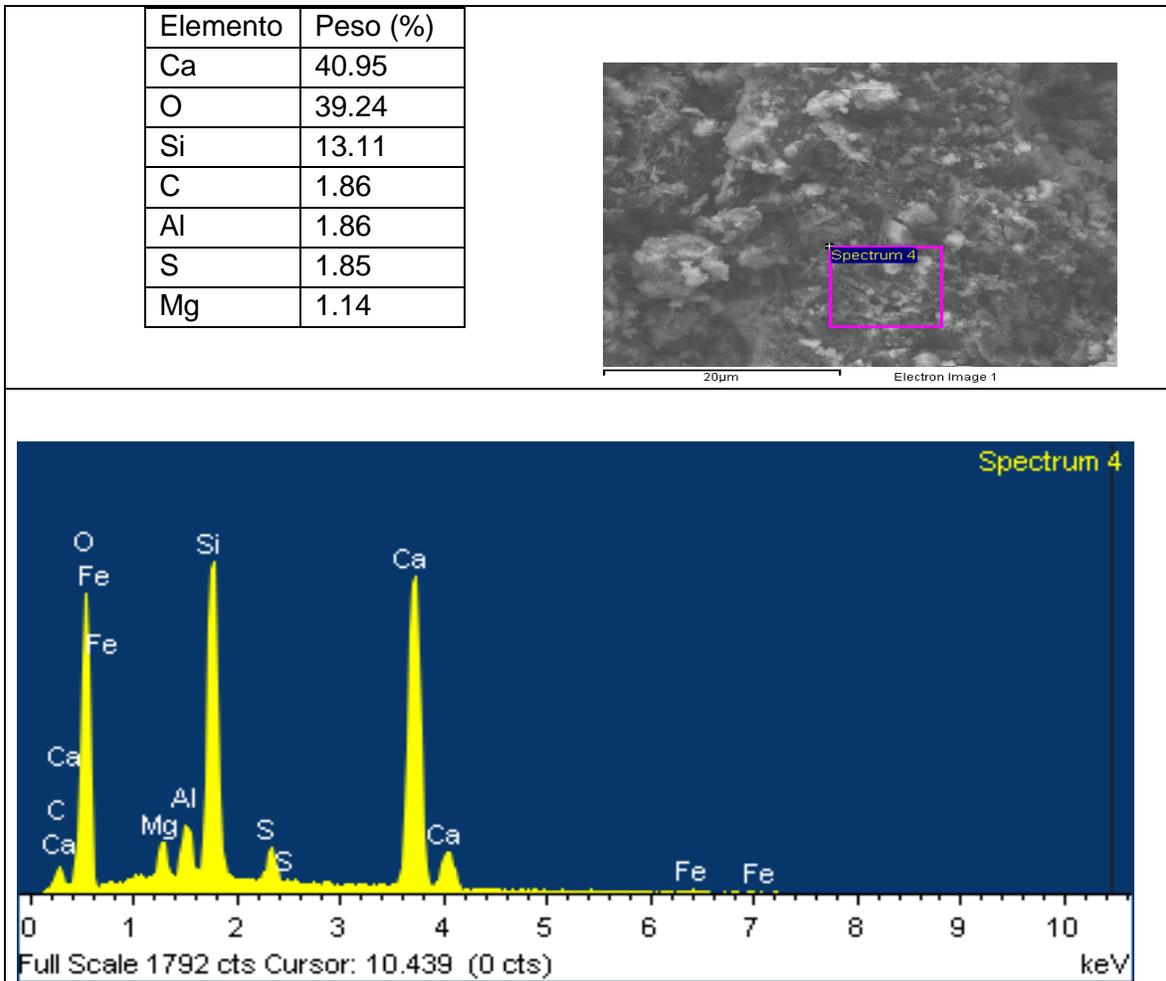


Figura 3.34 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M200-20-28

Los resultados de espectroscopía de dispersión de energía del cemento sustentable elaborado con la adición tipo RCD-M325, se presentan en la figura 3.35. Después de 28 días de edad, el cemento presentó una composición de 51.63% de oxígeno (O), 26% de silicio (Si), 12.60% de calcio (Ca), 5.14% de aluminio (Al), 2.68% de potasio (K), 0.39% de azufre (S), 0.38% de sodio (Na) y 0.38% de magnesio (Mg).

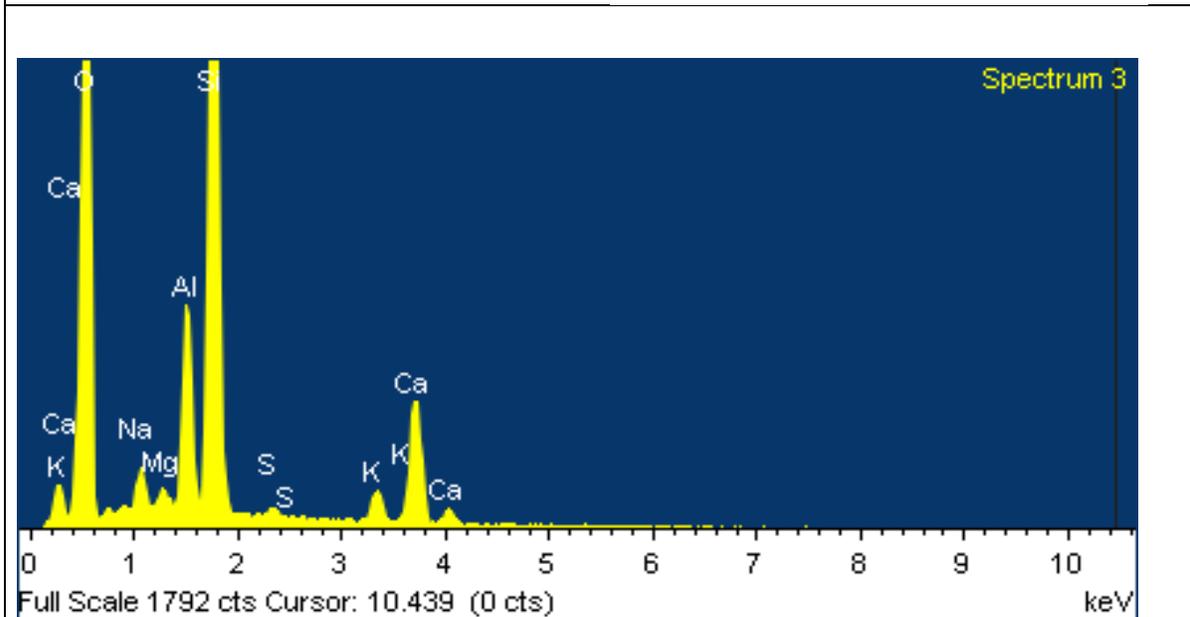
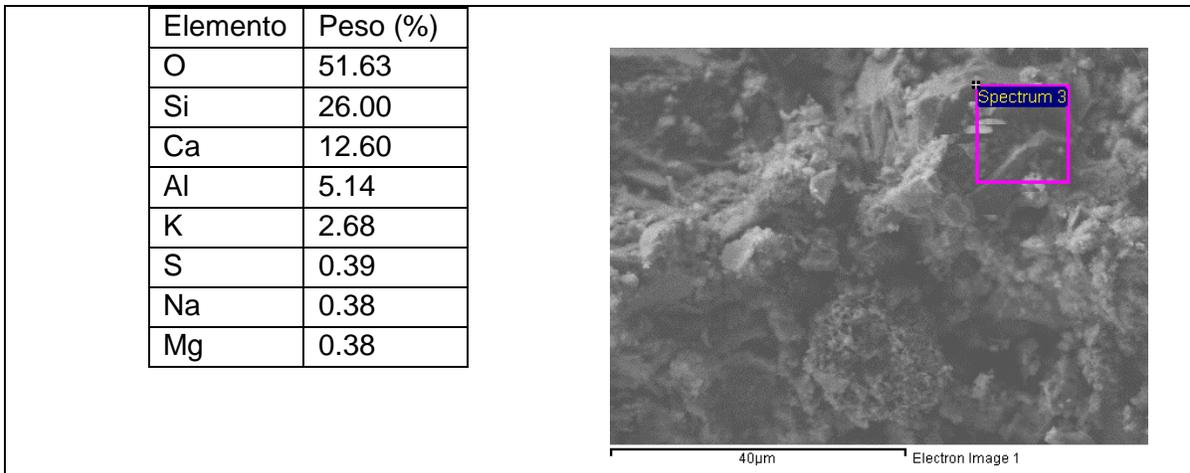


Figura 3.35 Difractograma del análisis químico elemental por dispersión de energía y micrografía de la zona de estudio del RCD-M325-20-28

De acuerdo con los resultados anteriores, entre los compuestos que se forman durante la hidratación del cemento Portland y durante las reacciones puzolánicas, encontramos silicato de calcio hidratado, hidróxido de calcio o portlandita y sulfoaluminato de calcio hidratado o etringita. Estos compuestos explican la presencia elemental del oxígeno, calcio y silicio en el análisis EDS. Los elementos en menores proporciones se deben a los RCD mixtos. Por otro lado, el carbono es resultado de la cinta negra de carbono necesaria para realizar las pruebas de MEB/EDS.

3.2.4.3 Análisis termogravimétrico

En la figura 3.36, se observa la pérdida de peso en función de la temperatura del cemento testigo y de los cementos con 20% de RCD-M con diferentes tamaños de partícula a la edad de 7 días. Se observa una pequeña caída en el peso, antes de los 200°C por pérdida de agua en la superficie de las partículas. En cambio, se presentan dos pérdidas de peso importantes. La primera alrededor de los 400°C, la cual corresponde a la descomposición del hidróxido de calcio que se formó durante la hidratación del cemento Portland. La segunda pérdida de peso que se presenta, ocurre aproximadamente a los 700°C e indica la descomposición del carbonato de calcio, generado por la reacción de la portlandita con dióxido de carbono.

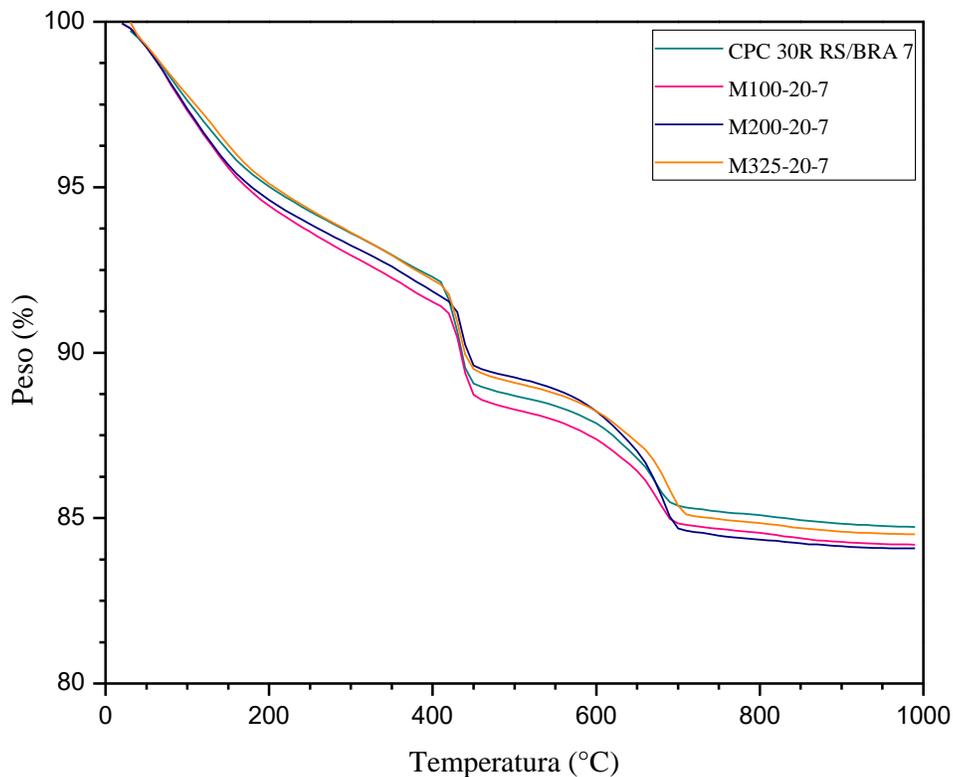


Figura 3.36 Curva ATG correspondiente a los cementos testigo y con 20% de residuo con diferentes tamaños de partícula, a los 7 días de edad.

En la figura 3.37, se presentan los resultados del análisis termogravimétrico del testigo y de los cementos sustentables elaborados con 20% de residuo con diferentes tamaños de partícula y con 28 días de hidratación. Se puede observar que nuevamente se presenta la descomposición del hidróxido de calcio a los 400°C y del carbonato de calcio a los 700°C.

Con 28 días de edad, la muestra testigo presentó 6% de pérdida de peso a los 400°C. Es decir, con la descomposición del hidróxido de calcio. Sin embargo, este resultado no es mucho mayor que los registrados por los cementos sustentables, los cuales perdieron entre 6 y 4%. Estos resultados indican que, a los 28 días de edad, el cemento testigo tenía mayor contenido de CH, lo cual corrobora los resultados obtenidos por DRX.

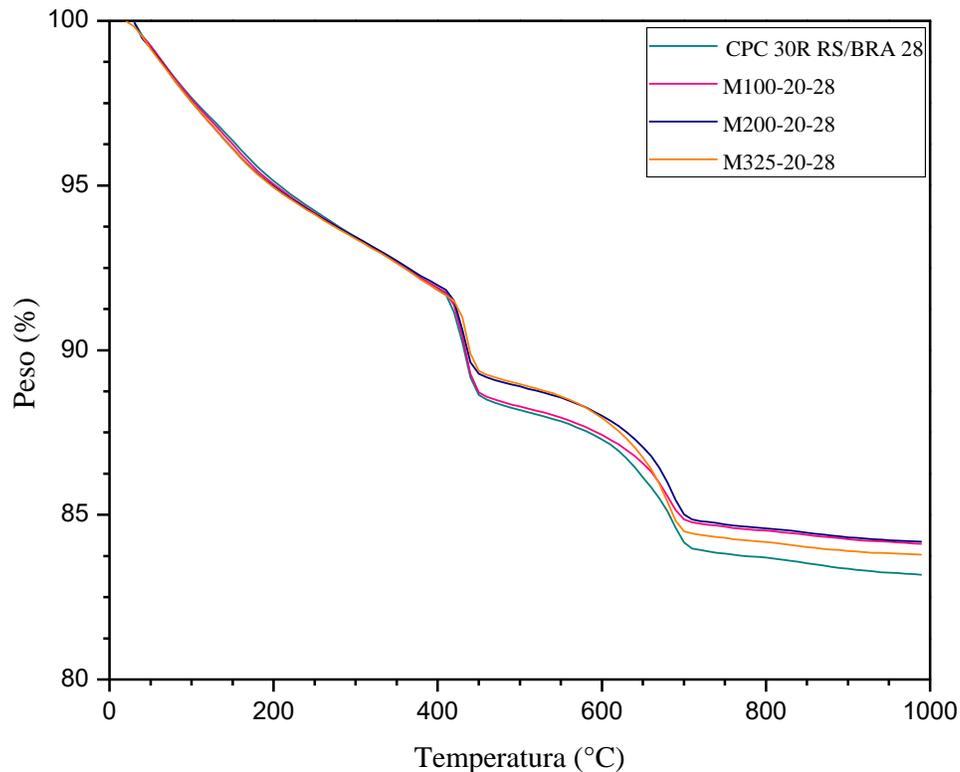


Figura 3.37 Curva ATG correspondiente a los cementos testigo y con 20% de residuo con diferentes tamaños de partícula, a los 28 días de edad.

De acuerdo con lo anterior, podemos observar que a edades tempranas (7 días) el grado de hidratación fue mayor en los cementos sustentables con adiciones de mayor tamaño. Sin embargo, esta situación se invierte a los 28 días, donde después de la muestra testigo, los cementos que mayor grado de hidratación presentaron fueron los que contenían adiciones con menor tamaño de partícula.

En la tabla 3.6, se presentan los compuestos principales de las pastas de cemento y el rango de temperatura en el que comúnmente se encuentran en un análisis termogravimétrico. De acuerdo con esta tabla, al derivar la curva peso respecto temperatura, podemos identificar picos que corresponden a las siguientes fases: agua en un rango de temperatura entre 30 y 105°C, etringita entre los 110 y 170 °C, hidróxido de

calcio entre los 400 y 600 °C, silicatos de calcio hidratados entre los 180 y 300 °C y carbonato de calcio entre los 700 y 900 °C.

Tabla 3.6 Rango de temperatura y fases presente en un análisis térmico diferencial de cemento [71-75].

Fase	Rango de temperatura [°C]
Agua	30 – 105
Etringita	110 – 170
Hidróxido de Calcio	400 – 600
Silicatos hidratados	180 – 300
Carbonato de Calcio	700 – 900

En la figura 3.38, se presentan las derivadas de la curva peso contra temperatura del análisis termogravimétrico a los 7 días. Se observa entre los 0 y 100°C la pérdida de agua evaporable, de los 100 a los 170°C la descomposición del yeso y etringita, los silicatos hidratados entre los 170 y 400°C, el hidróxido de calcio entre los 400 y 500°C, y la descomposición del carbonato de calcio entre los 600 y 800°C. Se observa, que el cemento testigo fue el que presentó mayor cantidad de portlandita respecto a los cementos sustentables, el testigo presentó más carbonatación en relación con los cementos sustentables, estos es importante porque la carbonatación un proceso donde el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y genera carbonato de calcio, situación que afecta la durabilidad del concreto.

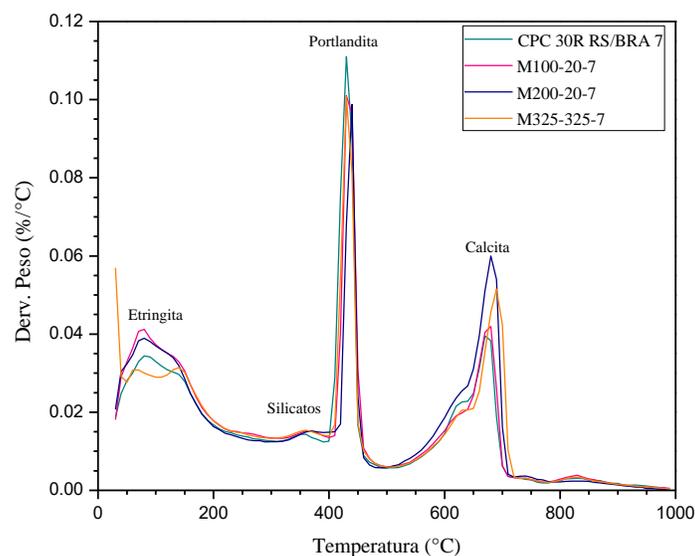


Figura 3.38 Derivadas del peso respecto a la temperatura de los cementos con 20% de RCD-M a 7 días.

En la figura 3.39, se presentan las gráficas derivadas de la curva peso contra temperatura obtenidas del análisis termogravimétrico para las pastas testigo y con 20% de residuos a los 28 días. Nuevamente observamos al inicio la pérdida de agua evaporable, seguida de la descomposición de la etringita, los silicatos de calcio, la portlandita y finalmente el carbonato de calcio.

De acuerdo con lo anterior, este análisis sirvió para identificar los contenidos de hidróxido de calcio como indicadores del grado de hidratación de los cementos y corroborar los resultados obtenidos de las pruebas de difracción de rayos X.

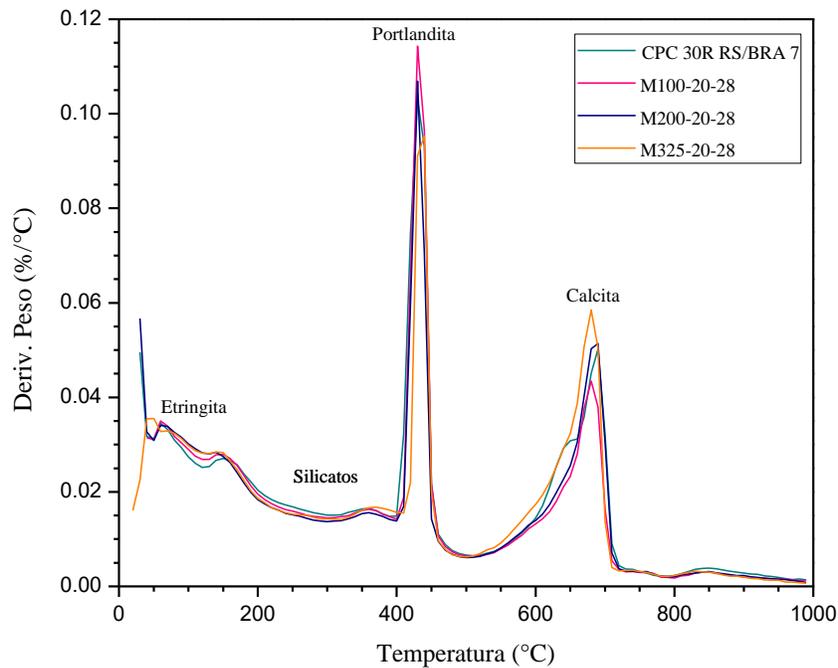


Figura 3.39 Derivadas del peso respecto a la temperatura para las pastas con 20% de residuo a 28 días.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación, se utilizaron residuos de construcción y demolición mixtos como materiales de remplazo de cemento Portland para la fabricación de cementos sustentables, lo cual además de ofrecernos una alternativa para disminuir el consumo de cemento Portland, representa un valor agregado a los residuos que actualmente no son muy utilizados debido a su poca aceptación en la industria de la construcción.

Mediante la caracterización de los residuos de construcción y demolición mixtos (RCD-M) utilizados en este trabajo de investigación, se confirmó que su composición química constituida por compuestos aluminosilíceos, les permite actuar como materiales puzolánicos. Así mismo, fue necesario modificarlos físicamente para obtener una finura adecuada y activar sus propiedades puzolánicas. De esta manera, se generaron nuevos cementos sustentables a partir de residuos de construcción y demolición. Adicionalmente, se observó que el índice de actividad puzolánica de estos residuos supera el mínimo requerido por las normas mexicanas e internacionales a los 7 y 28 días.

De acuerdo con las pruebas de resistencia a la compresión, se puede sustituir en un 20% el cemento Portland con RCD-M, sin que esto represente pérdidas significativas en los resultados. Este porcentaje coincide con los porcentajes de remplazo comunes (5 – 35%) de las puzolanas aceptadas y utilizadas actualmente en la industria.

Las pruebas de porosidad realizadas, confirmaron la influencia del tamaño de partícula de los residuos en los cementos elaborados. Los cementos que contenían RCD-M100 fueron más porosos que los RCD-M200 y RCD-M325.

La disminución de hidróxido de calcio dentro de la matriz cementicia, generada por la reacción puzolánica del RCD-M con el cemento Portland, mejoró las propiedades de durabilidad de los cementos sustentables.

Las técnicas de caracterización empleadas, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis termogravimétrico (ATG), nos permitieron comprobar que se presentó una reacción puzolánica en los cementos sustentables. Es decir, los residuos reaccionaron con el hidróxido de calcio producido durante el proceso de hidratación del cemento Portland para producir más silicato de calcio hidratado en la matriz cementicia. Adicionalmente, se observó que los residuos actuaron como una barrera alrededor de las partículas de cemento Portland que, en el caso de los cementos con RCD-M100 retardo el proceso de hidratación. Sin embargo, los cementos sustentables

elaborados con RCD-M200, tuvieron el tamaño de partícula adecuado para permitir que se desarrollara el proceso de hidratación y la reacción puzolánica en la matriz cementicia.

De acuerdo con lo anterior, los cementos elaborados con RCD-M100 fueron los que presentaron porcentajes de porosidad más altos, además de ser los menos favorecidos en las pruebas de resistencia a la compresión. Por estos motivos, se decidió descartar su utilización en pruebas futuras. Los cementos elaborados con RCD-M200 y RCD-M325 en general presentaron resultados similares. Sin embargo, el proceso de obtención del material RCD-M325 requiere una mayor inversión de energía y tiempo. En la búsqueda de optimizar los beneficios del RCD-M, se llegó a la determinación de dar continuidad al proyecto utilizando RCD-M200.

Para concluir, en el camino hacia la sustentabilidad de las industrias de la construcción y del cemento, donde el reciclaje de concreto juegue un papel primordial, el uso de materiales de remplazo de cemento Portland, representa una oportunidad para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas por la fabricación de cemento, mejorar las características de los concretos y obtener nuevos concretos sustentables, reducir los costos de las estructuras y emplear materiales de desecho.

Propuesta de uso de los cementos sustentables

Los resultados obtenidos en este proyecto, han sido importantes para justificar el uso de los RCD como materiales puzolánicos en la generación de nuevos materiales cementantes que puedan considerarse sustentables. Se pueden generar cementos sustentables con 20% de remplazo de cemento Portland sin un sacrificio significativo de la resistencia a la compresión y con buenas propiedades de durabilidad. Es decir, parte de la propuesta de aplicación de estos cementos sustentables es su uso en la elaboración de morteros, concretos y elementos prefabricados.

Trabajo futuro

El presente estudio, representa la etapa inicial de una larga cadena de investigación, donde se deberán analizar los efectos del uso de los cementos sustentables en la elaboración de morteros, concretos y elementos prefabricados que cumplan con la normatividad vigente de la industria de la construcción.

Actualmente, como parte de este proyecto se están llevando a cabo pruebas en concretos con los cementos con 20 y 40% de RCD-M200. Así mismo, se han elaborado concretos de

estos materiales cementicios y adiciones de humo de sílice, para mejorar las propiedades de trabajabilidad. Adicionalmente, se están elaborando concretos con los mismos proporcionamientos pero a base de cemento Portland comercial ya que se busca generar nuevos materiales que puedan estar al alcance de la sociedad.

En el trabajo a futuro, se aplicarán diferentes tipos de tratamientos térmicos y químicos en los RCD para la activación de sus propiedades puzolánicas.

Finalmente, hay un largo camino por recorrer para que, una vez demostrados los beneficios del RCD-M en concretos, sea aceptado y empleado por los involucrados en el proceso constructivo.

REFERENCIAS

- [1] Olusegun A. O. y Clinton O. A., “*Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry*”, Energy Procedia 142 (2017) 2491-2497.
- [2] Olusegun A. O. y Clinton O. A., “*Biomimetic reinvention of the construction industry: energy management and sustainability*”, Energy Procedia 142 (2017) 2721 – 2727.
- [3] Clinton A., Ifije O. y Thulisile Z., “*Sustainable construction practices: a lazy view of construction professionals in the South Africa construction industry*”, Energy Procedia 105 (2017) 3003 – 3010.
- [4] Barcelo L., Kline J., Walenta G. y Gartner E., “*Cement and carbon emissions*”, Materials and Structures 47 (2014) 1055 – 1065.
- [5] Lemary L., Reddy K., Randolph D. y Shah A., “*Mitigating and Adapting to Climate Change*” ASCE (2017).
- [6] Mohamad A., Skitmore M., Xia B., Teo M., Zhang X., y Naim K., “*The path towards greening the Malaysian construction industry*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 52 (2015) 1742-1748.
- [7] Moretti L., y Caro S., “*Critical analysis of the life cycle assessment of the Italian cement industry*”, Journal of Cleaner Production 152 (2017) 198-210.
- [8] Wojciech K., Tamas S., Jaskulski R., Reiterman P. y Supera M., “*Ecological high-performance concrete*”, Procedia Engineering 172 (2017) 595-603.
- [9] Sobolev K., Kozhukhova M., Sideris K., Menéndez E. y Santhanam M. “*Alternative Supplementary Cementitious Materials*”, Springer (2018).
- [10] Vieira M. “*Concrete*”, Springer (2013).
- [11] Webster M., “*Structural materials and global climate: A primer on carbon emissions for structural engineers*”, ASCE (2017).
- [12] Taylor H. F. W., “*Cement chemistry*”, Thomas Telford Publishing (1997).
- [13] The European Cement Association, “*The manufacturing process*”. Disponible en <http://www.cembureau.eu/cement-101/the-manufacturing-process> Fecha de consulta: 24 de abril de 2018.
- [14] CEMEX, “*Cómo hacemos cemento*”. Disponible en <http://www.cemex.com/es/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx> Fecha de consulta: 19 de julio de 2018.
- [15] Kurdowski W., “*Cement and Concrete Chemistry*”, Springer (2014).

- [16] Giraldo M. y Torón J., *“Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación”*, Dyna 73 (2006) 69-81.
- [17] Odler I., *“Hydration, setting and hardening of Portland cement”*, Butterworth-Heinemann (1998).
- [18] Cardarelli F., *“Material Handbook”*, Springer, (2018).
- [19] Costa C., *“Hydraulic binders”*, Springer (2013).
- [20] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto *“Cementos hidráulicos: especificaciones y métodos de prueba”*, Construcción y Tecnología 06 (2009) 67-71.
- [21] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, *“El Cemento”*. Disponible en <http://www.imcyc.com/cementohistoria/index-rsp.htm> Fecha de consulta: 24 de julio de 2018.
- [22] Vásquez B. y Corrales S., *“Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes”*, Problemas de Desarrollo 188 (2017) 113-138.
- [23] *“Cifras de la industria cementera mundial”*, Cemento y Concreto de Iberoamérica y el Caribe. 3 (2016) 3-35. Disponible en: <http://www.ficem.org/revista-concreto-y-cemento-2016/mobile/index.html#p=1>
- [24] Zongjin L., *“Advanced concrete technology”*, John Wiley & Sons, Inc. (2011).
- [25] Baker I., *“Fifty materials that make the world”*, Springer (2018).
- [26] Neves J., Correia A., Freire A., de Brito J., *“Aggregates”*, Springer (2013).
- [27] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, *“Los aditivos para concreto en seis pasos”*, Construcción y tecnología 7 (2006) 32 – 38.
- [28] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto *“El Concreto”*. Disponible en www.imcyc.com/concreto Fecha de consulta: 24 de abril de 2018.
- [29] Rojas L., *“Hoja de ruta de la industria del cemento de América Latina y el Caribe, hacia una economía baja en carbono”*, Cemento y Concreto de Iberoamérica y el Caribe 3 (2016) 36-44.
- [30] Lukman A., Oyedele L., Akinade O., Ajayi A., Davila M., Bilal M. y Bello S., *“Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator”*, Resources, Conservation and Recycling 129 (2018) 175-1866.
- [31] Liew K.M., Sojobi A. O. y Zhang L. W., *“Green concrete: Prospects and challenges”*, Construction and Building Materials 156 (2017) 1063-1095.

- [32] Ramezaniyanpour A., *“Cement replacement materials, Properties, Durability, Sustainability”*, Springer (2014).
- [33] Khan M., Jamil M., Karim M., Zain M. y Kaish A., *“Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar”*, KSCE Journal of Civil Engineering 21 (2017) 274-284.
- [34] Paiva H., Silva A.S., Velosa A., Cachim P. y Ferreira V. V., *“Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete”*, Construction and Building Materials 140 (2017) 374-384.
- [35] Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX, *“Catalogo de residuos utilizables en construcción”*.
Disponible en <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos> Fecha de consulta: 30 de marzo de 2018.
- [36] Siddique R., Iqbal M., *“Supplementary cementing materials”*, Springer (2011).
- [37] Webster M., *“Structural Materials and Global Climate: A primer on Carbon Emissions for Structural Engineers”*, ASCE, 2017.
- [38] Torgal F. P. y Jalali S., *“Eco-efficient construction and building materials”*, Springer (2011).
- [39] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *“Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos”* (2012).
- [40] Fonta P., *“Resultados del acuerdo de París (COP21) Oportunidades para el sector del cemento y concreto”*. Cemento y Concreto de Iberoamérica y el Caribe 3(2016) 10-16
- [41] Comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo, *“Nuestro futuro común”*, (1987).
- [42] Duran D., Artene A., Gogan L., Duran V., *“The objectives of sustainable development – ways to achieve welfare”*, Procedia Economics and Finance 26 (2015) 812-817.
- [43] Kusuma G., Budidarmawan J., Susilowati A., *“Impact of concrete quality on sustainability”*, Procedia Engineering 125 (2015) 754-759.
- [44] Poombete T., Krichkanok S., Tusanee T., *“Waste generated in high-rise buildings construction: A current situation in Tailand”*, Energy Procedia 138 (2017) 411-416.
- [45] Gálvez-Martos J., Styles D., Schoenberg H. y Zeschmar-Lahl B., *“Construction and demolition waste best management practice in Europe”*, Resources, Conservation and Recycling 136 (2018) 166-178.

- [46] Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, *“Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición”*.
- [47] Radlinski M., Harris N. J. y Moncarz P. D., *“Sustainable Concrete: Impacts of Existing and Emerging Materials and Technologies on the Construction Industry”*, Architectural and Engineering Institute (2017) 252-262.
- [48] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *“Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos”* (2012).
- [49] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, *“Ley general para la prevención y gestión de los residuos”*.
- [50] Cámara Mexicana de la industria de la construcción *“Plan de manejo de residuos de la construcción y demolición (PM-RCD)”*.
- [51] Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México (2016).
- [52] Concretos Reciclados *“Proceso e Instalaciones”*.
Disponible en <http://www.concretosreciclados.com.mx/es/proceso.php> Fecha de consulta: 28 de abril de 2018.
- [53] Margarido F., *“Environmental impact and life cycle evaluation of materials”* Springer (2013) 799-836.
- [54] Hui G., Caijun S., Xuemao G., Jinping Z., Yahong D., Tung-Chai L., Haibo Z. y Yuli W., *“Durability of recycled Aggregate concrete – A review”*, Cement and Concrete Composites 89 (2018) 251-259.
- [55] Khatib J. M., *“Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates”*, Cement and Concrete Research 4 (2005) 763-769.
- [56] Cabral A. E. B., *“Concrete with construction and demolition wastes (CDW)”*, Woodhead Publishing (2013).
- [57] Bravo M., de Brito J., Evangelista L. y Pacheco J., *“Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer’s incorporation and influence of CDW composition”*, Construction and Building Materials 168 (2018) 818-830.
- [58] Martínez I., Martínez F., Vázquez C., y Pérez J., *“Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate”*, Construction and Building Materials 37 (2012) 171-176.
- [59] De Brito J., Pereira A. S., Correira J. R., *“Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates”*, Cement and Concrete Composites 27 (2005) 429-433.

- [60] Mas B., Cladera A., del Olmo T. y Pitarch F., *"Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use"*, Construction and Building Materials 27 (2012) 612-622.
- [61] Dong H. y Ryou S., *"Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate"*, Construction and Building Materials 72 (2014) 56-64.
- [62] Evangelista L. y de Brito J., *"Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates"*, Cement and Concrete Composites 29 (2007) 397-401.
- [63] Cheng-Chinh F., Ran H., Howard H. y Sao-Jeng C., *"Properties of Concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes"*, Construction and Building Materials 112 (2016) 708-715.
- [64] Song H. y Ryou J., *"Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate"*, Construction and Building Materials 72 (2014) 56-64.
- [65] Wang L., Wang J., Qian X., Chen Peiyuan., Xu Y., Guo J. *"An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates"*, Construction and Building Materials 144 (2017) 432-441.
- [66] Tam V., *"A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017)"*, Construction and Building Materials 172 (2018) 272-292.
- [67] Granell E., *"Concretos reciclados y eficiencia energética"*, Construcción y tecnología en concreto 12 (2014) 29-31.
- [68] Residuos profesional "Investigadores mexicanos crean eco ladrillos con residuos de construcción".
Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/ecoladrillos-residuos-de-construccion/> Fecha de consulta: 30 de enero de 2019.
- [67] Ávalos-Rendon T. y Mendoza C.J., *"Study on the Expansion of a Cement-Based System Containing Sap Polymer and Supplementary Cementing Materials"*, Materials Sciences and Applications 8 (2017) 123-134.
- [68] Tasnim S., Ekhlaur M. y Ahmadi R., *"Mechanical performance of modified cement paste made with micro-fine POFA in ammonium nitrate environment"*, Construction and Building Materials 162 (2018) 534-542.
- [69] Cui S., Liu P., Su J., Cui E. y Zhu B., *"Experimental study on mechanical and microstructural properties of cement-based paste for shotcrete use in high-temperature geothermal environment"*, Construction and Building Materials 174 (2018) 603-612.

- [70] Franus W., Panek R., Wdowin M. *“SEM Investigation of Microstructures in Hydration Products of Portland Cement”*, Springer (2015).
- [71] Rodriguez de Sensale G. y Rodriguez Viacava I., *“A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler”*, Construction and Building Materials 166 (2018) 873-888.
- [72] Hernández E. F., Pfeiffer Perea H. y Cano Barrita P. F., *“Influencia del mucilago de nopal y extracto de algas cafés en el grado de hidratación de pastas de cemento Portland ordinario”*, Nexa Revista Científica 30 (2017) 73-83.
- [73] Monteagudo S.M., Moragues A., Galvez J. C., Casati M.J. y Reyes E., *“The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases”*, Thermochemical Acta, 592 (2014) 37-51.
- [74] Song S., Jiang L., Jiang S., Yan X., Xu N., *“The mechanical properties and electromechanical behavior of cement paste containing Nano-MgO at different curing temperature”*, Construction and Building Materials 164 (2018) 663-617.
- [75] Bhatti J., *“Hydration versus strength in a Portland Cement developed from domestic mineral wastes – A comparative study”*, Thermochemical Acta 106 (1986) 93-103.
- [76] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, *“Pruebas de resistencia a la compresión del concreto”*, Construcción y tecnología 6 (2006) 19 – 22
- [77] González O. M. y Robles F., *“Aspectos fundamentales del concreto reforzado”* Limusa (2005).
- [78] Forbes T. Z. *“X-ray Diffraction”* Springer (2016).
- [79] Cordero A., *“El origen del estudio de los cristales en México”*, Sociedad Mexicana de Cristalografía.
Disponible en: www.smcr.fisica.unam.mx/8temasutiles/articulosutiles/origen1.htm
Fecha de consulta: 18 de Febrero de 2018.
- [80] Aparicio M. y Carbajal G., *“Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias”*, Mundo Nano Vol3 No.2 (2010) 62-72.
- [81] Zhu Y., Inada H. *“Scanning Electron Microscopy”*, Springer (2012).
- [82] Okano Y., *“Scanning Electron Microscopy”*, Springer (2018).
- [83] Kohout T., Karlqvist R., Lassila I., Eskelinen J., Horling A., Pesonen L. y Haggstrom E., *“Ultrasonic Determination of Porosity in Homogeneous Ceramic Samples”*, Geophysical 49 (2013) 25-32.

- [84] Zou Y., Malzbender J., *“Development and optimization of porosity measurement techniques”*, *Ceramics International* 42 (2016) 2861-2870.
- [85] Matejicek J., Kolman B., Dubsky J., Neufuss K., Hopkins N., Zwick J., *“Alternative methods for determination of composition and porosity in abradable materials”*, *Materials Characterization* 57 (2006) 17-29.
- [86] Bottom R., *“Thermogravimetric Analysis”*, Blackwell Publishing (2008).

APÉNDICE

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN [76, 77]

La resistencia a la compresión del concreto, es una propiedad del desempeño de este material y es comúnmente utilizada para el diseño de estructuras. El ensayo a compresión, se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una sollicitación axial, la cual pretende comprimir la probeta de ensayo.

La resistencia a la compresión denominada f_c , se mide tronando probetas cilíndricas o cúbicas, en una máquina de ensayos a compresión como la mostrada en la figura A1. La resistencia a la compresión, se calcula a partir de la carga de ruptura (P) dividida entre el área de la sección que resiste a la carga (A). Se expresa en términos de esfuerzo, generalmente kg/cm^2 o MPa de acuerdo con el sistema internacional de unidades (SI).



Fig. A1 Marco de carga para pruebas de resistencia a la compresión.

En un ensayo a compresión, los especímenes se encuentran sujetos a carga axial (P) repartida uniformemente en la sección transversal (A). 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 del espécimen, se obtiene la curva esfuerzo deformación y el esfuerzo máximo soportado (figura A2).

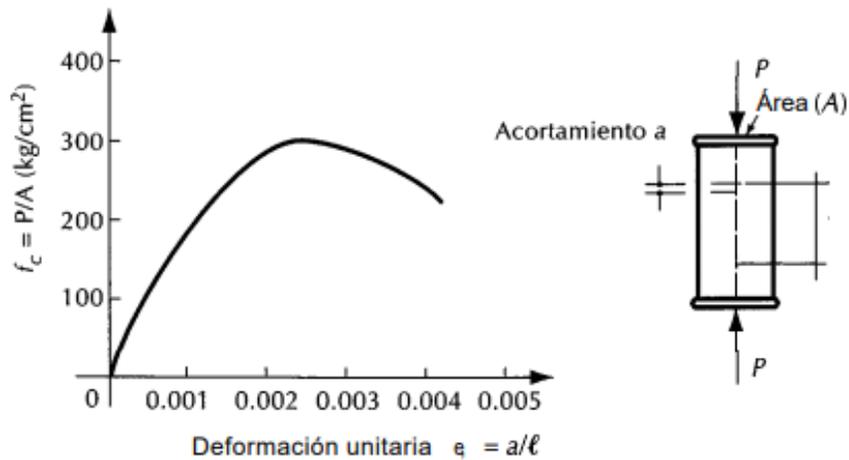


Fig. A2 Curva esfuerzo-deformación de un espécimen sujeto a carga de compresión [77].

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) [78-80]

La difracción de rayos X, es una técnica analítica usada principalmente para la identificación y cuantificación de fases cristalinas. Esta técnica, se basa en el fenómeno característico de las ondas, el cual consiste en la dispersión de ondas cuando estas interactúan con un objeto de unidades ordenadas.

Los Rayos X, fueron descubiertos por el físico alemán W.R. Röntgen quien los denominó así, debido a su naturaleza desconocida. En 1912, Max Von Laue formuló la teoría de la difracción de rayos X en cristales, lo cual permitió probar la naturaleza de los rayos X determinando que eran una radiación electromagnética de longitud de onda corta y frecuencia elevada, esto proporcionó un nuevo método para estudiar la materia.

En 1914 los Bragg, padre e hijo, lograron demostrar que los rayos X difractados por los cristales, podrían considerarse como reflexiones desde los planos atómicos de una estructura cristalina, dependiendo del ángulo de difracción para una determinada longitud de onda.

La hipótesis de Bragg, explicada en la figura A3, consistió en imaginar la difracción como una reflexión de los rayos X en los planos de átomos de la red cristalina de naturaleza repetitiva. Los planos están separados entre sí por distancias interplanares constantes d . El haz de rayos X, de longitud de onda λ , incide en fase sobre los planos con un ángulo de incidencia θ , formando así un frente de onda.

Es necesario, que tras la reflexión el haz de rayos X siga estando en fase. Esta situación solo ocurrirá si la diferencia de caminos recorridos por los frentes de onda, OF y OH (frentes de onda antes y después de la reflexión, respectivamente) son un número entero de la longitud de onda. Esa condición equivale a decir, que la suma de los segmentos FG y GH corresponde a un número entero (n) de veces la longitud de onda (λ):

$$FG + GH = n \cdot \lambda \quad (1)$$

Pero $FG = GH$ y $\text{sen}\theta = FG/d$ es decir: $FG = d \text{ sen}\theta$ con lo que la expresión (1) se convierte en la Ley de Bragg:

$$2 \cdot d \cdot \text{sen} \theta = n \cdot \lambda$$

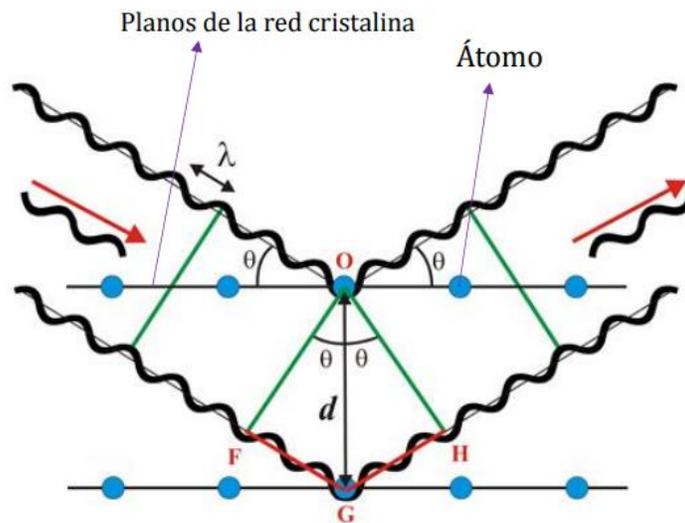


Fig. A3 Diagrama de la Ley de Bragg.

El tubo de rayos X convencional, como se muestra en la figura A4, consta de un cátodo con un filamento de tungsteno (W), el cual al calentarse emite electrones, que inciden en el blanco o ánodo generando un espectro de rayos X característico del blanco. La radiación, se emite en todas las direcciones, pero la que realmente es aprovechada es la que logra salir por las ventanas de Berilio (Be). Estos rayos X producidos en el tubo, son los que se hacen incidir en el material de estudio.

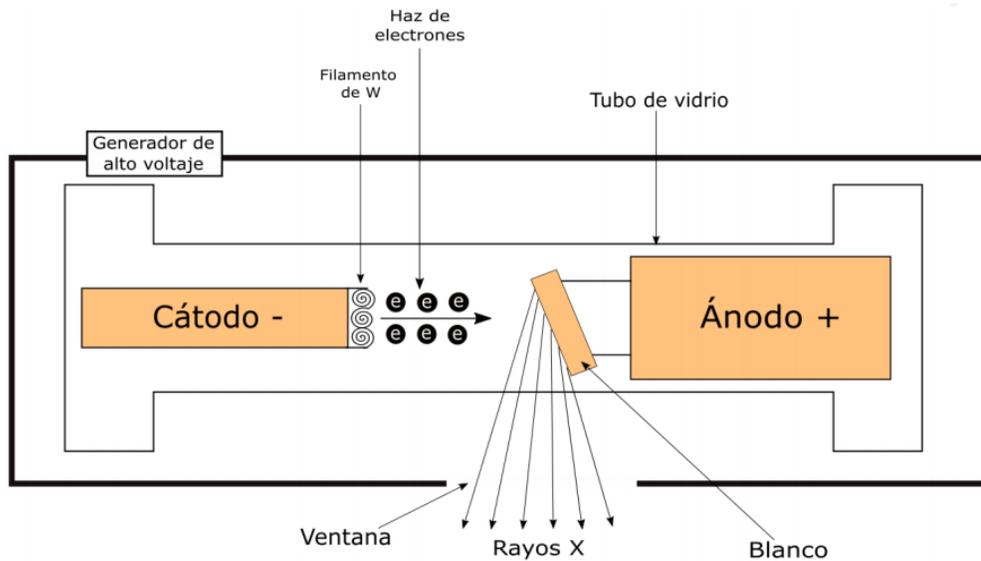


Fig. A4 Tubo de rayos X convencional.

Cada vez que se satisface la ley de Bragg en un experimento de DRX, el haz primario se difracta desde la muestra hacia un detector, el cual mide la intensidad de dicha radiación. De esta manera se obtiene el patrón de difracción de la muestra o difractograma.

La información que se genera a partir de los difractogramas, permite determinar el sistema cristalino al que pertenece el material, así como los parámetros de celda. Es decir, la unidad mínima con la que se genera un cristal. Con las intensidades de las reflexiones, es posible determinar la distribución de los átomos dentro de la celda (análisis estructural). La geometría de los perfiles en los “picos” o máximos de difracción permite determinar el tamaño de los cristales.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

El microscopio electrónico de barrido (MEB), es una de las herramientas para la obtención de una imagen microscópica, esta técnica revela la topografía de la superficie de una muestra, su composición y otras propiedades físicas y químicas.

El microscopio electrónico de barrido utiliza un haz de electrones enfocado. Cuando el haz de electrones enfocado irradia una muestra, se generan varias señales como consecuencia de la interacción de los electrones incidentes con los átomos de la muestra, como se observa en la figura A5.

Como resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra, se producen varios tipos de radiaciones como los electrones secundarios (ES) y los electrones retrodispersados (ERD). Los primeros son electrones de baja energía, que resultan de la emisión por parte de los átomos que constituyen la muestra (los más cercanos a la superficie) debido a la colisión con el haz incidente. En cambio, los electrones retrodispersados son electrones del haz incidente que han interactuado (colisionado) con los átomos de la muestra y han sido reflejados. La intensidad de ambas emisiones varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material, es decir, depende de la topografía de la muestra.

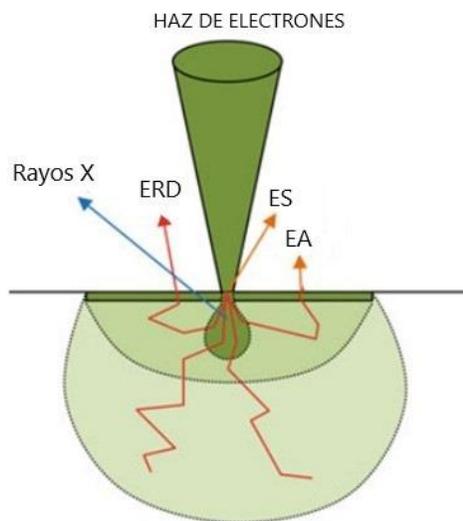


Fig. A5 Señales emitidas tras la interacción del haz de electrones con una muestra. Electrones Secundarios (ES), Electrones retrodispersados (ERD), Electrones Auger (EA) y rayos X.

Las partes principales de un microscopio electrónico de barrido como el mostrado en la figura A6, son:

- Cañón de electrones. Cuenta con un filamento de tungsteno, al cual se le aplica una señal de alto voltaje para generar un haz de electrones.
- Sistema de lentes electromagnéticas, que logra producir un haz electrónico delgado (coherente) y enfocararlo sobre el espécimen.
- Apertura, es una placa muy pequeña, metálica de platino con un diminuto orificio, que se coloca después de las lentes con el fin de disminuir el grosor del haz de electrones.

- Lente objetiva final. Proporciona la amplificación final, está formada por un sistema deflector (bobinas de barrido) que mueve el haz de electrones sobre superficie de la muestra y un astigmador que elimina distorsiones en las señales.

La señal emitida por los electrones y la radiación resultantes del impacto, se recoge mediante un detector y se amplifica para cada posición. El resultado es una imagen topográfica muy ampliada de la muestra. Con los electrones secundarios, se obtiene una imagen de apariencia tridimensional de la muestra. La intensidad de emisión de los electrones retrodispersados, depende del número atómico medio de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados. Una imagen originada por los electrones retrodispersados, revela diferencias en la composición química por diferencias de contraste.

El espectro de radiación de rayos X emitido por un material, en el proceso puede ser utilizado para hacer un microanálisis químico semicuantitativo, mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés).

La espectroscopía de dispersión de energía (EDS), es una técnica complementaria de la microscopia electrónica de barrido. Los rayos X liberados en la superficie de la muestra, llevan una firma energética única específica de cada elemento. El análisis EDS proporciona información sobre la composición química elemental de la muestra.

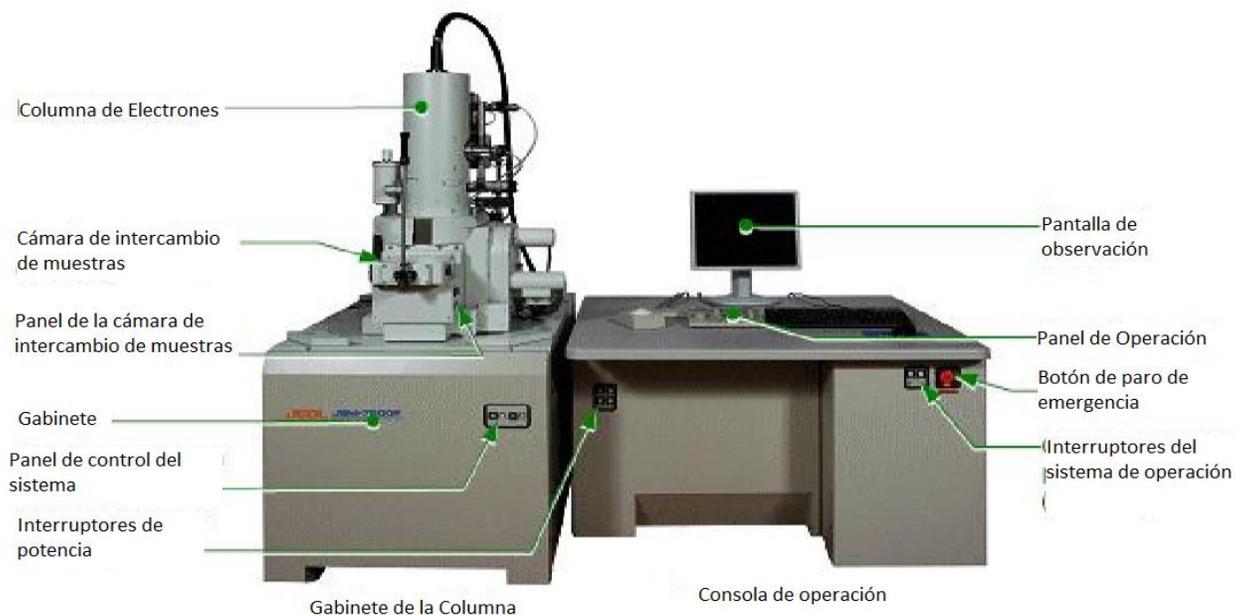


Fig. A6 Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7600F.

POROSIDAD POR EL MÉTODO DE INMERSIÓN DE ARQUÍMEDES [83-85]

El método de inmersión de Arquímedes, es un método cualitativo utilizado para medir la porosidad y se basa en el principio de flotabilidad de Arquímedes. A medida que los poros se llenan de agua, la muestra gana peso y esta ganancia es proporcional al volumen de la porosidad, con este método podemos obtener la porosidad abierta de una muestra.

La muestra porosa, debe sumergirse en un fluido perfectamente humectante durante un tiempo suficiente largo hasta que la red porosa se empape por completo con el fluido.

La medición consiste en pesar la muestra en tres estados: secada al horno, es decir, la muestra en aire con poros libres; saturada o la muestra en aire con los poros saturados; y saturada suspendida en agua. La porosidad se puede determinar con la siguiente expresión:

$$p = \frac{(m_S - m_{SH})}{(m_S - m_{SA})}$$

donde:

p, porosidad

m_S, peso de la muestra saturada, [g]

m_{SH}, peso de la muestra secada al horno [g]

m_{SA}, peso de la muestra saturada suspendida en agua, [g].

Las mediciones deben realizarse lo más rápido posible para que no se presenten cambios de peso debido a la evaporación. Pueden utilizarse otros líquidos diferentes al agua.

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (ATG) [86]

Se define como análisis térmico, a un grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o de sus productos de reacción en función de la temperatura, mientras esta se somete a un programa de temperatura controlado.

El análisis termogravimétrico (ATG), es una técnica experimental en la que se mide la masa de una muestra en función de la temperatura de la muestra. La muestra, se calienta a una velocidad de calentamiento constante (llamada medición dinámica) o se mantiene a una temperatura constante (medición isotérmica). Mediante esta técnica, se observa la

evolución de la masa de una muestra frente al tiempo o frente a la temperatura. Diferentes condiciones del medio pueden causar que una muestra pierda, o incluso gane masa, y así producir etapas relacionadas con diferentes procesos en la curva termogravimétrica. Algunos de los procesos que se pueden presentar, según el caso, son los siguientes:

- Evaporación de componentes volátiles. Secado, desorción y absorción de gases. Pérdida de agua de cristalización.
- Oxidación de metales en aire u oxígeno.
- Descomposición de sustancias orgánicas en aire u oxígeno.
- Descomposición térmica en una atmósfera inerte con la formación de productos gaseosos. Con compuestos orgánicos, este proceso se conoce como pirólisis o carbonización.
- Reacciones químicas heterogéneas, en las que un material de partida se toma de la atmósfera. Por ejemplo, reacciones de reducción con un gas de purga que contiene hidrógeno. Además, las reacciones en las que se desarrolla un producto, por ejemplo, descarboxilación o reacciones de condensación.
- Materiales ferromagnéticos. Las propiedades magnéticas de algunos materiales cambian con la temperatura (transición de Curie). Si la muestra se mide en un campo magnético no homogéneo, el cambio en la atracción magnética en la transición genera una señal termogravimétrica. El campo magnético se produce colocando un imán permanente muy cerca del horno cerca de la muestra.

Los equipos en los que se realizan los ensayos termogravimétricos, se llaman termobalanzas y se componen de una microbalanza electrónica, un horno, un programador de temperatura, un controlador para la atmósfera de trabajo y un equipo que registra todos los datos que se generan durante el ensayo. La figura A7, muestra un esquema de los elementos que componen una termobalanza.

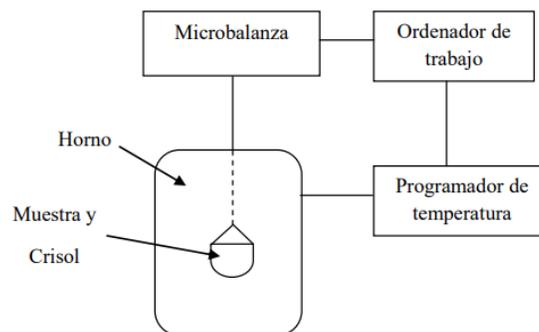


Fig. A7 Diagrama de una termobalanza genérica.