



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SOLIDOS**

**ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS Y AGUA
RESIDUAL TRATADA EN LA CONSTRUCCIÓN DE BANQUETAS Y
GUARNICIONES**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

MAYANIN GISELA RAMÍREZ TENJHAY

TUTOR PRINCIPAL

**M. I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

**DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DRA. LEONOR PATRICIA GÜEREC A HERNÁNDEZ
Secretario: M. A. I. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS
Vocal: M. I. CARLOS MANUEL MENÉNDEZ MARTÍNEZ
1 er. Suplente: DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA
2 do. Suplente: M.I ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

Ciudad Universitaria, CD. MX.

TUTOR DE TESIS:

M.I ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

FIRMA

DEDICATORIAS

A Dios gracias, por que ser mi padre, el amigo que nunca falla y la luz que guia mi camino.

A mi bella, insuperable e inigualable mama, por el sacrificio de cada día. Después de la vida, ella es el regalo más grande que Dios me dio.

A mi esposo, por aceptar ser mi compañero de batalla, por entenderme, motivarme, apoyarme incondicionalmente y por creer en mi.

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos, quienes me inspiran para ser mejor cada día.

A mi familia, por darme todo su apoyo y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

A mis suegros, por sus muestras amor, solidaridad y apoyo, por hacerme sentir como su hija.

Un agradecimiento especial a la M.I. Alva Beatriz Vázquez González por aceptarme desde el primer día sin conocerme, por todo su tiempo, paciencia y disponibilidad. Encontré algo más que una amiga.

Al mi comité tutorial, por su asesoramiento durante el desarrollo de la tesis y por sus valiosas sugerencias y comentarios.

A mis compañeros de generación, por su amistad y sobre todo por los momentos divertidos que compartimos.

Al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo en mi formación académica.

...y a todos aquellos que hicieron posible la elaboración y desarrollo de este trabajo.

¡Gracias!

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO.....	7
2.1.1 <i>Impactos ambientales de los RCD</i>	9
2.2 AGREGADOS PROCEDENTES DE RCD.....	10
2.2.1 <i>Agregados reciclados</i>	10
2.2.2 <i>Resistencia de agregados reciclados</i>	10
2.3 PROPIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS.....	10
2.3.1 <i>Textura y forma</i>	10
2.3.2 <i>Absorción del agua</i>	11
2.3.3 <i>Densidad</i>	11
2.4 PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS.....	11
2.4.1 <i>Características de concreto reciclado en estado fresco</i>	12
2.4.2 <i>Características de concreto reciclado en estado endurecido</i>	13
2.5 CONSUMO HÍDRICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	14
2.6 EL AGUA EN EL CONCRETO.....	15
2.6.1 <i>Hidratación del cemento</i>	17
2.6.2 <i>Calidad del agua, sus propiedades y efectos en el concreto</i>	17
2.7 SUSTENTABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN.....	18
3 METODOLOGÍA	24
3.1 ETAPA I - ESTUDIO DE GABINETE.....	24
3.2 ETAPA II - TRABAJO DE CAMPO.....	24
3.2.1 <i>Cemento</i>	25
3.2.2 <i>Agua</i>	25
3.2.3 <i>Agregados</i>	25
3.3 ETAPA III – CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL TRATADA Y AGREGADOS VÍRGENES Y RECICLADOS.....	26
3.3.1 <i>Caracterización de agua</i>	26
3.3.2 <i>Caracterización de agregados vírgenes y reciclados</i>	27
3.4 ETAPA IV - DISEÑO DE EXPERIMENTO.....	36
3.4.1 <i>Diseño de Mezclas</i>	36
3.4.2 <i>Proporciones de Mezclas</i>	37
3.5 ETAPA V - PRUEBAS DE CONCRETO ES ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO.....	39
3.5.1 <i>Pruebas en estado fresco</i>	40
3.5.2 <i>Pruebas en estado endurecido</i>	45
4 RESULTADOS	49
4.1 EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL TRATADA.....	49
4.2 EVALUACIÓN DE GRANULOMETRÍA CONFORME A LA N-CMT-2-02-002-02.....	50
4.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE PRUEBAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS.....	53
4.4 PRUEBAS DE CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO.....	54

4.5	ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	56
4.5.1	<i>Microscopia electrónica de barrido</i>	59
4.5.2	<i>Análisis de varianza</i>	60
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
5.1	CONCLUSIONES	63
5.2	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS.....	65
6	REFERENCIAS	67
	ANEXO I: PROCEDIMIENTOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA ...	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de RCD y su posible reúso.....	8
Tabla 2.2 Comparación de CAR y CANV.....	14
Tabla 2.3 Consumo de energía por tonelada de extracción de ANV	21
Tabla 2.4 Emisiones de CO ₂ por tonelada de extracción de ANV.....	21
Tabla 3.1 Resumen de pruebas y normas para caracterización del ART	27
Tabla 3.2 Resumen de pruebas y normas para caracterización de agregados gruesos	28
Tabla 3.3 Resumen de pruebas y normas para caracterización de agregados finos	29
Tabla 3.4 Clasificación de arena por módulo de finura	32
Tabla 3.5 Propuesta de mezclas.....	37
Tabla 3.6 Agua en kg por m ³ de concreto para TMA	37
Tabla 3.7 Dependencia entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del concreto ...	38
Tabla 3.8 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	38
Tabla 3.9 Dosificación en estado sss.....	39
Tabla 3.10 Dosificación corregida por absorción y humedad	39
Tabla 3.11 Pruebas de concreto en estado fresco.....	41
Tabla 4.1 Parámetros de calidad del agua residual tratada	49
Tabla 4.2 Granulometría de agregado virgen grueso.....	50
Tabla 4.3 Granulometría de agregado reciclado grueso	50
Tabla 4.4 Granulometría de agregado virgen fino	51
Tabla 4.5 Granulometría de agregado reciclado fino.....	51
Tabla 4.6 Resultados de caracterización de agregados gruesos	53
Tabla 4.7 Resultados de caracterización de agregados finos	53
Tabla 4.8 Resultados de pruebas en estado fresco.....	55
Tabla 4.9 Resistencia a la compresión	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Área de almacenamiento de agregados en PCR.....	26
Figura 3.2 EPCM, homogenización de materiales.....	28
Figura 3.3 Criba mecanizada para AG.....	30
Figura 3.4 Criba manual para AF.....	30
Figura 3.5 Obtención de densidad para AG.....	34
Figura 3.6 Determinación de estado sss para AF.....	35
Figura 3.7 Determinación de densidad para AF.....	36
Figura 3.8 Elaboración de mezclas.....	40
Figura 3.9 Prueba de revenimiento.....	42
Figura 3.10 Determinación de peso volumétrico de concreto fresco.....	43
Figura 3.11 Prueba de contenido de aire.....	43
Figura 3.12 Elaboración de especímenes.....	44
Figura 3.13 Desmolde e identificación de especímenes.....	45
Figura 3.14 Prueba de resistencia a la compresión.....	46
Figura 3.15 Preparación de muestra para SEM.....	47
Figura 3.16 Preparación de muestra para SEM.....	47
Figura 3.17 obtención de imágenes SEM.....	48
Figura 4.1 Curvas granulométricas de agregados gruesos.....	52
Figura 4.2 Curvas granulométricas de agregados finos.....	53
Figura 4.3 Representación gráfica de la resistencia a la compresión promedio a los 7 y 14 días.....	56
Figura 4.4 Representación gráfica de resistencia la compresión promedio a los 28 días de las mezclas CAN, R25, R30 y R100.....	58
Figura 4.5 Representación gráfica de resistencia a la compresión promedio a los 28 días de las mezclas CAN, CAN*, CAR y CAR*.....	59
Figura 4.6 Imágenes SEM a 200x sobre muestra de sección pulida.....	60
Figura A.1 Medidor de pH, temperatura y conductividad.....	76
Figura A.2 Obtención de demanda bioquímica de oxígeno ₅	77
Figura A.3 Determinación de sólidos.....	79
Figura A.4 Determinación de alcalinidad.....	80
Figura A.5 Determinación de dureza total.....	81
Figura A.6 Determinación de grasas y aceites.....	83
Figura A.7 Determinación de demanda química de oxígeno, sulfatos y cloruros.....	84

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A/C	Relación Agua Cemento.
ANV	Agregado Natural Virgen.
ANVF	Agregado Natural Virgen Fino.
ANVG	Agregado Natural Virgen Grueso.
AP	Agua Potable.
AR	Agregado Reciclado.
ARF	Agregado Reciclado Fino.
ARG	Agregado Reciclado Grueso.
ART	Agua Residual Tratada.
BTU	British Termal Unit.
CAR	Concreto de Agregado Reciclado.
CANV	Concreto de Agregado Natural Virgen.
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
CMM	Centro de Mario Molina.
CPC	Cemento Portland Compuesto.
CPO	Cemento Portland Ordinario.
EDTA	Ácido etilendiaminotetracético
EPCM	Etapas previas a la caracterización de materiales.
$f'c^*$	Resistencia a la compresión de diseño.
GEI	Gases Efecto Invernadero.
CE	Índice de consumo energético.
LGPGIR	Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
LMFI-UNAM	Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad. Nacional Autónoma de México.
NIST	National Institute of Standards and Technology.
NSC	National Stone Council.
MDS	Mínima diferencia significativa.
Mvc	Masa volumétrica compactada.
PCR	Planta de Concretos Reciclados.
PTAR-CE	Planta de Tratamiento de Agua Residual Cerro de la Estrella.
RCD	Residuos de la Construcción y Demolición.
SEM	Sacanning Electron Microscopy.
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
SSS	Saturado superficialmente seco.
TMA	Tamaño Máximo de Agregado.
WBCSD	Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible.
ZTI	Zona de Transición Interfacial

1 INTRODUCCIÓN

El concreto está compuesto por agregados naturales vírgenes (ANV), pasta cementante y agua; la extracción, producción y uso de estos produce afectaciones al ambiente. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, WBCSD por sus siglas en inglés (2009), establece en el documento *Iniciativa de la sustentabilidad del cemento* que “el concreto es el segundo material más usado después del agua” (p. 2), señalándolo como la base para el entorno urbano y formando al ambiente construido, debido a su versatilidad, durabilidad y economía. En los últimos años se considera que las prácticas en la industria de la construcción no han sido sustentables, debido a los altos consumos de energía, altas emisiones de CO₂ y gases efecto invernadero a la atmósfera, y el uso de recursos no renovables.

Por otra parte, se generan millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición (RCD); por ejemplo, solamente en Europa, Estados Unidos y Japón se generan más de 900 millones de toneladas cada año (WBCSD, 2009). Debido a la falta de planes de manejo para este tipo de residuos, en el mejor de los casos son dispuestos en rellenos sanitarios reduciendo su vida útil, pero usualmente son dispuestos de manera inadecuada produciendo contaminación al agua, suelo y aire; sin considerar opciones para su reúso o aprovechamiento en nuevas construcciones. Aunado a esto se tienen los altos consumos de agua potable para los procesos de producción de cemento, fabricación de concreto y curado de las estructuras recién construidas.

1.1 Justificación

El concreto es uno de los materiales más utilizados ampliamente en la construcción, se estima que la producción media anual de concreto es de alrededor de una tonelada por cada ser humano en el mundo. Los ANV, son el principal componente del concreto y su consumo se incrementa paralelamente con el aumento de la producción de cemento y la utilización de concreto (Marie y Quiasrawi, 2012). La WBCSD estimó una producción global de concreto en 2006, de 21 a 31 billones de toneladas, asumiendo una composición de acuerdo con Kosmatka, et al. (2004) de 75% de agregados, 15% de agua y un 10% material cementante, lo que da un consumo promedio de 19.5 billones de toneladas de ANV y casi 4 billones de toneladas de agua.

El uso de agua potable en la industria ha sido causa de sobreexplotación de fuentes de agua subterránea y una sobredemanda en la extracción de aguas superficiales de manera tal que a nivel internacional se manifiesta una problemática ambiental cada vez más crítica debido a la falta de disponibilidad de fuentes de abastecimiento y a su calidad (Van den Heede y De Belie, 2012). De acuerdo con los resultados publicados en el 2013 en el Atlas del Agua en México se espera tener un incremento en la población entre 2012 y 2030 de aproximadamente 20.4 millones de personas. Como resultado se estima que habrá una disminución en la disponibilidad de agua media per cápita de 4,090 m³ que se tenía en el 2010 a 3,815 m³ para el 2030. En la Ciudad de México el agua es uno de los principales problemas, tan solo la extracción de agua para la Zona Metropolitana es de 2,922 hm³/año rebasando la disponibilidad natural de la cuenca del Valle de México en un 173% (Ortega, 2011).

Por otra parte, grandes cantidades de desechos son generadas a partir de los procesos constructivos, obras de demolición y restauración de estructuras y edificios (Suárez, et al., 2006, p. 2). Las principales razones son la demolición de edificios viejos, deterioro estructural, reordenamiento de la ciudad, la expansión de vías de comunicación y en algunos casos desastres naturales (huracanes, terremotos, inundaciones, incendios). La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) estimó una generación nacional de RCD de 6.08 millones de toneladas por año en el 2011 y tomando en cuenta un crecimiento en la industria de la construcción de 5% promedio anual se traduce a 9.2 millones de toneladas por año para el 2018. Solamente en la Ciudad de México se generan alrededor de 7,000 t/d de RCD (NADF-007-RNAT-2013).

Esta situación obliga a buscar alternativas para reducir el consumo de ANV y de agua en la producción de cemento y concreto. Una posible solución a estos problemas es el uso de materiales reciclados en la producción de concreto hidráulico para la construcción de banquetas y guarniciones, lo que podría contribuir con información técnica que sustente a la NADF-007-RNAT-2013, norma ambiental para el Distrito Federal, que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción.

La sustitución de los ANV por agregados reciclados (AR) en la producción de concreto, se ha convertido en un tema de interés entre los investigadores hoy en día. El uso de AR genera beneficios ambientales, entre los que se incluyen la reducción de RCD dispuestos de manera clandestina, y el volumen depositado en rellenos sanitarios, además de que se reduce la demanda

sobre ANV. No obstante, la utilización de AR se ha visto obstaculizada por problemas técnicos debido a sus propiedades en comparación con los ANV (Marie y Quiasrawi, 2012).

1.2 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es evaluar las posibilidades de uso de agregados reciclados (AR) provenientes de los RCD y el uso de agua residual tratada (ART), en la elaboración de concreto hidráulico para banquetas y guarniciones, mediante la determinación de ciertas propiedades básicas de concreto de agregados reciclados (CAR), comparando los resultados con las propiedades de un concreto elaborado con agregados naturales (CAN).

1.2.1 *Objetivos específicos*

- Construir especímenes de concreto, sustituyendo diferentes porcentajes de ANV por AR y reemplazando agua potable por ART, de acuerdo a la NMX-C-159-ONNCCE-2009.
- Probar la resistencia a la compresión en especímenes de concretos fabricados con ANV, AR y ART, con base en la NMX-C-083-ONNCCE-2014.
- Determinar el cumplimiento de la norma de la Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT) N-CTR-CAR-1-02-010.
- Estimar los beneficios ambientales de utilizar AR y ART.

1.3 Alcances y limitaciones

Con la elaboración de este trabajo se pretende proponer un reúso de RCD y promover el uso de ART en la producción de concreto para contribuir a la preservación del ambiente, y recomendar su uso en la construcción de banquetas y guarniciones, y de esta manera contribuir técnicamente a la aplicación de la NADF-007-RNAT-2013.

En el presente trabajo se usaron RCD provenientes de la Planta de Concretos Reciclados S. A de C. V. (PCR) y ART proveniente de la planta de tratamiento de agua residual Cerro de la Estrella (PTAR-CE). La PCR es la única empresa en el país dedicada al tratamiento de RCD para su posterior uso como agregados reciclados. La tecnología de los equipos es similar a la utilizada en Inglaterra y España; es altamente especializada, computarizada y operable a control remoto. Además, el equipo cuenta con complementos que le permiten remover el acero del concreto,

obtener materiales desde 3” de tamaño máximo y ser graduados conforme a la normativa. El agua residual municipal tratada fue obtenida de la PTAR-CE ya que tiene un tren de tratamiento convencional, constituido por cribado, desarenación, sedimentación primaria y lodos activados como tratamiento biológico. Este tren de tratamiento para las aguas residuales municipales es común en varias ciudades del país.

2 MARCO TEÓRICO

El uso más antiguo que se tiene de los AR es en carreteras de Roma y en general en el continente Europeo al término de la segunda guerra mundial (Shing, 2004), desde entonces se han realizado diversos trabajos de investigación en varios países obteniendo resultados prometedores del uso de AR. Japón lleva más de un cuarto de siglo de investigación habiendo logrado un incremento en su uso, principalmente como material de sub-base en la construcción de carreteras de un 48% en 1990 a casi el 96% en 2000; gracias a iniciativas como la ley de reciclaje en 1991, el programa "Reciclar 21" en 1992, y "Las especificaciones sugeridas de calidad para la reutilización de materiales de concreto demolido en la construcción de obras" (Rao, et al. , 2007).

Al igual que Japón en el mundo se han tomado acciones para incrementar el uso de AR algunas de ellas son (WBCSD, 2009):

- Holanda prohíbe tirar RCD por lo que todo el concreto es reciclado a excepción de algunos residuos no reciclables.
- En Estados Unidos 38 estados utilizan AR en sub-base de carreteras y 11 en concreto nuevo.
- Brasil cuenta con legislación e instalaciones de reciclado que promueven el manejo de RCD.
- La legislación de Finlandia obliga a que todo el material potencialmente reciclable del sitio de demolición sea reciclado/reusado.
- En Taipei, China se estima una recuperación de RCD de alrededor del 90% y una tasa del 95% para concreto.
- Después del sismo del 2005 en Cachemira pakistaní, se aplicó la experiencia de Bélgica para promover la reutilización y el reciclaje de RCD.
- Qatar y los Emiratos Árabes Unidos tienen en desarrollo programas de reciclaje para producir agregados. El costo de los ANV impulsa el proceso en Qatar. En los Emiratos Árabes Unidos, las preocupaciones ambientales y las restricciones del gobierno en materia de residuos son los principales impulsores.
- En Australia se han realizado proyectos de AR en concreto hidráulico; sin embargo, el objetivo de la industria es que se tengan a nivel global mejores resultados ambientales en aplicaciones con bajos estándares de calidad del concreto.
- Tailandia utiliza concreto rechazado en prefabricados para proyectos comunitarios.
- Sur África cuenta con un mercado en Ciudad del Cabo para los AR.

Ahmad (2008), hace referencia al uso internacional de AR y la amplia gama de aplicaciones que se les puede dar, entre las que cita:

- En el proyecto Lenthall Street en Sydney, Australia se emplearon AR en cunetas y guarniciones.
- Material base en carreteras demostrando que se tiene un mejor comportamiento comparado con ANV. Además de brindar beneficios adicionales cuando se emplea en zonas húmedas de la sub rasante mejorando la estabilización de la base y la superficie de trabajo para la pavimentación.
- Un estudio de Desarrollo del Mercado para Productos de AR (2001) concluyó que el uso de estos materiales en terraplenes al igual que el ejemplo anterior optimizan la estabilización en áreas húmedas y la superficie de trabajo para ejecutar otras obras consecutivas.
- Fabricación de adoquines en Hong Kong para el sector de vivienda, donde se empezó un proyecto piloto para determinar su rendimiento a largo plazo en el 2002.
- En el 2001 el Instituto de Investigación en la Construcción de Noruega demostró a través de resultados de laboratorio que es factible utilizar AR como material de relleno en zonas de tubería a lo largo de las trincheras.
- En el 2001 se empleó en bloques de construcción para aislamiento de sonido los cuales cumplieron con todos los requerimientos en las pruebas de laboratorio.
- A las afueras de la ciudad de Oslo, Noruega se empleó concreto de agregados reciclados (CAR). Un 35% de AR fue sustituido para el concreto de la cimentación y un 50% en paredes y columnas del sótano. Las pruebas correspondientes en estado fresco y endurecido dieron resultados satisfactorios no mostrando afectaciones en las pruebas de congelación y deshielo para el 35% de contenido de AR y no se tuvo un incremento en el agrietamiento del concreto.

Sin embargo, pese a que se ha demostrado que el uso de AR contribuye a la disminución RCD y del uso de ANV, siguen siendo considerados materiales de baja calidad ya que sus propiedades vírgenes (mecánicas, físicas y/o químicas) se ven afectadas (Marinković et al., 2010).

De acuerdo con Silva et al., 2014: *Mientras que el reciclaje se cita a menudo como la mejor manera de manejar RCD, todavía hay varios obstáculos para el uso de AR en la construcción (p. 202):*

- *Falta de confianza por los clientes y contratistas,*
- *La incertidumbre en cuanto a sus beneficios ambientales,*

- *La falta de normas y especificaciones técnicas,*
- *Baja calidad del producto final, debido a la falta de conocimiento y/o intereses de los propietarios de plantas de reciclaje de RCD,*
- *Distancia entre los sitios de construcción y demolición y plantas y*
- *Disponibilidad en cantidad y calidad para satisfacer la demanda.*

Para enfrentar estos obstáculos es esencial fortalecer técnicamente el marco normativo para contribuir a un desarrollo del mercado en materiales reciclados, que provea al usuario seguridad al utilizarlos en la construcción.

2.1 Manejo de residuos de la construcción y demolición en el Valle de México

La mayor parte de los RCD son dispuestos de manera clandestina en la calle, quebradas, caminos, barrancas y otros accidentes naturales, contaminando el ambiente, afectando la salud y seguridad de los habitantes. Es por ello que en la Ciudad de México y con el objeto de promover su uso y reducir al mínimo la eliminación inadecuada, se crea la primera norma en el país que establece la clasificación y especificaciones de manejo de RCD, NADF-007-RNAT-2004, publicada en la Gaceta Oficial el 12 Julio de 2006. Por otra parte en el año 2004 se inaugura Concretos Reciclados SA de CV, ubicada en el cerro “Yehualique”, Delegación Iztapalapa Ciudad de México, antigua mina de arena y grava “La Esperanza “, la primera planta privada del país, y segunda de América Latina, dedicada a la recepción, almacenamiento y tratamiento de RCD, con una capacidad de 4,000 toneladas diarias (Ramos, 2007).

Los registros de la PCR indican que desde su apertura se han recuperado 1.6 millones de toneladas de RCD de los cuales solamente un 7.5% se ha empleado en nuevas construcciones. Entre las obras más emblemáticas donde se han empleado AR provenientes de la PCR están: la Línea 12 Dorada del metro, la construcción del Parque Bicentenario donde cada m³ demolido de la Ex-refinería 18 de Marzo fue reusado, y algunas otras como el pozo de absorción “Laguna la Quebradora”, parque ecológico “Cuitláhuac”, Bosque de Tlalpan, autopista urbana sur, y el distribuidor Vial calle 7 y Av. Chimalhuacán (Granell, 2014).

Por otro lado, de acuerdo con Ramos (2007) la PCR permitió la reutilización 17,000 metros cúbicos de escombros generados a raíz del sismo de 1985 empleados para la rehabilitación del sistema de riego en Xochimilco; en Tlalpan se usó para construir brechas cortafuego en zonas boscosas (Ramos, 2007).

Pese a la existencia de la norma la gestión de RCD realizada hasta ahora ha sido escasa y limitada a un reducido volumen dispuesto en la PCR a través de su acopio y almacenamiento temporal, creando un enorme depósito de RCD que podrían ser aprovechados. De tal forma, surge la norma ambiental para el Distrito Federal, NADF-007-RNAT-2013, clasificando nuevamente a los RCD (Tabla 2.1) de acuerdo al tipo de residuo y a su posible reúso con la finalidad de impulsar y mejorar el reúso de RCD. Los AR a utilizar son los clasificados en la sección A y corresponden a la sustitución de agregados gruesos reciclados (ARG) en la fabricación de concreto.

Tabla 2.1 Clasificación de RCD y su posible reúso

TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO
A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS	
<p>Elementos prefabricados Elementos estructurales y no estructurales Sobrantes de concreto en obra y premezclado</p>	<p>Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos. Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones. 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. Rellenos en cimentaciones. Mobiliario urbano. Construcción de muros divisorios.</p>
B. MEZCLADOS	
<p>Concretos hidráulicos Morteros Blocks Tabicones Adoquines Tubos de albañal Cerámicos Mamposterías Prefabricados de arcilla recocida (Tabiques, ladrillos, etc.), Piedra braza Agregados pétreos</p>	<p>Sub-bases en caminos y estacionamientos. Construcción de terraplenes. Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios. Construcción de andadores y trotapistas. Bases para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas, Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas. Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas. Construcción de pedraplenes. Material para la conformación de terrenos Relleno en jardineras Rellenos en cimentaciones.</p>

Continuación Tabla 2.1 Clasificación de RCD y su posible reúso

TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	POSIBLE REÚSO
C. PROVENIENTES DE FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO	
Carpeta asfáltica Bases negras	Bases asfálticas o 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	
Madera Papel y Cartón Metales Plástico Residuos de podas, tala y jardinería. Vidrio	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.
F. OTROS	
Residuos de Impermeabilizantes, tablaroca, instalaciones eléctricas, asbesto, tubería, herrería, lodos bentoníticos.	Deberá privilegiarse su reciclaje.

Fuente: Norma ambiental para el Distrito Federal, que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción (NADF-007-RNAT-2013).

2.1.1 Impactos ambientales de los RCD

Las afectaciones al ambiente causadas directamente por los RCD están ligadas a la etapa de disposición final. Los sitios de disposición final de los RCD son rellenos sanitarios o espacios no controlados (tiraderos a cielo abierto o mínimamente gestionados y permitidos por las entidades locales), en ambos casos se tiene un impacto negativo al ambiente. Los RCD son considerados inertes por su características; no generan malos olores, lixiviados, y/o proliferación de insectos. Sin embargo, en algunos casos pueden contener residuos tóxicos y peligrosos como: aceites, asbestos, fibras, resinas, pinturas, compuestos halogenados, entre otros, además pueden estar combinados con residuos domiciliarios (plásticos, papel, cartón, residuos orgánicos, etc.).

Al ser depositados en rellenos sanitarios se reduce su vida útil, además se dificulta su compactación, y se contamina el suelo cambiando sus características físicas y/o químicas de acuerdo a su composición. Por otra parte, cuando son depositados en sitios no controlados, afectan el paisaje, convirtiéndose en depósitos de residuos no peligrosos y peligrosos (residuos de comida, residuos de aceite gastado, estopas impregnadas con aceite, grasas, lubricantes, etc.), y pueden servir de refugio

para fauna nociva, atraídos por la existencia de materia orgánica. Los RCD son generadores de polvo, cuando se abandonan en las calles pueden obstruir el drenaje e interferir con el tránsito en las vías públicas. Cuando son tirados en los cauces de agua pueden provocar inundaciones y en el caso de ser dispuestos en tierras fértiles afectan su aprovechamiento.

2.2 Agregados procedentes de RCD

2.2.1 *Agregados reciclados*

La Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) clasifica como residuos de la construcción y demolición (RCD) aquellos generados durante la construcción, demolición, desmantelamiento y/o excavación de obras de infraestructura. En general los RCD se componen por fragmentos o restos de materiales como: tabiques, materiales pétreos, tierra, concreto, morteros, madera, alambre, resina, plásticos, yeso, cal, cerámica, tejados, pisos y varillas. (NADF-007-RNAT-2013). En México, los RCD se componen principalmente por 39% de material de excavación, 24% de concreto, 24% escombros; materiales potencialmente reusables como AR en la construcción (CMIC, 2013).

2.2.2 *Resistencia de agregados reciclados*

Según la investigación de Kou (2006) diversos autores registraron una pérdida de masa menor al 30% con base en la prueba de resistencia de desgaste de Los Ángeles, pero en estudios recientes consultados por Marinković et al. (2010), se encontró una pérdida mayor al 70%, mostrando que los AR no son aptos para usarse de acuerdo con la NMX-C-196-2010.

2.3 Propiedades de agregados reciclados

Las propiedades de AR se ven afectadas de manera negativa en gran medida por el mortero original que se adhiere a los agregados. De acuerdo con Marinković et al., (2010), las propiedades consideradas más relevantes para la producción de mezclas de concreto son las siguientes:

2.3.1 *Textura y forma*

De acuerdo con Kosmatka, et al. (2004), tanto la textura como su forma afectan las características del concreto en estado fresco. Las partículas de AR tienden a ser más angulosas, rugosas y largas,

tendrán un mayor consumo de agua para obtener la misma *trabajabilidad*^[a] que aquellas de ANV las cuales son más suaves y redondas (Kou, 2006).

2.3.2 *Absorción del agua*

Representa la cantidad de agua absorbida por los agregados, esta varía entre 3.5% a 9.2 % para ARG y de 5.5% a 13% para agregados reciclados finos (ARF), los cuales requieren más cantidad de agua comparados con los de ANV que van de 0.5% a 1.0% (Marinković et al., 2010). Estos valores se atribuyen nuevamente a la cantidad de mortero adherido por lo que están directamente relacionados con el tamaño del agregado (Kou, 2006).

2.3.3 *Densidad*

La densidad en AR disminuye hasta en un 10% comparada con la de ANV (Marinković et al., 2010) debido a la porosidad y baja densidad de mortero adherido a la superficie de los AR, lo cual según Kou, (2006) depende principalmente de tres características:

- Resistencia del concreto original. Mayor resistencia es equivalente a una mayor densidad.
- Tamaño del agregado. Al aumentar el tamaño del agregado el volumen de mortero adherido aumenta.
- Tipo de trituración y maquinaria empleada.

Debido a su alta absorción se recomienda usar un 20% (Kou, 2006) a un 30% (Shing, 2004) de agregados reciclados en la producción de concreto.

2.4 Propiedades del concreto con agregados reciclados

Diversos autores se han dedicado a realizar investigación para usar agregados reciclados en concretos estructurales demostrando que se tiene un decremento en la resistencia a la compresión debido principalmente al mortero adherido a los agregados del concreto original (Marinković et al., 2010). Esta pérdida se puede eliminar controlando que los agregados reciclados provengan de un concreto con mayor o igual resistencia al que se va a producir (Marinković et al., 2010) y empleando la misma relación agua-cemento (A/C) que se utilizó en el concreto original siempre y cuando las características de los AR sean similares a las de ANV, en caso contrario se debe emplear una relación A/C más baja (Marinković et al., 2010). Además, se ha comprobado que es posible

fabricar concreto estructural con un contenido del 25% al 30% de agregado reciclado fino y grueso (Silva y Naik, 2010).

2.4.1 Características de concreto reciclado en estado fresco

Es posible obtener concretos de baja a mediana resistencia 30 a 35 MPa (306 kg/cm² a 357 kg/cm²) independientemente del origen de los AR (Marinković et al., 2010). En la práctica es importante evaluar otros aspectos y características del concreto en estado fresco y estado endurecido, según el elemento donde se va a emplear y determinar si cumple con las especificaciones técnicas que señale la normativa correspondiente.

➤ Agua de mezcla y trabajabilidad

La *trabajabilidad* es una propiedad importante del concreto que determina el tiempo y facilidad de colado, grado de compactación y la resistencia a la segregación. La *trabajabilidad* se ve afectada por diversos factores, los que se relacionan directamente con las propiedades de los agregados son (Kosmatka, et al., 2004):

- Relación agua cemento

Es la proporción de agua respecto al peso de cemento contenido en una mezcla. Debido a la alta absorción de los AR varios autores han determinado que para obtener una *trabajabilidad* similar a la de un concreto con ANV se requiere un 5% más de agua cuando se emplean agregado reciclado grueso más arena natural y un 15% cuando los agregados gruesos y finos son AR. Por otra parte, es importante que los agregados tengan un contenido de humedad entre el 80-90%, debido a que cuando están secos se reduce de manera significativa su *trabajabilidad* (Kou, 2006).

- Contenido de cemento

Este se determina según la resistencia requerida y para obtener la misma *trabajabilidad* que la de un concreto convencional es necesario agregarlo en las mismas proporciones adicionales que el agua, 5% adicional al utilizar ARG más ANVF y un 15% al utilizar ARG y ARF (Kou, 2006).

- Granulometría de agregado

En el caso de ANV es difícil encontrar una distribución de tamaño uniforme por lo que se usan combinaciones de agregados o tamizados especiales. En el caso de AR depende del tipo de trituración y tamizado, entre más lisos y redondos mejor *trabajabilidad* que los angulosos y alargados (Kosmatka, et al., 2004).

- Contenido de aire

El aire incluido mejora la *trabajabilidad* cuando se tiene mezclas con agregados angulares y granulometrías pobres además de reducir el contenido de agua y arena (Kosmatka, et al., 2004). Es posible que el contenido de aire en AR sea un poco mayor comparado con el de ANV, pero no significa que siempre se obtendrán mezclas con un mayor contenido de aire (Kou, 2006).

➤ Densidad

La densidad influye directamente en la resistencia a la compresión disminuyendo de un 5% a 15% debido al contenido de mortero adherido a los agregados (Kou, 2006). La densidad de los AR reduce hasta un 10% en comparación con la densidad de NA y por consiguiente la densidad de un concreto de agregados reciclados (CAR) es ligeramente menor (aproximadamente 6%) que la densidad de un concreto con agregados naturales vírgenes (CANV) (Marinković et al., 2010).

2.4.2 Características de concreto reciclado en estado endurecido

Marinković et al., 2010 resumió la evidencia experimental comparando CAR y CANV que se muestra en la Tabla 2.2, se considera una misma relación agua cemento y uso de ARG. En la Tabla 2.2 no se incluye el uso de ARF producto de la trituración de RCD debido a su pésima calidad.

Tabla 2.2 Comparación de CAR y CANV

Propiedad	Comparación entre CAR y CANV	Referencias
Resistencia a la compresión.	Disminuye hasta en un 25%	Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002), Batayneh et al. (2007), Hansen (1992), Poon et al. (2004), Rahal (2007), Sánchez de Juan and Gutiérrez (2004), Yang et al. (2008).
Resistencia a la flexión y ruptura.	Disminuye hasta en un 10%	Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002), Batayneh et al. (2007), Hansen (1992), Malesev et al. (2007), Yang et al. (2008).
Módulo de elasticidad.	Disminuye hasta en un 45%	Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002), Rahal (2007), Sánchez de Juan and Gutiérrez (2004), Xiao et al. (2005), Yang et al. (2008).
Contracción por secado.	Incrementa hasta en un 50%	Domingo-Cabo et al. (2009), Gómez- Soberón (2002a), Hansen (1992), Li (2008).
Fluencia.	Incrementa hasta en un 50%	Domingo-Cabo et al. (2009), Gómez- Soberón (2002b), Hansen (1992).
Absorción de agua.	Incrementa hasta en un 50%	Li (2008), Malesev et al. (2007).

Fuente: Modificada por la autora a partir de *Marinković et al., 2010*.

2.5 Consumo Hídrico en la Ciudad de México

El agua es un recurso valioso ya que es fundamental para los procesos vitales y el desarrollo de las actividades humanas. Las grandes ciudades o zonas metropolitanas, como la Ciudad de México que alberga millones de habitantes, consumen grandes cantidades de agua proveniente de ríos y aguas subterráneas (Breña, 2009). La Ciudad de México, además de ser considerada como una de las zonas urbano-industriales más grandes del mundo, presenta un crecimiento poblacional dinámico, un claro ejemplo de ello es que de 1950 al 2005 se multiplicó 5.6 veces su número de habitantes (Breña, 2009).

El incremento de población en conjunto con la ubicación de esta mega metrópoli dio como resultado una mayor demanda de recursos y sobre explotación del acuífero del Valle de México. Fue por ello que para preservar los recursos de 1950 a 1972 se utilizaron los recursos del sistema

Lerma hasta que fueron insuficientes y se optó por buscar nuevas fuentes de abastecimiento, es entonces cuando se determinó que la cuenca del río Cutzamala poseía las condiciones idóneas para abastecer de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2005). Desde entonces el sistema Cutzamala es considerado como la fuente externa principal de abastecimiento. Sin embargo, se ha tenido que usar fuentes de abastecimiento adicionales para abastecer agua potable suficiente para los habitantes de la Ciudad de México; los acuíferos en la Cuenca de México y la importación de agua provenientes de los Sistemas Lerma (Breña, 2009).

En el 2011 se realizó un análisis por el Centro Mario Molina (CMM, 2011) para determinar el desempeño energético y ambiental del ciclo de manejo de aguas en el Valle de México, este mostró que el índice de consumo energético del recurso hídrico en la Ciudad de México equivale a 1.32 kilo-Watts hora (kWh) por cada metro cúbico de agua. El índice incluye el gasto energético por transporte del agua potable al consumidor final, gasto energético para drenar, tratar y expulsar de la cuenca. Con la nueva PTAR de Atotonilco se tiene proyectado un incremento del ICE (índice de consumo energético) que al comenzar operaciones estará en los 3.74 kWh por cada metro cúbico de agua, sin considerar el incremento con el paso del tiempo. Generando mayor producción de carbono y uso de recursos (CMM, 2011).

2.6 El agua en el concreto

Se dice que cualquier agua que sea considerada potable es ideal para fabricar concreto, pero en realidad eso no es totalmente cierto ya que esta puede tener ciertos contaminantes que, aunque no son dañinos para la salud de ser humano si pueden tener afectaciones en el concreto.

En general se han realizado estudios a nivel mundial buscando fuentes de abastecimiento de agua alternas para la producción de concreto, estas se han enfocado en analizar los efectos que se presentan en el concreto en estado fresco y endurecido, aguas contaminadas con minerales, sales y otros contaminantes como las provenientes de arroyos, lagos y del mar (McCarthy, sf). Los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios ya que se presenta una disminución en la resistencia a la compresión. Otra alternativa que se ha explorado y que en algunos países como Alemania ya es una práctica común es el uso de agua proveniente de enjuague de concretos, compuesta principalmente por agua de mezcla, cemento y finos remanentes de los agregados removidos, en general se han obtenido buenos resultados y un comportamiento similar en cuanto el tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, alcalinidad y contenido de cloruros (Silva y Naik, 2010).

Hay poca investigación en cuanto al uso de agua residual tratada en la elaboración de concreto hidráulico, por lo que se desconocen aún muchos aspectos en cuanto a la reacción que puede tener el concreto con los contaminantes presentes en el agua. Algunos resultados de los trabajos que se han realizado con respecto al uso de agua tratada son (Silva y Naik, 2010):

1. En Kuwait donde se elaboraron especímenes utilizando diferentes calidades de agua, se concluye que el uso de agua residual con un tratamiento terciario es factible de ser usada para mezcla de concreto sin mostrar efectos adversos. El ART con nivel primario y secundario produjo mayor tiempo de fraguado, menor resistencia a la compresión, y la posibilidad de incremento a la corrosión en el acero.
2. Se reportaron resultados satisfactorios para el uso de agua residual tratada. Con una reducción de resistencia a la compresión del 9% para 3 y 28 días (Cebeci and Saatci, 1924 citado por Silva y Naik, 2010, p. 4).
3. El tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión al emplear agua residual doméstica promedio tratada biológicamente es similar a la de un concreto convencional.
4. Los únicos factores que afectan de manera negativa al concreto se presentan cuando el agua residual tratada contiene cal mojada del proceso de curtido, desechos de pintura rechazada de fábricas y aguas ácidas (Abrams, 1924 citado por Silva y Naik, 2010, p. 4).
5. Los investigadores de Malaysia encontraron que cuando se emplea agua proveniente de un efluente tratado tanto la resistencia como el tiempo de fraguado aumentan.

En la Ciudad de México se realizó un estudio por Vázquez, et al. (2001) con el objeto de determinar la factibilidad de uso de aguas tratadas provenientes de las plantas de tratamiento de Chapultepec, Azcapotzalco, Tlatelolco, San Juan y Acueducto. Los resultados obtenidos fueron los esperados dando una resistencia a la compresión mayor en comparación con el concreto elaborado con agua potable; entre un 10% al 40% para el caso de las tres primeras plantas y arriba del 80% para las dos últimas. Con base en la revisión de la calidad del agua potable (AP) usada en este estudio se observó que tenía muy baja calidad, lo que seguramente afectó los resultados finales de la comparación entre el concreto fabricado con ART y AP haciéndolos cuestionables y poco confiables.

2.6.1 *Hidratación del cemento*

El cemento portland es un compuesto químico complejo, está compuesto por diferentes proporciones según su clasificación; 75% de Silicato Tricálcico (C_3S) y Silicato Dicálcico (C_2S) y un 15% de Aluminato Tricálcico (C_3A) y Ferroatuminato Tetracálcico (C_4AF). La hidratación en el cemento involucra reacciones químicas entre el cemento y el agua formando nuevos compuestos químicos que dan como resultado pasta de cemento endurecida. Se considera que el corazón del concreto es el Silicato de Calcio hidratado formado a partir de C_3S y C_2S , este nuevo compuesto da las características más importantes en el concreto fraguado y el endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional (Kosmatka, et al., 2004).

2.6.2 *Calidad del agua, sus propiedades y efectos en el concreto*

Kosmatka, et al., (2004), establece que cuando se tiene impurezas en exceso se pueden presentar las siguientes afectaciones:

1. Tiempo de fraguado
2. Resistencia del concreto
3. Eflorescencias
4. Manchado
5. Corrosión del acero
6. Inestabilidad del volumen
7. Reducción de durabilidad

Las afectaciones dependen del contaminante presente en exceso por lo que se deben determinar los límites de su contenido en el agua según el tipo de concreto requerido. A continuación, se enlistan algunos de los contaminantes y las afectaciones que pudieran presentarse en el concreto (Kosmatka, et al., 2004).

- **Carbonato Alcalino y Bicarbonato.** Pueden acelerar o retardar el tiempo de fraguado, cuando se encuentran en concentraciones mayores a 1000 ppm también pueden afectar su resistencia y la ocurrencia de reacciones álcali-agregados fuertes.
- **Cloruros.** Afectan principalmente a estructuras con refuerzo provocando corrosión. El límite de este depende en gran medida del tipo de estructura y del medio al cual este expuesta durante su vida útil.

- **Sulfatos.** Provocan reacciones expansivas potenciales y deterioro por ataque de sulfatos.
- **Carbonatos de Calcio y Magnesio.** Pueden afectar la resistencia cuando se presentan concentraciones arriba de los 400 ppm.
- **Sales de Hierro.** Se pueden presentar afectaciones en la resistencia cuando se presentan concentraciones arriba de 40,000 ppm.
- **Aguas ácidas.** Aguas con un pH menor a 3 pueden ocasionar problemas de manejo, se pueden utilizar aguas con un contenido de Ácido Clorhídrico, Ácido Sulfúrico y otros ácidos orgánicos en una concentración de 10,000 ppm.
- **Aguas alcalinas.** En concentraciones mayores del 0.5% en peso de cemento se puede ver afectada la resistencia del concreto. Algunos tipos de cemento pueden llegar a soportar concentraciones de 1.2% de peso del cemento.
- **Materia orgánica de ART.** Después del tratamiento las descargas suelen tener 20 ppm de DBO₅ (a nivel internacional) y no generan ninguna afectación a la resistencia del concreto.
- **Sedimentos o partículas en suspensión.** Concentraciones de 2000 ppm de arcilla o partículas finas de roca no afectan la resistencia del concreto. Se pueden aceptar concentraciones más altas, pero estas pueden afectar otras propiedades.
- **Aceites.** Las afectaciones son de acuerdo al origen y tipo de aceite. En el caso de aceites minerales presentes con una concentración de 2.5% en peso de cemento pueden llegar a reducir la resistencia en un 20%.
- **Algas.** Estas provocan una gran reducción en la resistencia y cuando se encuentra presentes en los agregados pueden reducir su adherencia en estos y la pasta cementante.

2.7 Sustentabilidad en la construcción

“La construcción sustentable está relacionada con la racionalidad en el uso de los recursos disponibles...sus principales objetivos están en la minimización de la generación de RCD y la maximización de su aprovechamiento” (CMIC, 2013, p.5), desde este punto de vista puede considerarse que los AR contribuyen al logro de la sustentabilidad en diversas maneras:

- Reúsa materiales viejos de construcción.
- Reduce la cantidad de residuos depositados en relleno sanitarios.
- Recicla materiales convirtiéndolos en productos de valor agregado.
- Reduce el consumo de energía. Se requiere de mucha energía para obtener la materia prima y transportarla a donde se necesita.
- Reduce emisiones de gases efecto invernadero.

- Preserva recursos naturales.

Reciclar, reusar y reducir sin duda es la clave para una construcción sustentable. Sin embargo, es complicado determinar la sustentabilidad de un material sin que la evaluación sea subjetiva. Un indicador numérico podría establecerse a través de nuevas herramientas como Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta técnica es utilizada para la evaluación de los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados a la fabricación de un producto o servicio a través de su ciclo de vida (ISO 14044, 2006).

Un ACV completo está basado en un modelo “Cradle to grave” (de la cuna a la tumba); es decir desde la adquisición de las materias primas, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, considerando todos los flujos de entrada y salida de cada uno de los procesos unitarios. Sin embargo, se presentan retos y limitaciones durante la elaboración de este, por lo que es importante puntualizar qué factores afectan la exactitud de los datos para que los resultados puedan ser interpretados de manera certera.

El tema de los AR es relativamente nuevo para México, además se cuenta con solo una planta de agregados reciclados y no hay registro en México de estudios de ACV. Un ACV realizado en Portugal donde se evaluaron 3 escenarios diferentes; uso de ANV, uso de ARG producidos en planta y ARG producidos con maquinaria móvil en el lugar de la demolición. Los dos escenarios evaluados con AR mostraron tener ventajas significativas sobre el uso de ANV (Estanqueiro, 2012). Otro estudio se llevó a cabo para la fabricación de un concreto estructural en Serbia los resultados fueron similares, a pesar de que en ambos casos el impacto total fue mayor para un CAR esto debido al uso de una mayor cantidad de cemento para obtener la misma resistencia y a las distancias de transporte entre la planta de reciclados y el sitio de construcción. Ambos parámetros pueden mejorar restringiendo la cantidad de cemento adicional para un CAR y evaluando rutas de transporte alternas donde la distancia a la planta de reciclados sea menor a la distancia a la cantera de AN (Marinković y Ignjatović, 2013).

La obtención de ANV incluye desde la extracción, procesamiento y transporte. La extracción comprende perforaciones en la roca, uso de explosivos para fracturación de la roca madre, la separación y trituración de la materia prima. El procesamiento de la materia prima requiere una serie de actividades como la trituración, cribado, separación, y almacenamiento de material. El transporte del material representa su distribución de la cantera a su destino final, se estima que un

93% se hace con camiones debido a la facilidad de carga y descarga, además de que pueden transportar hasta 25 toneladas. Cada proceso contribuye a impactos ambientales adversos al ambiente; erosión geológica, degradación de la calidad del agua y aire, contribución al cambio climático global, aspectos estéticos, ruido, afectación a flora y fauna (Estanqueiro, 2012).

Ahora bien, las fases con mayor impacto ambiental causadas directamente por el uso de agregados son: la extracción, procesamiento, y disposición final. El impacto generado por el transporte depende primordialmente de las distancias recorridas, presentándose varios escenarios; a) cantera a sitio de uso, b) planta de reciclaje a sitio de uso y/o c) planta de reciclaje móvil, por lo tanto, este es un factor variable y depende en gran medida de la ubicación de la obra. Por otra parte, los impactos generados en el procesamiento y fabricación de ARG y ANVG son exactamente los mismos, la maquinaria empleada es similar, con ciertas adaptaciones, a las utilizadas en las canteras de AR (Estanqueiro, 2012).

Conforme a lo descrito anteriormente, la etapa determinante para cuantificar los beneficios del uso de AR corresponde en gran medida a la extracción de materia prima donde se presentan los impactos más significativos, los cuales serían nulos al igual que el de la etapa de disposición final ya que en un escenario óptimo se aprovecharían en su totalidad los residuos generados en la obra. Para el caso de la Ciudad de México se estima que para el 2018 se puede eliminar la disposición de casi 9000 toneladas de RCD diarias en tiraderos a cielo abierto o en rellenos sanitarios, calculados a partir de un crecimiento del 5% establecido por la CMIC. Los RCD calculados pertenecen a residuos provenientes del material de excavación, prefabricados, escombros, concretos y otros; sin embargo, debe resaltarse que para la producción de AR solo se consideran los RCD provenientes del concreto. La CMIC estima que un 25% de RCD corresponde a concreto por lo que se considera un posible uso de 2,234 t de AR provenientes de RCD.

El comité nacional de agregados, NSC por sus siglas en inglés, estimó que por cada tonelada de ANV se tiene un consumo total de energía de 278,000 BTU (british thermal units) por cada tonelada. En la Tabla 2.3 se muestran las fuentes de energía consideradas por la NSC para estimar el consumo de energía para la extracción de ANV empleadas en la Tabla 2.4 en la cual se calculan las emisiones de CO₂ empleando los factores del programa Gases Efecto Invernadero (GEI) México (SEMARNAT, 2014). Por lo que de emplear las 2,234 t de AR provenientes de RCD constituirían una reducción de emisiones a la atmósfera de más de 50 toneladas de CO₂ diarias en la Ciudad de México.

Tabla 2.3 Consumo de energía por tonelada de extracción de ANV

Tipo de energía	BTU/t de ANV
Electricidad	20300
Gas natural	0.0015
Propano	230
Diésel	250000
Gasolina	7310
Total	277840

Fuente: Modificada por la autora a partir de NSC, 2008.

Tabla 2.4 Emisiones de CO₂ por tonelada de extracción de ANV

Tipo de energía	Consumo de energía por tonelada de ANV	Factor de emisión del programa GEI México	Kg CO ₂ por tonelada de ANV
Electricidad	5.95 KWh	5.00E-01 Kg Co2/KWh	2.97E+00 Kg CO ₂
Gas natural	1.58E-12 TJ	5.61E+04 Kg Co2/TJ	8.87E-08 Kg CO ₂
Propano	2.43E-07 TJ	7.74E+04 Kg Co2/TJ*	1.88E-02 Kg CO ₂
Diesel	2.64E-04 TJ	7.41E+04 Kg Co2/TJ	1.95E+01 Kg CO ₂
Gasolina	7.71E-06 TJ	7.74E+04 Kg Co2/TJ*	5.97E-01 Kg CO ₂
Total			23.12 Kg CO₂

Fuente: Elaboración propia

*Se empleó el factor de emisión correspondiente a combustóleo.

Beneficios ambientales del uso de agregados reciclados y agua residual tratada

Con base a la extracción de grava para la industria de la construcción estimada por el Anuario Estadístico de la Minería en 2013 en el Estado de México, el uso de RCD representa más del 10% de reducción de las emisiones de CO₂ generadas (SGM, 2014) y de acuerdo a la extracción en 2005 de la Ciudad de México corresponde a un 7% (Ramos, 2007). Sin mencionar los beneficios adicionales como la extensión en el tiempo de vida útil de rellenos sanitarios, evitando afectaciones al agua, aire, suelo, flora y fauna, y ayudando a la preservación de los ecosistemas (Marie y Quiasrawi, 2012).

Resultados de un estudio realizado en Australia indican que se tiene una reducción de aproximadamente un 46% de emisiones de gases efecto invernadero al disminuir el uso de energía utilizada para extracción de materias primas (Descarrega, 2011). Así mismo el proceso y fabricación de AR se puede hacer en sitio, reduciendo las emisiones causadas por el transporte (Shing, 2004). Esto a su vez reduce los costos de producción de AR haciéndolos más baratos que los ANV, desde la obtención de materias primas naturales, transporte desde centros de producción,

traslado a relleno sanitario o centro de acopio y costos de procesamiento y fabricación de agregados.

La tasa de crecimiento en la industria de la construcción en México de acuerdo a la CMIC es de 5% anual, esto implica un mayor consumo de concreto lo que se traduce en un mayor consumo de materias primas. El agua es un componente primordial del concreto, tanto para la producción de la mezcla final como para del cemento, en este último se tiene un consumo aproximado de 0.189 m^3 de agua de por cada tonelada (CEMEX, 2011). Desafortunadamente no se tienen estadísticas de producción de concreto para la Ciudad de México, la Federación Interamericana del Cemento (FICEM) estimó un consumo de cemento en México de 34 503 000 mil toneladas para 2010 con una población de 112 336 538 habitantes, para este mismo año se estima un consumo de 307 kg por habitante. Tomando las cifras anteriores y la población de 88 510 80 habitantes en 2010 de la Ciudad de México, para la producción de cemento se utilizaron $513,566 \text{ m}^3$ de agua. Adicionalmente, considerando que el consumo de cemento por m^3 de concreto es alrededor de un 10% y 15% el contenido de agua, solo para la producción de concreto en un año se estimó un consumo de $4\,075\,922 \text{ m}^3$ de agua para la mezcla final.

Partiendo del consumo de agua para la producción de concreto obtenido anteriormente, del análisis del CMM (1.32 kWh/m^3 de agua) y un factor de emisión eléctrico 0.4929 kg CO_2 equivalente/ kWh del programa GEI México del año 2012 (SEMARNAT, 2014); se tiene una producción de 0.215 kg de CO_2 equivalente por cada m^3 de concreto fabricado en la Ciudad de México debido al consumo de agua.

En la Ciudad de México del total de aguas residuales generadas solo se da tratamiento a $3.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (De la Peña, 2013), de emplearse en su totalidad para la fabricación de concreto se tiende a una reducción de 73865.5 t de CO_2 anuales, esto es casi una reducción del 3% de emisiones de CO_2 anuales respecto al consumo de agua en la Ciudad de México para la producción de cemento. Sin embargo, esta cantidad es menor ya que se debe tomar en cuenta si la calidad de agua es apropiada en el resto de las plantas de tratamiento, la cantidad de ART que se dispone para uso agrícola y la restricción de uso de ART en elementos estructurales.

Aspectos sociales y económicos

El amplio mercado de AR y el interés en el tema por investigadores, empresarios, técnicos especializados, y trabajadores en general, genera nuevos puestos de trabajo favoreciendo al desarrollo económico y social de un estado o país (Chandra, 2011). La Agencia de Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA , 2002) afirma que la incineración de 10 000 toneladas de RCD puede significar la creación de 1 empleo, depositarlas en un relleno sanitario 6 puestos de trabajo, pero su reciclaje podría generar 36 puestos de trabajo. El reciente informe de *Strategic Analysis of the European Recycled Materials and Chemicals Market in Construction Industry* (Análisis Estratégico de los materiales reciclados y productos químicos mercado europeo en la industria de la construcción) registró que el mercado de materiales de construcción reciclados generó ingresos de 744.1 millones de € en 2010 y se estima que alcanzará 1.3 mil millones € en 2016 (Frost and Sullivan, 2011 citado por Pacheco-Torgal, et al., 2013, p. 2), sin considerar un 100% de reciclado de RCD; es decir, que los beneficios económicos serían mayores a los estimados (Phillips et al., 2011 citado por Pacheco-Torgal, et al., 2013, p. 2).

En la ciudad de México el costo de AR es un 50% menor con respecto al de ANV en promedio (Granell, 2014) y el Ing. Sergio Núñez encargado de la PTAR-CE informó que el costo de ART es de 2.50 pesos por m³ de agua, que es mucho menos de la mitad del costo del agua potable (11.00 pesos por m³). El Ing. Benjamín Medina Hernández, director general de regulación ambiental de la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA), declaró que algunas delegaciones que emplearon AR duplicaron la construcción de banquetas (B. Medina Hernández, comunicación personal, 13 de Octubre, 2015). Adicionalmente, se está implementando el nuevo Programa de Auditoria Ambiental Sustentable (PAAS) cuyo propósito es dar incentivos fiscales para empresas que emplean AR en su proceso constructivo.

3 METODOLOGÍA

El propósito de este capítulo es presentar la metodología desarrollada y que se presenta en 5 etapas, mediante la descripción de las actividades de campo, el procedimiento de caracterización de los agregados y del agua, diseño y dosificación de mezclas y métodos de prueba de concreto en estado fresco y endurecido conforme a la normativa correspondiente.

- I. Estudio de gabinete.
- II. Trabajo de campo.
- III. Caracterización de AR y ART.
- IV. Diseño de experimento.
- V. Pruebas de concreto es estado fresco y endurecido.

3.1 Etapa I - Estudio de gabinete.

Se realizó la revisión bibliográfica que se presenta en el Capítulo 2 de este documento, que incluye los siguientes temas:

- Uso de AR a través de los años y alrededor del mundo.
- Manejo de RCD en el Valle de México enfocándose principalmente a la NADF-007-RNAT-2013 y en los resultados que se han obtenido con la aplicación de la normativa.
- Características y propiedades de los AR procedentes de RCD y de concretos fabricados con estos AR.
- Consumo hídrico en la Ciudad de México.
- Importancia de la calidad de agua para la fabricación del concreto.
- Sustentabilidad de uso de AR de acuerdo al CMIC y los beneficios ambientales.

3.2 Etapa II - Trabajo de campo.

En esta etapa se obtuvieron los materiales utilizados en la etapa experimental. Se hicieron los muestreos de AR en la PCR y ART de la PTAR-CE ambos bajo los lineamientos de la normativa mexicana aplicable.

3.2.1 *Cemento*

En el presente proyecto se empleó un Cemento Portland Compuesto (CPC) 30R (de resistencia mínima a los 28 días de 300 kg/cm²), que corresponde al de menor resistencia que se puede adquirir para la autoconstrucción. Este cemento tiene un desempeño de alta resistencia, fraguado rápido, durabilidad y es ideal para la construcción de zapatas, alcantarillados, obras sanitarias, prefabricados de todo tipo y compatible con todos los materiales convencionales (NMX-C-414-ONNCCE-2014).

3.2.2 *Agua*

El agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de concreto se obtuvo de las instalaciones de suministro de agua potable del LMFI-UNAM. El agua residual tratada fue obtenida de la PTAR-CE que se encuentra ubicada en Iztapalapa, actualmente cumple con los parámetros de calidad establecidos por la NOM-003-SEMARNAT que corresponde a los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público con contacto directo. El agua tratada es utilizada principalmente para el cultivo de las zonas ejidales en las delegaciones Xochimilco, Mixquic, Tláhuac y Milpa Alta, aseo en zona Industrial San Nicolás y el metro de la Ciudad de México (S. Nuñez, comunicación personal, 9 de Septiembre 2015).

3.2.3 *Agregados*

Los ANV y el cemento se adquirieron comercialmente, mientras que los AR fueron proporcionados por la PCR. En esta se tiene clasificados y almacenados los agregados producto de los residuos de la construcción y demolición (Figura 3.1). La obtención de los AR se hizo de acuerdo a la NMX-C-030-ONNCCE-2004, que establece que el muestreo de agregados de material almacenado debe hacerse con muestras simples tomando porciones aproximadamente iguales de diferente nivel y directriz del almacén. En la presente investigación se empleó grava controlada reciclada (graduada conforme a normativa) y arena reciclada (generada a partir del proceso de trituración para obtención de grava reciclada); ambos provenientes de residuos de concreto.



Figura 3.1 Área de almacenamiento de agregados en PCR

3.3 Etapa III – Caracterización de agua residual tratada y agregados vírgenes y reciclados.

Se llevó a cabo la caracterización de los ART, AN y ANV para establecer su cumplimiento con normativa aplicable. La caracterización de los AR y ANV se desarrolló en el Laboratorio de Materiales (LMFI-UNAM), mientras que la caracterización del ART se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental, ambos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.3.1 *Caracterización de agua*

El agua potable es una de las fuentes más limpias, pese a que puede contener productos químicos disueltos y sólidos en suspensión, actualmente es la única fuente aceptable para la fabricación de concreto. A fin de evaluar la posibilidad de emplear agua procedente de la PTAR-CE como fuente alterna para la fabricación de concreto, se realizaron pruebas de calidad de agua. Se determinaron algunos de los parámetros de la N-CMT-2-02-003-02 que señala la calidad de agua para fabricación de concreto hidráulico. La normativa empleada para la determinación de dichos parámetros se muestra en la Tabla 3.1 y en el Anexo I se describe a detalle el proceso que se llevó a cabo para su obtención.

Tabla 3.1 Resumen de pruebas y normas para caracterización del ART

TIPO DE PRUEBA	Norma utilizada
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	NMX-AA-028 –SCFI-2001
Sólidos	NMX-AA-034-SCFI-2001
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001
Dureza	NMX-AA-072-SCFI-2001
Potencial de hidrógeno (pH), Temperatura y conductividad	-----
Cloruros, sulfatos y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	-----

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Caracterización de agregados vírgenes y reciclados

La calidad de los agregados determina en gran parte las características del concreto, en especial en lo relativo a la resistencia y durabilidad. Entre las características físicas más importantes de los agregados está la distribución de partículas, textura y forma, porosidad y absorción de agua (Chandra, 2011).

La etapa previa a la caracterización de materiales (EPCM) consistió en la homogenización de las muestras simples para formar una muestra compuesta, que sea representativa del total de material almacenado (Figura 3.2). En esta etapa se redujo el tamaño de la muestra compuesta (100 kg a 150 kg por cada tipo de material) por el método de cuarteo, y se tomaron varias muestras de material requeridas para los diversos análisis a realizar las cuales se muestran en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.



Figura 3.2 EPCM, homogenización de materiales

1. Agregado natural virgen fino, 2. Agregado natural virgen grueso, 3. Agregado reciclado grueso 4. Agregado reciclado fino.

Tabla 3.2 Resumen de pruebas y normas para caracterización de agregados gruesos

TIPO DE PRUEBA	Norma utilizada para AG
Masa en estado saturado y superficialmente seca (W _{ss}) g	NMX-C- 164 – 2014 – ONNCCE
Absorción %	
Masa volumétrica compactada (M _{vc}) kg/m ³	NMX-C- 073- ONNCCE – 2004
Granulometría y tamaño máximo de agregado	NMX-C-077-1997-ONNCCE

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Resumen de pruebas y normas para caracterización de agregados finos

TIPO DE PRUEBA	Norma utilizada para AF
Masa en estado saturado y superficialmente seca (W_{ss}) g	NMX-C- 165 – 2004–ONNCCE
Absorción%	
Granulometría	NMX-C-077-1997-ONNCCE
Módulo de finura (MF)	NMX-C-251-1997-ONNCCE

Fuente: Elaboración propia

➤ **Granulometría**

El análisis granulométrico es usado para determinar la graduación de materiales propuestos como agregados para fabricar concreto hidráulico; es un procedimiento que se puede realizar de manera manual o mecanizada en el que se hace la separación de partículas del agregado por tamaños, de tal forma que se pueda conocer la cantidad en peso de cada tamaño que aporta al peso total de la muestra. La separación de tamaños se hace con tamices o mallas normalizadas de diferentes aberturas, registrando el peso retenido en cada una de ellas. La muestra obtenida para granulometría de la EPCM se pone a secar a temperatura ambiente y se pesa cada 30 minutos hasta obtener un peso constante. La muestra es depositada en la criba superior del juego de tamices, previamente ordenados en forma decreciente 1½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, No. 4 (para AG) y No. 4, No. 8, No. 16, No. 50, No. 100 (para AF); es necesario que el juego de tamices cuente con una tapa superior y una charola en la parte inferior para evitar la pérdida de finos (NMX-C-077-1997-ONNCCE). La Figura 3.3 muestra la criba mecanizada para AG y la Figura 3.4 muestra las mallas para el cribado manual de AF.



Figura 3.3 Criba mecanizada para AG



Figura 3.4 Criba manual para AF

Para el cribado se hacen vibrar o se agitan vigorosamente las mallas durante un tiempo aproximado de 5 a 10 minutos, posteriormente se pesa el material retenido en cada uno de los tamices. Los resultados de granulometría se obtuvieron mediante las Ecuación 3.1 .

$$\%PR = \frac{PRT}{Mt} * 100(\%) \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

%PR es el porcentaje de peso retenido

PRT es el peso retenido en tamiz (g)

Mt es el peso total de la muestra seca (g)

Una vez obtenido el %PR para cada uno de los tamices se calcula el porcentaje retenido acumulado; que es la suma acumulativa de los porcentajes retenidos en los tamices, y el porcentaje que pasa; que es 100% menos el porcentaje retenido acumulado para cada tamiz. Adicionalmente, se calcula el porcentaje de error (Ecuación 3.2) y se verifica que éste sea menor que 2%, en caso contrario el análisis deberá ser repetido.

$$Error = \frac{Wo - Wf}{Wf} * 100\% \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Wo es el peso inicial de la muestra (g)

Wf es el sumatoria de pesos retenidos (g)

Otro indicador importante es el módulo de finura (MF), que describe los tamaños de los AF, la medida del grosor de las partículas; entre más grande sea el MF más gruesas son las partículas. Es un índice que describe la proporción de finos y gruesos que lo constituye. Determina la cantidad mínima de agregado fino necesaria para rellenar las oquedades entre los AG y mejorar la manejabilidad de la masa de concreto, funcionando como lubricante para los AG. El MF del AF se obtiene sumando los porcentajes retenidos acumulados por las mallas N° 4, 8, 16, 30, 50 y 100, y dividiendo esta suma entre 100, algunos valores límites se presentan en la Tabla 3.4 (NMX-C-251-1997-ONNCCE).

Tabla 3.4 Clasificación de arena por módulo de finura

Arena gruesa	2.5 a 3.5
Arena fina	1.5 a 2.5
Arena muy fina	0.5 a 1.5

Fuente: (Kosmatka, et al., 2004)

➤ Masa volumétrica compactada

La masa volumétrica compactada (M_{vc}) se define como la masa o peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. Este volumen representa el espacio ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado afectando la demanda de cemento y dosificación de AG en la mezcla. La angulosidad de las partículas aumenta la cantidad de vacíos mientras que un agregado bien graduado los disminuye (Kosmatka, et al., 2004).

Para obtener la M_{vc} de los agregados gruesos, se toma una muestra resultado de la EPCM, se llena el recipiente en tres capas del mismo volumen, compactando el material entre cada capa, dándole 25 penetraciones con una varilla de acero, distribuidas uniformemente sobre la superficie, con una fuerza tal que no triture las partículas del agregado. En la última capa el recipiente se llena hasta sobrepasar el borde superior, después del compactado se hace el enrase mediante operaciones de barrido horizontal; se quitan y ponen partículas de tal forma que las que sobresalgan del borde de la superficie compensen las oquedades debajo de él (NMX-C-073-ONNCCE-2004). Se obtiene la masa total del recipiente incluido el material y se determina la masa neta del material en el recipiente, obteniendo la M_{vc} con la Ecuación 3.3.

$$M_{vc} = \frac{M_t - M_r}{V} * 1000 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

M_{vc} es la masa volumétrica compactada (Kg/m³)

M_t es la masa del material y recipiente (Kg)

V es el volumen de recipiente (m³)

M_r es la masa del recipiente (kg)

➤ Densidad y absorción

La densidad se define como la relación de la masa del agregado y la masa de agua con el mismo volumen, se emplea para la dosificación de AG y AF en la mezcla. Aunque no se utiliza como un parámetro de calidad puede afectar directamente la resistencia y densidad de concreto (ligero, normal o pesado). Por otra parte, la absorción determina la cantidad de agua que absorbe cada partícula para que esta no absorba ni ceda agua en la hidratación del cemento. El contenido de agua debe ser preciso de lo contrario se afecta directamente la relación agua cemento que a su vez afecta la resistencia a la compresión y *trabajabilidad*. Para determinar la absorción y densidad se debe llegar a la condición saturada superficialmente seca (sss), es decir agregados cuyos poros de cada partícula están llenos de agua y sin exceso de esta en la superficie de la partícula, para lo cual se debe sumergir la muestra de material obtenida en EPCM en agua por un periodo de 24 h con una tolerancia de ± 4 horas.

Agregado grueso

Transcurrido el tiempo de saturación se extrae el material y se seca con una franela o trapo previamente humedecido, procurando remover el agua que se encuentra en la superficie hasta que se pierda el brillo acuoso por lo que el material queda en estado sss. Se pesa una fracción del material (W_{sss}). Se procede a llenar de agua el picnómetro de sifón en una superficie plana y se deja que escurra el agua por el sifón hasta que no salga agua. Se tapa con una mano la salida de agua en el sifón y se introduce la muestra lentamente, una vez terminado esto se destapa el sifón y se recibe el agua en una probeta graduada para medir el volumen desplazado (Figura 3.5) (NMX-C-073-ONNCCE-2004), con los datos obtenidos se emplea la Ecuación 3.4.

$$D = \frac{W_{sss}}{V_{des}} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

D es la densidad (g/cm^3)

W_{sss} es la masa del material en sss (g)

V_{des} es el volumen desplazado (mL)



(1)

(2)



(3)

(4)

Figura 3.5 Obtención de densidad para AG

1. Secado de material, 2. Determinación de masa, 3. Ecurrimento de exceso de agua por el sifón y 4. Volumen desplazado.

Para la determinación de la absorción se pesa una fracción de la muestra en estado sss (W_{ss}) y se coloca en el horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ o hasta remover por completo la humedad contenida en la muestra, se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina la masa seca (W_{sc}). Se procede a calcular su absorción en porcentaje con la Ecuación 3.5.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{W_{ss} - W_{sc}}{W_{sc}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

W_{ss} es la masa de muestra en estado sss (g)

W_{sc} es la masa muestra seca (g)

Agregado fino

Una vez transcurrido el tiempo de saturación se retira el exceso de agua procurando no perder los finos, para lograr el estado sss se tiende la arena en una superficie limpia y seca, moviéndola de un lugar a otro para remover el exceso de humedad. Para determinar el estado sss se emplea un cono truncado el cual se llena con la arena en 2 capas, dándole 15 y 10 compactaciones con el pisón a la primera y segunda capa respectivamente, se enrasa y se retira el cono sin hacer movimientos laterales. Si la arena se queda con la forma del cono aún se tiene un exceso de humedad, por lo cual se continúa secando y se repite lo antes descrito, hasta que 1/3 del cono de arena se desmorone lentamente; que será cuando la arena llegue al estado de sss, el proceso se observa en la Figura 3.6 (NMX-C- 073- ONNCCE-2004).



Figura 3.6 Determinación de estado sss para AF
1. Secado de material, 2. Llenado de cono truncado, 3. Compactación de arena.

Para obtener la densidad se coloca agua en el picnómetro se obtiene su peso y se deposita una muestra en estado sss previamente pesada. Se extrae el aire atrapado agitando e invirtiendo el picnómetro hasta que no se observen burbujas de aire. Una vez que se ha realizado esto se determina la masa del picnómetro con el material (Figura 3.7) y se calcula la densidad (Ecuación 3.6) por diferencia de masas (NMX-C- 073- ONNCCE-2004).

$$D = \frac{W_{ss}}{W_{pa} + W_{ss} - W_{paa}} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

D es la densidad (g/cm^3)

W_{ss} es la masa de muestra en estado sss (g)

W_{pa} es la masa del picnómetro con agua (g)

W_{paa} es la masa del picnómetro con agua y arena (g)

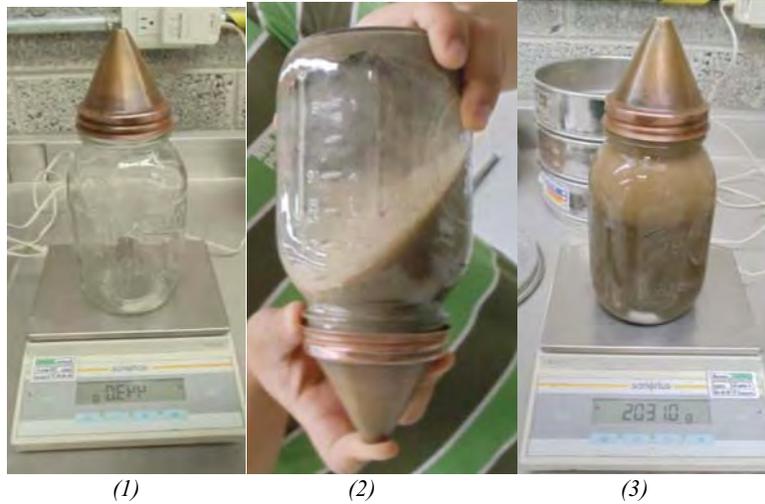


Figura 3.7 Determinación de densidad para AF
 1. Peso de picnómetro, 2. Extracción de burbujas de aire, 3. Peso de picnómetro con arena y agua.

Al igual que para el AG, se obtiene la absorción pesando una muestra en estado sss y se coloca en el horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ o hasta remover por completo la humedad contenida en la muestra, se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina la masa seca (NMX-C-165-2004-ONNCCE).

3.4 Etapa IV - Diseño de Experimento

Una vez establecidas las características de los materiales, se elaboró el diseño y dosificación de mezclas para llevar a cabo la fabricación de especímenes de concreto.

3.4.1 Diseño de Mezclas

Con base en la bibliografía (Marie y Quiasrawi, 2012; Shing, 2004; Marinković et al., 2010; y Kou, 2006) consultada en diversas investigaciones se sabe que las propiedades mecánicas del concreto elaborado con un alto porcentaje de ARG ($> 30\%$) son inferiores a las de un concreto fabricado con ANV. Por tal motivo, en la presente investigación se consideró como uno de los criterios para la combinación de ANV y AR el uso de un 30% de ARG. Se realizaron un total de 7 mezclas; la mezcla testigo que corresponde a un CAN y su contra parte un CAR (empleando agregado reciclados; grueso y fino), ambas mezclas se repitieron empleando ART (CAN* y CAR*) y para el resto de las mezclas se sustituyó el contenido de ARG en un 100%, 30% y 25% con respecto al ANVG. La propuesta de mezclas se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Propuesta de mezclas

Nombre	Descripción
CAN	Mezcla con agregados naturales vírgenes.
CAR	Mezcla con agregados reciclados.
CAN*	Mezcla con agregados naturales vírgenes y agua residual tratada.
CAR*	Mezcla con agregados reciclados y agua residual tratada.
R25	Mezcla con un 25% de agregado grueso reciclado.
R30	Mezcla con un 30% de agregado grueso reciclado.
R100	Mezcla con un 100% de agregado grueso reciclado.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Proporciones de Mezclas

La dosificación de mezcla se estableció con base en los resultados obtenidos en la caracterización de los ANV y AR y siguiendo las recomendaciones de Kosmatka, et al., 2004.

1. Con la Tabla 3.6 se determina el contenido de agua considerando el tamaño máximo de agregado (TMA) grueso 25 mm (menor tamaño de la malla por el cual debe pasar toda la muestra del AG) y se selecciona el revenimiento, por lo que se obtiene un valor de 195 kg/m³ de contenido de agua.

Tabla 3.6 Agua en kg por m³ de concreto para TMA

Revenimiento cm	Agua en kilogramos por metro cubico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.						
	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170

Fuente: Kosmatka, et al., 2004

2. La Tabla 3.7 muestra la relación A/C en función de la resistencia a la compresión deseada del concreto. Para esta investigación se seleccionó una resistencia a la compresión de 250kg/cm², por lo que la relación A/C es de 0.62. Por tanto, la cantidad de cemento requerida se obtiene dividiendo el porcentaje de agua entre la relación agua cemento (195/0.62 = 314.52 kg/m³ de cemento).

Tabla 3.7 Dependencia entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.4
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.7	0.61
150 (15)	0.8	0.72

Fuente: Kosmatka, et al., 2004

- La cantidad de AG se determina con base en el MF del AF y el tamaño máximo de AG, multiplicando el factor que se obtiene con estos datos de la Tabla 3.8 por la M_{vc} del AG. En este caso se tiene un MF de 2.5 para el ANVF, por lo que se interpola utilizando 0.70 para todas mezclas a excepción de las mezclas CAR y CAR*, donde para el ARF se tiene un MF de 4, por lo que se utilizó un factor de 0.65 que es el valor máximo señalado en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25.00 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Kosmatka, et al., 2004

- Para determinar la cantidad de arena se suma la cantidad de cemento, de AG y agua en kg/m³ convirtiéndolos después a litros/m³, esta suma se resta a 1000 (suponiendo un

volumen unitario de 1m^3) y ese resultado se multiplica por la densidad obteniendo entonces los kg de arena por m^3 de concreto.

Tabla 3.9 Dosificación en estado sss

Mezcla	CAN/CAN*	CAR/CAR*	R25	R30	R100
Material	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
Cemento	315	315	315	315	315
Agua	195	195	195	195	195
Grava virgen	963	---	703	665	---
Grava reciclada	---	816	237	281	879
Arena virgen	687	---	667	661	727
Arena reciclada	---	723	----	---	---

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.9 resume la dosificación de mezclas obtenidas a partir de los puntos 1-4 descritos anteriormente.

3.5 Etapa V - Pruebas de concreto es estado fresco y endurecido

Teniendo la dosificación se procedió a hacer la elaboración de las mezclas. De la Tabla 3.9 los pesos se corrigen por absorción y contenido de humedad. Al peso del material original se le resta el % de absorción y se le suma el % de humedad, tanto para AF y AG. En cuanto al contenido de agua se hace lo inverso se suma el total de absorción de material y se resta el contenido de humedad total de todos los materiales. El contenido de humedad debe ser el del momento previo a la elaboración de la mezcla por lo que se debe repetir la homogenización de los materiales, los cuales deberán ser cubiertos para que no pierdan la humedad presente hasta la elaboración de la mezcla. El % de humedad se obtiene con el mismo procedimiento para la absorción sin que deba estar en sss. La Tabla 3.10 muestra las dosificaciones corregidas siguiendo el procedimiento descrito.

Tabla 3.10 Dosificación corregida por absorción y humedad

Mezcla	CAN/CAN*	CAR/CAR*	R25	R30	R100
Material	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
Cemento	315	315	315	315	315
Agua	180	251	178	179	310
Grava virgen	970	0	711	672	0
Grava reciclada	0	880	238	282	880
Arena virgen	688	0	675	669	766
Arena reciclada	0	662	0	0	0

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.8 Elaboración de mezclas

1. Introducción de materiales, 2. Mezcla de materiales, 3. Tiempo de espera para hidratación total de materiales, 4. Mezcla final.

Una vez modificada se procedió a pesar los materiales; agua, cemento, arena y grava, de acuerdo con la Tabla 3.10. La incorporación de estos fue en revolvedora y con el orden que indica la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 “Concreto hidráulico para uso estructural”, una parte de agua, el agregado grueso, el agregado fino, cemento y el agua restante, después de tres minutos de mezclado se dejó reposar tapando la entrada un minuto como lo ilustra la Figura 3.8 (3) para finalmente volver a encender por otros tres minutos logrando así una mejor unión de los materiales. Se continuó con las pruebas del concreto en estado fresco considerando los parámetros permisibles de tiempo para la realización de dichas pruebas, las cuales se describen a continuación.

3.5.1 Pruebas en estado fresco

El concreto se denomina en estado fresco cuando está recién mezclado, es una masa que se puede moldear de diferentes formas. Las propiedades más importantes del concreto en estado fresco son la *trabajabilidad*, cohesión y grado de compactación, estas características serán determinadas mediante las pruebas de la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Pruebas de concreto en estado fresco

TIPO DE PRUEBA	Norma utilizada
Determinación del revenimiento	NMX-C-156-ONNCCE-2010
Determinación del contenido de aire	NMX-C-157-ONNCCE-2006

Fuente: Elaboración propia

➤ Revenimiento

Esta prueba asegura que el concreto sea *trabajable* y para poder llevarla a cabo se emplea un cono estándar, varilla y placa de acero. Se humedece el equipo y el cono se pone sobre la placa de revenimiento, se colocan los pies firmemente en los estribos del cono de revenimiento. El cono se llena en tres capas del mismo volumen y se varilla 25 veces, uniformemente comenzando por el exterior y terminando en la parte central, en cada capa. El llenado de la última capa se hace hasta que empiece a derramarse. Se nivela la superficie con la varilla de acero con una acción de rodillo, se limpia el concreto que se encuentre alrededor de la base del cono, se sujeta el cono de las astas presionando hacia abajo y se deja de pisar los estribos. El cono deberá ser removido con precaución hacia arriba, en un tiempo no menor a 5 ± 2 segundos, se coloca al revés en un costado de la muestra y se coloca la varilla encima del cono, la medida de revenimiento se toma entre la varilla y la parte central de la muestra (Figura 3.9) (NMX-C-156-ONNCCE-2010).



Figura 3.9 Prueba de revenimiento

1. Colocación de cono, 2. Varillado de muestra, 3. Medición de revenimiento, 4. Lectura de revenimiento.

➤ Contenido de aire y masa volumétrica compacta

El método aplicado para la determinación del contenido de aire es el correspondiente a la NMX-C-157-ONNCCE-2010. Se utiliza un recipiente cilíndrico de acero y una cubierta de ensamble. El principio de operación se basa en igualar un volumen de aire y una presión conocida, en una cámara de aire cerrada, con un volumen desconocido en la muestra de concreto. La cubierta cuenta con un manómetro que mide el porcentaje de aire, válvulas de purga de agua, escape de aire del recipiente, escape de aire de la cámara de presión y para el paso de aire de la cámara de presión al recipiente. Se llena el recipiente en tres capas de igual volumen y se compactan con la varilla 25 veces, la última capa se llena hasta que sobrepase su volumen. Se enraza el exceso de concreto con una regla metálica, se limpian el contorno del recipiente. Se obtiene la masa total del recipiente y se determina la masa neta del material, con el volumen y masa del recipiente se determina su peso volumétrico con la formula M_{vc} para agregado grueso (para obtener el peso volumétrico se puede

utilizar otro recipiente de volumen y peso conocido, ver Figura 3.10. En seguida se coloca la cubierta y se cierra herméticamente, se cierra la válvula de aire y se abre la válvula de purga para inyectar agua para llenar el volumen de la tapa, hasta que salga el agua por la válvula de escape de aire del recipiente. Se golpea suavemente el recipiente hasta que expulse todo el aire, se cierran las válvulas y se bombea aire dentro de la cámara hasta que en el manómetro marque cero. Se abre la válvula para el paso de aire de la cámara de presión al recipiente y para tomar la lectura se espera hasta que el manómetro mantenga el mismo valor (Figura 3.11) (NMX-C-158-ONNCCE-2006).

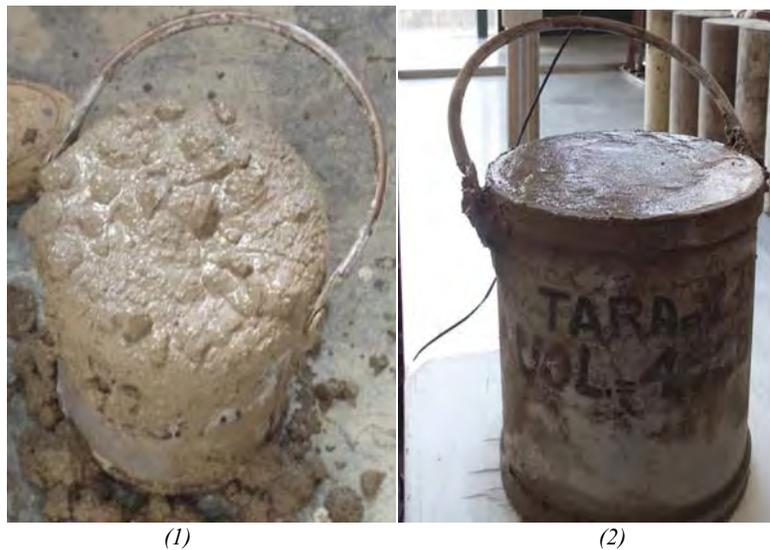


Figura 3.10 Determinación de peso volumétrico de concreto fresco
1. Llenado de recipiente, 2. Mezcla compactada para determinación de su masa.

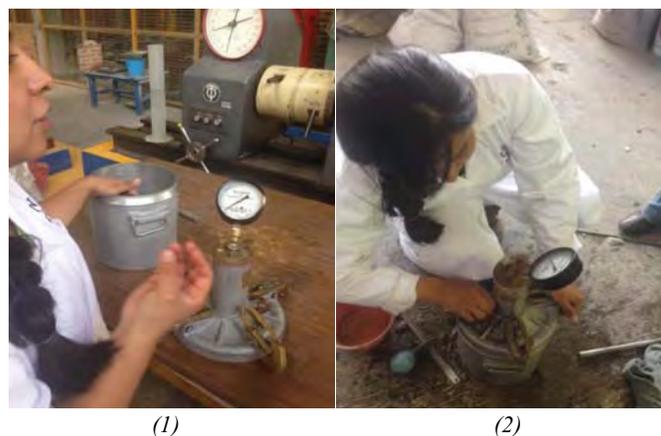


Figura 3.11 Prueba de contenido de aire
1. Equipo empleado para determinar contenido de aire, 2. Lectura de contenido de aire.

➤ Elaboración de especímenes

Para determinar la resistencia a la compresión es necesario elaborar especímenes de acuerdo a la NMX-C-159-ONNCCE-2009 (Figura 3.12). Para ello se emplearon moldes cilíndricos de acero inoxidable de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura, limpios y untados ligeramente con desmoldante. El llenado se hace en 3 capas del mismo volumen compactando varillando 25 veces de manera uniforme penetrando aproximadamente 10 mm, y golpeando las paredes con un mazo de goma (caucho duro) para eliminar el posible aire atrapado. La última capa se llena hasta que se derrame el cilindro. Se utiliza una regla metálica para el enrase y se retira cualquier concreto que este alrededor del molde. Se colocan en un lugar fresco para que fragüe, normalmente el fraguado inicial ocurre entre 2 y 6 horas después del mezclado y el final ocurre entre 4 y 12 horas (Kosmatka, et al., 2004).



Figura 3.12 Elaboración de especímenes
1. Llenado y compactado de mezcla, 2. Enrase de molde, 3. Cilindro terminado.

Para asegurar el fraguado de las mezclas se desmoldó 24 horas después del mezclado y una vez desmoldados se procedió a hacer la identificación de especímenes (Figura 3.13) para ser colocados en la sala de curado con una temperatura de 18°C hasta alcanzar la edad de prueba de resistencia a la compresión. El curado es un proceso importante mediante el cual se mantiene la humedad y temperatura favorable para que los materiales se hidraten en su totalidad y se desarrolle su resistencia y durabilidad (Shing, 2004), se recomienda una temperatura de 10°C a 20°C y una humedad relativa no menor al 80% (Kosmatka, et al., 2004).

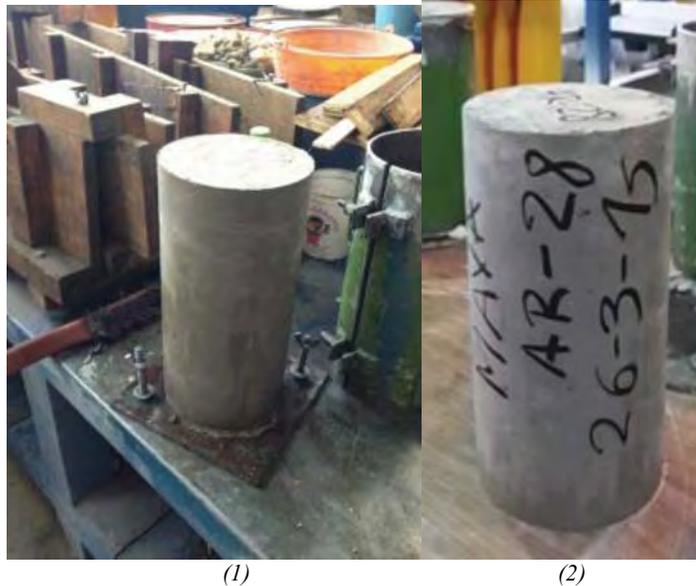


Figura 3.13 Desmolde e identificación de especímenes
1. Especimen cilíndrico terminado, 2. Etiquetado de identificación.

3.5.2 Pruebas en estado endurecido

El estado endurecido del concreto se presenta una vez que se terminó la etapa de fraguado, ganando resistencia a la compresión. Esta es la propiedad comúnmente utilizada para el diseño de estructuras por los ingenieros y se mide mediante ensayos destructivos con probetas cilíndricas o cúbicas. La resistencia a la compresión según Kosmatka, et al., (2004) se puede definir como “la medida máxima de la resistencia a la carga axial de especímenes de concreto” (p. 8). Esta se calcula a partir de la carga de rotura, dividida por el área de la sección transversal de la probeta y se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), mega pascales (MPa), o en libras-fuerza por pulgada cuadrada (psi). La resistencia a la compresión se realiza de acuerdo a lo que se especifica en la NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo en la máquina universal, semejante a una prensa que ejerce presión mediante unas placas accionadas con un sistema hidráulico (Figura 3.14). Los especímenes para aceptación o rechazo de concreto deben ensayarse a la edad de 14 días, en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días en el caso de resistencia normal. Se elaboraron 5 especímenes por cada mezcla ensayando a los 7 días, 2 a los 14 días y 2 a los 28 días (NMX-C-083-ONNCCE-2014).



Figura 3.14 Prueba de resistencia a la compresión
 1. Colocación centrada de cilindro, 2. Aplicación de carga, 3. Falla de cilindro.

➤ Microscopia Electrónica de Barrido

Con el fin de completar la información sobre las características del concreto se realizaron pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Esta técnica es utilizada para una variedad de proyectos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés) para materiales de construcción en concretos de alto rendimiento. Una preparación adecuada de la muestra en cualquier técnica de microscopia facilita la interpretación de las características microestructurales. La técnica SEM emplea electrones microdispersados e imágenes de rayos X por lo que se requiere de una superficie considerablemente pulida para obtener imágenes de alta calidad (Stutzman y Clifton, 1999).

La preparación de las muestras se realizó mediante el siguiente procedimiento permitiendo una clara definición de las imágenes. La primera fase consistió en la obtención de una muestra representativa obtenida de la parte central del espécimen cilíndrico de aproximadamente 2cm x 2cm. Una vez obtenida la muestra se utilizó resina epóxica para impregnar los poros (llenando los vacíos y dando soporte a la microestructura del concreto), consecutivamente se sometió a vacío eliminando el aire atrapado de tal manera que la muestra quedó totalmente encapsulada (Figura 3.15). La muestra se colocó al horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de 40°C para posteriormente ser desmoldada y pulida usando una serie de grados cada vez más finas tanto de lijas como de pasta de diamante (Figura 3.16). La etapa de pulido es necesaria para eliminar la textura rugosa y exponer una sección transversal sin modificación de la microestructura del concreto.

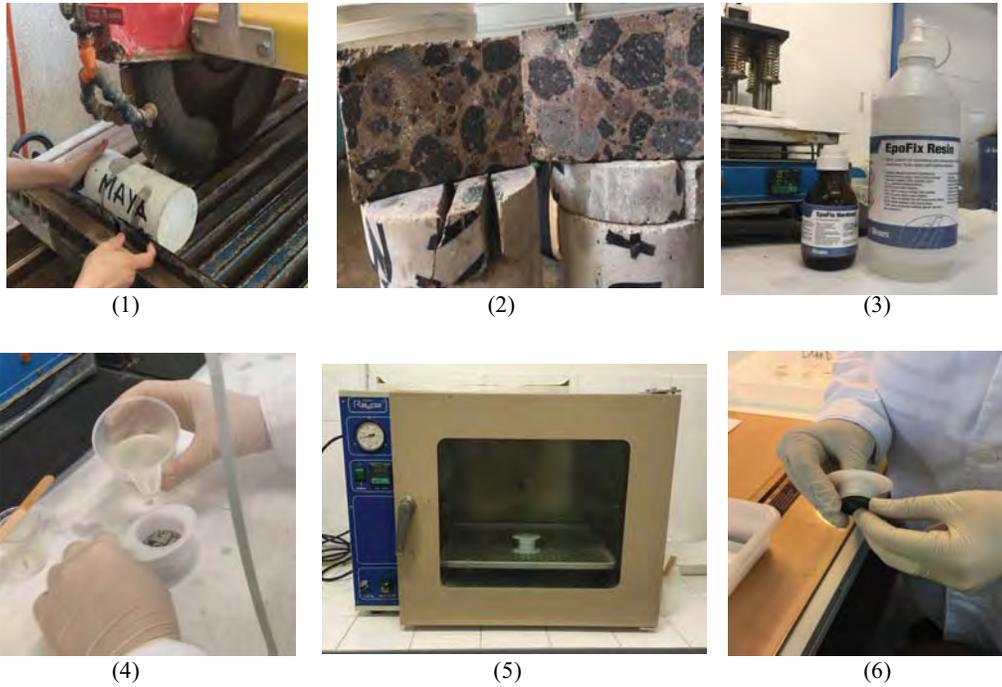


Figura 3.15 Preparación de muestra para SEM

1. Corte del espécimen, 2. Reducción de muestra, 3. Resina epóxica empleada, 4. Embebido de muestra en resina epóxica, 5. Eliminación de aire atrapado por medio de vacío, 6. Desmolde de muestra.

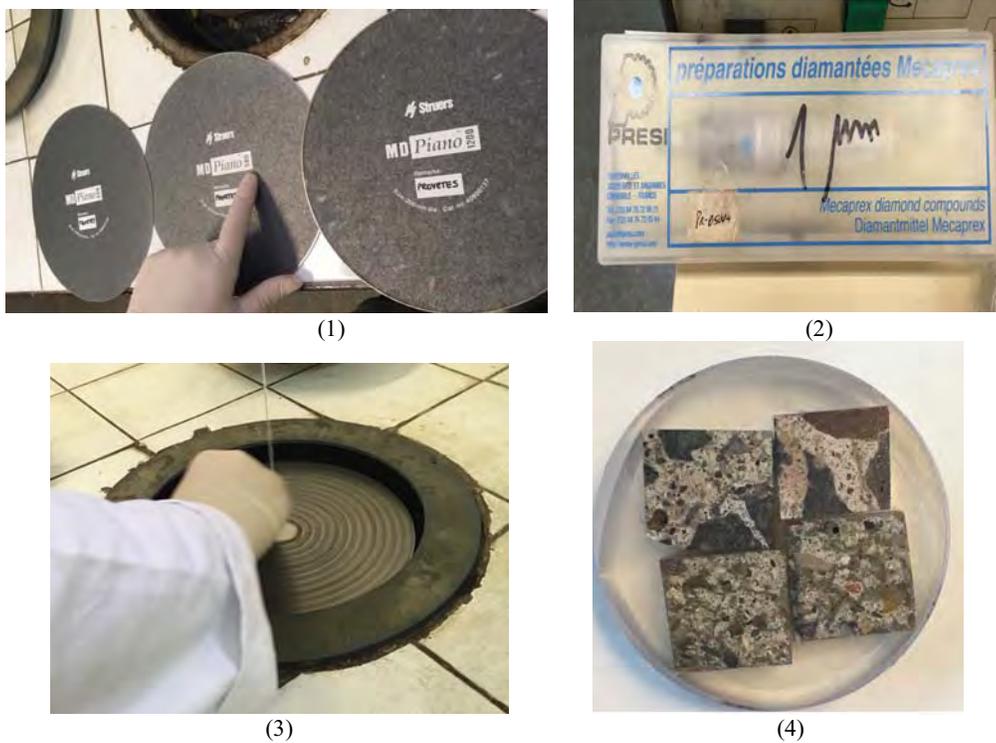


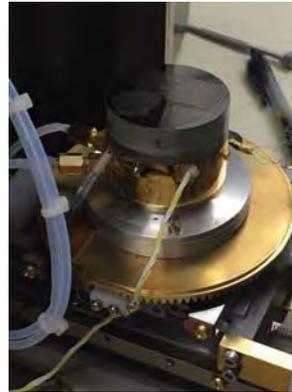
Figura 3.16 Preparación de muestra para SEM

1. Lijas de diamante, 2. Pasta de diamante, 3. Pulido de muestra, 4. Muestra final.

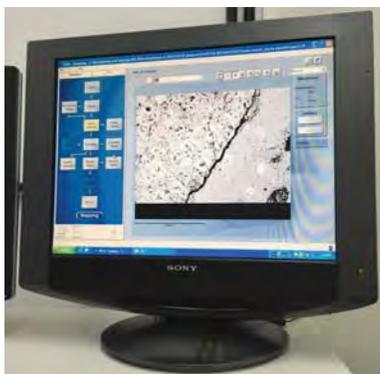
Previo a la obtención de imágenes la muestra pulida se prepara empleando un recubrimiento de carbón en polvo, la muestra se coloca en el microscopio marca JOEL (JSM-6510), con una base conductora de plata; obteniendo las imágenes con diversas resoluciones (Figura 3.17).



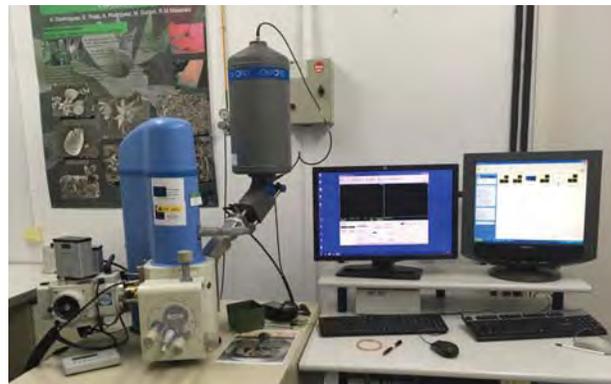
(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 3.17 obtención de imágenes SEM

1. Muestra con recubrimiento de carbón, 2. Colocación de la muestra en el equipo, 3. Obtención de imágenes y 3) Microscopio marca JOEL (JSM-6510).

4 RESULTADOS

Se presentan los resultados experimentales detallados obtenidos de las pruebas descritas en el Capítulo 5. El objetivo del capítulo es determinar la influencia del empleo de AR y ART en las características en estado fresco y endurecido de un concreto de acuerdo a la caracterización de los materiales empleados para su fabricación.

4.1 Evaluación de calidad de agua residual tratada

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados del análisis descrito en el Anexo I, el promedio de los resultados reportados por el SACMEX correspondiente al primer trimestre del 2015, los límites establecidos por la normativa NOM-003-SEMARNAT y la N-CMT-2-02-003-02. En la tabla se observa que la calidad de agua proporcionada por la PTAR-CE además de cumplir con lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT, cumple con lo establecido en la N-CMT-2-02-003-02, a excepción del contenido de grasas y aceites.

Tabla 4.1 Parámetros de calidad del agua residual tratada

Parámetros	N-CMT-2-02-003-02 ^[1]	NOM-003-SEMARNAT ^[2]	SACMEX	Análisis de laboratorio
Cloruro como Cl ^[3] (ppm)	600	250***	55.15	1.17
Sulfato como SO ₄ (ppm)	3500	----	ND	70
Carbonatos como CO ₃ (ppm)	600	----	95.82	140
pH (H ⁺)	≥6.5	5-10**	7.27	7.52
Materia Orgánica (DBO ₅) (ppm)	150	20	2.75	22
Álcalis totales como Na ⁺ (ppm)	450	500***	85.46	97
Dióxido de carbono disuelto CO ₂ (ppm)	3	----	-----	ND
Sólidos en suspensión en agua natural (ppm)	2000	20	22	6
Sólidos en suspensión en agua reciclada* (ppm)	35000	----	22	6
Magnesio como Mg ⁺⁺ (ppm)	150	0.2***	0.045	ND
Grasas y aceites (ppm)	0	15	3.33	0.056

Fuente: Elaboración propia

[1] Máxima concentración tolerada (cementos sulfato resistentes) N-CMT-2-02-003-02

[2] Máxima concentración tolerada NOM-003-SEMARNAT

[3] Para concreto reforzado

*Se considera como agua reciclada, la que se usó en el lavado de unidades revolventoras de concreto.

**NOM-001-ECOL-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

***Criterio SACMEX-1999.

4.2 Evaluación de granulometría conforme a la N-CMT-2-02-002-02

El análisis de granulometría determina si un agregado es aceptado para la elaboración de concreto hidráulico, los resultados obtenidos de la granulometría para los AG se presentan en las Tablas 4.2 y 4.3 y los correspondientes a AF se encuentran en las Tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.2 Granulometría de agregado virgen grueso

Agregado virgen grueso				
Malla	Peso retenido (gr)	% Peso retenido	% Peso retenido acumulado	% Que pasa
1"	366	7.38	7.38	92.62
3/4"	1,346	27.13	34.50	65.50
1/2"	1,794	36.15	70.66	29.34
3/8"	720	14.51	85.17	14.83
No. 4	621	12.52	97.68	2.32
Charola	115	2.32	100.00	0.00
Total	4,962	100		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3 Granulometría de agregado reciclado grueso

Agregado reciclado grueso				
Malla	Peso retenido (gr)	% Peso retenido	% Peso retenido acumulado	% Que pasa
1"	216	4.32	4.32	95.68
3/4"	1,525	30.51	34.83	65.17
1/2"	1,885	37.72	72.55	27.45
3/8"	725	14.51	87.05	12.95
No. 4	582	11.64	98.70	1.30
Charola	65	1.30	100.00	0.00
Total	4,998	100		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4 Granulometría de agregado virgen fino

Agregado virgen fino				
Malla	Peso retenido (gr)	% Peso retenido	% Peso retenido acumulado	% Que pasa
No. 4	29	2.90	2.90	97.10
No. 8	115	11.50	14.40	85.60
No. 16	155	15.50	29.90	70.10
No. 30	163	16.30	46.20	53.80
No. 50	213	21.30	67.50	32.50
No.100	224	22.40	89.90	10.10
Charola	101	10.10	100.00	0.00
Total	1,000	100		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5 Granulometría de agregado reciclado fino

Agregado reciclado fino				
Malla	Peso retenido (gr)	% Peso retenido	% Peso retenido acumulado	% Que pasa
No. 4	210	17.62	17.62	82.38
No. 8	403	33.81	51.43	48.57
No. 16	224	18.79	70.22	29.78
No. 30	124	10.40	80.62	19.38
No. 50	75	6.29	86.91	13.09
No.100	93	7.80	94.71	5.29
Charola	63	5.29	100.00	0.00
Total	1,192	100		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la norma N-CMT-2-02-002-02 los resultados obtenidos de las Tablas 4.2 a la 4.5 se deberán graficar en una escala logarítmica, donde el porcentaje de material que pasa es representado en las ordenadas y el diámetro de las partículas en las abscisas, con esto se determina el cumplimiento de la distribución del tamaño de acuerdo a lo señalado en la norma, información útil para la producción y control de concreto hidráulico. Para verificar el cumplimiento de la granulometría la curva del material en estudio debe pasar por la parte central restringida por los límites inferior y superior, los cuales se indican en color rojo en la Figura 4.1 y 4.2.

En la Figura 4.1 se observa que los ANVG y ARG cumplen con los límites de granulometría, es decir la gráfica del material utilizado se encuentra en medio de los límites indicados por la norma. Para el caso de la Figura 4.2 el ANVF cumple con los límites excepto por el material de la malla número 8, condición que es aceptable; mientras que en el caso de ARF no cumple con las recomendaciones señaladas en la N-CMT-2-02-002-02. En este mismo análisis se obtiene el MF para el AF habiendo obtenido un 2.5 para ANVF clasificándolo como arena fina y para el ARF el valor es de 4.0 que sobrepasa lo recomendado por Kosmatka, et al., 2004.

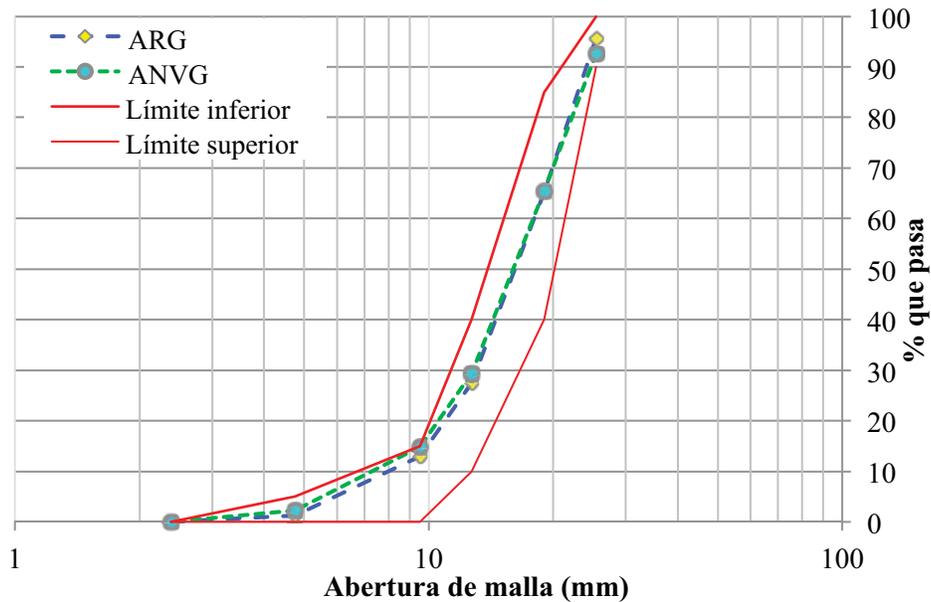


Figura 4.1 Curvas granulométricas de agregados gruesos

Fuente: Elaboración propia

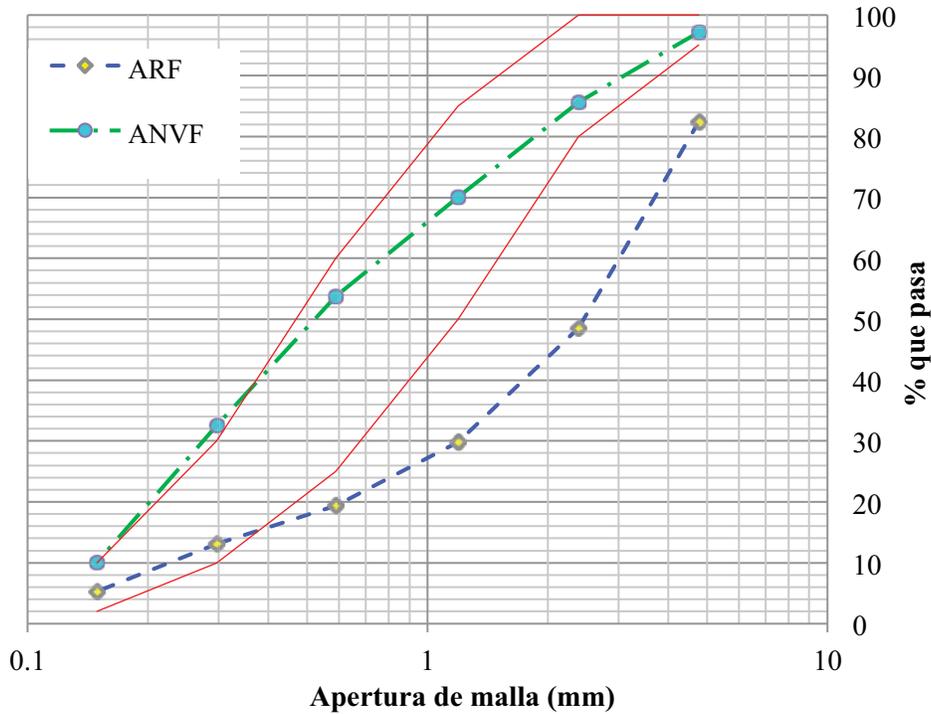


Figura 4.2 Curvas granulométricas de agregados finos

Fuente: Elaboración propia

4.3 Evaluación de los resultados de pruebas físicas de los agregados

En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados gruesos y finos respectivamente; empleados para el proporcionamiento de la mezcla (procedimiento descrito en el apartado 3.2.1).

Tabla 4.6 Resultados de caracterización de agregados gruesos

	Error <2%	TMA (mm)	Densidad gr/cm ³	Absorción %	Masa volumétrica compactada kg/m ³
ANVG	0.77	25	2.29	4.45	1376.21
ARG	0.04	25	2.23	10.48	1254.99

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Resultados de caracterización de agregados finos

	Error <2%	Módulo de finura	Densidad gr/cm ³	Absorción %
ANVF	0.00	2.5	2.31	3.2
ARF	0.6	4	2.11	17.58

Fuente: Elaboración propia

La densidad de los ANV varía de 2.4 a 2.9 g/cm³ (Kosmatka, et al., 2004); los resultados en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 muestran que todos los agregados empleados en la presente investigación se encuentran dentro del ámbito requerido.

Una alta absorción de agua en los materiales no tiene que ser negativa; sin embargo, podría ser un indicador de un mal desempeño para el concreto. Generalmente se tienen niveles de absorción del 0.2% al 4% para AG y del 0.2% al 2% para AF (Kosmatka, et al., 2004), para el cual solamente el ANVG está dentro de los límites y en cuanto al ARG y ARF los valores son bastante altos pudiendo ser una posible causa del decremento en la resistencia a la compresión, además de demandar una mayor cantidad de agua. En el caso de ARG se puede explicar debido al mortero viejo adherido a las partículas del agregado.

La M_{vc} de un AG usado para la elaboración de concreto de peso normal es de 1200 a 1750 kg/m³, comparando estos valores con los de la Tabla 4.6 puede concluirse que los AG son aptos para un concreto estructural de baja densidad (Kosmatka, et al., 2004). La M_{vc} del ARG se encuentra casi en el límite debido a que la textura de las partículas son angulares y más alargadas, en comparación con las de un AGV que son más redondeadas y lisas, lo que conlleva a una menor compactación.

4.4 Pruebas de concreto en estado fresco y endurecido.

Los resultados de las pruebas en estado fresco descritas en el apartado 3.3 se muestran en la Tabla 4.8, de los cuales se deduce lo siguiente:

- El contenido de aire mejora la *trabajabilidad* y esta correlacionado directamente con el revenimiento. Los valores de contenido de aire en la práctica de acuerdo con Kosmatka, et al. (2004) van del 2 a 3%, por lo que de la Tabla 4.8 se obtiene que las mezclas se encuentran dentro de este ámbito.
- El intervalo seleccionado para revenimiento fue de 8 a 10 cm, se cumple con la tolerancia de ±25mm. Aunque las mezclas CAR y CAR* se encuentran dentro del intervalo seleccionado es pertinente establecer que fue de difícil manejabilidad debido al alto contenido de partículas gruesas, mayor absorción y textura áspera presentes en ARF; que resulta en una mezcla con baja compactación natural y de difícil colocación en la práctica.

- La Tabla 4.8 también muestra el peso volumétrico del concreto, que de acuerdo con el RCDF se clasifica como concreto para fines estructurales clase de resistencia normal empleado para fines estructurales clase dos al estar dentro de los límites señalados de 1900 a 2200 kg/m³, en todas las mezclas elaboradas.

Tabla 4.8 Resultados de pruebas en estado fresco

Mezcla	Contenido de aire (%)	Revenimiento (cm)	Peso Volumétrico (Kg/m³)
CAN	2.4	9.5	2132
CAN*	2.5	9	2144
CAR	2.7	8	2046
CAR*	2.8	8.5	2075
R25	2.6	9	2115
R30	2.4	9	2109
R100	2.5	8.5	2126

Fuente: Elaboración de autora.

Una prueba individual de resistencia a la compresión que se encuentre por debajo del $f'c^*$ de diseño no necesariamente significa que no se cumple con las especificaciones requeridas. En algunos casos la falla puede encontrarse en la ejecución de las pruebas y no necesariamente en el concreto. Generalmente se toma el promedio de los ensayos a los 28 días para determinar su cumplimiento y este debe ser igual o mayor a la resistencia de diseño, condición que se cumple en todas las mezclas a excepción de la mezcla CAR que se queda 8% debajo de la $f'c^*$ de 25 MPa. Los promedios de los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión se muestran en la Tabla 4.9; se ensayó un cilindro a los 7 días y dos cilindros a los 14 y 28 días.

Tabla 4.9 Resistencia a la compresión

Nombre de la mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días
CAN	19.17	24.00	26.06
CAR	21.32	22.37	25.09
R25	18.32	23.37	25.88
R30	22.94	22.91	24.81
R100	19.79	26.80	26.61
CAN*	18.28	22.49	24.71
CAR*	21.32	21.26	24.30

Fuente: Elaborado por la autora.

4.5 Análisis de resistencia a la compresión

La resistencia a los 7 y 14 días proporciona un indicador a temprana edad del desarrollo de la resistencia, se estima que el rango de resistencia respecto a los 28 días se encuentra entre un 60% al 70% y 86% al 92% respectivamente (Kosmatka, et al., 2004). En la Figura 4.3 se tiene la representación gráfica de la resistencia a los 7 y 14 días, donde todas las mezclas se encuentran dentro de los valores esperados de la resistencia a la compresión; 15MPa - 17MPa a los 7 días y 21MPa - 23MPa a los 14 días.

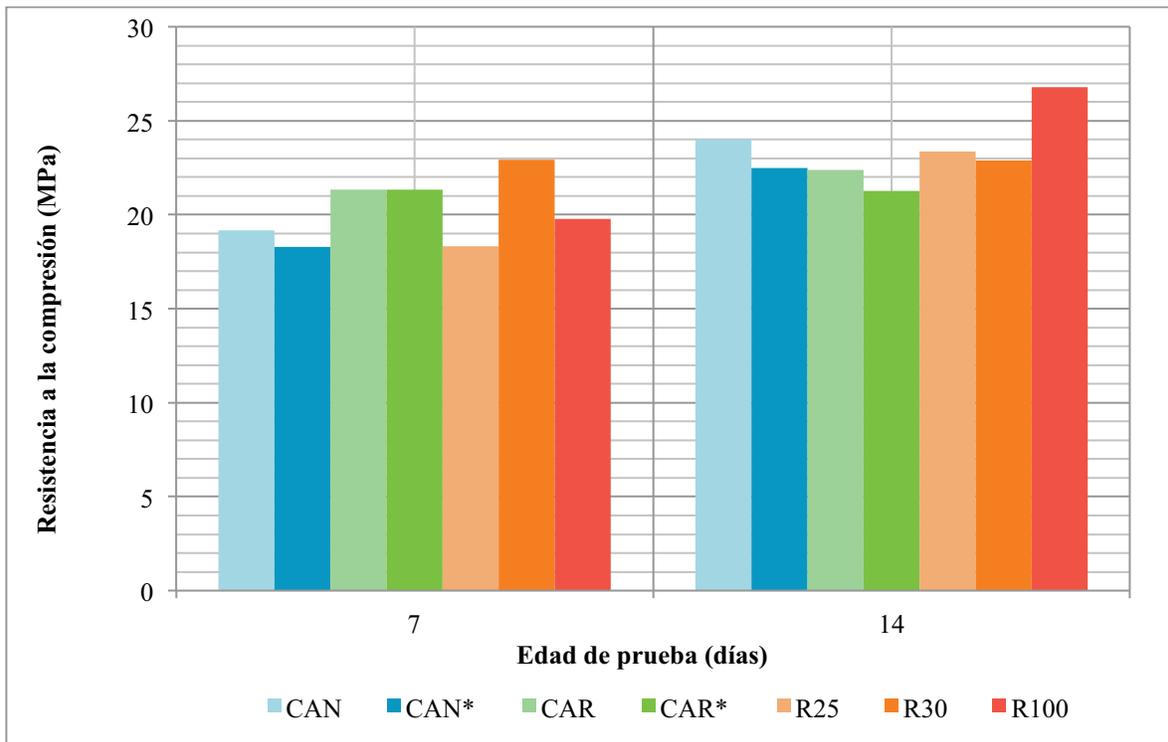


Figura 4.3 Representación gráfica de la resistencia a la compresión promedio a los 7 y 14 días

La resistencia a edad temprana (3, 7 y/o 14 días) puede ayudar a detectar problemas relacionados con la calidad del concreto o con los procedimientos de las pruebas en el laboratorio, estas no constituyen un criterio para rechazar el concreto. Se analiza la resistencia obtenida a los 28 días, la cual determina su cumplimiento de resistencia $f'c^* = 25\text{MPa}$, para el cual fue diseñado el concreto.

En la figura 4.4 se tiene la representación gráfica de la resistencia a los 28 días de las mezclas donde la variable es el contenido de ARG. El promedio de los resultados muestra que no hay diferencias significativas entre la mezcla R25, R30, R100 y CAN, siendo la mezcla R100 la de mayor resistencia. La diferencia de resistencia entre R25 y CAN es menos del 1%, pese a que la R30 está

por debajo en casi un 5% respecto de un CAN tan solo se encuentra por debajo en menos de 1% con respecto al $f'c^*$ (25MPa). Por otra parte, el R100 (27MPa) da una resistencia superior al CAN (26Mpa), este incremento tan solo representa un 2% por encima del CAN. Este último resultado se puede atribuir a diversos factores, sin embargo en este caso en particular se deduce que se debe principalmente a dos factores:

- La homogeneidad del material; pese a la homogenización de la muestra del material a emplear previo a la fabricación de las mezclas, la variabilidad de la calidad de los ARG es amplia debido a que los residuos utilizados para su fabricación pertenecen a concretos con diversas resistencias, por lo tanto, la resistencia obtenida en la mezcla R100 se puede atribuir a que el concreto de procedencia de los ARG es mayor o igual a la resistencia del concreto nuevo.
- El mortero adherido a las partículas; entre mayor sea el contenido de mortero adherido en las partículas menor es a la resistencia a la compresión y en consecuencia menor peso volumétrico. De acuerdo con los resultados de las pruebas en estado fresco en la Tabla 4.8, R100 tiene un peso volumétrico mayor con respecto a R25 y R30 y tan solo está por debajo en un 0.28% en comparación con un CAN, por lo que se puede deducir que el contenido de mortero viejo (adherido a las particulares del ARG) es escaso.

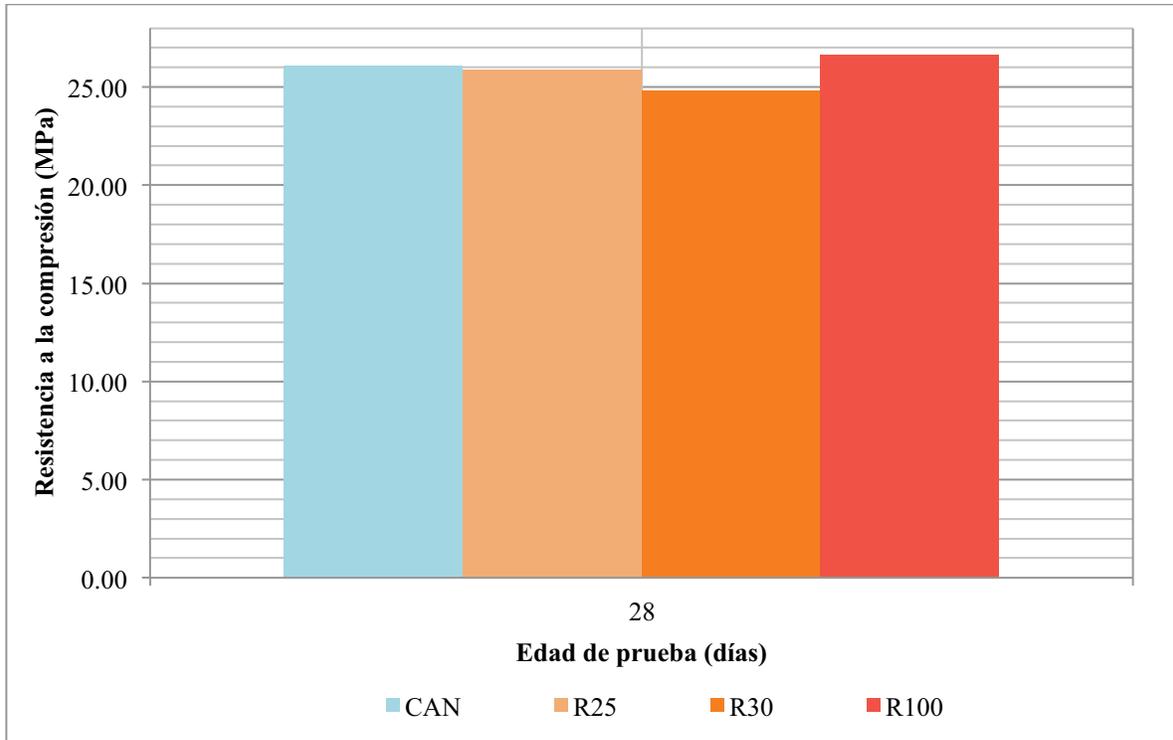


Figura 4.4 Representación gráfica de resistencia la compresión promedio a los 28 días de las mezclas CAN, R25, R30 y R100

En la Figura 4.5 se muestran los resultados de resistencia a los 28 días de los especímenes elaborados empleando ART y reemplazando AN en su totalidad por ARG y ARF. De la figura se puede establecer que las mezclas CAN, CAN* y CAR cumplen con el $f'c^*$, siendo CAR* el de menor resistencia. Comparando la mezcla CAN vs CAR donde las variables son los ARF y ARG podemos ver que hay una disminución en la resistencia de menos del 4%, sin embargo, pese a que el revenimiento está dentro de los rangos establecidos es importante mencionar que la mezcla CAR presento baja *trabajabilidad* al igual que la mezcla CAR*, esto es atribuible a la alta absorción del ARF y a su alto contenido de partículas gruesas. Por otra parte, comparando solamente el CAN vs CAN* en donde la única variable de influencia es el ART se tiene decremento intrascendente en la resistencia a la compresión, se presenta el mismo comportamiento en un CAR vs un CAR*. Pese a que el decremento que se tiene no es sustancial se infiere que el uso de ART si influye en la resistencia a la compresión del concreto.

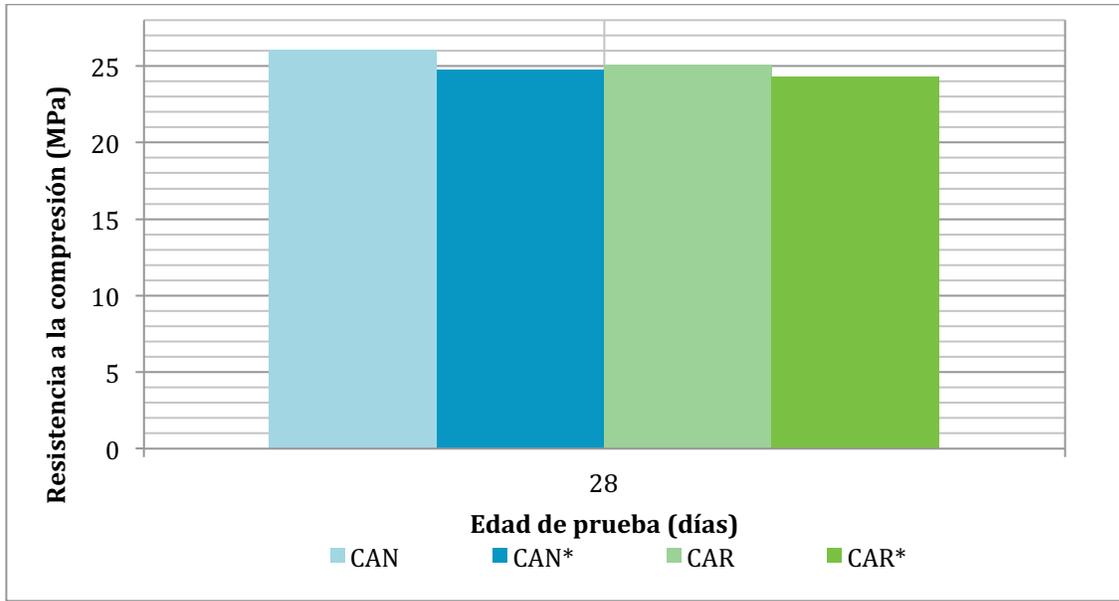


Figura 4.5 Representación gráfica de resistencia a la compresión promedio a los 28 días de las mezclas CAN, CAN*, CAR y CAR*

4.5.1 Microscopia electrónica de barrido

Adicionalmente se realizó una SEM con la intención de explicar el comportamiento de la resistencia a compresión. La Figura 4.6 muestra la microestructura de la llamada Zona de Transición Interfacial (ZTI), localizada entre un agregado y el mortero. Esta ZTI es causante de afectaciones importantes en las propiedades de los concretos ya que actúa como “el eslabón más débil” de su matriz; su espesor, su porosidad, su discontinuidad, su rugosidad y su tortuosidad son los parámetros que la describen. En esta imagen se observa que el espesor de la ZTI es más grueso (50 μm) para un CAR en comparación con la de un CAN (20 a 30 μm), la imagen es notoriamente continua y poco tortuosa. En otras palabras, la creación de áreas más débiles alrededor de los agregados formadas entre un AR (con mortero adherido) y el nuevo mortero del concreto nuevo, son las causas de la pérdida de resistencia.

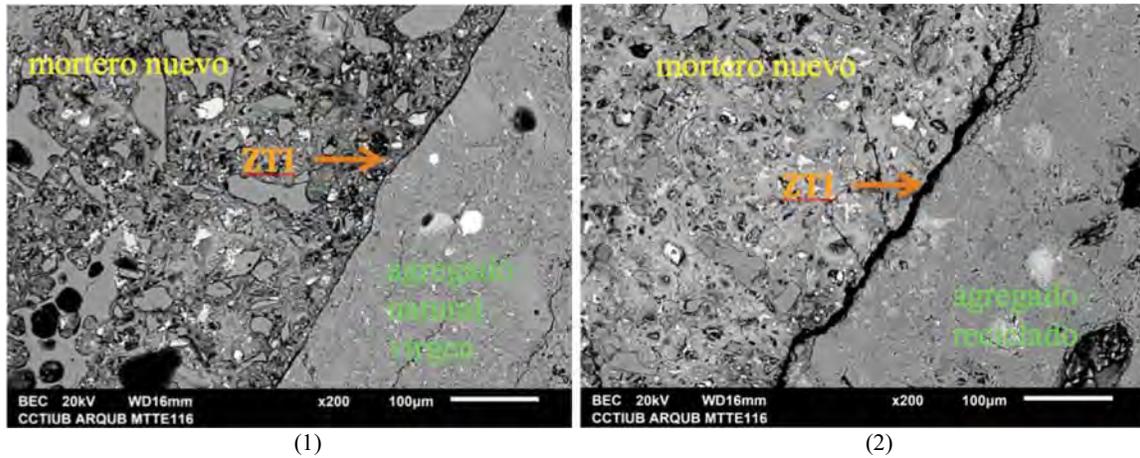


Figura 4.6 Imágenes SEM a 200x sobre muestra de sección pulida
 1. Mezcla CAN y 2. Mezcla CAR

4.5.2 Análisis de varianza

Con la intención de determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos de los especímenes elaborados con AR procedentes de RCD y ART de la PTAR-CE se aplicó un análisis de varianza a los resultados de resistencia a la compresión, para un diseño de bloques completamente al azar, de 7 tratamientos y 3 bloques fijando un nivel de alfa máximo de 0.05 para aceptar una diferencia estadística del 95% de confiabilidad, de acuerdo con el modelo matemático mostrado en la Ecuación 4.1.

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + T_j + E_{ij} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Y_{ij} es la variable de respuesta

μ es la media general

β_i es el efecto de bloque

T_j es el efecto de tratamiento

E_{ij} es el error aleatorio

Los tratamientos son las variaciones de porcentaje de ARG y remplazo de ART, los bloques son los especímenes probados a diferentes edades y la variable de respuesta es el promedio de resistencia a la compresión de los especímenes. El análisis de varianza utiliza las medias para calcular cuadrados medios; estimando la dispersión entre mediciones de tratamientos debidas a causas aleatorias (error

experimental). Se hace una prueba F, distribución según Fisher-Snedecor a los cuadrados medios y con esto se determina si existen diferencias reales entre las medias de los tratamientos, generando dos hipótesis:

Hipótesis nula: No existe diferencia significativa entre los tratamientos.

Hipótesis alterna: Si hay una diferencia significativa entre los tratamientos.

En ausencia de diferencias reales debidas a medias de los tratamientos, los cuadrados medios serán en promedio iguales. En otras palabras, se acepta la hipótesis nula concluyendo que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, indicando que las probabilidades de obtener una diferencia de medias del tratamiento son solo del 5% (Badii et al., 2007).

El análisis en el experimento rechazó la hipótesis nula; si hay una diferencia significativa entre tratamientos, por lo que se realizó un segundo análisis utilizando el método de la mínima diferencia significativa (MDS). Este método estadístico se aplica cuando previamente se haya rechazado la hipótesis nula del test F del análisis de varianza he identifica cuales son los tratamientos diferentes entre sí. La MDS hace una comparación de medias por pares, sigue una distribución t de Student con N-1 grados de libertad y donde la denominada MDS, viene dada por la Ecuación 4.2 (Marques, 2003):

$$LSD = t_{\alpha/2, N - \alpha} \sqrt{\left(\hat{S}_R^2 * \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right) \right)} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

\hat{S}_R^2 es la varianza residual

n_i y n_j es el número de observaciones correspondientes a cada media

$N - \alpha$ es el número de grados de libertad de la varianza residual

$t_{\alpha/2, N - \alpha}$ es el valor crítico de la distribución T con $N - \alpha$ grados de libertad que deja una probabilidad a su derecha igual a $\alpha/2$

Los resultados de este MDS muestran que la diferencia se presenta solo para el tratamiento de la mezcla 100R con respecto al resto, la resistencia a la compresión es más alta, indicador de que se tiene un mejor desempeño cuando se hace una sustitución de un 100% de ARG y que no hay diferencia entre el resto de los tratamientos.

El análisis de varianza para bloques completamente al azar fue repetido, analizando solo 6 de los tratamientos excluyendo la mezcla 100R; dando como resultado la aceptación de la hipótesis nula; no existe diferencia significativa entre los tratamientos. Demostrando que cuando se tiene un remplazo de hasta un 30% de ARG o de agua potable por ART no hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo corresponde a las conclusiones generales del trabajo de investigación. Las recomendaciones para el diseño de un concreto hidráulico no estructural con agregados reciclados provenientes de residuos de la construcción y recomendaciones para investigaciones futuras que den continuidad al presente trabajo de investigación.

El uso de agregados reciclados provenientes de los RCD conlleva a una práctica sustentable en la industria de la construcción, al igual que el uso de fuentes de abastecimiento de agua alternas como el ART. El gobierno de la Ciudad de México está promoviendo activamente políticas destinadas a reducir el uso de recursos primarios y fomentar la reutilización y el reciclado. Diversas investigaciones sobre el uso de AR provenientes de RCD han demostrado que es posible obtener un concreto de buena calidad empleando agregados reciclados.

El objetivo principal del presente trabajo fue investigar la viabilidad de emplear AR y ART para la fabricación de concreto para banquetas y guarniciones. El estudio incluyó la preparación de mezclas de concreto con diversos porcentajes de AR y la sustitución de agua potable por ART. Además, se incluyó la evaluación de las propiedades de concreto en estado fresco y endurecido. Se fabricó un total de 37 especímenes de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto con diferentes porcentajes AR y empleando ART, las propiedades estudiadas fueron *trabajabilidad* de la mezcla, revenimiento, contenido de aire y resistencia a la compresión. Adicionalmente se obtuvieron imágenes con la técnica SEM la cual permitió visualizar la microestructura del concreto fabricado con AR. De acuerdo con los resultados experimentales, el uso de agregado reciclado grueso y agua residual tratada en mezclas de concreto como alternativa de agregado natural virgen y agua potable es factible. Por lo que, en la siguiente sección se presentan las conclusiones principales que se obtuvieron de los resultados experimentales.

5.1 Conclusiones

El ART procedente de la PTAR-CE cumple con los límites de la N-CMT-2-02-003-02 que señala la calidad de agua para fabricación de concreto hidráulico, a excepción de grasas y aceites cuya concentración no excede significativamente la norma. En la investigación se encontró que ninguno de los especímenes de concretos fabricados con el ART presenta efectos perjudiciales y es un medio viable, práctico y apropiado para reducir el uso de agua potable, basados en los resultados de las pruebas de concreto en estado fresco y la resistencia a la compresión obtenida. El ART de la PTAR-

CE se puede considerar como una fuente de agua aceptable para la fabricación de concreto en elementos no estructurales, como lo son banquetas y guarniciones.

De acuerdo con el análisis de varianza realizado para la resistencia a la compresión se tiene que el uso ART o ARG en hasta un 30% no presentan diferencias respecto a un concreto convencional, por lo que es factible emplearlos para la fabricación de concreto nuevo. Con el análisis se establece que no hay diferencias significativas en la resistencia a la compresión y que se da cumplimiento a lo establecido por la norma de la SCT N-CTR-CAR-1-02-010, referente a banquetas y guarniciones. Con base a las imágenes SEM se puede concluir que, además de los efectos adversos debido a las propiedades físicas de los AR (baja densidad, alta porosidad), el comportamiento mecánico del concreto; es ocasionado por la alta porosidad del mortero adherido a los ANV originales y a la creación de las nuevas áreas débiles ZTI, por lo que se conjetura que a mayor contenido de ARG menor es la resistencia, por lo que se debe limitar la cantidad en el uso de ARG de acuerdo a las características del concreto requerido. No obstante, los ARG son de alta calidad y no presentan diferencias significativas en comparación ANV por lo que es viable obtener un concreto con un comportamiento mecánico satisfactorio, de la presente investigación se puede destacar los siguientes puntos:

- La densidad y M_{vc} compacta de los agregados reciclados gruesos no es significativamente menor por lo que cumple con las recomendaciones de literatura.
- La *trabajabilidad*, contenido de aire y revenimiento no presentaron afectaciones sustanciales en ninguno de los tratamientos donde se utilizó ARG. En la mezcla R100 se tuvo un centímetro menos en revenimiento con respecto a una mezcla control, lo que se puede compensar con el uso de aditivos fluidificantes.
- La absorción de ARG fue mayor en un 6%, sin embargo, esto no afectó las características del concreto.
- El ARF tiene alto contenido de mortero y en comparación con un ANF es de baja calidad por lo que no es recomendable su uso en la fabricación de concreto.

Los beneficios ambientales al utilizar AR y ART se manifiestan en una reducción de las emisiones de CO₂, los cálculos presentados en el presente proyecto a partir de datos de la bibliografía muestran una reducción considerable con el uso de ART y AR, de tal manera que el incremento en su uso es clave para la conservación de recursos naturales para las generaciones futuras.

5.2 Recomendaciones para futuros estudios

Mientras que los estudios han demostrado que los AR provenientes de RCD se puede utilizar como agregados para concreto nuevo, hay una necesidad de obtener más datos sobre su uso a largo plazo y evaluar su durabilidad. Si bien la investigación demuestra que al usar 100% de contenido de ARG superará la resistencia de un concreto con 100% ANV, es necesario verificar algunas otras propiedades y determinar si es posible emplearlo en muros de concreto reforzado de viviendas de interés social, en donde solo se requiere de 150 kg/cm^2 (NTC, 2008), mediante el cumplimiento de la normativa correspondiente. Por lo que se recomienda, hacer pruebas en losas, vigas y paredes para obtener otras características del concreto con AR y ART para identificar efectos adversos que se puedan presentar. También se recomienda hacer pruebas con la adición de aditivos en la mezcla para no perder *trabajabilidad* y buscar obtener una mayor resistencia a la compresión.

Al igual que se cuenta con especificaciones y normativas para ANV es necesario establecer los estándares para el uso de AR en sus diversas aplicaciones, esto es clave fundamental para su uso a futuro creando oportunidades para aumentar el uso de AR. Esto ayudará a que el usuario utilice AR en la elaboración de nuevos concretos con confianza.

Se encontró que no hay suficiente investigación referente al uso de ART en la fabricación de concreto, por lo que es necesario experimentar con diferentes calidades de agua residual tratada y determinar si es factible su uso en función de la N-CMT-2-02-003-02, que establece los parámetros de calidad de agua para la fabricación de concreto hidráulico. Basado en el trabajo experimental llevado a cabo el ART procedente de una PTAR, con un tren de tratamiento similar a la PTAR-CE, podría ser utilizada en la elaboración de concreto. Actualmente la PTAR-CE da cumplimiento a la NOM-003-SEMARNAT, donde sus límites máximos permisibles son más estrictos a los que establece la N-CMT-2-02-003-02.

En el subcapítulo 2.7 “sustentabilidad de la construcción” se presentó información de los beneficios ambientales que se obtienen al emplear el uso de AR y ART, ambos recursos tienen gran potencial para resolver la problemática que representa la disposición final de RCD y la preservación de los recursos naturales. Sin embargo, se recomienda hacer un estudio más a fondo, basado en un análisis de ciclo de vida, para establecer parámetros numéricos referentes a la Ciudad de México.

En esta investigación no es objetivo realizar un análisis de los beneficios económicos que se tiene al utilizar agua residual tratada y agregados reciclados; sin embargo, en el presente trabajo se incluye

información de la Ciudad de México, que indican que la construcción con agregados reciclados y agua residual tratada tiene un costo global menor en comparación con el uso de agregados naturales vírgenes y agua potable. Los ARG y el ART son recursos valiosos para la industria de la construcción, tomando en cuenta tanto los aspectos económicos como de sostenibilidad.

6 REFERENCIAS

- Ahmad, A. (2008). Performance of Recycled Aggregate Concrete. Tesis de Maestría. Islamic University of Gaza, Israel. Recuperado el 7 de Mayo del 2014, de pp. 5-20.
- Badii, M.H., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A. y Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de Negocios* 4(2), 283–330. UANL, Monterrey, México.
- Breña, A.F., Breña, J.A. y Naranjo, M.F. (2009). Costo de energía eléctrica del m³ de agua abastecida por los sistemas de bombeo en la zona metropolitana del Valle de México. Seminario Iberoamericano sobre planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua. Valencia, España (IX SEREA). Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de http://www.senado.gob.mx/comisiones/recursos_hidraulicos/docs/doc10.pdf
- Cámara Mexicana de la Industria la Construcción (2013). Plan Nacional de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición (PM-RCD), México. Recuperado el 25 de Octubre del 2014, de <http://www.fic.org.mx/OTTIC/CMIC/GuiaRapida.pdf> (pp. 15-16)
- Cemex. Informe de desarrollo sustentable 2011. Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de http://www.cemexmexico.com/desarrollosustentables/ids2011/docs/cemex_rs2011.pdf
- Centro Mario Molina (2011). Evaluación energética de los actuales sistemas de aguas urbanas y propuestas de manejo de los recursos hídricos en la Ciudad de México. Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2012/05/12.EvaluaciónEnergeticaAguasUrbanasDF_fin.pdf
- Chandra, S. (2011). Mechanical Behaviour and Durability Performance of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate. Tesis de Maestría. University of Stellenbosch, Sudafrica. Recuperado el 7 de Mayo del 2014, de pp. 1-50.
- De la Peña, M., Ducci, J., y Zamora, V. (2013). Tratamiento de Aguas Residuales en México. Recuperado el 11 de Mayo del 2016, <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5931/Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20en%20México.pdf?sequence=4>

- Descarrega, A. (2011). Quality Improvement of the Recycled Aggregates Through Surface Treatment. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica De Catalunya, España. Recuperado el 16 de Mayo del 2014, de pp. 14-28.
- Federación Interamericana del Cemento. *Informe Estadístico 2013. Bogotá, Colombia*. Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- Granell, E.(2014). *Experiencia empresarial de los RCD en México*, memoria usb. Segundo Encuentro de Residuos de la Construcción y Demolición. La división de Ingeniería Civil y Geomántica de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2014, pp.8-23.
- Gómez, L. (2007). Empleo de materiales alternativos en la industria de la Construcción para vivienda económica: mejoramiento de Calidad de vivienda y confort térmico. CONACYT – CONAVI, pp.15-26.
- HACH Company, 2000. DR/201 espectrofotómetro, manual de análisis de agua, Loveland, Colorado.
- INEGI. Censo Nacional de Gobiernos y Delegaciones, 2012, México. Consultado el 23 de Febrero del 2016, de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=09>
- ISO 14044, 2006. Gestión ambiental-Análisis del ciclo de vida-Requisitos y directrices. Capítulo 1, 2 y 3. Consultado el 5 Octubre del 20015, en <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B.,Panarese,W.C. y Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Illinois, EE.UU. : Portland Cement Association, pp. 1-335.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) publicada el 28 de Enero de 1988 en el Diario Oficial de la Federación (DOF). Última Reforma publicada el 16 de Enero del 2014 en el DOF. Recuperada el 7 de Mayo del 2015, de [http://www.pgjdf.gob.mx/fedapur/DF/Normas/nadf-007-rnat-2004%20\(cascajo\).pdf](http://www.pgjdf.gob.mx/fedapur/DF/Normas/nadf-007-rnat-2004%20(cascajo).pdf)

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) publicada el 8 de Octubre de 2003 en el Diario Oficial de la Federación (DOF). Última Reforma publicada el 4 de Junio del 2014 en el DOF. Recuperada el 7 de Mayo del 2015, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf

The Natural Stone Council, (2008). Limestone Quarrying and Processing; A Lyfe-cycle inventory. University of Tennessee, EE. UU. Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de http://www.naturalstonecouncil.org/content/file/LCI%20Reports/Limestone_LCIv1_October2008.pdf

Marie, I. y Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 1-6. Zarka, Jordania. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>

Marinković, S. y Ignjatović, I. (2013). Life-cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs). Woodhead Publishing Ltd (23), 569-604. Novi Sad, Serbia.

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., y Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management* (30), 2255–2264. Novi Sad, Serbia.

Marques, M.J., 2003. Pruebas de diferencia de medias o de comparaciones múltiples. Recuperada el 27 de Septiembre del 2015, de <http://colposfesz.galeon.com/disenos/teoria/cap13bmj/cap13bmj.htm>

Martínez, J. y Gallardo, L., (2005). Supervisión y control de obra (Urbanización). Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Estanqueiro, B.A.M. (2012) Life cycle assessment of the use of recycled aggregates in the production of concrete, Instituto Superior Técnico, Universidad Técnica de Lisboa-UTL, Portugal.

McCarthy, L., (sf). Analysis of alternative water sources for use in the manufacture of concrete. Tesis de Maestría. Queensland University of Technology, Australia.

M-MMP-4-04-006/02 Libro: Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. Parte: 4. Materiales para Pavimentos. Título: 04 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas Capítulo: 006. Desgaste Mediante la Prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normativa SCT- Instituto Mexicano del Transporte. Consultado el 15 de Mayo del 2014 en: <http://normas.imt.mx/default.htm>

National Mixed Concrete Association (sf). *El concreto en la Práctica ¿Qué, por qué y cómo?* Recuperado el 23 de Febrero del 2016, de <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/cip35es.pdf>

N-CTR-CAR-1-02-003/00 Libro: Construcción de carreteras. Parte: 1. Conceptos de Obra. Título: 02 Estructuras Capítulo: 003. Concreto hidráulico. Normativa SCT- Instituto Mexicano del Transporte. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://normas.imt.mx/default.htm>

N-CTR-CAR-1-02-010/00 Libro: Construcción de carreteras. Parte: 1. Conceptos de Obra. Título: 02 Estructuras Capítulo: 010. Banquetas y guarniciones. Normativa SCT- Instituto Mexicano del Transporte. Consultado el 15 de Mayo del 2014 en: <http://normas.imt.mx/default.htm>

N-CMT-2-02-002-02 Libro: Características de los materiales. Parte: 2. Materiales para Estructuras. Título: 02 Materiales para Concreto hidráulico. Capítulo: 002. Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico. Normativa SCT- Instituto Mexicano del Transporte. Consultado el 18 de Mayo del 2014 en: <http://normas.imt.mx/default.htm>

N-CMT-2-02-003-02 Libro: Características de los materiales. Parte: 2. Materiales para estructura. Título: 02 Materiales para concreto hidráulico. Capítulo: 003. Calidad de agua para concreto hidráulico. Normativa SCT- Instituto Mexicano del Transporte. Consultado el 18 de Mayo del 2014 en: <http://normas.imt.mx/default.htm>

NMX-AA-005-SCFI-2000, Análisis de agua - determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperad el 15 de Agosto del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx>

NMX-AA-028 –SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO_5) y residuales tratadas - método de prueba. Recuperad el 15 de Agosto del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx>

NMX-AA-034-SCFI-200, Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperad el 15 de Agosto del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx>

NMX-AA-036-SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperad el 15 de Agosto del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx>

NMX-AA-072-SCFI-2001, Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Recuperad el 15 de Agosto del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx>

NMX-C-030- 2004-ONNCCE, Industria de la construcción- Agregados- Muestreo. Consultado el 25 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-073-2004-ONNCCE, Industria de la construcción- Agregados-Masa- volumétrica-Método de prueba. Consultado el 25 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-077-1997-ONNCCE, Industria de la construcción- Agregados para concreto- Análisis granulométrico- Método de prueba. Consultado el 25 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-083-2014-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. Consultado el 25 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-144-1997-ONNCCE, Industria de la construcción- Cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-156-2010-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto-Determinación del revenimiento en el concreto fresco. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-157-2006-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto-Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-159- 2009-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto-Elaboración y curado, en el laboratorio de especímenes. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-162-2014-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto- Determinación de la masa unitaria, calculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-164- 2014-ONNCCE, Industria de la construcción- Agregados-determinación de la masa especifica y absorción de agua del agregado grueso. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C- 165- 2004-ONNCCE Industria de la construcción- Agregados-determinación de la masa especifica y absorción de agua del agregado fino – método de prueba. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-196-2010-ONNCCE, Industria de la construcción- Agregados- Resistencia por abrasión e impacto de agregados grueso usando la maquina de los Ángeles- método de prueba. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-155-ONNCCE-2014, Industria de la construcción- Concreto hidráulico- dosificado en masa especificaciones y métodos de ensayo. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-414-ONNCCE-2014, Industria de la construcción- Cementos Hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

NMX-C-251-1997-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto- Terminología. Consultado el 31 de Octubre del 2014 en: <http://www.onncce.org.mx/pdf/catalogoV05251010Up.pdf>

Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto (2008). Recuperada el 7 de Mayo del 2015, de <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/743.pdf>

Norma ambiental para el Distrito Federal (NADF-007-RNAT-2004), que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción en el Distrito Federal. Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 12 Julio de 2006. Recuperada el 7 de Mayo del 2015, de <http://www.sedema.df.gob.mx/sitios/conadf/documentos/NADF-007-RNAT-2013.pdf>

Norma ambiental para el Distrito Federal (NADF-007-RNAT-2013), que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción en el Distrito Federal. Publicada en la Gaceta oficial del Distrito Federal el 4 de Agosto de 2014. Recuperada el 25 de Abril del 2015, de http://www.sedema.df.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/Convocatoria-PROY_NADF_007_GODF.pdf

Ortega Font, N. (2011).El agua en números. *Casa del Tiempo*. (41).

Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., Miraldo, S., Abdollahnejad, Z., y Labrincha, J. (2013). The suitability of concrete using recycled aggregates (RAs) for high-performance concrete (HPC). *Woodhead Publishing Ltd* (17), 424-438.

Kou, S.C. (2006). Reusing Recycled Aggregates in Structural Concrete. Tesis de Doctorado. The Honk Kong Polytechnic University, Hong Kong pp. 8-54.

Ramos, E. (2007). Diagnóstico básico de residuos de la construcción del Estado de México.

Rao, A., Jha, K., y Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* (50), 71–81.

Shing Chai NGO, N. (2004). High-Strength Structural Concrete with Recycled Aggregates. Tesis de Licenciatura. University of Southern Queensland, Australia pp 1-1 a 2-3.

- Silva, M. y Naik, T., (2010). Sustainable Use of Resources – Recycling of Sewage Treatment Plant Water in Concrete. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Universita Politecnica delle March, Ancona, Italy, pp.2.
- Silva, R.V., De Brito, J., y Dhir, R.K., (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials* (65), 201-217. Lisbon, Portugal.
- SGM. Servicio Geológico Mexicano, 2014. Panorama Minero del Estado de México. Recuperado el 5 de Abril del 2016, de <http://www.sgm.gob.mx>.
- Stutzman P.E. y Clifton, J.R. “Specimen preparation for Scanning Electron Microscopy”. Actas de la Vigésima Primera Conferencia Internacional en microscopia del Cemento, L. Jany y A. Nisperos eds. pp. 10-22,1999. Recuperado el 5 de Septiembre del 2016, de <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build00/PDF/b00033.pdf>.
- Suarez, M., Defagot, M., M. F. Carrasco., Marcipar, A., Miretti, R. y Saus, H. (2006). Estudio de hormigones elaborados con residuos de ladrillerías y de demolición. Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Santa Fe, pp.2-13.
- Van den Heede, P. y De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement & Concrete Composites* (34), 431–442.
- Vázquez, A., Gonzales, F., Rocha, L., y Flores, J., (2001). Elaboración de concretos con aguas tratadas. *Construcción y Tecnología en concreto*. Recuperado el 31 de Octubre del 2014, de <http://www.imcyc.com/revista/2001/abril2001/concretos.htm>
- World Business Council for Sustainable Development (2009). The Cement Sustainability Initiative. Recuperado el 10 de Enero del 2015, de <http://www.wbcds.org>

**ANEXO I: PROCEDIMIENTOS DE CARACTERIZACIÓN
DEL AGUA RESIDUAL TRATADA**

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA CARACTERIZACIÓN DE ART

Potencial de hidrógeno (pH), Temperatura y conductividad

Estos tres parámetros se midieron en el sitio al momento de tomar la muestra con un medidor electrónico portátil (HANNA instruments, modelo HI98130 combo), ver Figura A.1.



Figura A.1 Medidor de pH, temperatura y conductividad

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La determinación de la DBO₅ se realizó de acuerdo a lo establecido por la NMX-AA-028 –SCFI-2001. La DBO₅ es una medida de la cantidad de oxígeno utilizada por una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de incubación de 5 días.

El primer paso consistió en la preparación de agua de dilución; se airea agua destilada hasta su saturación y se agregan 1 mL de cada nutriente por cada litro de agua destilada: solución amortiguadora, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y cloruro férrico. Para el caso de la muestra proveniente de la PTAR-CE se prepararon dos diluciones diferentes al 0.5% (5 mL de agua de muestra y 995 mL agua de dilución) y al 1% (10 mL de agua de muestra y 990 mL de agua de dilución), con las cuales se llenaron frascos Winkler de 300 mL, se guardó un frasco con cada dilución en la incubadora a 20°C para su análisis posterior. Con los otros frascos se procedió a determinar el oxígeno disuelto inicial (OD_i). Para la fijación del oxígeno se agregan 2 mL de sulfato de magnesio y de álcali –yoduro- nitrato, se tapa el frasco vertiendo el excedente y mezclando perfectamente, formándose un precipitado, el que una vez sedimentado hasta el hombro de la botella se mezcla nuevamente y se agregan 2 mL de ácido sulfúrico, se agita para disolver el precipitado. Posteriormente se toman 200 mL de la muestra con el oxígeno disuelto fijado y se colocan en un matraz Erlenmeyer, se agregan dos gotas de almidón que trabaja como indicador, se llena una bureta con tiosulfato de sodio 0.025N, se titula hasta obtener el color original. La cantidad

de tiosulfato utilizado corresponde directamente a los mg/L de oxígeno disuelto en dicha muestra. El mismo procedimiento (Figura A.2) se repite a los 5 días para obtener el oxígeno disuelto final (OD_f), y la DBO_5 se obtiene mediante la Ecuación a.

$$DBO_5 = \frac{OD_i - OD_f}{\% \text{ de dilución}} \quad (\text{Ecuación a})$$

DBO_5 es la demanda bioquímica de oxígeno última (mg/L)

OD_i es la concentración de oxígeno inicial (mg/L)

OD_f es la concentración de oxígeno final (mg/L)

% de dilución expresado en decimales

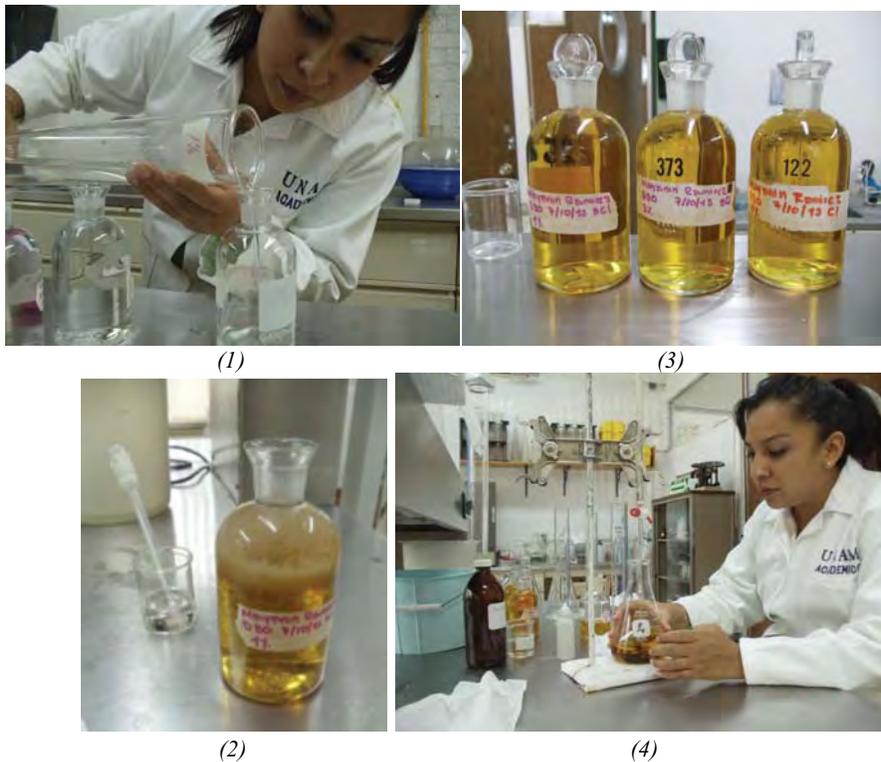


Figura A.2 Obtención de demanda bioquímica de oxígeno;

1. Preparación de dilución, 2. Formación de precipitado, 3. Oxígeno fijado, 4. Titulación con tiosulfato de sodio.

Sólidos

El procedimiento se realizó conforme a NMX-AA-034-SCFI-2001, parte de este se puede ver en la Figura A.3. Se emplean cápsulas y crisoles a peso constante; es decir se colocan en la mufla a una

temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ durante 20 minutos como mínimo, después se transfieren a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 minutos. Se pasan a un desecador, donde se dejan enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se pesan y se repite el ciclo hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0.5 mg.

Para la determinación de sólidos totales se vierten 10 mL de la muestra en una cápsula y se pone sobre un baño maría hasta su evaporación total, luego se coloca en un horno a temperatura de $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ por un periodo de una hora, la cápsula se deja enfriar en un desecador y se pesa nuevamente. El contenido de sólidos totales es el incremento de peso de la cápsula dividido entre el volumen de la muestra (Ecuación b).

$$ST = \frac{(G_1 - G) * 1000}{V} \quad (\text{Ecuación b})$$

ST son los sólidos totales (mg/L)

G_1 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación (mg)

G es el peso de la cápsula vacía a peso constante (mg)

V es el volumen de muestra (mL)

Los sólidos suspendidos se determinan filtrando la muestra a través de un filtro de fibra de vidrio colocado en un crisol a peso constante. Una vez filtrada la muestra se coloca el crisol en un horno a temperatura de $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ por un periodo de una hora y se obtiene el incremento en peso respecto al inicial, el cual representa el contenido de sólidos suspendidos en la muestra (Ecuación c).

$$SST = \frac{(G_4 - G_3) * 1000}{V} \quad (\text{Ecuación c})$$

SST son los sólidos suspendidos totales (mg/L)

G_3 es el peso del crisol con el filtro a peso constante (mg)

G_4 es el peso del crisol con el filtro y el residuo seco (mg)

V es el volumen de muestra (mL)

Los sólidos disueltos se obtuvieron por diferencia entre los sólidos totales menos sólidos suspendidos totales (Ecuación d).

$$SDT = ST - SST \quad (\text{Ecuación d})$$

SDT sólidos disueltos totales (mg/L)

ST son los sólidos totales (mg/L)

SST son los sólidos suspendidos totales (mg/L)

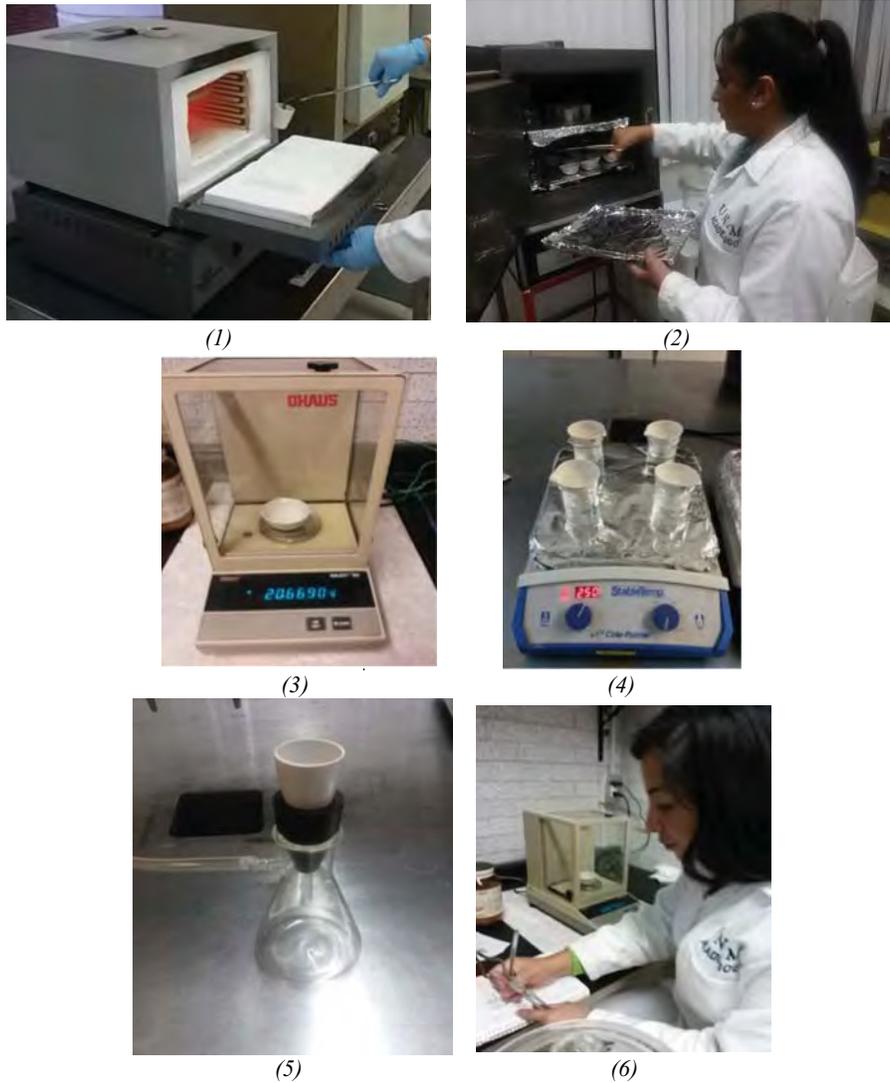


Figura A.3 Determinación de sólidos

1. Colocación de crisoles y cápsulas en la mufla, 2 Transferencia de crisoles y cápsulas a la estufa, 3. Peso de crisoles y cápsulas, 4. Cápsulas a baño maría, 5. Filtrado de muestra, 6. Registro de datos.

Alcalinidad

Se empleó el método indicado en la NMX-AA-036-SCFI-2001, el cual está basado en una valoración de la muestra empleando como una disolución titulante ácida.

Se miden 50 mL de agua de muestra y se colocan en un matraz Erlenmeyer, agregando 3 gotas de anaranjado de metilo tornando la muestra en color amarillo y se titula con una disolución de ácido sulfúrico 0.02N, hasta un color canela, ver Figura A.4. La alcalinidad total se determina mediante la Ecuación e.

$$AT = \frac{H_2SO_4}{vm} \quad (\text{Ecuación e})$$

AT alcalinidad total (mg/L)

H_2SO_4 es la cantidad de ácido sulfúrico utilizada para la titulación (mL)

vm es la cantidad de muestra utilizada para la prueba (mL)

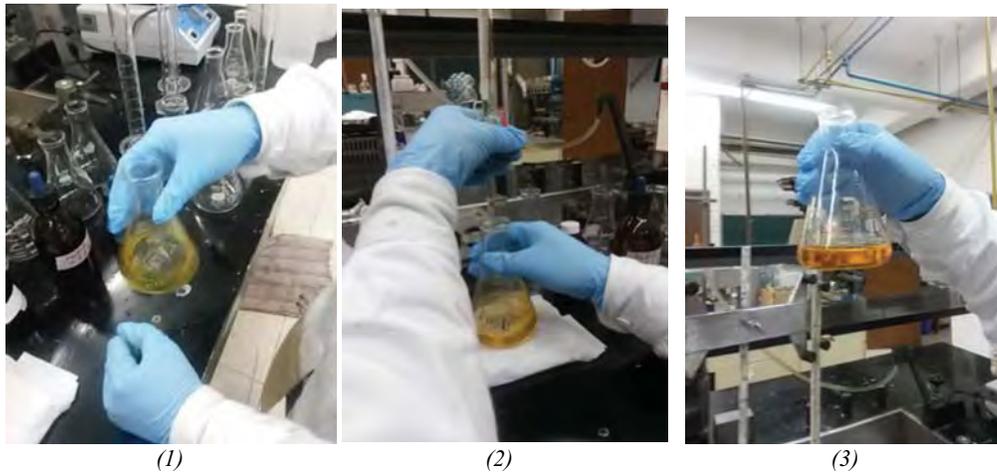


Figura A.4 Determinación de alcalinidad

1. Adición de anaranjado de metilo, 2. Titulación con ácido sulfúrico, 3. Titulación terminada (color canela).

Dureza

La determinación de dureza se realizó por medio de titulación de acuerdo a la NMX-AA-072-SCFI-2001. El método consiste en una valoración empleando negro de ericromo T como indicador visual, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira azul cuando estos se encuentran acomplexados o ausentes. Se toma una muestra de 25 mL y se coloca en un matraz Erlenmeyer, se agregan 2 mL de la solución buffer y 0.2g del indicador negro de ericromo T. Se titula con

disolución EDTA 0.01 M, ácido etilendiaminetetracético por su nombre en inglés, hasta obtener el cambio de color de vino rojizo a azul intenso, ver Figura A.5. La dureza total (mg/L CaCO₃) se calcula empleando la Ecuación f.

$$\text{Dureza} \left(\frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right) = \frac{A \times C \times 1000}{D} \quad (\text{Ecuación f})$$

A es el volumen utilizado de EDTA (mL)

C son los $\left(\frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right)$ equivalentes a 1mL de EDTA

D es el volumen de muestra (mL)



(1)



(2)

Figura A.5 Determinación de dureza total

1. Adición de solución buffer, 2. Cambio de coloración después de titulación.

Grasas y aceites

La determinación de grasas y aceites se realizó conforme a lo establecido en la NMX-AA-005-SCFI-2000, cuyo principio se basa en la absorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un Soxhlet empleando hexano como disolvente (Figura A.6). Primero se preparan matraces de extracción a peso constante y suspensión de tierra de diatomeas; se agrega un gramo de tierra de diatomeas a 100 mL de agua destilada. Se coloca papel filtro en un embudo Büchner y este a su vez en un matraz Kitazato, se agregan los 100 mL de suspensión aplicando vacío. Posteriormente se lava con 100 mL de agua destilada. Se transfiere la muestra de agua acidificada al embudo Büchner, una vez que se termina el filtrado se coloca el filtro en un cartucho de extracción. Se utilizan trozos de papel filtro impregnado con hexano para limpiar las paredes internas del embudo, el frasco contenedor de la muestra y se colocan en el mismo cartucho. El cartucho se coloca en la estufa a 103°C -105°C por un periodo de 30 minutos.

Se adicionan 200 mL de hexano en los matraces a peso constante y se coloca el cartucho en el equipo Soxhlet, el equipo se coloca sobre una parrilla de calentamiento, controlando la temperatura hasta alcanzar una velocidad de extracción de 20 ciclos/hora durante un periodo de 4 horas. Una vez terminado el tiempo de extracción se retira el matraz y se emplea un rotavapor para recuperar parte del disolvente, y para asegurar que no queden residuo se evapora el resto, el matraz se coloca en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente y se pone nuevamente a peso constante. Adicionalmente se debe analizar un blanco de reactivo bajo las mismas condiciones de la muestra, el valor obtenido se resta al resultado de la muestra. El contenido de grasas y aceites se determina con la Ecuación g.

$$G \text{ y } A \text{ (mg/L)} = \frac{A - B}{V} \quad (\text{Ecuación g})$$

A es el peso final del matraz de extracción (mg)

B es el peso inicial del matraz de extracción (mg)

V es el volumen de la muestra (L)



(1)



(2)



(3)



(4)

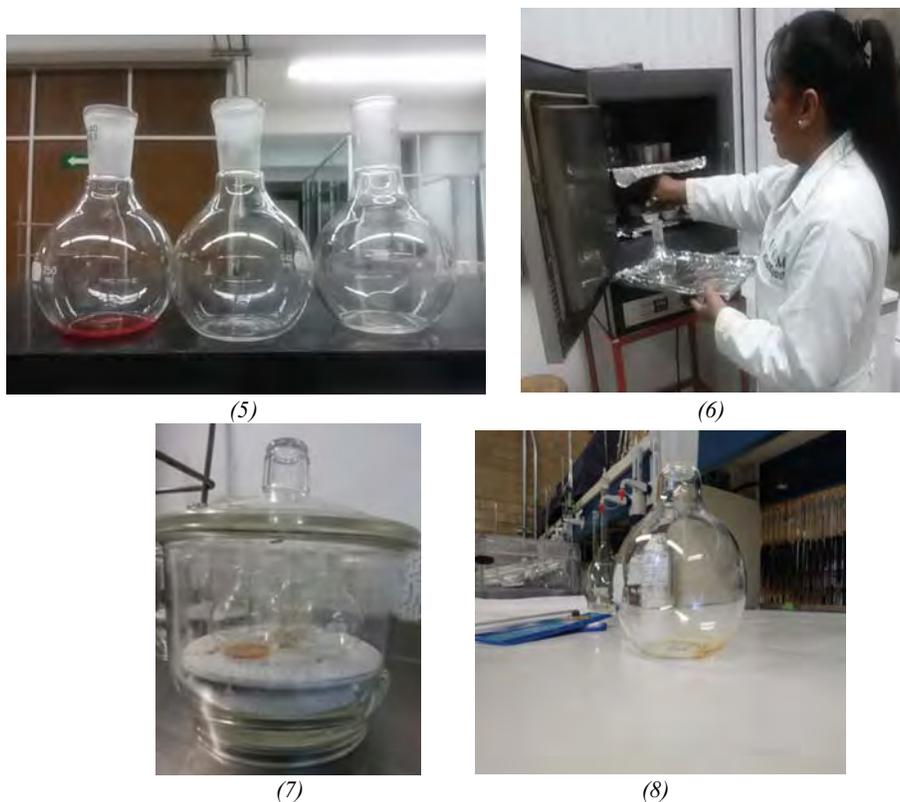


Figura A.6 Determinación de grasas y aceites

1. Filtrado de suspensión de tierra de diatomeas y muestra, 2. Preparación de equipo, 3. Extracción de grasas y aceites 4. Uso de rotavapor para recuperación de hexano (marca Büchi modelo R 110), 5. Matracas con hexano, grasas y aceites, 6. Colocación de matraces en estufa para evaporación total de hexano, 7. Matraces en desecador para enfriar, 8. Matraz con grasas y aceites recuperados de muestra.

Cloruros, sulfatos y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para la determinación de cloruros, sulfatos y DQO, se empleó un espectrofotómetro cuyo principio se basa en utilizar las propiedades de la luz y su interacción con otras sustancias, ver Figura A.7. En general el dispositivo selecciona y separa la luz de una determinada longitud de onda y la hace pasar por la muestra. La intensidad de la luz es captada y comparada con la intensidad de la luz que incidió en la muestra y a partir de esto se calcula la transmitancia de la muestra, que depende de la concentración de la sustancia (HACH company, 2000).

Para determinar la DQO se precalienta el reactor a 150°C, en un tubo de reactivo con una pipeta en un ángulo de 45 grados se colocan 2 mL de agua destilada y en otro tubo 2 mL de la muestra. Ambos tubos se mezclan y se colocan 2 horas en el reactor, se dejan enfriar a 120°C y mientras

siguen calientes se mezclan nuevamente y se colocan en un estante hasta alcanzar temperatura ambiente. En el equipo HACH se ingresa el número de programa para DQO, se gira el cuadrante hasta la longitud de onda indicada en la pantalla, se limpia la parte exterior del tubo con agua destilada y se coloca en el equipo presionando *zero* para que esta lectura corresponda a la de 0 mg/L de DQO, después se coloca el tubo con nuestra muestra y se selecciona *read* obteniendo el resultado de DQO en la muestra.

Para determinar los cloruros y sulfatos el procedimiento es similar, en este caso primero se introduce el número de programa en el equipo y se ajusta la longitud de onda. Se llenan dos celdas con 25 mL de muestra, a una se le agrega el contenido de una bolsa de reactivo, tapamos y sacudimos por 20 segundos, se selecciona *timer* para que el equipo contabilice el tiempo de reacción. Terminado el tiempo de reacción se coloca el blanco (celda con muestra sin reactivo) presionando *zero* y se obtiene una lectura de 0 mg/L de Cl^- o SO_4^{2-} según sea el caso, posteriormente se coloca la celda con la muestra de agua y el reactivo presionando *read* y se hace la lectura.

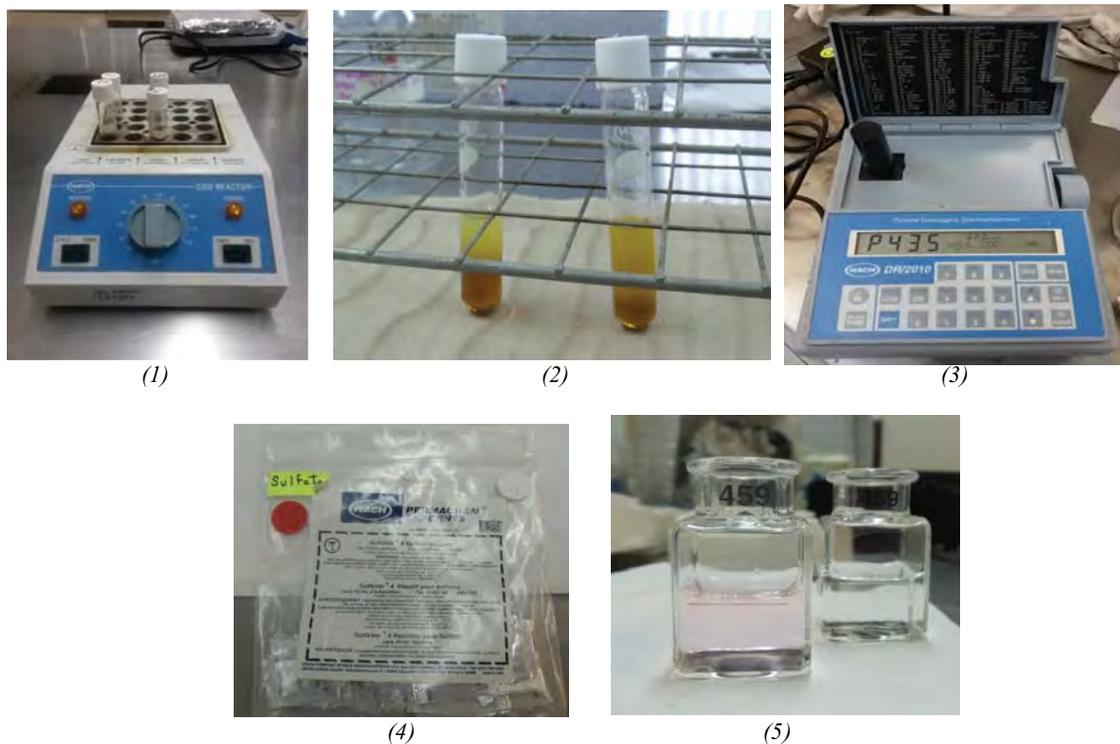


Figura A.7 Determinación de demanda química de oxígeno, sulfatos y cloruros

1. Reactor para DQO marca HACH modelo 45600-00, 2. Tubos con reactivo para DQO y muestra, 3. Equipo marca HACH modelo DR/2010, 4. Reactivo para sulfato,
5. Celdas con reactivo para determinación cloro.