



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE CONCRETO CON AGREGADO
GRUESO RECICLADO PRE-TRATADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
BERSAIN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. FRANCISCO GONZÁLEZ DÍAZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: M.I MENDOZA ESCOBEDO CARLOS JAVIER

Secretario: M.I. CANDELAS RAMÍREZ LUIS

Vocal: ING. COTTIER CAVIEDES JUAN LUIS

1^{er.} Suplente: M.I. MENDOZA ROSAS MARCO TULIO

2^{do.} Suplente: DR. GONZÁLEZ DÍAZ FRANCISCO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que me han apoyado todo el tiempo, por su amor, paciencia y comprensión, ya que son mi motivación y forman parte importante al alcanzar este objetivo en mi desarrollo profesional.

A mis hermanos, que son una plataforma importante en mi vida ya que siempre me han impulsado a superarme y ser mejor cada día.

Al Ingeniero Juan Luis Cottier Caviedes por su apoyo, disposición y sus conocimientos compartidos en la dirección de ésta tesis.

Al Doctor Francisco González Díaz por su confianza, dedicación, paciencia y su iniciativa como cotutor apoyando la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México ya que el estudio del posgrado en Ingeniería fortalece mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACyT) a través del programa de posgrados de calidad, por el apoyo económico brindado para la realización del posgrado.

Al Departamento de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, a través del Área de Construcción por la facilidad de utilizar su laboratorio para la realización de este trabajo de investigación.

A todos los que directa e indirectamente colaboraron mostrando su apoyo y compartiendo experiencias, compañeros y amigos que compartimos buenas experiencias y excelentes momentos.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

HIPÓTESIS DE TRABAJO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 17 |
| AGREGADOS RECICLADOS | 17 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 16 |
| 1.2 DEFINICIÓN..... | 18 |
| 1.3 PRODUCCIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS | 19 |
| 1.3.1 ETAPAS DE PROCESAMIENTO..... | 19 |
| 1.3.2 PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS | 20 |
| 1.3.3 SISTEMAS DE TRITURACIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS | 21 |
| 1.3.4 ALMACENAMIENTO..... | 23 |
| 1.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS..... | 24 |
| 1.4.1 GRANULOMETRÍA..... | 24 |
| 1.4.2 DENSIDAD ESPECÍFICA..... | 25 |
| 1.4.3 ABSORCIÓN | 26 |
| 1.4.4 FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL | 26 |
| 1.4.5 IMPUREZAS..... | 27 |
| 1.4.6 CONTENIDO DE MORTERO ADHERIDO | 28 |
| 1.5 NORMATIVIDAD | 28 |
| 1.5.1 LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA). | 29 |
| 1.5.2 NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-007-RNAT-2013. | 30 |
| 1.5.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN. | 32 |
| 1.6 RECOMENDACIONES PARA DISEÑO DE MEZCLAS CON AGREGADOS RECICLADOS ACI 555R-01..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 1.7 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL AGREGADO RECICLADO | 36 |
| 1.7.1 TRATAMIENTO TERMO-MECÁNICO | 37 |
| 1.7.2 TRATAMIENTO CON ÁCIDO | 37 |
| 1.7.3 TRATAMIENTO CON SILICATO DE CALCIO | 38 |
| 1.7.4 TRATAMIENTO DEL AGREGADO RECICLADO POR LA EXPOSICIÓN A CARBONATO DE CALCIO | 39 |
| 1.7.5 TRATAMIENTO CON MICROONDAS | 40 |
| 1.7.6 OTROS TRATAMIENTOS..... | 40 |
| CAPÍTULO 2 | 43 |
| FACTORES DE DETERIORO DEL CONCRETO | 43 |
| 2.1 DURABILIDAD | 44 |
| 2.2 CONDICIONES DE EXPOSICIÓN Y DE SERVICIO..... | 46 |
| 2.2.1 MEDIO AMBIENTE | 46 |
| 2.2.2 CONDICIONES DE SERVICIO..... | 47 |
| 2.2.3 CLASIFICACIÓN DE EXPOSICIÓN A ACCIONES DE DETERIORO DEL CONCRETO | 48 |
| 2.3 ATAQUE POR CLORUROS..... | 50 |
| 2.3.1 PRUEBA DE PERMEABILIDAD RÁPIDA AL ION CLORURO | 52 |
| 2.4 ATAQUE POR SULFATOS..... | 53 |
| 2.5 CARBONATACIÓN..... | 54 |
| 2.5.1 EFECTOS DE LA CARBONATACIÓN..... | 55 |
| 2.5.2 PENETRACIÓN DE CARBONATACIÓN | 56 |
| 2.5.3 MEDICIÓN DE LA CARBONATACIÓN..... | 57 |
| 2.6 CORROSIÓN..... | 57 |
| 2.6.1 TÉCNICAS DE MONITOREO DE LA CORROSIÓN..... | 58 |
| 2.6.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA | 59 |
| 2.6.1.2 POTENCIAL DE MEDIA CELDA..... | 60 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7 MEDIDAS DE PREVENCIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO | 61 |
| 2.7.1 REVESTIMIENTO PARA MEJORAR LA DURABILIDAD EN EL CONCRETO..... | 61 |
| 2.7.1.2 PROPIEDADES DEL REVESTIMIENTO | 61 |
| 2.7.2 MEDIDAS DE PREVENCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO | 62 |
| 2.7.2.1 ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN | 63 |
| 2.7.2.2 RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO..... | 63 |
| CAPÍTULO 3..... | 65 |
| DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS | 65 |
| 3.1 OBTENCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS DE CONCRETO..... | 66 |
| 3.2 TRITURACIÓN PRIMARIA..... | 67 |
| 3.3 TRITURACIÓN SECUNDARIA | 68 |
| 3.4 SEPARACIÓN DE TAMAÑOS..... | 69 |
| 3.5 PRUEBAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS RECICLADOS..... | 70 |
| 3.5.1 GRANULOMETRÍA..... | 70 |
| 3.5.2 MASA VOLUMÉTRICA SUELTA Y COMPACTA | 71 |
| 3.5.3 MASA ESPECÍFICA..... | 73 |
| 3.5.4 ABSORCIÓN | 74 |
| 3.5.5 COEFICIENTE DE FORMA | 75 |
| 3.5.6 CONTENIDO DE MORTERO ADHERIDO | 76 |
| 3.5.7 RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS..... | 79 |
| 3.6 EVALUACIÓN DE SELLADORES PARA TRATAMIENTO DEL AGREGADO GRUESO RECICLADO . | 79 |
| 3.6.1 TIPOS DE SELLADORES..... | 80 |
| 3.6.2 SELECCIÓN DEL SELLADOR | 81 |
| 3.6.3 TRATAMIENTO DE LOS AGREGADOS..... | 82 |
| 3.6.4 MEZCLAS DE PRUEBA | 84 |
| 3.6.5 RESISTENCIA A TENSIÓN DIAMETRAL | 85 |

| | |
|--|------------|
| 3.6.6 ELECCIÓN DEL SELLADOR A UTILIZAR..... | 86 |
| 3.7 FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES PARA PRUEBAS FÍSICAS Y MECÁNICAS..... | 86 |
| 3.7.1 ELABORACIÓN DE CONCRETO..... | 86 |
| 3.7.2 PRUEBAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO..... | 87 |
| 3.7.2.1 REVENIMIENTO..... | 87 |
| 3.7.2.2 PESO VOLUMÉTRICO..... | 88 |
| 3.7.2.3 CONTENIDO DE AIRE..... | 89 |
| 3.7.2.4 RESUMEN DE PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO..... | 89 |
| 3.8 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO..... | 90 |
| 3.8.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD..... | 90 |
| 3.8.2 RESISTENCIA POR TENSIÓN DIAMETRAL..... | 92 |
| 3.8.3 RESUMEN DE PRUEBAS DE RESISTENCIA MECÁNICA..... | 92 |
| 3.8.4 INDUCCIÓN DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA..... | 93 |
| 3.8.4.1 CÁMARA DE CARBONATACIÓN..... | 95 |
| 3.8.4.2 MONITOREO DE LA CARBONATACIÓN..... | 95 |
| 3.8.5 POTENCIAL DE CORROSIÓN..... | 100 |
| 3.8.6 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA..... | 101 |
| 3.8.6 PRUEBA DE PERMEABILIDAD DEL ION CLORURO..... | 110 |
| 3.9 ANÁLISIS DE COSTO DEL CONCRETO..... | 111 |
| CAPÍTULO 4..... | 114 |
| CONCLUSIONES..... | 114 |
| 4.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... | 117 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 119 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Capítulo 1

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1-Trituradora de mandíbulas..... | 22 |
| Figura 1.2-Trituradora de impacto..... | 22 |
| Figura 1.3- Trituradora de conos..... | 23 |
| Figura 1.4 Granulometría agregado natural vs agregado reciclado..... | 25 |

Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1.- Clasificación de los residuos de construcción, demolición y su posible reúso..... | 32 |
| Tabla 1.2.- Reutilización de residuos si se encuentran en un radio de 20 km..... | 35 |

Capítulo 2

Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1.- Clasificación de exposición a acciones de deterioro del Concreto..... | 48 |
| Tabla 2.2.- Penetrabilidad del Ion Cloruro en base a la carga pasada..... | 53 |
| Tabla 2.3.- Rangos de resistividad y riesgo de corrosión del acero de refuerzo..... | 59 |
| Tabla 2.4.- Criterio de evaluación de potencial de media celda..... | 60 |
| Tabla 2.5.- Propiedades del revestimiento para el concreto..... | 62 |
| Tabla 2.6.- Revestimiento de concreto mínimo requerido en la estructura..... | 64 |

Capítulo 3

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3.1.- Residuos de construcción y demolición..... | 66 |
| Figura 3.2.- Clasificación y almacenamiento de residuos de concreto..... | 67 |
| Figura 3.3.- Trituración primaria de residuos de construcción..... | 68 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.4.- Trituración secundaria..... | 69 |
| Figura 3.5.- Granulometría del agregado grueso T.N. 13 mm..... | 70 |
| Figura 3.6.- Dimensión mayor del agregado reciclado..... | 75 |
| Figura 3.7.- Pasta adherida en el agregado reciclado..... | 77 |
| Figura 3.8.- Proceso de determinación de mortero adherido..... | 78 |
| Figura 3.9.- Tratamiento del agregado reciclado..... | 82 |
| Figura 3.10.- Absorción del sellador en el agregado reciclado..... | 83 |
| Figura 3.11.- Resistencia a tensión del concreto..... | 86 |
| Figura 3.12.- Fabricación de vigas y cilindros de concreto..... | 87 |
| Figura 3.13.- Revenimiento del concreto..... | 88 |
| Figura 3.14.- Peso volumétrico del concreto..... | 88 |
| Figura 3.15.- Contenido de aire del concreto..... | 89 |
| Figura 3.16.- Prueba de compresión..... | 91 |
| Figura 3.17.- Prueba de módulo de elasticidad..... | 91 |
| Figura 3.18.- Prueba de tensión diametral..... | 92 |
| Figura 3.19.- Probeta para monitoreo de la carbonatación..... | 94 |
| Figura 3.20.- Probeta para medición de potencial de corrosión..... | 94 |
| Figura 3.21.- Cámara de carbonatación acelerada..... | 95 |
| Figura 3.22.- Profundidad de carbonatación del CAR..... | 96 |
| Figura 3.23.- Profundidad de carbonatación del CAR..... | 97 |
| Figura 3.24.- Profundidad de carbonatación del CAN..... | 98 |
| Figura 3.25.- Comportamiento de la carbonatación en el concreto..... | 99 |
| Figura 3.26.- Prueba de potencial de corrosión..... | 100 |
| Figura 3.27.- Potencial de corrosión..... | 101 |
| Figura 3.28.- Prueba de resistividad eléctrica del concreto..... | 102 |
| Figura 3.29.- Resultados de la resistividad eléctrica del concreto..... | 102 |
| Figura 3.30.- Valores de resistividad y potencial antes de la carbonatación..... | 103 |
| Figura 3.31.- Valores de resistividad y potencial después de la Carbonatación..... | 104 |
| Figura 3.32.- Concreto con agregado natural antes de la carbonatación..... | 104 |
| Figura 3.33.- Concreto con agregado reciclado antes de la carbonatación..... | 105 |
| Figura 3.34.- Concreto con agregado reciclado tratado antes de la carbonatación..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.35.- Concreto con agregado natural carbonatado..... | 106 |
| Figura 3.36.- Detalle del concreto con agregado natural carbonatado..... | 106 |
| Figura 3.37.- Concreto con agregado reciclado carbonatado..... | 107 |
| Figura 3.38.- Detalle concreto con agregado reciclado carbonatado..... | 107 |
| Figura 3.39.- Concreto con agregado reciclado tratado..... | 108 |
| Figura 3.40.- Detalle concreto con agregado reciclado tratado carbonatado..... | 108 |
| Figura 3.41.- Fases del concreto entre agregado reciclado y pasta nueva..... | 109 |
| Figura 3.42.- Prueba de permeabilidad ion cloruro..... | 110 |
| Figura 3.43.- Gráfica de permeabilidad Ion cloruro..... | 110 |

Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.1.- Cálculos de granulometría..... | 71 |
| Tabla 3.2.- Peso volumétrico compacto..... | 72 |
| Tabla 3.3.- Peso volumétrico suelto..... | 72 |
| Tabla 3.4.- Coeficiente de forma de los agregados reciclados de acuerdo a su tamaño nominal..... | 76 |
| Tabla 3.5.- Resultados prueba de mortero adherido..... | 78 |
| Tabla 3.6.- Propiedades de los agregados..... | 79 |
| Tabla 3.7.- Clasificación de los diferentes tipos de selladores..... | 81 |
| Tabla 3.8.-Absorción y densidad de agregados reciclados saturados con diferentes selladores..... | 83 |
| Tabla 3.9.- Dosificación del concreto..... | 84 |
| Tabla 3.10.- Características de mezclas de concreto elaboradas con agregados tratados con diferentes selladores..... | 84 |
| Tabla 3.11.- Resultados de pruebas a tensión diametral del concreto..... | 85 |
| Tabla 3.12.- Resumen de pruebas al concreto en estado fresco..... | 90 |
| Tabla 3.13.- Resumen de pruebas al concreto en estado endurecido..... | 92 |
| Tabla 3.14.- Costo del concreto por metro cúbico..... | 111 |

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aborda en el capítulo uno las características en general de los agregados reciclados, su tipo de producción, las propiedades que tiene este tipo de agregado, la normatividad que rige actualmente en nuestro país sobre estos materiales y las técnicas de tratamiento del agregado reciclado que se han aplicado para mejorar sus propiedades.

En el capítulo dos se abordan los temas de los factores de deterioro en el concreto considerándose la durabilidad del concreto como un factor importante para el buen funcionamiento del concreto ante los agentes que atacan a la estructura. Se menciona el ataque por diferentes agentes como son: cloruros, sulfatos, carbonatación y cómo estos ataques generan principalmente corrosión en el acero de refuerzo.

En el capítulo tres se obtienen las principales características de los agregados reciclados así como también se analiza el comportamiento del agregado grueso reciclado dándole un tratamiento de sellador base polímero para mejorar sus características de absorción. Una vez que se elige el sellador adecuado se comparan las características del concreto fabricado con agregado natural, concreto con agregado reciclado y concreto con agregado reciclado tratado. Se obtienen características en estado fresco y endurecido. Se analiza también el comportamiento de este tipo de concreto ante la carbonatación acelerada para comparar si un tratamiento al agregado grueso reciclado brinda mejores características ante este efecto. Otro análisis importante es el del costo por metro cubico de nuestro concreto aquí se compara si el tratamiento al agregado reciclado genera mayor costo.

En la parte de conclusiones se analizan los resultados obtenidos tanto con el concreto con agregados naturales, así como con el concreto con agregado reciclado sin tratar, de igual manera al concreto con agregados reciclados tratados.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar propiedades físicas y mecánicas asociadas con el comportamiento de durabilidad del concreto elaborado con agregados gruesos reciclados tratados superficialmente con sellador base polímero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y evaluar las propiedades físicas de agregados gruesos reciclados pre-tratados superficialmente.
- Determinar y evaluar la resistencia mecánica de concretos elaborados con agregados grueso reciclado pre-tratados superficialmente.
- Determinar y evaluar la permeabilidad, velocidad de carbonatación, resistividad eléctrica y corrosión de concreto reforzado elaborados con agregados grueso reciclado pre-tratado superficialmente.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

El tratamiento superficial con sellador base polímero en agregados gruesos reciclados puede mejorar propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado elaborado con este tipo de agregados.

CAPÍTULO 1

AGREGADOS RECICLADOS

1.1 ANTECEDENTES

El continuo aumento de la población a lo largo de la historia de la humanidad ha incrementado el desarrollo de actividades productivas lo que se ha traducido en la sobre-explotación de los recursos del planeta, renovables y no renovables. A causa de ello, en las últimas décadas ha habido la necesidad de preservar y proteger el medio ambiente de un inminente desequilibrio ecológico. Por otra parte, la gran demanda de recursos básicos para determinadas industrias ha llevado a la escasez de materias primas. Es en este contexto, es que se han impulsado técnicas y tecnologías de reciclaje.

En la industria de la construcción, la utilización de agregados reciclados para la elaboración de concreto se ha convertido en una práctica habitual en los países industrializados donde existe un fuerte compromiso por el impacto ambiental y por la preservación de los recursos naturales. Los estudios actuales de concreto reciclado con sustitución parcial de agregados naturales por los agregados reciclados de concreto prometen un camino factible para su práctica, un ahorro de energía y mejoras medioambientales.

Una gran cantidad de escombros producto de demoliciones de estructuras son producidos anualmente en los países desarrollados saturando los depósitos de escombros derivados de la actividad constructiva. Esto ha llegado a ser un serio problema social y ambiental para las ciudades, debido a la necesidad de disponer de terrenos para su almacenamiento y al alto costo que implica su manejo. Otro punto importante a considerar es la reducción de extracción de materiales pétreos de los entornos naturales, disminuyendo el impacto ambiental y el rápido agotamiento de las reservas naturales.

Desde el punto de vista ambiental, el reciclaje de escombros es bastante atractivo porque aumenta la vida útil de los rellenos sanitarios y evita la degradación de recursos naturales no renovables. Con el uso de los materiales reciclados, se pueden obtener grandes ahorros en el transporte de residuos de la construcción y en materias primas.

Esto se puede notar especialmente en las áreas urbanas o en los proyectos de construcción donde se pueden reunir la demolición y la nueva obra, también donde es factible reciclar una gran cantidad de escombros en el mismo lugar de trabajo o en las cercanías.

El reciclaje de residuos de la construcción, ha sido de interés en grandes proyectos relativos a la rehabilitación y reconstrucción después de desastres o guerras, pero también debe serlo en lugares como nuestro país, pues son muchas las porciones de paisaje que se han ido perdiendo debido a la extracción de materias primas para la obtención de materiales para la construcción.

En la actualidad, uno de los mayores problemas ambientales que enfrenta la Ciudad de México es la cantidad de residuos sólidos generados por su población. De estos destacan los Residuos de la Construcción y Demolición, los cuales hasta el momento carecen de una gestión adecuada que promueva su reúso o reciclaje y cuya generación asciende a las 7,000 ton/día (NADF-007-RNAT-2013).

La creciente demanda de vivienda, las necesidades de infraestructura y la falta de gestión ambiental, son factores determinantes en la disposición inadecuada de los residuos de construcción y demolición, lo que provoca impactos al ambiente.

En julio de 2006 entró en vigor la norma ambiental NADF-007-RNAT-2004, que tiene como objetivo establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos de la construcción en la Ciudad de México. Dicha norma establece la sustitución de por lo menos un 25% de materiales vírgenes por materiales reciclados en la construcción de diferentes obras, salvo que se compruebe mediante estudios un porcentaje diferente; con lo cual la norma pretende contribuir al aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición, así como también en la reducción de los problemas ambientales derivados de su inadecuada disposición.

1.2 DEFINICIÓN

Agregados reciclados son todos aquellos materiales producto de los residuos de la construcción y demolición que han tenido un proceso de selección, molienda, cribado, almacenamiento y que por sus características pueden ser reincorporados en la construcción (Malhotra, V. M, 1976).

Según la Norma Oficial Mexicana NMX-C-111 ONNCCE, Industria de la Construcción – agregados para concreto especificaciones y métodos de prueba, define a los agregados de la siguiente manera:

AGREGADO FINO: Material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria volcánica, *concreto reciclado* o una combinación de estos u otros, que pasa por la criba 4.75 mm (malla No.4) y se retiene en la criba 0.075 (malla No. 200).

AGREGADO GRUESO: Material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria de alto horno, escoria volcánica, *concreto reciclado* o una combinación de estos u otros, que es retenido por la criba 4.75 mm (malla No. 4) y que pasa por la criba 90 mm (malla 3 ½”).

Como lo menciona esta norma el agregado puede ser obtenido mediante la trituración de concreto existente y puede ser utilizado en la fabricación de concreto nuevo sustituyendo parcial o totalmente al agregado natural. En este trabajo se utiliza solo agregado grueso reciclado.

En función de la naturaleza de obtención de los agregados reciclados pueden clasificarse en agregados reciclados procedentes de la trituración de concreto, agregados reciclados cerámicos o mixtos cuando procedan de una mezcla de distinta naturaleza. En ocasiones las técnicas de demolición selectiva y procesamiento permiten obtener por separado a los agregados reciclados, mientras que otras veces los agregados producidos en planta son mixtos. En este estudio se utiliza el término agregado reciclado para denominar al agregado que se obtiene únicamente de la trituración de elementos de concretos viejos, producto de las demoliciones.

La necesidad de la utilización de agregados reciclados en la construcción está fundamentada por motivos medioambientales, debido a la generación de grandes volúmenes de cascajo que se producen día con día y debido a su difícil procesamiento y disposición final.

Existen varios estudios que han evaluado las propiedades de los agregados reciclados, obteniéndose una gran dispersión de resultados ya que la calidad de los mismos dependen de numerosos factores, como por ejemplo, el grado de limpieza y homogeneidad que presentan los agregados o las técnicas de procesamiento utilizadas. No obstante lo anterior, en países como Japón disponen de técnicas de reciclado que permiten obtener agregados reciclados con características similares a los agregados naturales, ya que eliminan prácticamente todo el mortero que esta adherido al agregado reciclado.

1.3 PRODUCCIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS

1.3.1 ETAPAS DE PROCESAMIENTO

Para el empleo de agregados procedentes de escombros en la fabricación de concreto nuevo es necesario un procesamiento de los residuos, en la que se pueden diferenciar dos fases:

- 1) *Demolición selectiva en el origen.*- Se deben establecer una serie de precauciones durante el proceso de demolición para evitar que los escombros de concretos se mezclen con tierras, y se reduzcan al máximo el contenido de otros materiales de construcción que resultarían indeseables. De esta forma es conveniente separar los escombros de mampostería y los de concreto durante el proceso de demolición, reduciendo así tratamientos posteriores, aunque son los elementos más pequeños que quedan en los escombros y que no se pueden separar durante la demolición los que crean más problemas en el tratamiento de

los agregados reciclados. Además si los escombros van a ser reciclados, conviene utilizar métodos de demolición que reduzcan en situ su tamaño de tal forma que puedan ser tratados por el sistema de trituración de la planta de reciclaje, menores de 1200 mm en plantas fijas y de 400 a 700 mm en plantas móviles.

- 2) *Plantas de agregados reciclados.*- Las plantas de producción de agregados reciclados son similares a las plantas de producción de agregado natural, y solo requieren además electroimanes para la separación del acero y otros sistemas para la eliminación de impurezas.

1.3.2 PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS

Las plantas de producción de agregados reciclados incluyen trituradoras, cribas, bandas transportadoras y equipos para la eliminación de contaminantes.

La planta de tratamiento debe asegurar una mínima distancia de transporte, es decir, situarse lo más cerca posible del centro de la ciudad donde se originan la mayoría de los residuos de la construcción y donde se da una amplia demanda de reciclaje de materias primas.

Los sistemas de procesamiento utilizados dependerán de la aplicación final que se le vaya a dar al agregado reciclado (material para relleno, concreto, etc.) y de la calidad de impurezas que contenga.

Las plantas de tratamiento de agregados reciclados se pueden clasificar en (European Demolition Association, 1992):

1. Plantas de primera generación: carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero y otros elementos metálicos.

2. Plantas de segunda generación. Añade al tipo anterior sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos a la trituración, por vía seca o húmeda.
3. Plantas de tercera generación: dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios, considerados como contaminantes de los agregados reciclados.

Además se puede establecer otra clasificación de las plantas según su capacidad de desplazamiento en: móviles, semimóviles y fijas.

1.3.3 SISTEMAS DE TRITURACIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS

Las trituradoras utilizadas pueden ser: de mandíbulas, de impactos o de conos (Ibid. Pág. 21). Algunas de estas se describen a continuación:

TRITURADORA DE MANDÍBULAS (Figura 1.1): Producen una buena distribución de tamaño para la producción de concreto, ya que produce una cantidad de finos reducida (menor del 10%); aunque la forma de las partículas es más angulosa. La compresión se realiza entre una placa fija y otra móvil. La reducción de tamaño de partícula se ejecuta a medida que ésta recorre la longitud entre las placas. Esta trituradora se utiliza como primaria, obteniéndose tamaños de partículas entre 10 y 20 centímetros (4" - 8"). El producto obtenido suele usarse como relleno de no ser tratado por otro tipo de trituradora posteriormente.

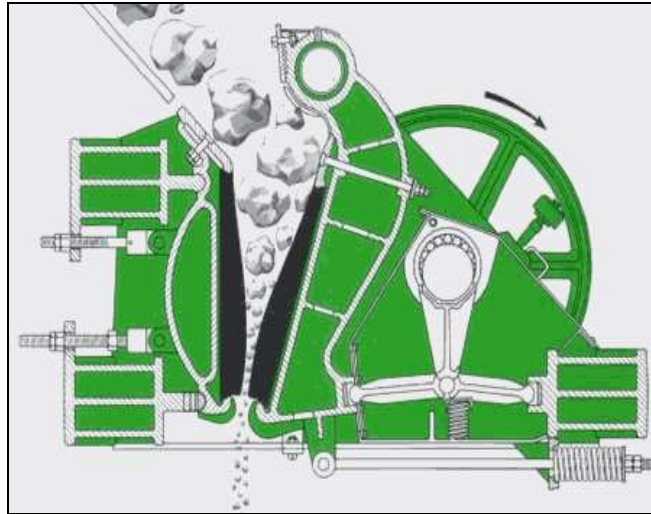


Figura 1.1.-Trituradora de mandíbulas.

TRITURADORAS DE IMPACTO (Figura 1.2): Son mejores para la trituración de agregados para carreteras. El principal inconveniente que presentan los agregados es que sufren un gran desgaste con los impactos. Producen gran cantidad de finos (hasta un 40%). Este tipo de máquina tiene un rotor con placas que gira y lanza las partículas sobre una o varias placas produciendo su rotura. Pueden usarse como primarias, secundarias o eventualmente terciarias, generando una partícula de forma más regular y de tamaño menor a 5 centímetros (2").

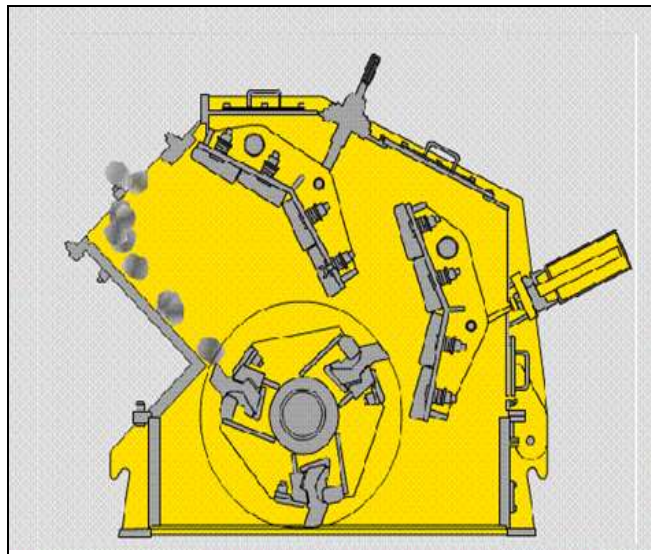


Figura 1.2.-Trituradora de impacto.

TRITURADORA DE CONOS (Figura 1.3): La trituración se produce mediante dos placas con forma de cono. El tamaño de la partícula al ingresar debe ser menor a 15 centímetros (6”), por este motivo suele trabajar como secundaria después de la de mandíbulas o la de impacto. Las partículas procesadas tienen un tamaño menor a 38 milímetros (1.5”). Produce una cantidad media de finos (menor del 20%).

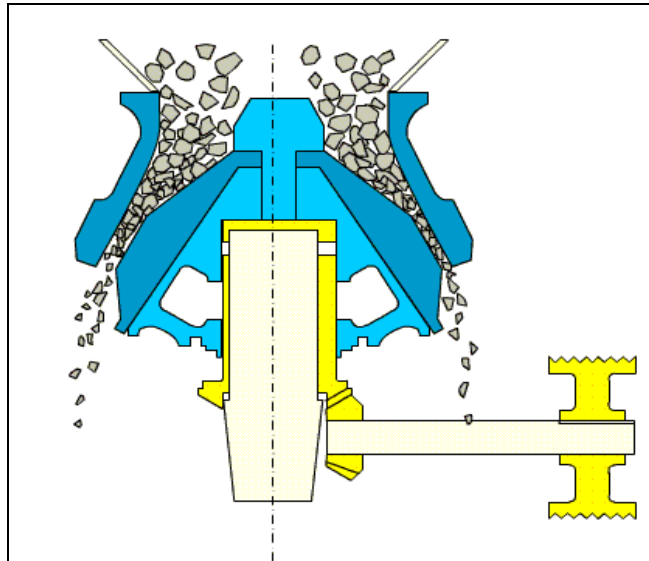


Figura 1.3.- Trituradora de conos.

Pueden existir varios procesos de trituración en los que se emplean diferentes tipos de maquinaria; la calidad del agregado reciclado depende, además de su procesamiento y clasificación, del tipo de trituración al cual sea sometido.

1.3.4 ALMACENAMIENTO

La Unión Internacional de Laboratorios y Ensayos de Materiales de Construcción, Sistemas y Estructura (RILEM 1992), establece para la utilización de agregado reciclado y concreto reciclado, las siguientes recomendaciones sobre el almacenamiento de los agregados reciclados que deben ser tomadas en cuenta:

- Es aconsejable que los agregados reciclados procedentes de concreto de distintas calidades se almacenen separadamente. Esto es difícil de conseguir, ya que el control de estos materiales se suele hacer a la entrada de la planta de reciclaje solo es visual.
- Almacenar en lugares distintos el agregado grueso reciclado y el agregado fino.
- Separa los agregados reciclados de los agregados naturales.
- La absorción de agua del agregado grueso reciclado es alta, por lo que es aconsejable utilizar los agregados en condición de saturación. Las tolvas de los agregados pueden estar provistas de aspersores de agua para mantener esta condición de humedad.
- Conviene no almacenar los agregados finos durante un periodo largo de tiempo.

Estas recomendaciones de almacenamiento son importante seguirlas desde la recepción de residuos sólidos en las plantas de agregados reciclados ya que permite tener un mayor control al momento de ser procesados.

1.4 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

1.4.1 GRANULOMETRÍA

La granulometría del agregado reciclado depende fundamentalmente del tipo de trituración realizada en el procesamiento.

En la figura 1.4 se presentan los límites granulométricos del agregado grueso según la norma ASTM C-33, comparado contra el rango de granulometrías frecuentes para el agregado reciclado (RILEM 1992).

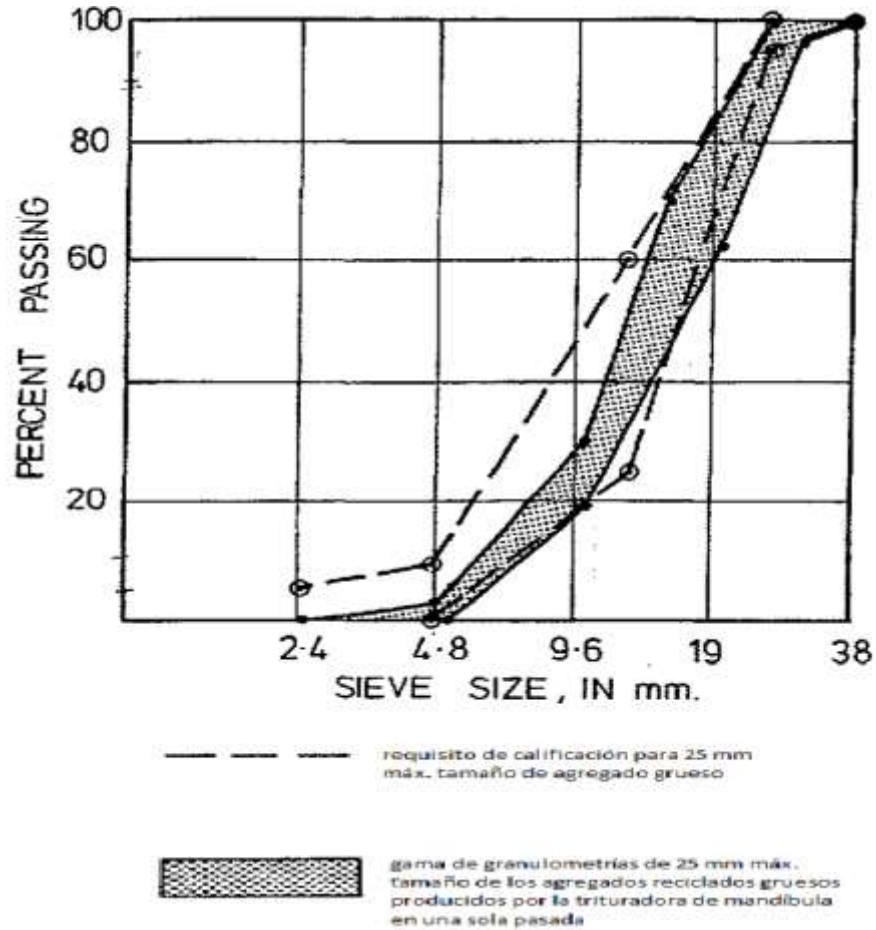


Figura 1.4.- Granulometría agregado natural vs agregado reciclado (RILEM 1992).

El comportamiento granulométrico del agregado reciclado presenta pequeñas variaciones, dependiendo principalmente del sistema de trituración empleado y la calidad del concreto original.

1.4.2 DENSIDAD ESPECÍFICA

La densidad del agregado reciclado es inferior a la del agregado natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos y al contenido de impurezas de menor densidad, como ladrillo o asfalto.

Los valores de densidad obtenidos en diferentes estudios revela que el rango de esta se ubica entre 2.07-2.36 kg/dm³ (Hansen 1986). Algunos de los factores que pueden influir en la densidad del agregado reciclado son :las técnicas de procesamiento utilizadas en la obtención, el grado de contaminación, y en menor medida otros parámetros como la calidad del concreto de origen.

1.4.3 ABSORCIÓN

La absorción es una de las propiedades físicas del agregado reciclado que presenta mayor diferencia con respecto con respecto al natural.

La absorción es en todos los casos superior a la de los agregados naturales, debido a la elevada absorción del mortero que queda adherido a él; mientras que la absorción del agregado natural suele oscilar entre 0-5%, la absorción del mortero alcanza valores mayores. El intervalo encontrado en diversos estudios es, en el agregado grueso de 0.8-13%, con un valor medio de 5.6% (Sánchez Marta, 2004).

1.4.4 FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL

La forma y la textura superficial de los agregados reciclados dependen de las acciones a que hayan estado sometidos, del tipo de trituradora, de su relación de reducción, siendo estos factores preponderantes para obtener la forma final de los agregados. Como es sabido esta característica de los agregados tiene influencia en algunas propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, como la trabajabilidad y las resistencias mecánicas (Mehta y Monteiro, 1994).

1.4.5 IMPUREZAS

Uno de los mayores problemas que plantea este tipo de agregados es que frecuentemente pueden incorporar impurezas y contaminantes que influyen negativamente en las propiedades del concreto. Estos contaminantes pueden ser muy variados, desde plástico, madera, yeso, ladrillo, materia orgánica, asfalto, etc.

Uno de los principales efectos de estas impurezas en el concreto es el descenso de resistencia mecánica que producen. Además de reducir las resistencias, dependiendo del tipo de impureza, se pueden presentar otros problemas perjudiciales (Ibídem pág. 93):

- El vidrio favorece la reacción álcali-agregado; la separación resulta difícil, ya que su densidad es similar a la del agregado.
- El yeso puede originar ataque por sulfatos.
- La madera y papel son inestables a los ciclos humedad-secado y congelación-deshielo produciendo desconchados superficiales.
- Las pinturas incluyen aire en el concreto.
- Los suelos arcillosos aumentan la demanda de agua y originan mayor contracción en el concreto.
- La presencia de metales puede producir manchas superficiales debidas a la oxidación, especialmente cuando el contenido de cloruros es elevado. Las piezas de zinc o aluminio pueden causar problemas debidos al desprendimiento de hidrógeno en el concreto fresco y fracturas en el hormigón endurecido producidas por expansiones.

1.4.6 CONTENIDO DE MORTERO ADHERIDO

El agregado reciclado posee cierta cantidad de pasta adherida que lo diferencia de los agregados naturales. Esta pasta es lo que causa la diferencia entre sus propiedades, es decir por esta razón el agregado reciclado tiene mayor, absorción y menor densidad, estas propiedades afectan negativamente al utilizarlo en una nueva mezcla de concreto. De acuerdo con la bibliografía consultada son varios los estudios que se han realizado para evaluar el contenido de pasta adherida al agregado reciclado, obteniéndose en cada uno distintos valores ya que la prueba aún no está normalizada. En algunos ensayos se determina el contenido de pasta adherida, mientras que en otros se determina el contenido de mortero adherido, es decir la pasta más el agregado fino, dando por lo tanto este último valores mucho mayores. Algunos estudios muestran que el contenido de mortero en los agregados reciclados va del 25-60% (Sánchez Marta, 2004).

1.5 NORMATIVIDAD

Las leyes del país emanan de manera directa o indirecta de los artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. La preservación del medio ambiente se rige por leyes federales y estatales así como sus respectivos reglamentos y normas aplicables.

En cuanto al medio ambiente, éstas promueven el ordenamiento ecológico nacional, estatal y municipal, el establecimiento, conservación, restauración y el mejoramiento de áreas naturales y de amortiguamiento urbano, así como la preservación de la calidad del aire, agua, suelo su control y restauración.

1.5.1 LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA).

Esta ley reglamenta la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente; tiene por objeto establecer los lineamientos y las provisiones que deberán sujetarse el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, el mantenimiento de los bienes y servicios ambientales y la conservación de los ecosistemas y biodiversidad en México.

Establece en la sección cinco sobre la evaluación de impacto ambiental, el procedimiento a través del cual la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Es decir, exigirá que cada obra nueva presente, previo a su inicio un estudio de impacto ambiental con las disposiciones que se sujetará su construcción y posterior operación. Estos estudios, según el grado de afectación esperado para el entorno tendrán tres niveles de profundización:

1. Contarán con un informe preventivo, cuando la actividad cumple los límites fijados en el ordenamiento ecológico municipal.
2. Estudio de impacto ambiental, si afecta de manera limitada los recursos naturales y requiere de medidas especiales para cumplir con el ordenamiento ecológico.
3. Estudios de riesgo, si se trata de obras o actividades que manejen materiales y/o residuos peligrosos.

Esta ley también establece en su artículo 134 Para la prevención y control de la contaminación del suelo, en el inciso tres:

Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.

Como esta ley lo indica es obligatorio hacer un buen uso de los residuos; en lo que compete a la Industria de la Construcción, a los generadores corresponde sacar el mayor aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición que generalmente se producen en la obra, evitando así sanciones y que estos residuos terminen en sitios que no fueron destinados para este fin como son barrancas, ríos, vía pública, etc.

1.5.2 NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-007-RNAT-2013.

Esta norma establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición, en la Ciudad de México.

La composición de los residuos generados por la industria de la construcción en la Ciudad de México varía mucho dependiendo del tipo de actividad que se realice ya sea demolición o construcción, además de los métodos utilizados para su obtención. Los residuos generados durante estas actividades consisten generalmente en desperdicio de materiales utilizados para construir tales como madera, tabla roca, residuos de albañilería, metales, vidrio, plásticos, asfalto, concretos, ladrillos, bloques, cerámicos, entre otros.

Actualmente dentro de los residuos generados por la industria de la construcción, los metales y la madera son los materiales que mayor potencial de reúso tienen, sin embargo, los residuos de las excavaciones, el concreto, las tejas, los ladrillos, tabiques y cerámicos, son otros componentes que también han demostrado tener un potencial importante de reúso o reciclaje, que permiten reducir de manera importante su disposición en el suelo de conservación.

La Ley de Residuos Sólidos de la Ciudad de México clasifica a los residuos de la construcción como uno de los residuos que deben ser manejados de manera especial, tanto por la cantidad de material involucrado y su impacto en el ambiente debido a una disposición inadecuada, como por su potencial de reúso y reciclaje.

Los residuos generados por la industria de la construcción tienen potencial de reúso, o reciclaje por lo que esta norma pretende reducir su disposición en sitios autorizados y evitar la disposición inadecuada en suelo urbano y de conservación.

Según la norma en la Ciudad de México en lo que corresponde a la generación de residuos de la construcción y demolición, basada en estimaciones proporcionadas por las delegaciones políticas de la Ciudad de México, la generación de estos residuos alcanza valores de 7,000 ton/día. Por esta razón y a falta de depósitos controlados de residuos sólidos en la ciudad es muy importante su reutilización y un manejo adecuado.

Para esta norma un manejo integral de los residuos es: las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.

Es en este sentido es que en este trabajo se le busca dar un tratamiento a los agregados reciclados para que tengan una utilización más eficiente en la fabricación de concreto nuevo, cuidando sus características no solo de resistencia mecánica sino también de durabilidad para así garantizar un mejor comportamiento en condiciones de servicio.

1.5.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN.

Los residuos de la construcción están constituidos generalmente por un conjunto de fragmentos o restos de materiales producto de demolición, desmantelamiento, excavación, tales como tabiques, piedras, tierra, concreto, morteros, madera, alambre, resina, plásticos, yeso, cal, cerámica, tejados, pisos y varillas, entre otros, cuya composición puede variar ampliamente dependiendo del tipo de proyecto, la obra y etapa de construcción. En la tabla 1.1 se encuentran clasificados los residuos mencionados anteriormente. Para incrementar el aprovechamiento de estos materiales, los residuos de la construcción se deben clasificar en las fracciones indicadas en este cuadro.

Es claro que la gestión correcta de estos residuos constituye uno de los grandes retos de las sociedades modernas ya que los problemas ambientales que generan son muchos.

Tabla 1.1.- Clasificación de los residuos de construcción, demolición y su posible reúso. (NADF-007-RNAT-2013).

| TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN | POSIBLE REÚSO * |
|---|---|
| A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS | |
| <p style="text-align: center;">Elementos prefabricados Elementos estructurales y no estructurales Sobrantes de concreto en obra y premezclado</p> | <p>Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos.</p> <p>Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones.</p> <p>Elaboración de productos prefabricados (Blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena).</p> <p>Bases para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas.</p> <p>Construcción de Andadores y trotapistas.</p> <p>Sub-bases en caminos y estacionamientos.</p> <p>Construcción de terraplenes.</p> <p>Construcción de pedraplenes,</p> <p>Material para relleno o para la elaboración de suelo – cemento.</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas.</p> <p>Material para la conformación de terrenos.</p> <p>Rellenos en cimentaciones.</p> <p>Mobiliario urbano.</p> <p>Construcción de muros divisorios.</p> |
| B. MEZCLADOS | |
| <p>Concretos hidráulicos</p> <p>Morteros</p> <p>Blocks</p> <p>Tabicones</p> <p>Adoquines</p> <p>Tubos de albañal</p> <p>Cerámicos</p> <p>Mamposterías</p> <p>Prefabricados de arcilla recocida (Tabiques, ladrillos, etc.),</p> <p>Piedra braza</p> <p>Agregados pétreos</p> | <p>Sub-bases en caminos y estacionamientos.</p> <p>Construcción de terraplenes.</p> <p>Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios.</p> <p>Construcción de andadores y trotapistas.</p> <p>Bases para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas.</p> <p>Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas.</p> <p>Construcción de pedraplenes.</p> <p>Material para la conformación de terrenos**</p> <p>Relleno en jardineras</p> <p>Rellenos en cimentaciones.</p> |
| C. PROVENIENTES DE FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO* | |
| <p>Carpeta asfáltica</p> <p>Bases negras</p> | <p>Bases asfálticas o negras.</p> <p>Concretos asfálticos elaborados en caliente.</p> <p>Concretos asfálticos templados o tibios.</p> <p>Concretos asfálticos elaborados en frío.</p> |
| D. RESIDUOS DE EXCAVACIÓN | |
| <p>Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos</p> | <p>Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje</p> |
| E. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS | |
| <p>Papel y Cartón, Madera, Metales, Plástico, Residuos de podas, tala y jardinería, Vidrio.</p> | <p>Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.</p> |
| F. OTROS | |
| <p>Residuos de Impermeabilizantes, tablaroca, instalaciones eléctricas, asbesto, tubería, herrería, lodos bentoníticos.</p> | <p>Deberá privilegiarse su reciclaje.</p> |

* Para ser incluidos en el proyecto ejecutivo de la obra.

** En ningún caso se utilizará en suelos de conservación, áreas naturales protegidas, áreas de valor ambiental, de y zonas de recarga de mantos acuíferos.

Según el inciso 8.1 de esta ley los generadores de residuos de la construcción y demolición y los prestadores de servicios deben cumplir las disposiciones indicadas en las siguientes fases del manejo, según sea el caso (Tabla 1.1):

- a) Separación en la fuente generadora de residuos,
- b) Almacenamiento temporal,
- c) Recolección y transporte,
- d) Tratamiento,
- e) Aprovechamiento y
- f) Disposición final

El aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición se considera de acuerdo con lo siguiente:

1. Los generadores de residuos de la construcción y demolición deberán reciclar o reusar in situ sus residuos o enviarlos a un centro autorizado, de acuerdo con lo señalado en la tabla 1.1, con excepción de los incisos E y F. Lo anterior, siempre que no estén contaminados.
2. Para el aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición de la tabla 1.1, los generadores de residuos, deberán presentar el cálculo de los indicadores de manejo que son los siguientes: residuos reciclados en obra, residuos que se reciclará fuera de obra, material reusable, residuos para disposición final.

De acuerdo con el inciso 8.5.3 de esta ley es obligatoria la incorporación en el proyecto ejecutivo de la obra material reciclado y/o reusable para las obras públicas y privadas indicados en la tabla 1.2, siempre que exista en un radio de 20 km la disponibilidad del recurso.

Tabla 1.2.- Reutilización de residuos si se encuentran en un radio de 20 km. (NADF-007-RNAT-2013).

| AGREGADOS PÉTREOS CON CEMENTANTE | AGREGADOS PÉTREOS SIN CEMENTANTE |
|---|--|
| 1. Construcción de banquetas, guarniciones y bordillos. | 1. Sub-rasantes, sub-bases y bases hidráulicas en estacionamientos y en la red secundaria de vialidades. 2. Construcción de ciclovías, ciclistas, andadores y trotapistas. 3. Construcción de terraplenes y pedraplenes. |
| 2. Plantillas y firmes de concreto. | 4. Restauración de espacios degradados. |
| 3. Elaboración de suelo cemento en rellenos especiales. | 5. Bases para banquetas. 6. Lechos, acostillamientos y relleno de tuberías. 7. Conformación de parques y jardines. 8. Zanjas drenantes. 9. Traslados de obras diversas. |

Esta ley hace mención que los materiales reciclados deben cumplir con las especificaciones técnicas del proyecto ejecutivo de la obra, con lo indicado en el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México, sus normas técnicas complementarias y las normas aplicables.

1.6 RECOMENDACIONES PARA DISEÑO DE MEZCLAS CON AGREGADOS RECICLADOS ACI 555R-01.

El American Concrete Institute (ACI) en su capítulo 555R-01, que se refiere a la demolición y reutilización del concreto reciclado, también presenta algunas recomendaciones para diseño de mezclas con este tipo de agregado que a diferencia del agregado natural tiene diferentes características.

Se puede suponer que la relación a/c para una resistencia a la compresión requerida será la misma para un concreto con agregados reciclados como para un concreto convencional, cuando el agregado grueso reciclado se utiliza en combinación con arena

natural. Si las mezclas de prueba muestran que la resistencia a la compresión es menor de lo previsto, se debe hacer un ajuste a una menor relación a/c.

Las características de los agregados como son: peso específico, peso volumétrico, absorción, humedad, granulometría, etc. deben determinarse antes de la realización de la mezcla.

La relación entre grava/arena para concreto fabricado con agregados reciclados es el mismo que cuando se utilizan materiales vírgenes; las mezclas de prueba son absolutamente obligatorias.

Para la fabricación de concreto es importante mencionar que se pueden seguir estas recomendaciones:

- 1) Un requisito importante de todo agregado reciclado de concreto es el pre-humedecimiento de los agregados para compensar la alta absorción de agua de los agregados reciclados.
- 2) Los materiales menores que la malla No. 8 (aproximadamente 2 mm) deben ser eliminados de los agregados antes de la producción.

1.7 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL AGREGADO RECICLADO

Actualmente se han implementado diferentes tipos de tratamientos para darle mejores características al agregado grueso reciclado. La mayoría de estos se caracterizan por eliminar el mortero adherido o pasta al agregado y otros por hacerlo menos absorbente al agua utilizando diferentes materiales para este fin. A continuación se mencionan algunos de estos métodos más relevantes que se encontraron en la investigación bibliográfica.

1.7.1 TRATAMIENTO TERMO-MECÁNICO

Este tipo de tratamiento (Yuwu Sui, Anette Mueller, RILEM 2012), consiste en dar al agregado grueso un tratamiento termo-mecánico, que se basa en calentar este agregado por un cierto tiempo y después triturarlo eliminando así el mortero que tiene la partícula, ya que en comparación con los agregados vírgenes hacer concreto con agregados reciclados, la pasta le confiere propiedades diferentes. Por el método de tratamiento termo-mecánico, el cemento endurecido de la pasta se puede quitar. El objetivo es mejorar la calidad de los agregados. Los resultados del estudio demostraron que con una temperatura de tratamiento de 250-300 ° C se pueden desarrollar propiedades similares a los agregados naturales. Por este método los agregados gruesos se pueden producir con una densidad aparente cercana al de los agregados naturales. Según este estudio, también alternativamente, el tratamiento térmico se puede realizar a temperaturas de 500° C, seguido de un corto tratamiento mecánico. La decisión para la utilización de este método depende si se cuenta con el equipo necesario para alcanzar estas temperaturas e inmediatamente después triturar el material.

1.7.2 TRATAMIENTO CON ÁCIDO

Este proceso de tratamiento implica sumergir el agregado grueso reciclado a concentraciones de ácido clorhídrico (HCl) para eliminar el mortero o pasta que tienen adherido. El objetivo de esta técnica fue desarrollar un tratamiento potencial usando ácido de baja concentración como una alternativa para producir agregados reciclados de alta calidad en aplicaciones de concreto estructural. Según este estudio, los resultados muestran que el uso de diferentes cantidades de ácido para eliminar o reducir al mínimo las partículas de mortero sueltas adjuntas en las superficies de los agregados reciclados puede mejorar significativamente sus propiedades físicas y mecánicas. Además, la reducción de mortero suelto que cubre las partículas del agregado reciclado agrega una posible mejora a la superficie de contacto entre la nueva

pasta de cemento y el agregado reciclado. El uso de un ácido de baja concentración menor al 10% parece seguro y no perjudicial sobre las partículas de agregado reciclado. Los resultados demuestran que el agregado reciclado tratado produce concreto con una mayor resistencia a la compresión en comparación con los agregados reciclados no tratados (Sallehan Ismail, Mahyuddin Ramli, 2013).

Sin embargo, la eficacia de estos métodos de tratamiento sigue dependiendo de varios factores que requieren mayor consideración, ya que por un lado resultan efectivos pero al utilizar ácido diluido en agua se vuelve a contaminar ya que estos desechos comúnmente terminan arrojándose al drenaje o depósitos no autorizados.

1.7.3 TRATAMIENTO CON SILICATO DE CALCIO

Este tipo de tratamiento explora la viabilidad de la combinación de dos métodos diferentes de tratamiento de la superficie para mejorar las propiedades del agregado grueso reciclado. Este proceso de tratamiento implica sumergir agregado reciclado grueso a concentraciones bajas de ácido clorhídrico para eliminar las partículas sueltas de la superficie y luego impregnar el mismo agregado con una solución de silicato de calcio. Los resultados revelaron que el método combinado mejoró significativamente las propiedades físicas del agregado grueso reciclado. Ya que el silicato de calcio proporciona una capa de revestimiento sobre el agregado reciclado y funcionó como un relleno para los poros en la superficie del agregado grueso reciclado.

El tratamiento del agregado reciclado dio buenos resultados a compresión. La mejora de la resistencia a la compresión se atribuye a: el uso de ácido a baja concentración que elimina efectivamente el mortero viejo adherido sobre la superficie del agregado reciclado, este factor es la causa principal de las propiedades inferiores del agregado reciclado. Además, la modificación de la superficie que fue seguido por la impregnación del agregado reciclado con silicato de calcio, que actúa como un relleno microscópico para rellenar los poros y grietas, mejoró significativamente las propiedades físicas del agregado reciclado. Esta notable mejora se indicó por el aumento de la densidad y la

reducción de la absorción de agua del agregado reciclado (Sallehan Ismail, Mahyuddin Ramli, 2013).

1.7.4 TRATAMIENTO DEL AGREGADO RECICLADO POR LA EXPOSICIÓN A CARBONATO DE CALCIO

En este estudio (Anna M. Grabiec, et al. 2012) se presentan la modificación de la superficie del agregado reciclado utilizando el método de exposición que emplea bacterias (*Bacillus pasteurii*) *Sporosarcina pasteurii*. El concepto se basa en la capacidad de las bacterias para precipitar carbonato de calcio en la superficie exterior de la pared celular (Biomodificación).

En este caso fue posible obtener una reducción en la absorción de agua de los agregados, este efecto fue más visible en el caso de las fracciones más finas y para los agregados procedentes de concreto con menor calidad, disminuyendo un 50% la absorción al agua después del tratamiento. Esto ofrece la oportunidad de mejorar la calidad y aumentar el uso de agregados reciclados de baja calidad.

Sin embargo, hay que subrayar que el tiempo entre el momento de la trituración del concreto y de probar el agregado de este concreto es factor que podría haber contribuido a la consecución de tales resultados. Esta vez fue de 2 años. Este tratamiento representa un costo barato en comparación con otros pero debe estar estrictamente controlado ya que el empleo de bacterias requiere de estudios de laboratorio a nivel celular para observar su comportamiento, así como determinar el comportamiento de estos agregados aplicando este tipo de tratamiento y su utilización nuevamente en el concreto.

1.7.5 TRATAMIENTO CON MICROONDAS

Un método más de tratamiento para mejorar las características del agregado reciclado encontrado en la bibliografía es el que utiliza microondas para separar el agregado de la pasta adherida en su superficie (Nicholas Lippiatt, Florent Bourgeois, et.al. 2012). Este trabajo y los resultados reportados se refieren a la liberación selectiva de componentes de concreto, es decir mortero y agregado para el reciclaje mediante la combinación de calentamiento por microondas y una trituración secundaria. El tamaño nominal del agregado reciclado utilizado en este estudio fue de 10 mm y son tratados de forma individual en un microondas de (2,45 GHz, 2 kW). Con este tratamiento se obtiene una limpieza de la pasta de cemento adherida a la superficie del agregado reciclado de alrededor del 60% con un tiempo de exposición de 50 segundos.

Los resultados mostraron que con el método de tratamiento asistido por microondas, las partículas de agregado reciclado se calientan a una temperatura mucho más baja y por una duración más corta. Además, los resultados de este estudio mostraron que el tratamiento asistido por microondas puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas del concreto producido con agregado reciclado, como es la resistencia a compresión, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad. La incorporación de hasta 40% de los agregados reciclados tratados con este método no parece tener un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas del concreto.

1.7.6 OTROS TRATAMIENTOS

Otros tratamientos que también se encontraron (Valerie Spaeth, et al., 2013) fueron realizados por investigadores franceses que utilizaron polímero a base de silicato de sodio soluble en agua. Después de aplicar este tratamiento a base de polímero al agregado reciclado se obtuvieron especialmente baja absorción de agua y una mejor resistencia al desgaste de agregado tratado por este método. Este tipo de tratamiento se enfatiza en la formación de película polimérica en la red de poros. Esta película permite una significativa reducción de la capacidad de absorción de agua. La película

formada es eficiente y resistente en el entorno alcalino. Esta investigación se quedó solamente en la caracterización del agregado reciclado faltaba su aplicación en el concreto y evaluar su comportamiento en estado fresco y endurecido.

Una investigación más realizada (Ya-Guang Zhu, et al., 2013) se enfocó en el uso de un polímero repelente al agua base silano para tratar los agregados. El silano o hidruro de silicio, es un compuesto químico cuya fórmula es SiH_4 . Es análogo al metano, pero derivado del silicio. Usando este tratamiento se encontró que el silano puede mejorar la durabilidad del concreto con agregados reciclados, pero puede conducir a reducciones en la resistencia a la compresión; el agregado reciclado tratado superficialmente con silano es más eficaz en la reducción de la absorción de agua, de la carbonatación y de la penetración de iones cloro. Es decir se mejoran las características de durabilidad y no tiene un aumento significativo en cuanto a la resistencia a compresión.

Un tratamiento más encontrado (Shi-Cong Kou, et al., 2010) fue la de impregnar los agregados con alcohol de polivinilo. Soluciones de alcohol de polivinilo se pueden utilizar para mejorar las propiedades del agregado grueso reciclado. En este estudio, una solución al 10% se encontró que era óptima para tener mejores características en el agregado y en el concreto. Las resistencias a compresión fueron similares a las de concreto con agregado natural a una edad de 90 días; los especímenes que se probaron a compresión a 28 días con este tratamiento fueron relativamente menores al de referencia hecho con agregado natural. Esto se debe a que conforme avanza el tiempo el concreto va adquiriendo mayor resistencia.

Un último artículo recopilado (Zhan Bao-jian, et al., 2014) presenta un estudio experimental de las propiedades del concreto elaborado con agregados reciclados sometidos a una impregnación de dióxido de carbono (CO_2). A los agregados reciclados se les colocó en una cámara de carbonatación con una concentración de dióxido de carbono del 100% para que pudieran ser saturados durante 48 y 72 horas, posteriormente se obtuvieron sus propiedades físicas. Posteriormente se produjo concreto con este agregado y se comparó con concreto elaborado con agregado natural, obteniéndose los siguientes resultados: este tratamiento según los autores reduce la absorción e incrementa la densidad del agregado reciclado, reduce la

contracción por secado y la permeabilidad del concreto. En cuanto a resistencia mecánica, como son compresión y tensión a 28 días, es menor la resistencia del concreto elaborado con agregado reciclado tratado pero a 90 días se mejora e iguala a la del concreto con agregado natural.

Estos tipos de estudios se han desarrollado principalmente en países como Japón, Francia, Alemania, España ya que cuentan con mayor número de plantas de agregados reciclados y buscan mejorar las características de estos materiales para incorporarlos 100% al concreto nuevamente.

CAPÍTULO 2
FACTORES DE DETERIORO DEL
CONCRETO

Al diseñar y construir una estructura de concreto se define implícitamente el compromiso de hacer lo necesario para que, en desempeño de sus funciones normales, preste el servicio requerido durante el tiempo de vida esperado. Esto está relacionado con la durabilidad del concreto, por lo tanto deben preverse las condiciones a las que estará sujeta dicha construcción, incluyendo los factores externos como los internos, para así emplear materiales con propiedades que ayuden a proporcionar la durabilidad requerida.

2.1 DURABILIDAD

La durabilidad se define de acuerdo con la norma oficial mexicana NMX -C - 155 ONNCCE - 2014, como la capacidad del concreto hidráulico para resistir satisfactoriamente durante la vida útil de la estructura las cargas de diseño, la acción ambiental, ataque químico o abrasión y de proteger al acero de refuerzo y demás elementos metálicos embebidos de la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro, con el objeto de que el concreto mantenga su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.

Los factores que de manera más importante intervienen en la durabilidad del concreto estructural son entre otros, la impermeabilidad, la adecuada compactación, la protección del acero de refuerzo, el curado y la existencia de recubrimientos adecuados.

Para que en el concreto se produzca los procesos físicos y químicos, tanto los deseables como los perjudiciales, se necesita agua. El calor proporciona la energía que activa los procesos. Los efectos combinados del agua y el calor, junto con otros elementos ambientales, son importantes y deben ser considerados y monitoreados. Seleccionar materiales apropiados cuya composición sea adecuada y procesarlos correctamente de acuerdo con las condiciones ambientales existentes es fundamental para lograr un concreto durable.

Para obtener elementos y estructuras de concreto durables se deben considerar en las especificaciones del proyecto acciones contra mecanismos específicos de deterioro que pueden presentarse según la clase de exposición en que dichos elementos y estructuras estarán en condiciones de servicio.

Las principales acciones de deterioro que afectan la durabilidad de la estructura de concreto son:

- Físicas y mecánicas, generalmente asociadas a congelamiento deshielo, erosión, fenómenos geológicos, hundimientos diferenciales y cambios de volumen por gradientes térmicos o de humedad.
- Ataque químico por exposición a ácidos, gases, agua y suelos que contienen sustancias químicas agresivas incluyendo sulfatos y microorganismos biológicos.
- Reacción química de agregados con los álcalis del cemento.
- Mecanismos que ocasionan corrosión del acero de refuerzo o de embebidos metálicos en el concreto propiciada principalmente por carbonatación y la presencia de iones de cloro (NMX -C - 155 ONNCCE – 2014).

Un aspecto importante que se menciona también es que el uso de materiales de buena calidad y una correcta dosificación de la mezcla no aseguran que el concreto resultante sea durable. Para lograr concretos durables también es absolutamente fundamental contar con un sistema de control de calidad y mano de obra calificada. (ACI 201.1R).

El concreto para uso estructural debe tener una masa normal en estado fresco comprendida entre 1900 kg/m^3 hasta 2400 kg/m^3 esto es tal como lo indica la norma NMX -C - 155 ONNCCE – 2014.

2.2 CONDICIONES DE EXPOSICIÓN Y DE SERVICIO.

Las causas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio. Las condiciones de exposición se refieren básicamente al medio ambiente y al medio de contacto con el concreto en el lugar, mientras que las de servicio se refieren a las funciones operativas de cada estructura en particular.

2.2.1 MEDIO AMBIENTE

La temperatura y la humedad son características ambientales cuyas magnitudes y variaciones pueden afectar las propiedades y el desempeño del concreto en sus diferentes estados, desde recién mezclado hasta completamente endurecido.

Las altas temperaturas aceleran la hidratación del cemento y la pérdida de agua por evaporación, lo cual afecta su resistencia potencial y le provoca cambios volumétricos capaces de agrietarlo en estado endurecido. Sin embargo, si se toman medidas para prevenir los efectos dañinos del calor ambiental en las primeras edades del concreto, y éste alcanza a desarrollar sus propiedades de diseño, el hecho de que posteriormente la estructura permanezca y preste servicio en un ambiente cálido no constituye por sí misma una condición de exposición desfavorable para su durabilidad.

El medio ambiente frío influye sobre la hidratación del cemento en sentido opuesto al caluroso, pero sus efectos sobre el concreto pueden ser más complejos, dependiendo de la magnitud de las bajas temperaturas. Así el concreto que se elabora a una temperatura moderadamente baja, fragua y endurece con cierta lentitud pero posteriormente puede desarrollar a plenitud sus propiedades potenciales si se le cura a una temperatura adecuada, Sin embargo, si la temperatura de elaboración es demasiado baja y alcanza a congelar el concreto a edad temprana, puede dañarlo en forma irreversible. Asimismo, si el concreto ya endurecido y en servicio se pone a muy bajas temperaturas capaces de congelar el agua en su interior, pueden sufrir también

un importante deterioro al cabo de un cierto número de ciclos de congelación y deshielo, si no se protege apropiadamente contra ello.

2.2.2 CONDICIONES DE SERVICIO

El deterioro del concreto debido a las condiciones de servicio se refiere a los efectos de las acciones, básicamente de carácter físico que recibe la estructura en el curso de su vida operativa. De acuerdo con su origen y predictibilidad estas acciones pueden considerarse como ordinarias o eventuales. Las primeras corresponden a las cargas, solicitaciones y fuerzas de diversa índole que actúan en la estructura como consecuencia de sus funciones normales, en tanto que las segundas son acciones resultantes de eventos extraordinarios cuyas ocurrencias y magnitud son prácticamente impredecibles.

Como ejemplos de las acciones normalmente previstas puede citarse: 1) las cargas de diseño y sus correspondientes esfuerzos y deformaciones en estructuras convencionales, 2) las cargas repetitivas que provocan fatiga en el concreto de pavimentos, losas de puentes, durmientes de ferrocarril, etc., 3) las cargas sostenidas y sus consecuentes deformaciones diferidas en puentes de concreto y otras estructuras similares, 4) las fuerzas abrasivas mecánicas que producen desgaste y erosión del concreto en pisos y pavimentos, 5) las acciones hidráulicas abrasivas, erosivas, y de cavitación que desgastan, erosionan e incluso destruyen el concreto de revestimiento de canales, túneles, vertedores y otras estructuras hidráulicas.

Las acciones que rebasan las condiciones normales, se producen como consecuencia de eventos extraordinarios tales como sismos, incendios, huracanes, inundaciones, etc.; debido a que muchas veces la magnitud de estos eventos sobrepasa las consideraciones de diseño, las estructuras son incapaces de resistir sus efectos y el concreto sufre daños muy considerables.

La evaluación y prevención de todas las acciones inherentes a las condiciones de servicio, ordinarias y eventuales, corresponde esencialmente a la etapa de proyecto y

diseño de las estructuras. Sin embargo, al pasar a la etapa de construcción se debe contribuir a reforzar la efectividad de las medidas preventivas de diseño mediante la acertada definición y utilización del concreto requerido, a fin de lograr estructura sin deficiencias constructivas y capaces de desempeñar eficazmente sus funciones en las condiciones de servicio previstas.

2.2.3 CLASIFICACIÓN DE EXPOSICIÓN A ACCIONES DE DETERIORO DEL CONCRETO

Las diferentes clases de exposición a acciones de deterioro a las que pueden estar sometidas las estructuras de concreto y que deben considerarse por el estructurista para establecer las especificaciones y requisitos de durabilidad según la norma NMX -C - 155 ONNCCE – 2014, se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto (NMX -C - 155 ONNCCE – 2014).

| CLASIFICACIÓN | CONDICIONES DE EXPOSICIÓN |
|---------------|--|
| 1 | Ambiente seco: |
| | Interior de edificaciones habitables. |
| | Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua. |
| | Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor de tres meses al año. |
| 2a | Ambiente húmedo sin congelamiento: |
| | Interior de las edificaciones con humedad relativa mayor al 60% por más de tres meses al año. |
| | Elementos exteriores expuestos al viento pero no al congelamiento. |
| | Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento. |
| 2b | Ambiente húmedo con congelamiento: |
| | Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento |
| | Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento. |
| 3 | Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes: |

| | | |
|---|--|------------|
| | Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes congelantes. | |
| | Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes. | |
| 4a | Ambiente marino totalmente sumergido: | |
| | Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire. | |
| 4b | Ambiente marino grado moderado: | |
| | Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 m de la línea de costa. | |
| 4c | Ambiente marino grado severo: | |
| | Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, la línea de costa y 300 metros. | |
| 4d | Ambiente marino zona de salpicadura: | |
| | Área rica en sales en contacto con agua. Estructuras en contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado. | |
| 5a | Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos): | |
| | En contacto con agua | |
| | pH | 6.5-5.5 |
| | CO ₂ agresivo (en mg/l como CO ₂) | 15-30 |
| | Amonio (en mg/l como NH ₄ ⁺) | 15-30 |
| | Magnesio (en mg/l como Mg ²⁺) | 100-300 |
| | Sulfato (en mg/l como SO ₄ ²⁻) | 200-600 |
| | En contacto con suelo: | |
| | Grado de acidez según Baumann - Gully | mayor a 20 |
| | Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire) | 2000-6000 |
| 5b | Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos): | |
| | En contacto con el agua: | |
| | pH | 5.5-4.5 |
| | CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l) | 31-60 |
| | Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l) | 31-60 |
| | Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l) | 301-1500 |
| | Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l) | 601-3000 |
| | En contacto con suelo: | |
| Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire) | 6000-12000 | |
| 5c | Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos): | |
| | En contacto con agua | |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| | pH | 4.5-4.0 |
| | CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l) | 61-100 |
| | Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l) | 61-100 |
| | Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l) | 1501-3000 |
| | Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l) | 3001-6000 |
| | En contacto con suelo: | |
| | Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire) | >12000 |
| 5d | Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, químicos o sólidos): | |
| | pH | < 4.0 |
| | CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l) | > 100 |
| | Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l) | > 100 |
| | Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l) | > 3000 |
| | Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l) | > 6000 |
| 6 | Acciones de erosión y cavitación: | |
| 6a | Grado ligero. Vialidad con escasa circulación. Vehículos ligeros y tráfico peatonal. Sin riesgo de congelación (SRC). | |
| 6b | Grado mediano. Carreteras y caminos de red secundaria. Pisos industriales con circulación de montacargas con ruedas de hule con menos de 12 ton. De carga. Superficies con maniobras de carga ligeras en interiores. | |
| 6c | Grado alto. Carreteras con carga intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule o metálicas con cargas mayores a 12 ton. Flujo hidráulico menor a 12 m/s. | |
| 6d | Grado severo. Carreteras con carga muy intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule, metálicas y tipo oruga. Patios de maniobras con tráfico alto y arrastre de objetos pesados. Flujo hidráulico mayor a 12 m/s con riesgo de cavitación. | |

Según esta norma en todos los casos registrará la condición o combinación de exposición más agresiva.

2.3 ATAQUE POR CLORUROS

El ataque por cloruros se distingue principalmente porque la acción principal de estos es inducir la corrosión del acero de refuerzo, y es solo como consecuencia de esta corrosión que se daña el concreto con el que está en contacto.

Los cloruros así como la mayor parte de los agentes químicos agresivos, penetran como contaminación en los componentes del concreto al momento de la dosificación o bien cuando el concreto ha endurecido es decir por absorción; este fenómeno se presenta cuando se expone a un medio ambiente agresivo como puede ser el agua de mar.

La presencia de cloruros en un concreto poroso y en contacto con el acero de refuerzo acelera la corrosión cuando alcanza cierto grado de concentración. El origen de los cloruros puede ser proveniente de los componentes del concreto o precedentes del medio de contacto externo e infiltrados a través del concreto (Adam M. Neville). La suma de los cloruros de ambos orígenes debe mantenerse por debajo de una concentración crítica para prevenir la corrosión; dicha concentración crítica de cloruros depende de las condiciones de exposición de la estructura y las características del acero de refuerzo.

Los cloruros pueden localizarse en el interior del concreto, principalmente en el agua utilizada para su fabricación, en adiciones, en los agregados o materiales cementicios. Cuando los cloruros se localizan en la fabricación del concreto, específicamente en la mezcla inicial, pueden combinarse químicamente con la pasta de cemento, entre ellos los aluminatos, distribuyéndose uniformemente; de esta manera no se crean pilas de concentración (Manuel M. Ferrer). Sin embargo, es posible que se genere una distribución no uniforme, debido al movimiento del agua que contiene el cloruro en la solución.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el concreto que no está permanentemente en contacto directo con el agua. No obstante, debido a que la sal en solución penetra y asciende por capilaridad, el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el concreto, de tal suerte que la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, y el clima tropical propio de las franjas costeras actúa

como inductor del proceso. Además al entrar los cloruros en el concreto endurecido buena parte de ellos permanecerán como cloruros libres en el agua de los poros, siendo precisamente muy agresivos.

El cloruro de sodio es la sal más importante en el agua de mar y en los agentes utilizados como sales de deshielo. Cuando la concentración de cloruros en contacto con el refuerzo excede la concentración crítica, se inicia la corrosión del acero. Sin embargo no existe ninguna concentración válida universalmente (Adam M. Neville).

Este tiempo de iniciación de la corrosión, depende de la calidad del concreto, el espesor de recubrimiento del acero y la cantidad de cloruros a los cuales la estructura se encuentra expuesta. Los cloruros inducen una destrucción local de la capa pasiva del acero, ocasionando un ataque localizado que se transforma frecuentemente en picaduras.

2.3.1 PRUEBA DE PERMEABILIDAD RÁPIDA AL ION CLORURO

Una prueba rápida para determinar la penetrabilidad de los iones de cloruro en el concreto esta prescrita por la norma NMX-C-155- ONNCCE- 2014, la cual determina la conductividad eléctrica, es decir la carga eléctrica pasada durante cierto intervalo de tiempo a través de una probeta de concreto entre soluciones de cloruro de sodio (NaCl) e hidróxido de sodio (NaOH), cuando se mantiene una diferencia de potencial de 60 V. La carga se relaciona con la penetrabilidad de los iones de cloruro en el concreto.

Para los cálculos e interpretación de resultados esta norma sugiere que se grafiquen la corriente (en amperes) contra el tiempo (en segundos). Como referencia se puede utilizar el siguiente cuadro para comparar los resultados obtenidos con los que dicta la norma para evaluar en que rango se encuentra el concreto evaluado.

Tabla 2.2.- Penetrabilidad del Ion Cloruro en base a la carga pasada (NMX-C-155- ONNCCE- 2014).

| Carga Pasada (Coulombs) | Permeabilidad al Ion Cloruro |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| > 4000 | Elevada |
| 2000 - 4000 | Moderada |
| 1000 - 2000 | Baja |
| 100 - 1000 | Muy baja |

Estos son los rangos de permeabilidad en base a la carga pasada y dan un parámetro para clasificar el concreto.

2.4 ATAQUE POR SULFATOS

Las sales solidas no atacan al concreto, pero cuando están presentes en solución pueden reaccionar con la pasta de cemento hidratado. Particularmente son comunes los sulfatos de sodio (Na_2SO_4), potasio (K_2SO_4), magnesio (MgSO_4) y calcio (Ca SO_4), (Adam M. Neville), los cuales se presentan particularmente en el suelo y agua freática. El sulfato puede estar presente también en los efluentes y desechos industriales tales como los de las industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería.

Los sulfatos del agua freática son usualmente de origen natural, pero también pueden venir de fertilizantes o efluentes industriales. Estos contienen algunas veces sulfatos de amonio, el cual ataca la pasta de cemento hidratado al producir yeso (Adam M. Neville). En vez de destruir al concreto disolviendo los componentes, los sulfatos reaccionan químicamente con otros componentes para formar un mineral expansivo que descompone el concreto.

La severidad del ataque al concreto depende de varios factores. Entre éstos se encuentra el tipo de sulfatos, de manera que los sulfatos de magnesio y amonio son los más dañinos. Lo anterior se produce debido a que cuando los sulfatos actúan sobre las fases de la pasta del cemento, como son los silicatos cálcicos; mediante una serie de

acciones complejas, el pH de la pasta de cemento se ve afectado. Asimismo, mientras más solubles sean éstos, mayores serán los daños que se causen sobre el concreto. Por lo anterior la mayoría de las recomendaciones toman en cuenta la cantidad de sulfatos presente al clasificar los daños que causan.

La severidad del ataque se incrementa en el caso en que las aguas que contienen sulfatos fluyen a través del concreto. Así, la naturaleza y el contacto entre el sulfato y el concreto son importantes. El ataque más ofensivo tiene lugar en el concreto que está expuesto a ciclos de mojado y secado continuos (Adam M. Neville). Pero si por el contrario el concreto se encuentra totalmente sumergido, las condiciones de ataque por sulfatos son menos severas.

El efecto del ataque de sulfatos es que, además de producir degradación por expansión y grietas en el concreto, también produce una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. El concreto atacado por sulfatos tiene una apariencia blanquecina, esa es su principal característica (Adam M. Neville). El deterioro comienza en los extremos y esquinas, siguiendo por agrietamiento progresivo y lo cual reduce al concreto a una condición frágil y blanda.

2.5 CARBONATACIÓN

La continua exposición de las estructuras al aire atmosférico propicia el fenómeno de carbonatación del concreto, el dióxido de carbono del aire reacciona con los compuestos alcalinos derivados del cemento para formar carbonatos; como consecuencia la alcalinidad original del concreto tiende a disminuir y con ello se reduce la protección química que brinda al acero de refuerzo contra la corrosión.

El estudio del comportamiento del concreto se basa generalmente en la suposición de que el medio ambiente es aire que no reacciona con la pasta de cemento hidratado. Sin embargo en realidad el aire contiene dióxido de carbono el cual en presencia de humedad reacciona con el cemento hidratado. Cuando un concreto o mortero está expuesto a dióxido de carbono se origina una reacción que produce carbonatos; esta

reacción es acompañada por contracción. En general todos los elementos constitutivos del cemento portland hidratado son susceptibles de carbonatación. Los resultados pueden ser benéficos o perjudiciales, dependiendo del tiempo, la tasa y la extensión de la carbonatación y del ambiente al cual está expuesto el cemento.

En general el CO_2 está presente en pequeñas proporciones en el aire, en áreas rurales donde la concentración es de aproximadamente 0.03% en las grandes ciudades el valor aproximado de este es de 0.30% o mayor, (Tecnología del Concreto, Adam M. Neville). No obstante, altas concentraciones pueden ser encontradas en ambientes específicos de exposición tales como: túneles, estacionamientos cerrados y/o subterráneos, puentes, áreas industriales, etc.

La reacción del cemento portland hidratado con el CO_2 del aire es generalmente un proceso lento (Ludwig 1980). Este proceso depende fuertemente de la humedad relativa ambiente, la temperatura, la permeabilidad del concreto y la concentración de CO_2 .

Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera insignificante (Verbeck,1958). Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO_2 .

Los concretos relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los concretos densos, bien compactados y curados. Una menor relación agua/cemento y una buena compactación reducen la permeabilidad y limitan la carbonatación a la superficie (ACI 201.1R).

2.5.1 EFECTOS DE LA CARBONATACIÓN

A diferencia de otros ácidos, el ácido carbónico no causa daño a la pasta de cemento, el efecto es neutralizar los álcalis precipitando carbonato de calcio, la formación de

dicho compuesto disminuye la porosidad del concreto haciéndolo menos permeable y aumentando su resistividad eléctrica.

La carbonatación puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad dimensional de los productos de concreto. Sin embargo, en otros casos la carbonatación puede provocar el deterioro y una disminución del pH en la pasta cementicia, provocando la corrosión del refuerzo próximo a la superficie. (ACI 201.1R)

Durante la carbonatación sucede una contracción irreversible y ganancia de masa y como producto de la carbonatación se puede presentar mejoría de la estabilidad de volumen a cambios posteriores de humedad y reducción de la permeabilidad (Verbeck, 1958).

2.5.2 PENETRACIÓN DE CARBONATACIÓN

La velocidad de carbonatación del concreto tiende a disminuir con el tiempo debido a que los carbonatos precipitados en la zona superficial dificultan la difusión del CO₂ a mayor profundidad. Se han propuesto diferentes modelos para describir la velocidad de carbonatación, no obstante el modelo más empleado para evaluar dicho parámetro está basado en la siguiente expresión matemática:

$$D = K\sqrt{t}$$

Donde:

D= Penetración de carbonatación en mm

K= coeficiente de carbonatación en mm/año^{1/2}

t= tiempo de exposición en años.

La carbonatación aumenta en proporción con la raíz cuadrada del tiempo en condiciones de humedad constante, el coeficiente K (mm/año^{1/2}) es considerado como una medida de la velocidad de carbonatación para concretos expuestos en condiciones

medioambientales de servicio (Bertolini L. et al., 2004), dentro del factor K están implícitas todas las características intrínsecas del concreto y condiciones de exposición.

2.5.3 MEDICIÓN DE LA CARBONATACIÓN

Un método común y sencillo para establecer la extensión de la carbonatación es mediante el método colorimétrico, es decir que a una superficie recién cortada se le aplica una solución de fenolftaleína, la coloración violeta o morado indica un concreto sin carbonatación, pero si el color del concreto no se altera la carbonatación será completa. (Fernández Cánovas Manuel pág.87).

La solución de fenolftaleína normalmente es preparada mediante una proporción de polvo de fenolftaleína diluida en alcohol y agua: A este respecto el método RILEM CPC-18 recomienda una solución de 1% de fenolftaleína y 70% etanol.

Para determinar la rapidez con que es probable que ocurra la carbonatación, se puede utilizar la prueba acelerada. Esta consiste en la exposición de especímenes de concreto en una cámara que contiene una alta concentración de CO₂, humedad relativa alrededor del 70% y temperatura arriba de 25° C.

2.6 CORROSIÓN

La corrosión del acero embebido en el concreto generalmente es un proceso electroquímico en el cual se desarrolla un ánodo donde se produce oxidación y un cátodo donde se produce reducción. En otras palabras, el proceso corrosivo es la tendencia del regreso a la condición natural del metal en condiciones estables. Generalmente el acero que se encuentra en el concreto está protegido contra la corrosión gracias al elevado pH de la pasta de cemento portland que lo rodea. La pasta cementicia no carbonatada tiene un pH mínimo de 12,5; con este pH el acero no se corroe. Si el pH disminuye (por ejemplo si el pH baja a 10 o menos) es posible que haya corrosión. La carbonatación de la pasta de cemento portland puede disminuir el pH a

valores de 8 a 9, y en consecuencia puede generar corrosión. Si hay humedad y una fuente de oxígeno la presencia de iones cloruro solubles en agua la corrosión se puede acelerar (ACI 222 R).

La corrosión produce una fuerza expansiva que hace que el concreto ubicado sobre el acero se agriete. En la mayoría de los casos, utilizando sobre el refuerzo un buen recubrimiento de concreto y concretos de baja permeabilidad con aire incluido se puede asegurar una durabilidad adecuada, pero si las condiciones de exposición son severas se requerirán mecanismos de protección positivos, tales como el uso de refuerzo recubierto con epoxi, protección catódica o inhibidores de la corrosión. (ACI 201.2R).

2.6.1 TÉCNICAS DE MONITOREO DE LA CORROSIÓN

Las estructuras que presentan daños por corrosión del acero de refuerzo normalmente son inspeccionadas con el fin de identificar el origen y la magnitud del problema. Una vez que se ha cuantificado el deterioro, se proponen y ejecutan procedimientos de reparación encaminados en alcanzar la expectativa de vida de servicio programada, y en el mejor de los casos aumentar la vida útil. Para encontrar la solución óptima de reparación y evitar mayores problemas de corrosión en el futuro, es necesario concentrarse en la identificación del problema mediante medición de parámetros que describan objetivamente la magnitud del daño.

Actualmente existen pruebas para evaluar si el acero de la estructura de concreto presenta problemas de corrosión. Estas pruebas tienen parámetros establecidos que estiman el grado de corrosión del acero, es decir si velocidad de corrosión es baja, moderada o alta. A continuación se menciona las pruebas que se realizaron para este trabajo y los parámetros que se manejan de acuerdo con la bibliografía consultada.

2.6.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica del concreto es una importante propiedad física la cual puede ser definida como la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de éste. El concreto puede ser considerado como un material semiconductor donde su resistividad varía sustancialmente dependiendo de un gran número de variables.

Las técnicas de medición de la resistividad eléctrica están basadas principalmente en la aplicación de corriente, los electrodos para medición pueden ser usados sobre la superficie o embebidos en el concreto.

Las lecturas de resistividad dependen del contenido de humedad del concreto y por lo tanto los valores pueden cambiar de un día a otro. Como guía tenemos el siguiente cuadro que presenta medidas más comunes de acuerdo al estado de la estructura de concreto.

Tabla 2.3.- Rangos de resistividad y riesgo de corrosión del acero de refuerzo (Kendell Frank, et al. 2002).

| RESISTIVIDAD (kΩcm) | RIESGO DE CORROSIÓN |
|---------------------|---------------------|
| >20 | BAJO |
| 10-20 | BAJA A MODERADA |
| 5-10 | ALTA |
| <5 | MUY ALTA |

Con esta tabla se puede realizar una clasificación del concreto con base en la resistividad eléctrica y determinar si el acero de refuerzo tiene algún inicio de corrosión en la estructura.

2.6.1.2 POTENCIAL DE MEDIA CELDA

La prueba de potencial de corrosión se realiza como lo marca la norma americana ASTM C 876-09. El procedimiento estándar de esta norma propone ciertos límites que establecen el grado de corrosión del acero, sin embargo, y puesto que el potencial está afectado por la humedad, espesor del recubrimiento, grado de carbonatación, contenido de cloruros, etc., se recomienda correlacionar los valores obtenidos con experiencias previas de pruebas similares de laboratorio y campo.

Un buen indicador de la actividad de la corrosión es el potencial dado por una media celda de cobre/sulfato de cobre. Se considera que la corrosión es activa si el potencial tiene un valor menor de -0.35 v, ocurriendo rotura del concreto si el valor desciende de -0.50 v. (Fernández Cánovas Manuel pág.87).

El criterio general para interpretar las mediciones de potencia se basan según la norma ASTM C 876-09. La cual sugiere valores indicados en la siguiente tabla para poder determinar si el acero de refuerzo se encuentra corroído en base a la diferencia de potencial.

Tabla 2.4.- Criterio de evaluación de potencial de media celda (ASTM C 876-09).

| POTENCIAL DE CORROSIÓN | PROBABILIDAD DE CORROSIÓN |
|--------------------------|-------------------------------|
| Más positivo que -0.20 V | >90 % que no exista corrosión |
| Entre -0.20 y -0.35 V | Es incierto |
| Más negativo que -0.35 V | >90% que exista corrosión |

Como lo indica la tabla 2.4 solo proporciona valores probables de lo que puede estar ocurriendo en una estructura de concreto si estamos en esos rangos de valores de potencial.

2.7 MEDIDAS DE PREVENCIÓN EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

2.7.1 REVESTIMIENTO PARA MEJORAR LA DURABILIDAD EN EL CONCRETO

La aplicación de revestimiento que se utilizan para proteger al concreto contra la degradación que provocan los productos químicos y/o el ambiente al cual estará expuesto, le permite un mejor comportamiento y durabilidad a la estructura.

2.7.1.2 PROPIEDADES DEL REVESTIMIENTO

Algunas propiedades de los revestimientos de protección que generalmente se utilizan en el concreto según el (ACI 515.1R) se mencionan a continuación:

- Si el revestimiento está expuesto a productos químicos provenientes de fuentes externas, estos productos químicos no se deberán filtrar ni penetrar a través del revestimiento ni destruir la adherencia entre el revestimiento y el concreto.
- La resistencia a la abrasión deberá ser adecuada para evitar que el revestimiento sea eliminado bajo condiciones normales de servicio.
- La resistencia de la unión adherente entre el revestimiento y el concreto deberá ser como mínimo igual a la resistencia a la tensión del concreto en la superficie; esta unión es afectada por el grado de limpieza de la superficie en el momento de aplicar el material de revestimiento.

Un aspecto importante es que al aplicar el revestimiento la superficie debe estar libre de partículas sueltas, polvo, aceite, cera y otras suciedades o productos químicos que pudieran afectar la adherencia.

Tabla 2.5.- Propiedades del revestimiento para el concreto (ACI 515.1R).

| SEVERIDAD DEL AMBIENTE QUÍMICO | ESPESOR NOMINAL | RECUBRIMIENTOS TÍPICOS | USOS TÍPICOS PERO NO EXCLUYENTES DE LOS SISTEMAS PROTECTORES EN ORDEN DE SEVERIDAD |
|--------------------------------|-----------------|--|--|
| Moderado | 1 mm | Polivinil butiral, poliuretano, epoxi, acrílico, asfalto de copolímero acrílico-estireno, alquitrán de carbón, goma clorada, vinilo, neopreno, epoxi de alquitrán de carbón, uretano de alquitrán de carbón. | Protección contra sales anticongelantes, Mejorar la resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo, Evitar que el concreto se manche, Aplicación en servicios de agua de alta pureza, Proteger el concreto en contacto con soluciones químicas con pH tan bajos como 4, dependiendo del agente químico presente. |
| Intermedio | 3 a 9 mm | Epoxi con filler de arena, poliéster con filler de arena, poliuretano con filler de arena, materiales bituminosos. | Proteger al concreto contra la abrasión y la exposición intermitente a ácidos diluidos en plantas químicas, tambos y establecimientos procesadores de alimentos. |
| Serio | 6 a 13 mm | Epoxi reforzado con vidrio, poliéster reforzado con vidrio, láminas de neopreno, láminas de cloruro de polivinilo plastificado | Proteger tanques y pisos de concreto continuamente expuestos a materiales diluidos (pH menor que 3), ácidos orgánicos, soluciones salinas, álcalis fuertes. |

2.7.2 MEDIDAS DE PREVENCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

La forma más sencilla de evitar la corrosión está dada por un buen recubrimiento de concreto, el buen diseño de la mezcla y las prácticas de construcción adecuadas. El concreto en sí es una barrera física que protege al acero contra los agentes que provocan la corrosión, por lo que el espesor de la capa de concreto reduce las condiciones de agresividad exteriores que dañan al acero de refuerzo. Existen otras formas de protección, sin embargo, el principal limitante de su uso en la práctica es el factor económico, a continuación se mencionan algunos métodos que se han aplicado para disminuir el riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

2.7.2.1 ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los inhibidores de corrosión son un tipo particular de aditivo químico para concreto cuya función principal no va dirigida a actuar directamente sobre el concreto en sí, sino sobre el refuerzo protegiéndolo frente al ataque de agentes agresivos.

Es importante mencionar que con el uso de estos aditivos no siempre se evita la penetración de los agentes de corrosión en el concreto, sino más bien se inhiben sus efectos.

La dosis de empleo de aditivos inhibidores de corrosión dependerá de la vida útil esperada de la estructura y de las características de los componentes de la mezcla de concreto, en particular, la relación a/c, el tipo de cemento y empleo de adiciones (Manuel M. Ferrer).

2.7.2.2 RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO

Otra medida de protección contra la corrosión que se emplea frecuentemente consiste en revestir el acero de refuerzo con un material que evite su contacto directo con los agentes corrosivos. Estos materiales pueden ser metálicos y no metálicos; de los metálicos el más empleado es el zinc y de los no metálicos las resinas epoxi.

El revestimiento con zinc o galvanizado del acero de refuerzo se basa en que este metal tiene un potencial corrosivo más negativo que el del acero. Consiste en introducir el acero en un baño de zinc fundido a 450 °C; siendo la capa exterior zinc puro. En estas condiciones la corrosión del zinc resulta menos dañina que la del acero, porque el producto de la corrosión es menos expansivo y dañino para el concreto. Por el contrario esta medida ofrece un tiempo de protección limitado pues en condiciones de exposición prolongada a muy altas concentraciones de cloruros el galvanizado sufre picaduras y con ello deja de ser eficaz.

Por otra parte el uso de resinas epoxi para revestir las barras de acero de refuerzo se utiliza para darle mayor protección contra la corrosión en condiciones de alto riesgo. El procedimiento que usualmente se aplica en planta es empleando resina epoxi en polvo para adherirla a las barras mediante fusión electrostática, lo cual permite obtener una superficie áspera y propicia para su adherencia con el concreto. Esta forma de protección que suele ser muy eficaz tiene como limitación el daño que puede sufrir el revestimiento del acero durante su transportación desde la planta de tratamiento, habilitado y colocación en obra.

Las normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto establecen los siguientes criterios: El revestimiento y el detallado del acero serán tales que el concreto pueda ser colocado y compactado adecuadamente. El revestimiento libre de toda barra de refuerzo no será menor que su diámetro, ni menor que lo señalado a continuación: En columnas y trabes, 20 mm, en losas, 15 mm. Si las barras forman paquetes, el recubrimiento libre, además, no será menor que 1.5 veces el diámetro de la barra más gruesa del paquete.

Tabla 2.6. Revestimiento de concreto mínimo requerido en la estructura.

| CLASIFICACIÓN DE EXPOSICIÓN | RESISTENCIA A COMPRESIÓN ESPECIFICADA, MPa (KG/CM ²) | | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 15 (150) | 20 (200) | 25 (250) | 30 (300) | 40 (400) | 50 (500) | 60 (600) | 70 (700) |
| | RECUBRIMIENTO MÍNIMO REQUERIDO (MM) | | | | | | | |
| A1 | 30 | 25 | 25 | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 |
| A2 | 50 | 40 | 35 | 30 | 25 | 25 | 20 | 20 |
| B1 | 65 | 50 | 40 | 35 | 30 | 30 | 25 | 25 |
| B2 | - | - | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 30 |
| C | - | - | - | - | - | 70 | 65 | 60 |

Cuando el concreto es colado sobre o contra el terreno, compactado y no se conozcan las condiciones de agresividad del terreno, el mínimo recubrimiento para la superficie en contacto con el terreno será 75 mm, o 50 mm si se emplea plantilla o membrana impermeable entre el terreno y el concreto por colar.

CAPÍTULO 3
DESARROLLO EXPERIMENTAL Y
RESULTADOS

3.1 OBTENCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS DE CONCRETO.

Para el desarrollo de esta investigación se recolectaron residuos de concreto obtenidos de los laboratorios de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. En un principio estos residuos de concreto estaban almacenados conjuntamente con otros materiales de distinta naturaleza como son: madera, aluminio, varillas de acero, basura etc. Como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1.- Residuos de construcción y demolición.

Posteriormente se llevó a cabo la clasificación y almacenamiento de los residuos de concreto que consistían principalmente de cilindros y vigas ensayadas anteriormente en el laboratorio, como se muestra en la siguiente figura 3.2.



Figura 3.2.- Clasificación y almacenamiento de residuos de concreto.

3.2 TRITURACIÓN PRIMARIA

Una vez seleccionados y almacenados los residuos de concreto se llevó a cabo la trituración primaria de los residuos utilizando un martillo neumático (Figura 3.3), esto es necesario antes de llevarse a la trituradora ya que el equipo admite únicamente tamaños de hasta 4 pulgadas.



Figura 3.3.- Trituración primaria de residuos de concreto.

3.3 TRITURACIÓN SECUNDARIA

Para realizar esta trituración se utilizó una trituradora de quijadas marca Construcción Maquinaria y Equipo, S.A. (COMESA). Modelo 6" x 10" (Figura 3.4).

El grado de trituración alcanzado fue regulado de tal forma que se obtuviera una granulometría ajustada a tamaño nominal de 12.5mm. (1/2"). Esto debido a que los moldes utilizados para fabricar las probetas para corrosión y carbonatación permiten utilizar agregado de ese tamaño máximo para tener un recubrimiento adecuado.



Figura 3.4.- Trituración secundaria.

3.4 SEPARACIÓN DE TAMAÑOS

La trituradora cuenta con cribas que realizan una separación de tamaños del agregado al momento que la trituradora comienza a operar, desde gravas hasta arenas. Para hacer los diseños de la mezcla esta granulometría se ajusta de acuerdo con las características que se necesitan para el concreto.

3.5 PRUEBAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

3.5.1 GRANULOMETRÍA

La granulometría es una característica propia de todo material granular y se define como la distribución de tamaños de partículas que se presentan en agregados finos (arenas) y gruesos (gravas).

El procedimiento del análisis granulométrico se encuentra descrito en la norma mexicana NMX-C-077 ONNCCE. El primer paso para llevar a cabo un análisis de tamaños consiste en tomar la muestra y reducirla de acuerdo con las normas NMX-C-030 ONNCCE y NMX-C-170 ONNCCE, respectivamente. Posteriormente, la separación de tamaños se hace utilizando un arreglo de cribas con aberturas de malla como las especificadas en las tablas (tablas de límites granulométricos para arenas y gravas) de la norma NMX-C-111 ONNCCE, los límites tienen por objetivo enmarcar los diferentes tamaños necesarios para un mejor comportamiento del concreto, los resultados se expresan en porcentaje de peso (masa) retenido en cada una de las cribas, ya sea en forma cuantitativa o gráfica.

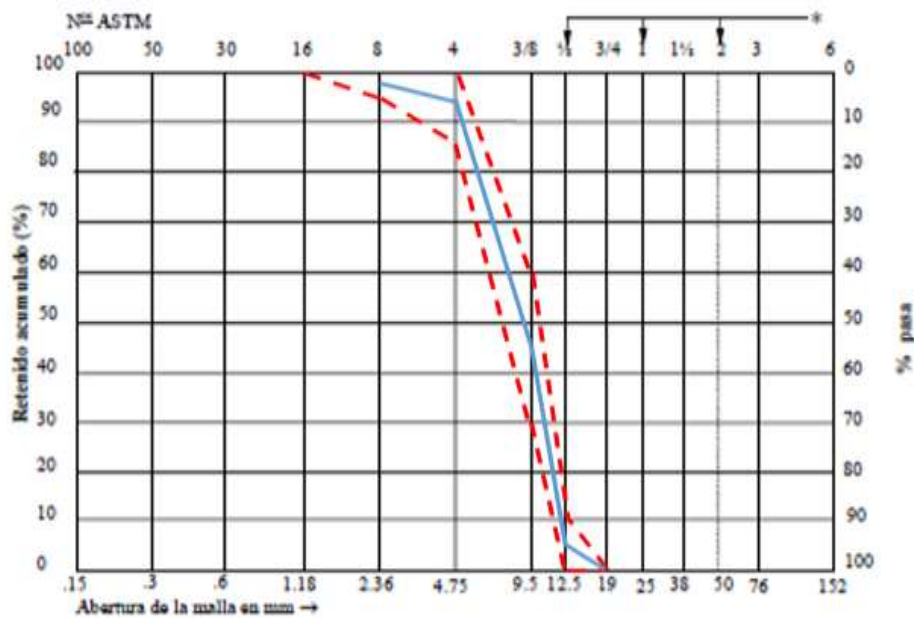


Figura 3.5.- Granulometría del agregado grueso de T.N. 13 mm.

Tabla 3.1.- Cálculos de granulometría.

| CÁLCULOS DE GRANULOMETRÍA | | | | |
|----------------------------------|-------|------------------|-----|------------------------|
| Denominación de malla | | Retenido parcial | | Retenido acumulado (%) |
| NOM | ASTM | (g) | (%) | |
| G 76 | 3 | | | |
| G 50 | 2 | | | |
| G 37.5 | 1 1/2 | | | |
| G 25 | 1 | | | |
| G 19 | 3/4 | 0 | 0 | 0 |
| G 12.5 | 1/2 | 300 | 5 | 5 |
| G 9.5 | 3/8 | 2000 | 40 | 45 |
| G 4.75 | 4 | 2400 | 47 | 92 |
| M 2.36 | 8 | 300 | 5 | 97 |
| M 1.18 | 16 | | | |
| M 0.6 | 30 | | | |
| M 0.3 | 50 | | | |
| M 0.15 | 100 | | | |
| Charola | | | 3 | 100 |
| Total | | 5000 | 100 | |

3.5.2 MASA VOLUMÉTRICA SUELTA Y COMPACTA

El propósito de este método de ensayo es determinar la masa por unidad de volumen de una muestra de agregado. El peso volumétrico (PV) de un agregado debe ser conocido para seleccionar las proporciones adecuadas en el diseño de mezclas de concreto. En el caso del método de diseño de mezclas por el método del ACI 211.1, el peso volumétrico de la grava es utilizado para cuantificar el volumen de éste por metro cúbico de concreto. Cuando se utiliza el método de mínimos vacíos, el peso volumétrico combinado de grava y arena es un dato de partida para estimar las proporciones de los demás componentes. Para obtener la masa compacta se sigue el procedimiento como lo indica la norma NMX-C-073 ONNCCE. La siguiente tabla 3.2 muestra el resultado obtenido:

Tabla 3.2.- Peso volumétrico compacto.

| PRUEBA | PESO KG | PV COMPACTO (KG/M ³) |
|------------|---------|----------------------------------|
| 1 | 3,40 | 1219 |
| 2 | 3,39 | 1215 |
| 3 | 3,43 | 1227 |
| PROMEDIO = | | 1221 |

El resultado promedio de peso volumétrico compacto obtenido fue de 1221 kg/m³, este resultado comparado con otro estudio sobre concreto con agregados reciclados pero los agregados obtenidos de concreto premezclado de origen andesita fue de 1223 kg/m³ (Martínez Soto Iris, 2005).

Para determinar la masa suelta se sigue el procedimiento de la norma NMX-C-073 ONNCCE. El resultado obtenido se enuncia a continuación en la tabla 3.3:

Tabla 3.3.- Peso volumétrico suelto.

| PRUEBA | PESO KG | PV SUELTO (KG/M ³) |
|------------|---------|--------------------------------|
| 1 | 3,11 | 1114 |
| 2 | 3,09 | 1108 |
| 3 | 3,05 | 1092 |
| PROMEDIO = | | 1105 |

Según la norma NMX-C-299-ONNCCE-2010, los agregados no se consideran ligeros ya que para poder considerarlos ligeros el peso volumétrico máximo en estado seco y suelto del agregado grueso debe ser inferior a 900 kg/m³, y el resultado promedio obtenido (Tabla 3.3) es de 1105 kg/m³.

3.5.3 MASA ESPECÍFICA

La densidad aparente de los agregados es un dato que interesa para el diseño de mezclas de concreto, éste sirve para determinar la cantidad de agregado para un volumen unitario de concreto.

Generalmente las partículas de agregado tienen poros saturables y no saturables, dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua. Por lo tanto, es posible tener diversos tipos de densidad como estados de humectación existan en el agregado. La que más interesa en el campo de la tecnología del concreto y específicamente en el diseño de mezclas es la densidad aparente en estado saturado superficialmente seca; esta se define como la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos los poros saturables y no saturables.

La densidad es una propiedad importante para el diseño de mezclas porque con él se determina la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, debido a que los poros interiores de las partículas de agregado van a ocupar un volumen dentro del concreto y además porque una cierta cantidad de agua es capaz de alojarse dentro de los poros saturables, teóricamente se sabe que esta agua no interviene en la reacción química con el cemento.

Para obtener este dato importante para el diseño de mezcla se procede a realizar la prueba como se describe en la norma NMX-C-164 ONNCCE.

El peso específico del agregado grueso reciclado que se utilizó para realizar los diseños de mezclas de concreto fue de 2.20 kg/dm³, del agregado reciclado sin tratar en base al procedimiento descrito en la norma oficial mexicana. En un estudio realizado en el cual utilizaban agregados obtenidos de concreto reciclado de origen andesita este valor de densidad se encontró de 2.24 kg/dm³ (Martínez Soto, 2005).

Para el agregado reciclado tratado el peso específico aumento muy poco debido al tratamiento, este fue de 2.26 kg/dm³.

Para el agregado grueso natural se utilizó grava andesita con una densidad saturada superficialmente seca obtenida en el laboratorio de 2.40 kg/dm^3 . El agregado fino natural fue también andesita con una densidad de 2.31 kg/dm^3 .

Estos datos fueron utilizados para el diseño de cada tipo de mezcla de acuerdo con el ACI 211.1.

3.5.4 ABSORCIÓN

La absorción en los agregados, es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material. La absorción es una propiedad física que está íntimamente relacionada con la porosidad y permeabilidad de los agregados. Estos tres parámetros influyen directamente en la adherencia de la pasta de cemento, la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo, la estabilidad química, la resistencia a la abrasión y la densidad específica.

La absorción obtenida para el diseño de la mezcla se determinó en base al procedimiento descrito en la norma NMX-C-164 ONNCCE, obteniendo un valor de 9.53% para el agregado grueso reciclado sin tratar esto es debido a que por la cantidad de mortero adherido a la superficie del agregado reciclado absorbe mayor cantidad de agua y también a que la partícula es muy porosa.

Para el agregado reciclado tratado la absorción disminuyó considerablemente esto debido a que el sellador forma una capa impermeable en el agregado, la absorción obtenida en este caso fue de 5.76%.

El intervalo encontrado en diversos estudios de absorción del agregado grueso reciclado oscila entre 0.8-13%, con un valor medio de 5.7% (Sánchez Marta, 2004). Según los valores encontrados en este trabajo se está en este intervalo aunque también depende del tipo de concreto que se esté triturando para obtener los agregados.

Los datos obtenidos de absorción en el agregado natural, para el agregado grueso fue de 3.80% y el agregado fino de 7.70%.

Estos datos son muy importantes para a dosificación de las mezclas de concreto.

3.5.5 COEFICIENTE DE FORMA

Para que las mezclas de concreto tengan una consistencia adecuada con un contenido mínimo de mortero, se presenta el método para calificar la forma de los agregados gruesos para la optimización de las proporciones de las mezclas.

La norma mexicana NMX-C-436 ONNCCE agregados para concreto- coeficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso, presenta el método de prueba para determinar el coeficiente volumétrico del agregado grueso que se retiene en la criba 4.75 (malla no.4), también conocido como factor de forma o coeficiente de forma.

Según esta norma el coeficiente volumétrico es la relación que existe entre la suma de los volúmenes de las partículas representativas del agregado grueso que componen la muestra entre la suma de los volúmenes de las esferas que circunscriben a cada partícula de dicha muestra.

Preparación y acondicionamiento de las muestras: Se mide con el vernier la longitud mayor de cada partícula, la cual se denomina d_i en donde $i=1, \dots, n$ = número de partículas (figura 3.6).



Figura 3.6.- Dimensión mayor del agregado reciclado.

Se determina el volumen real (V_r) de las muestras que se midieron llevándolas a condición saturada y superficialmente seca midiendo el volumen desalojado en un picnómetro de sifón.

Para cada tamaño nominal de grava se le determinó el coeficiente de forma y se obtuvo un coeficiente de forma medio de acuerdo con la granulometría utilizada.

Los coeficientes volumétricos obtenidos se describen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4.- Coeficiente de forma de los agregados reciclados de acuerdo con su tamaño nominal.

| TAMAÑO NOMINAL | COEFICIENTE DE FORMA |
|-----------------------|-----------------------------|
| 1/2" (12.5 MM) | 0.25 |
| 3/8" (9.5 MM) | 0.24 |
| NO. 4 (4.75 MM) | 0.33 |

Se obtuvo además el coeficiente volumétrico medio, el cual fue de 0.26.

Esto indica una buena forma de la partícula del agregado ya que para que se considere de buena calidad el coeficiente debe ser según la norma NMX-C-111 ONNCCE mayor o igual a 0.20. Esto para satisfacer los requisitos de trabajabilidad, módulo de elasticidad, cohesión y contracción que se requieren en el concreto.

3.5.6 CONTENIDO DE MORTERO ADHERIDO

El agregado reciclado a diferencia con el agregado natural, contiene una cantidad de mortero adherido (Figura 3.7). Ese mortero es el causante de las diferencias que existen entre las propiedades de un agregado natural y un agregado reciclado, y esto afecta negativamente su comportamiento en el concreto.

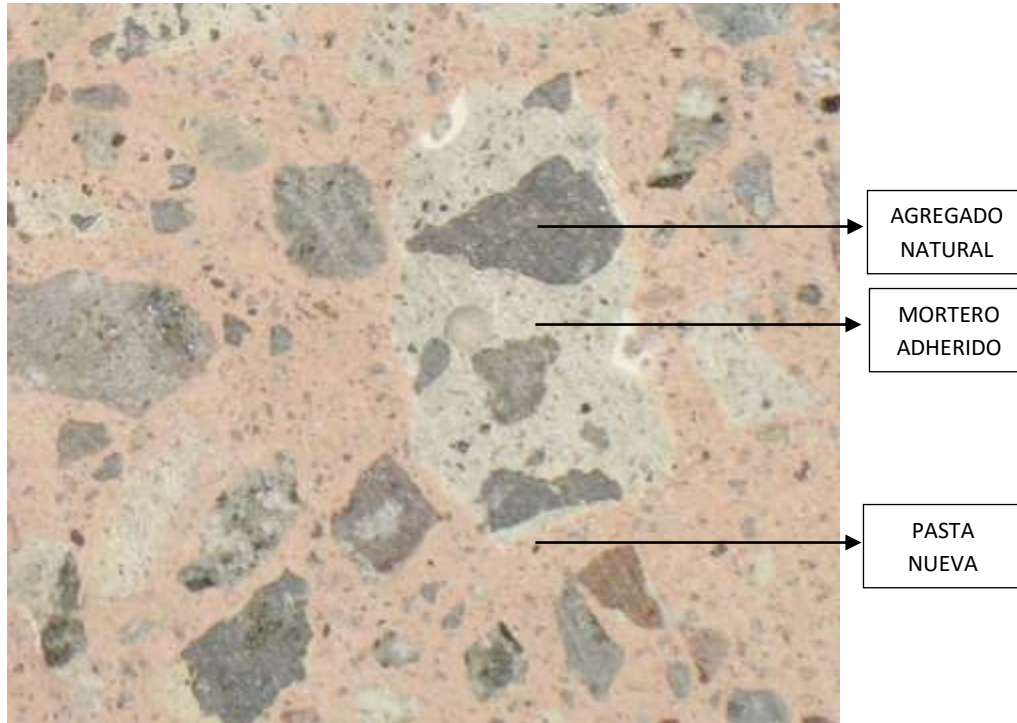


Figura 3.7.- Pasta adherida en el agregado reciclado.

En la actualidad no existe una norma que especifique el procedimiento a utilizar para la determinación del contenido de mortero adherido en el agregado reciclado, el objetivo de este ensayo es determinar la cantidad de pasta más agregado fino que tiene el agregado tal y como se va a utilizar en la mezcla de concreto.

El procedimiento utilizado para esta prueba es el siguiente:

- Se elige una muestra representativa del material a utilizar, esta muestra se seca al horno y se pesa seco (peso inicial).
- Se sumergen las partículas en una disolución de ácido con agua y comienzan a agitarse, este paso se repite varias veces hasta que el cemento comience a disolverse, como se muestra en la figura 3.8.
- Una vez que se le dio el tratamiento anterior, el material se lava con agua usando la criba de abertura 0.075 mm (No. 200), el material retenido en esta malla se considera como agregado sin pasta y se procede a secarla al horno.

- El porcentaje de mortero adherido se determina por diferencia de peso inicial y final después de la prueba, ya que este ácido produce la disolución del cemento.



Figura 3.8.- Proceso de determinación de mortero adherido.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación, tabla 3.5.

Tabla 3.5.- Resultados prueba de mortero adherido.

| PRUEBA DE MORTERO ADHERIDO | | | | | |
|----------------------------|---------|------------------|----------------|--------------|------------|
| TMN | MUESTRA | MASA INICIAL (g) | MASA FINAL (g) | % DE MORTERO | PROMEDIO % |
| 13 MM | 1 | 136 | 95 | 30.15 | 33 |
| | 2 | 133 | 90 | 32.33 | |
| | 3 | 136 | 87 | 36.03 | |

Algunos estudios muestran que el contenido de mortero en los agregados reciclados va del 25-60% (Sánchez Marta, 2004), utilizando procedimientos similares.

3.5.7 RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS

A continuación se presenta una tabla resumen de las propiedades obtenidas de los agregados utilizados para este trabajo así como también las normas utilizadas para cada procedimiento utilizado.

Tabla 3.6.- Propiedades físicas de los agregados.

| PROPIEDAD | NORMA | AGREGADO GRUESO RECICLADO (AR) | AGREGADO GRUESO RECICLADO TRATADO (ART) | AGREGADO GRUESO NATURAL (AN) | AGREGADO FINO NATURAL (AF) |
|--|------------------------|--------------------------------|---|------------------------------|----------------------------|
| ABSORCIÓN (%) | NMX-C-164 NMX-C-165 | 9.53 | 5.76 | 3.80 | 8.70 |
| DENSIDAD (kg/dm ³) | NMX-C-164 NMX-C-165 | 2.20 | 2.26 | 2.40 | 2.31 |
| PESO VOLUMÉTRICO SUELTO (kg/m ³) | NMX-C-073 | 1105 | 1136 | 1262 | 1140 |
| PESO VOLUMÉTRICO COMPACTO (kg/m ³) | NMX-C-073 | 1221 | 1247 | 1325 | 1313 |
| COEFICIENTE DE FORMA | NMX-C-436 | 0.26 | 0.25 | 0.20 | --- |
| TAMAÑO NOMINAL (mm) | NMX-C-111 | 13 | 13 | 13 | NO APLICA |
| MODULO DE FINURA | NMX-C-111 | NO APLICA | NO APLICA | NO APLICA | 3.20 |
| MORTERO ADHERIDO % | --- | 33 | NO APLICA | NO APLICA | NO APLICA |

Estas propiedades obtenidas en el laboratorio fueron las que se utilizaron para el diseño de la mezcla de concreto.

3.6 EVALUACIÓN DE SELLADORES PARA TRATAMIENTO DEL AGREGADO GRUESO RECICLADO

Para realizar el tratamiento del agregado grueso reciclado se determinó que característica del agregado se pretende mejorar, en este caso se propone modificar la alta absorción del agregado grueso utilizando un sellador base polímero que sirva como capa impermeable en el agregado y estudiar cómo esta aplicación modifica las características del concreto en estado fresco y endurecido.

3.6.1 TIPOS DE SELLADORES

Un sellador, sellante o tapa poros es un material fabricado por la combinación de sustancias químicas y que se utiliza para evitar la penetración de líquido formando una barrera protectora en la superficie que se aplica.

Los selladores ayudan al mantenimiento y cuidado de los inmuebles, la correcta elección permite obtener mayores beneficios del producto, como: impermeabilidad, rendimiento, durabilidad, acabados estéticos, etc.

Para este trabajo se analizaron dos tipos de selladores:

- **Selladores Acrílicos**

Utilizan como base para su fabricación los polímeros obtenidos del ácido acrílico, que en su estado puro, se trata de un líquido corrosivo, incoloro y de olor penetrante. Se puede mezclar con agua y alcohol. Se produce a partir del propileno, un subproducto gaseoso de la refinación del petróleo.

Este tipo de selladores son fáciles de aplicar, tienen buena adherencia en material como concreto, madera, yeso, ladrillo etc. son durables y se puede pintar sobre ellos, una vez que el producto ha secado deja una película transparente.

- **Selladores Vinílicos**

Las resinas vinílicas utilizadas para la fabricación de selladores de este tipo se obtienen mediante la reacción de copolímeros de cloruro de vinilo y acetato de vinilo. Polímeros de enlace vinilo que dan origen a materias termoplásticas denominadas resinas de vinilo o vinílicas.

Las resinas acrílicas a diferencia de las resinas vinílicas o vinil acrílicas, se caracterizan por tener una alta resistencia a la radiación UV, a la intemperie, alcalinidad de muros, además de una mayor retención del color.

3.6.2 SELECCIÓN DEL SELLADOR

Para este proceso se eligieron las marcas comerciales más usuales en el mercado y sus tipos de sellador ya sean vinílicos o acrílicos, y se obtuvieron las principales características de cada producto según su ficha técnica. En la tabla 3.7 se presenta una comparación resumida de las características de cada sellador utilizado en este trabajo de investigación.

Tabla 3.7.- Clasificación de los diferentes tipos de selladores.

| MARCA | NOMBRE DEL PRODUCTO | TIPO | CARACTERÍSTICAS |
|------------------|----------------------------|------------------|--|
| COMEX | SELLADOR 5X1 CLÁSICO | VINIL-ACRÍLICO | No resiste productos químicos corrosivos ni altas temperaturas. |
| | SELLADOR 5X1 REFORZADO | ESTIREN-ACRÍLICO | Buena resistencia a la alcalinidad, excelente sellado, no resiste productos químicos corrosivos. |
| | BIOSENSE PRIMARIO ACRÍLICO | ACRÍLICO | Puede ser aplicado directamente sobre acero al carbón, sin presentar oxidación y con propiedades anticorrosivas. |
| DUPONT | ACRISSELLO | ACRÍLICO | Disminución de la porosidad y mejor adherencia. |
| | ACRISSELLO ENTINTABLE | ACRÍLICO | Disminuye la porosidad, mejor adherencia, permite ser entintado, es lavable. |
| | ACRISSELLO UNIVERSAL | VINIL-ACRÍLICO | Sella y protege, buena adherencia, mejora la durabilidad. |
| BEREL | SELLADOR ACRÍLICO NO. 580 | ACRÍLICO | Resina acrílica, resistente a alcalinidad, humedad, buen sellado y adhesión. |
| | SELLADOR VINÍLICO NO. 570 | VINÍLICO | Resinas vinil acrílicas, buen sellado, adhesión y resiste humedad. |
| SHERWIN-WILLIAMS | SELLADOR VINÍLICO 6X1 | VINÍLICO | Disminución de la porosidad. |
| SAYER LACK | SELLALACK SELLADOR 5X1 | VINIL-ACRÍLICO | Excelente plasticidad, alto rendimiento y acabado transparente, brinda protección contra hongos y moho. |

Cada uno de estos productos ofrecen una buena calidad de sellado en el concreto, la preparación de las soluciones fue hecha de acuerdo con las recomendaciones de las hojas técnicas de los productos, en general se observa que la proporción es de cinco partes de agua por una de sellador. Este tipo de productos y las características que deben cumplir de acuerdo con las normas oficiales mexicanas como son densidad (NMX-U-024), consistencia (NMX-K-227), brillo (NMX-U-093).

3.6.3 TRATAMIENTO DE LOS AGREGADOS

Para este proceso se obtuvieron una muestra de cada tipo de sellador y se disolvieron como lo indica la ficha técnica; con el sellador preparado se introducen los agregados reciclados y se dejan saturando por 24 horas. Transcurrido este tiempo se saca la muestra de agregado y se hacen las pruebas de absorción así como también de peso específico del agregado para cada tipo de sellador, como se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9.- Tratamiento del agregado reciclado.

En la figura 3.10 se puede observar la profundidad de absorción del sellador sobre el agregado reciclado, con esta imagen se puede constatar que el tratamiento con sellador que se empleó en este trabajo no penetra totalmente la partícula de agregado reciclado y que es un tratamiento superficial.

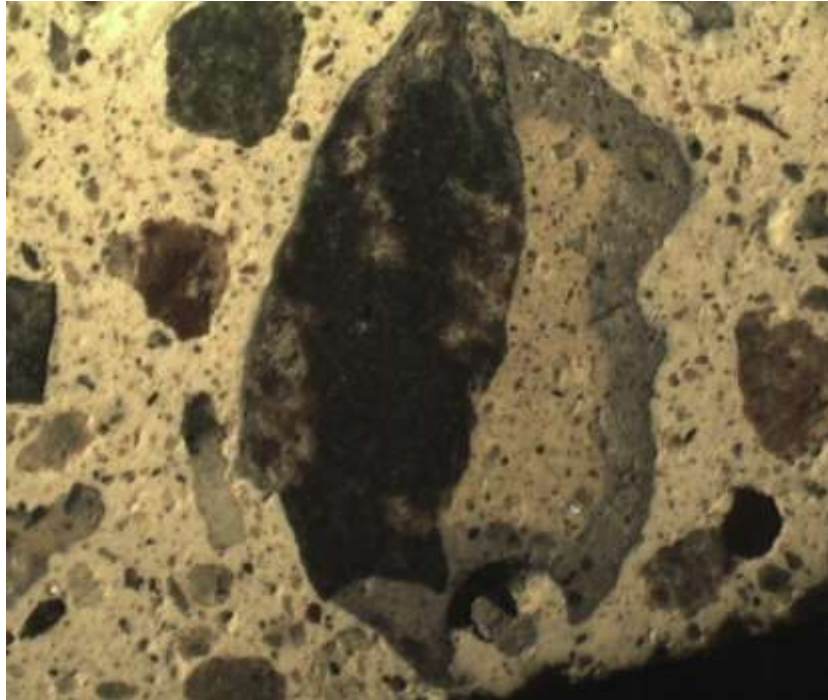


Figura 3.10.- Absorción del sellador en el agregado reciclado

Los datos obtenidos se enuncian en la tabla 3.8

Tabla 3.8.- Absorción y densidad de agregados saturados con diferentes selladores.

| SELLADOR | MARCA | CARACTERÍSTICAS | ABSORCIÓN | Densidad |
|----------|------------|---|-----------|-----------------------|
| | | | [%] | [kg/dm ³] |
| 1 | DUPONT | Acrisello entintable | 10,25 | 2,02 |
| 2 | DUPONT | Acrisello para superficies alcalinas | 11,11 | 2,00 |
| 3 | DUPONT | Acrisello universal interiores y exteriores | 11,36 | 2,01 |
| 4 | COMEX | Sellador clásico vinil-acrílico | 9,65 | 2,03 |
| 5 | COMEX | Reforzado acrílico | 10,96 | 2,23 |
| 6 | COMEX | Brosense. Primario acrílico anticorrosivo | 11,27 | 2,00 |
| 7 | BEREL | Sellador acrílico 580 | 10,96 | 2,00 |
| 8 | BEREL | Sellador vinílico 570 | 11,70 | 2,00 |
| 9 | SAYER LACK | Productos especiales base agua | 10,34 | 2,04 |
| 10 | SHERWIN W. | Sellador vinílico Transparente | 11,11 | 2,01 |

3.6.4 MEZCLAS DE PRUEBA

Para evaluar el comportamiento de los selladores en los agregados, se decidió realizar mezclas de prueba. Para el diseño se utilizaron las recomendaciones de dosificación de los materiales según el ACI 211.1 La dosificación utilizada para todas las mezclas se enuncia en la tabla 3.9.

Tabla 3.9.- Dosificación del concreto.

| DOSIFICACIÓN POR METRO CÚBICO DE CONCRETO | |
|--|------------------------|
| fcr= | 300 kg/cm ² |
| A/C | 0.54 |
| REVENIMIENTO | 15 cm. |
| MATERIAL | |
| CEMENTO | 422 kg |
| GRAVA | 693 kg |
| ARENA | 742 kg |
| AGUA | 228 kg |

Durante la realización de las mezclas de prueba se midieron sus propiedades como son: revenimiento y peso volumétrico Los resultados obtenidos se describen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Características de mezclas de concreto elaboradas con agregados tratados con diferentes selladores.

| MEZCLA | SELLADOR | REVENIMIENTO | PESO VOL. KG/M³ |
|---------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| #1 | <i>AXALTA acrisello entintable</i> | 13,6 | 2026 |
| #2 | <i>AXALTA acrisello acrílico</i> | 12.9 | 2015 |
| #3 | <i>AXALTA acrisello universal</i> | 13.2 | 2015 |
| #4 | <i>COMEX 5x1 clásico</i> | 15,3 | 2031 |
| #5 | <i>COMEX 5x1 reforzado</i> | 21,9 | 2017 |
| #6 | <i>COMEX Biosense Primario</i> | 11,5 | 2020 |
| #7 | <i>BEREL 580 Acrílico</i> | 17,8 | 2006 |
| #8 | <i>BEREL 570 Vinílico</i> | 11,8 | 2007 |
| #9 | <i>SAYER LACK</i> | 15,3 | 2016 |
| #10 | <i>SHERWIN W.</i> | 6,5 | 2001 |
| #11 | <i>SIN TRATAR</i> | 11,6 | 2016 |

Una vez elaboradas las probetas, éstas permanecieron durante 28 días en el cuarto de curado a 23° C y 95% de humedad relativa.

3.6.5 RESISTENCIA A TENSIÓN DIAMETRAL

Los cilindros obtenidos de las mezclas de prueba se sometieron a pruebas de tensión diametral a 28 días, esto debido al pre-tratamiento del agregado grueso reciclado para observar su comportamiento en cuanto adherencia, y ver cuál era el mejor sellador a utilizar en este trabajo. El procedimiento de ensaye se realizó de acuerdo con la norma NMX-C- 163 ONNCCE.

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 3.10.

Tabla 3.11.- Resultados de pruebas a tensión diametral del concreto.

| TRATAMIENTO DEL AGREGADO | σ PROMEDIO (KG/CM ²) |
|--------------------------|---|
| 1.- ACRISELLO ENTINTABLE | 26,5 |
| 2.- ACRISELLO ACRÍLICO | 27,8 |
| 3.- ACRISELLO UNIVERSAL | 25,8 |
| 4.- COMEX 5X1 CLÁSICO | 25,8 |
| 5.- COMEX 5X1 REFORZADO | 30,7 |
| 6.- COMEX BIOSENSE | 27,5 |
| 7.- BEREL ACRÍLICO | 29,4 |
| 8.- BEREL VINÍLICO | 27,5 |
| 9.- SAYER LACK | 24,4 |
| 10.- SHERWIN WILLIAMS | 26,1 |
| 11.- SIN TRATAR | 23,5 |

Al evaluar la resistencia a tensión de cada tipo de concreto con sellador, se encontró que en general los productos no afectan importantemente la adherencia. Particularmente, se observó que el sellador Comex 5x1 resulto ser el de mejor comportamiento en cuanto a resistencia a la prueba de tensión diametral, esto puede atribuirse a que el sellador no afecta importantemente la adherencia entre el agregado y la pasta.

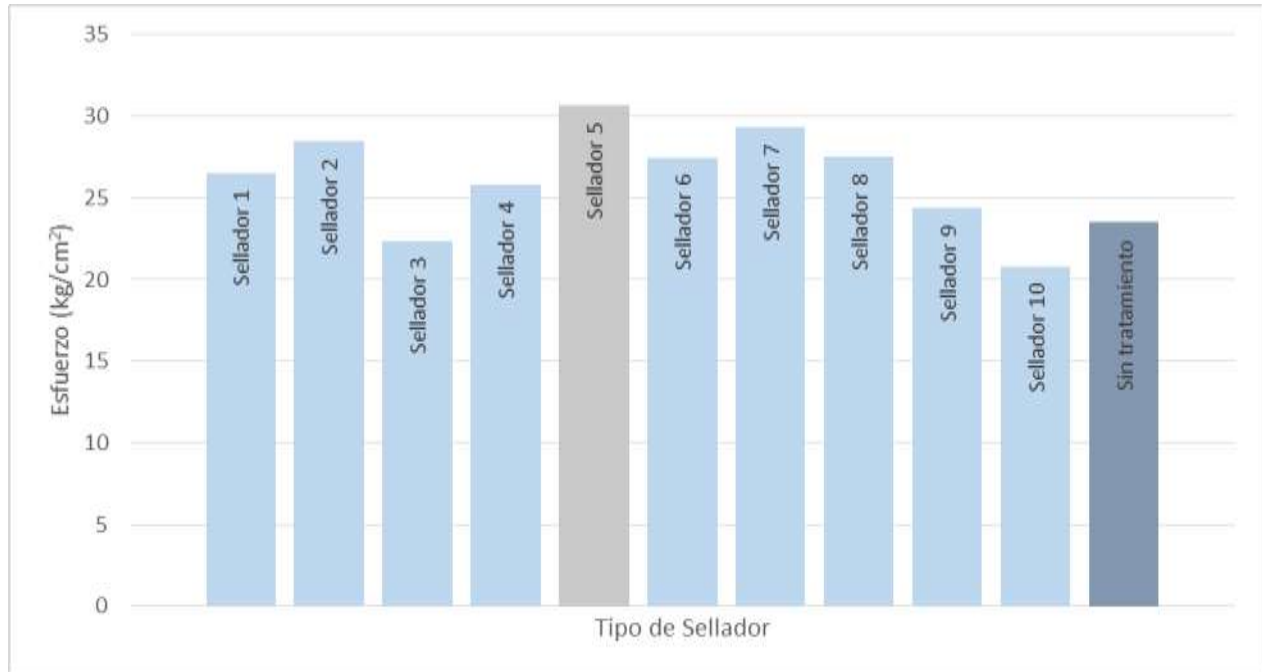


Figura 3.11.- Resistencia a tensión del concreto.

3.6.6 ELECCIÓN DEL SELLADOR A UTILIZAR

Debido al buen comportamiento de adherencia se decidió utilizar el sellador Comex 5x1 reforzado acrílico. Este tipo de sellador será utilizado para realizar las pruebas de resistencia y durabilidad, así como también comparar su comportamiento contra un concreto elaborado con agregados reciclados sin tratar y contra un concreto elaborado con agregados naturales de origen andesita.

3.7 FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES PARA PRUEBAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

3.7.1 ELABORACIÓN DE CONCRETO

Para evaluar el comportamiento global del sellador seleccionado, se fabricaron 30 cilindros de 10 x 20 cm., para cada tipo de agregado grueso (agregado grueso reciclado sin tratar, agregado grueso reciclado tratado con sellador, agregado natural). A continuación se enuncia el resumen para el uso de cada tipo de mezcla elaborada.

También se elaboraron tres vigas de 15 x 15 x 60 cm. Dos de ellas se usaron para fabricar probetas (con varilla) que sirven para evaluar la corrosión. La tercera viga se usó para las probetas que permitirían evaluar la velocidad de carbonatación.



Figura 3.12.- Fabricación de vigas y cilindros de concreto.

3.7.2 PRUEBAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Se le realizaron pruebas al concreto en estado fresco como son: revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire. El procedimiento de prueba y los resultados se presentan a continuación.

3.7.2.1 REVENIMIENTO

Este procedimiento es utilizado para medir la consistencia del concreto, es decir el grado de trabajabilidad de la mezcla en estado fresco en términos de la disminución de altura. Esta prueba se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-156-ONNCCE- 2010.



Figura 3.13.- Revenimiento del concreto.

3.7.2.2 PESO VOLUMÉTRICO

La obtención del peso volumétrico del concreto se utiliza para determinar el peso por metro cúbico de concreto. Este se obtiene dividiendo el peso neto del concreto fresco entre el volumen del recipiente que lo contiene. Esta prueba se realizó según la norma NMX-C-162-ONNCCE-2010.



Figura 3.14.- Peso volumétrico del concreto.

3.7.2.3 CONTENIDO DE AIRE

La prueba de contenido de aire en el concreto es una característica que mide los vacíos en el concreto que se crean de manera natural durante el proceso de mezclado, usualmente expresado como un porcentaje del volumen total de la mezcla. Esta prueba se llevó a cabo de acuerdo a la norma NMX-C-157-ONNCCE-2006.



Figura 3.15.- Contenido de aire del concreto.

3.7.2.4 RESUMEN DE PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

En la tabla 3.12 se presenta el resumen con las características obtenidas del concreto en estado fresco.

Tabla 3.12.- Resumen de pruebas al concreto en estado fresco.

| CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO | | | |
|--|---------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| TIPO DE CONCRETO | PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³) | REVENIMIENTO (cm) | CONTENIDO DE AIRE (%) |
| CONCRETO CON AGREGADO NATURAL | 2097 | 15.0 | 2.5 |
| CONCRETO CON AGREGADO GRUESO RECICLADO | 2070 | 13.5 | 2.8 |
| CONCRETO CON AGREGADO GRUESO RECICLADO TRATADO | 2038 | 14.0 | 2.7 |

3.8 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

La resistencia de un material se define como la habilidad para resistir esfuerzos sin fallar. La falla se identifica con la aparición de grietas. En el diseño del concreto y en el control de calidad, la resistencia a compresión es la propiedad que más comúnmente se especifica, esto es debido a que muchas propiedades del concreto están relacionadas con la resistencia a compresión, como son: el módulo de elasticidad, impermeabilidad y la resistencia a los agentes ambientales (Kumar Mehta,1998).

3.8.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

La prueba de compresión se realiza de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCE-2002. La prueba de módulo de elasticidad se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-128-ONNCE-1997.



Figura 3.16.- Prueba de compresión.



Figura 3.17.- Prueba de módulo de elasticidad.

3.8.2 RESISTENCIA POR TENSIÓN DIAMETRAL

Esta prueba se realizó como lo marca la norma NMX-C-163-ONNCCE-2010.



Figura 3.18.- Prueba de tensión diametral.

3.8.3 RESUMEN DE PRUEBAS DE RESISTENCIA MECÁNICA

A continuación se presenta la siguiente tabla resumiendo los promedios de las pruebas realizadas al concreto en estado endurecido.

Tabla 3.13.- Resumen de resistencia del concreto en estado endurecido.

| TIPO DE CONCRETO | RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²) | RESISTENCIA A TENSIÓN (kg/cm ²) | MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²) |
|---|--|---|---|
| CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO | 252 | 27 | 150,775 |
| CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO | 271 | 26 | 155,669 |
| CONCRETO CON AGREGADO NATURAL | 284 | 29 | 157,309 |

Se encontró que la resistencia a compresión del concreto con agregado reciclado tratado es 8% mayor que el concreto con agregado reciclado sin tratar. La resistencia a compresión del concreto con agregado reciclado con respecto a la del concreto con agregado natural es 5% menor. El concreto con agregado reciclado sin tratamiento con respecto al concreto con agregado natural su resistencia a compresión es menor en un 12%. es importante mencionar que los tres tipos de concretos fueron fabricados con la misma dosificación para poder comparar los resultados en las mismas circunstancias. En cuanto a las resistencias a tensión diametral el concreto con agregados reciclados sin tratamiento su resistencia representa el 10.7% de su resistencia a compresión, el concreto con agregado reciclado tratado su resistencia a tensión diametral representa el 9.6% de su resistencia a compresión, y el concreto con agregado natural su resistencia a tensión diametral representa el 10.2% de su resistencia a compresión. En cuanto al módulo de elasticidad, las normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto especifica que para concretos clase 2, que de acuerdo con las características del concreto que son los que estamos manejando se puede utilizar la siguiente formula $(8000\sqrt{f'c})$, que para este caso los módulos de elasticidad promedio de la tabla 3.14 son superiores a este parámetro.

En general estudios consultados coinciden en que las pérdidas de resistencia, cuando se sustituye el 100% del agregado grueso, suelen encontrarse en el orden del 20% pudiendo llegar a alcanzar en ocasiones el 30%. Asimismo, cuando la sustitución es menor al 50%, las pérdidas de resistencia se sitúan entre el 2-15%; llegando a exhibirse pérdidas de resistencia inferiores al 5%, cuando la sustitución de agregado natural por agregado reciclado se limitan entre el 20 y 30% (Vidaud Quintana Eduardo, 2015).

3.8.4 INDUCCIÓN DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA

Para esta prueba se utilizaron 20 probetas con dimensiones de 7x7x15 cm, por cada tipo de mezcla (concreto con agregado reciclado, CAR, agregado reciclado tratado, CART y concreto con agregado natural, CAN). La figura 3.18 muestra la configuración de las probetas utilizadas para monitorear el avance de la carbonatación de los

diferentes concretos, las probetas fueron obtenidas mediante cortes de las vigas que se mencionan en el inciso 3.7.1.



Figura 3.19.- Probeta para monitoreo de la carbonatación.

También por cada mezcla se elaboraron 20 probetas de las mismas dimensiones que las que ya se mencionaron anteriormente, pero con acero de refuerzo embebido en el centro (Figura 3.19), dejándose sobresalir una fracción de la varilla en una de las superficies axiales, estas probetas sirvieron para hacer las pruebas de potencial de corrosión antes y después de la carbonatación.



Figura 3.20.- Probeta para medición de potencial de corrosión.

Para inducir la carbonatación solo en las caras laterales de las probetas, éstas fueron recubiertas en su cara superior e inferior con una pintura especial.

3.8.4.1 CÁMARA DE CARBONATACIÓN

Para obtener la concentración deseada de CO₂ se empleó el equipo denominado *Shel-Lab CO₂ Incubator Model 2406* (Figura 3.20) el cual posee las siguientes características:

- Control de ajuste de temperatura para minimizar la condensación.
- Controles de ajuste de CO₂.
- Control de humedad relativa mediante sal de cloruro de calcio.



Figura 3.21.- Cámara de carbonatación acelerada.

3.8.4.2 MONITOREO DE LA CARBONATACIÓN

La velocidad de carbonatación se monitorea cada semana después de poner las probetas en la cámara de carbonatación acelerada, con una concentración de CO₂ del 10%, temperatura de 30° C y humedad relativa en un rango del 60-70% esto para favorecer las condiciones del proceso acelerado de la carbonatación. El seguimiento del avance de la carbonatación se llevó a cabo mediante la obtención de cortes de las probetas que no tenían acero de refuerzo, posteriormente se aplicaba el indicador de fenolftaleína y se medían las profundidades de carbonatación obteniéndose un promedio para cada tipo de concreto (Figuras 3.21, 3.22 y 3.23).







| CARBONATACIÓN CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO | | | |
|---|-----------------------------------|--|---|
| TIEMPO (DÍAS) | PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN (MM) | CONSTANTE DE CARBONATACIÓN (K) mm/año ^{1/2} | IMAGEN |
| 3 | 2.10 | 23 |  |
| 7 | 5.05 | 36 |  |
| 14 | 8.22 | 42 |  |
| 21 | 13.18 | 55 |  |
| 35 | 16.65 | 54 |  |
| 56 | 26.77 | 68 |  |

Figura 3.22.- Profundidad de carbonatación del CART.







| CARBONATACIÓN CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO | | | |
|---|-----------------------------------|--|---|
| TIEMPO (DÍAS) | PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN (MM) | CONSTANTE DE CARBONATACIÓN (K) mm/año ^{1/2} | FIGURA |
| 3 | 2.37 | 26 |  |
| 7 | 8.32 | 60 |  |
| 14 | 10.31 | 53 |  |
| 21 | 14.62 | 61 |  |
| 35 | 18.61 | 60 |  |
| 56 | 28.30 | 72 |  |

Figura 3.23.- Profundidad de carbonatación del CAR.







| CARBONATACIÓN CONCRETO CON AGREGADO NATURAL | | | |
|---|-----------------------------------|--|---|
| TIEMPO (DÍAS) | PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN (MM) | CONSTANTE DE CARBONATACIÓN (K) mm/año ^{1/2} | FIGURA |
| 3 | 2.26 | 25 |  |
| 7 | 5.50 | 40 |  |
| 14 | 9.21 | 47 |  |
| 21 | 14.16 | 59 |  |
| 35 | 19.98 | 65 |  |
| 56 | 35.00 | 89 |  |

Figura 3.24.- Profundidad de carbonatación del CAN.

Las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 muestran el comportamiento del avance de la carbonatación en el tiempo para los tres tipos de concretos elaborados siguiente grafica muestra el comportamiento de las tres muestras de concreto elaborado. Se observa que durante los primeros 35 días las profundidades de carbonatación son muy similares para los tres tipos de concretos, no obstante, después se detecta que el concreto con agregado natural presenta la mayor velocidad de carbonatación, en contraste el concreto con agregado reciclado tratado tuvo el mejor comportamiento, ya que al final del periodo de aplicación tiene el valor más bajo en la velocidad de carbonatación. Comparando estos valores y evaluando cada uno para un tiempo de 10 años el concreto con agregado natural se carbonataría 25% más rápido que el agregado reciclado tratado. En cuanto a al comportamiento del agregado reciclado tratado y reciclado sin tratar no existe mucha diferencia.

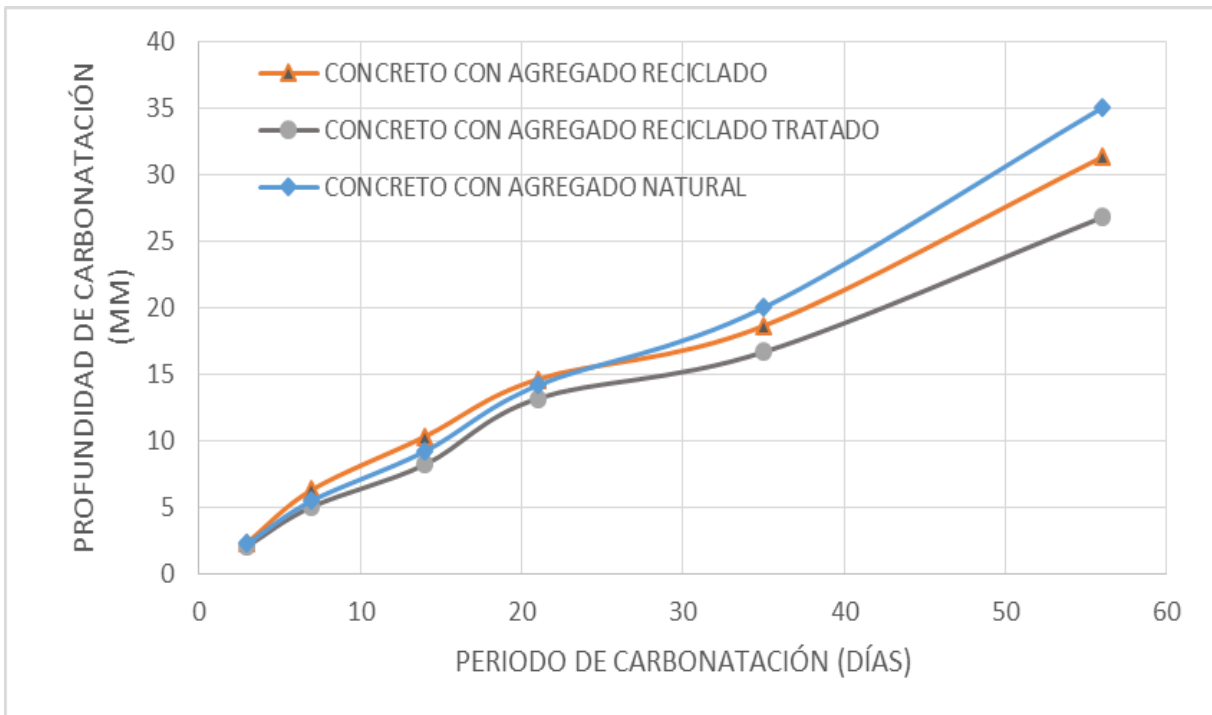


Figura 3.25.- Comportamiento de la carbonatación en el concreto.

3.8.5 POTENCIAL DE CORROSIÓN

La prueba de potencial de corrosión se llevó a cabo como lo marca la norma ASTM C-876-09; se evaluaron las probetas que tenían acero de refuerzo antes y después de la carbonatación (Figura 3.26).



Figura 3.26.- Prueba de potencial de corrosión.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.27. Teniendo la siguiente nomenclatura: Concreto con Agregado Reciclado Tratado (CART), Concreto con Agregado Natural (CAN) y Concreto con Agregado Reciclado sin tratamiento (CAR).

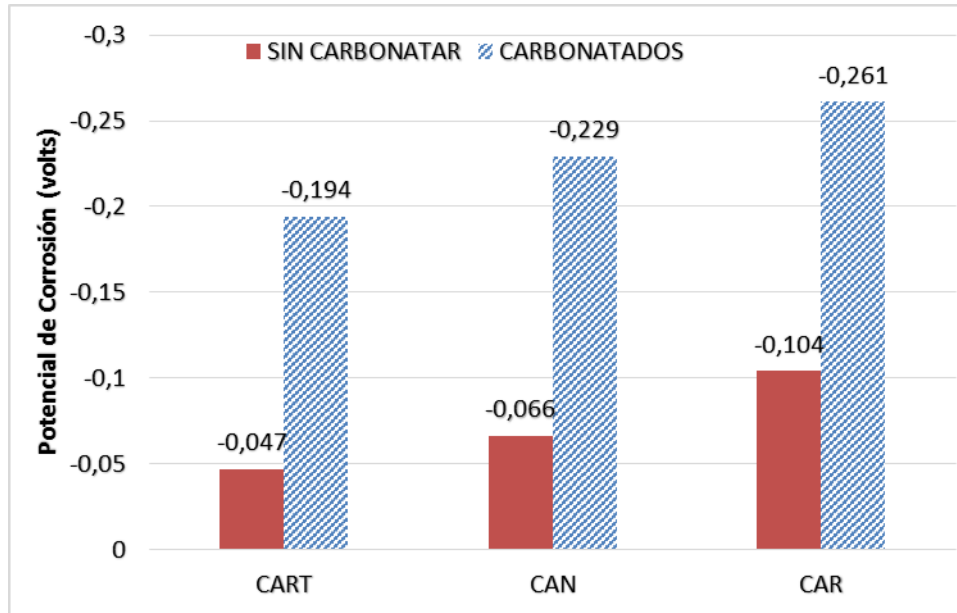


Figura 3.27.- Resultados de potencial de corrosión.

Se puede observar que antes de la inducción de la carbonatación acelerada los potenciales son bajos ya que el concreto se encuentra en buenas condiciones, posteriormente después de la carbonatación los potenciales se encuentran en la zona incierta de corrosión de acuerdo con la tabla 2.24 y ya se ha iniciado la corrosión de las probetas con acero de refuerzo. Se observa que para probetas con agregados reciclados tratados los valores de potencial tienden a ser menores.

3.8.6 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Las pruebas de resistividad eléctrica se llevaron a cabo utilizando el método de las cuatro puntas ya que es útil para medir resistencias muy bajas como es en el concreto; mide cuanto se opone el concreto al paso de la corriente (Figura 3.28).

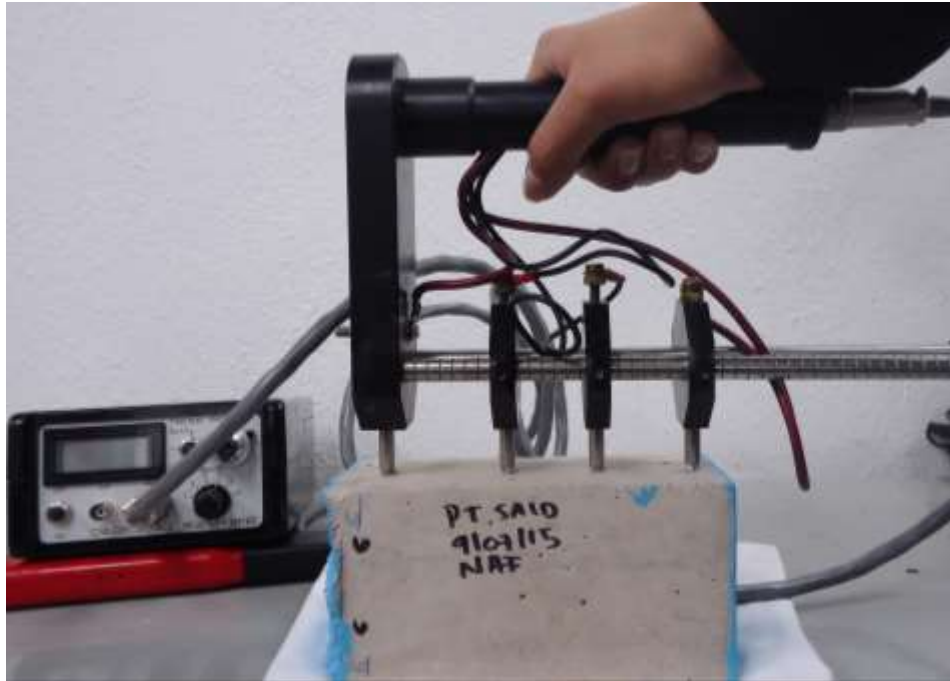


Figura 3.28.- Prueba de resistividad eléctrica del concreto.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.29.

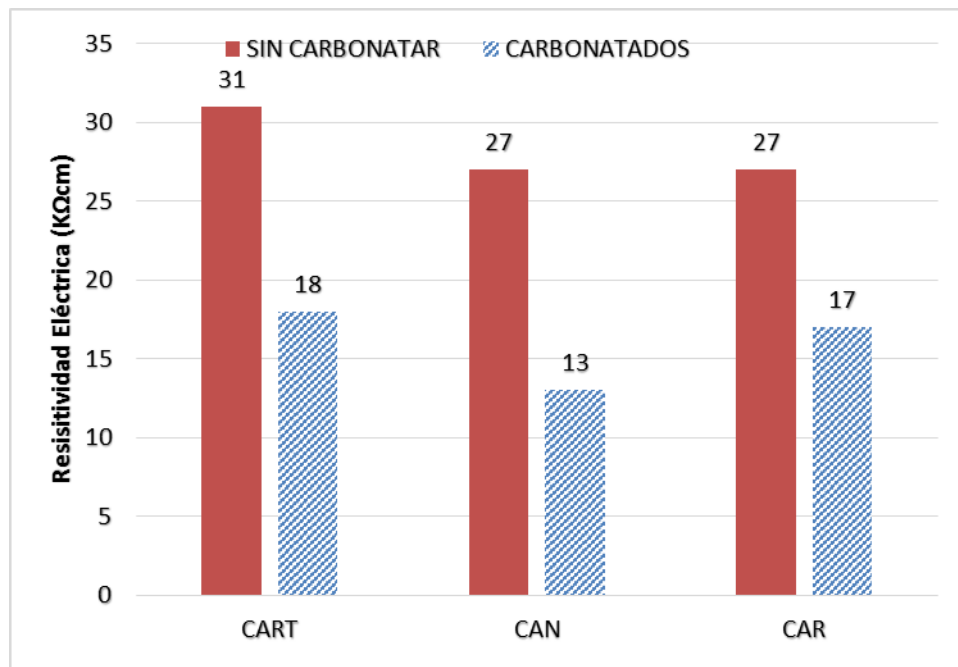


Figura 3.29.- Resultados de la resistividad eléctrica del concreto.

Como se observa en la figura anterior y comparando los resultados con los de la tabla 2.3, valores de resistividad mayores de 20 kΩcm, la probabilidad de corrosión es baja y el concreto está en buenas condiciones. El concreto con agregado reciclado tratado (CART) muestra mejor comportamiento antes de la carbonatación teniendo una mayor resistividad eléctrica. Una vez que al concreto se le introdujo la carbonatación acelerada, la resistividad disminuye por debajo de 20 kΩcm. Y esto según la tabla 2.3 el acero de refuerzo embebido en el concreto tiene un inicio moderado de corrosión. También se observa que después de la carbonatación el concreto con agregado reciclado tratado (CART) presenta mayor resistividad eléctrica esto indica un buen comportamiento del mismo.

A continuación (figura 3.30) se presenta una comparativa del concreto antes de carbonatarse donde se comparan los valores de potencial de corrosión y resistividad eléctrica.

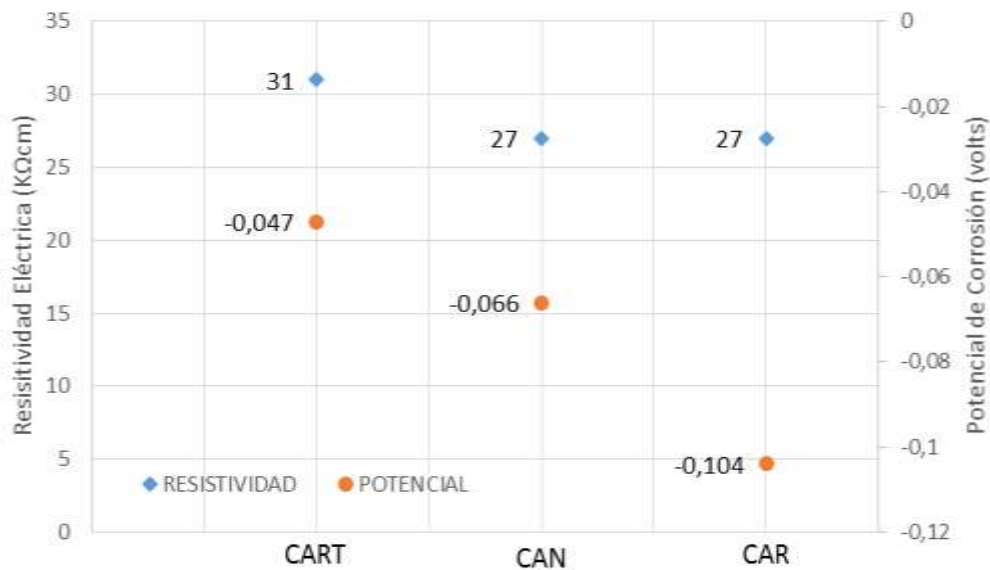


Figura 3.30.- Valores de resistividad y potencial antes de la carbonatación.

En la figura 3.31 se muestran los valores de potencial y resistividad después del proceso de carbonatación acelerada.

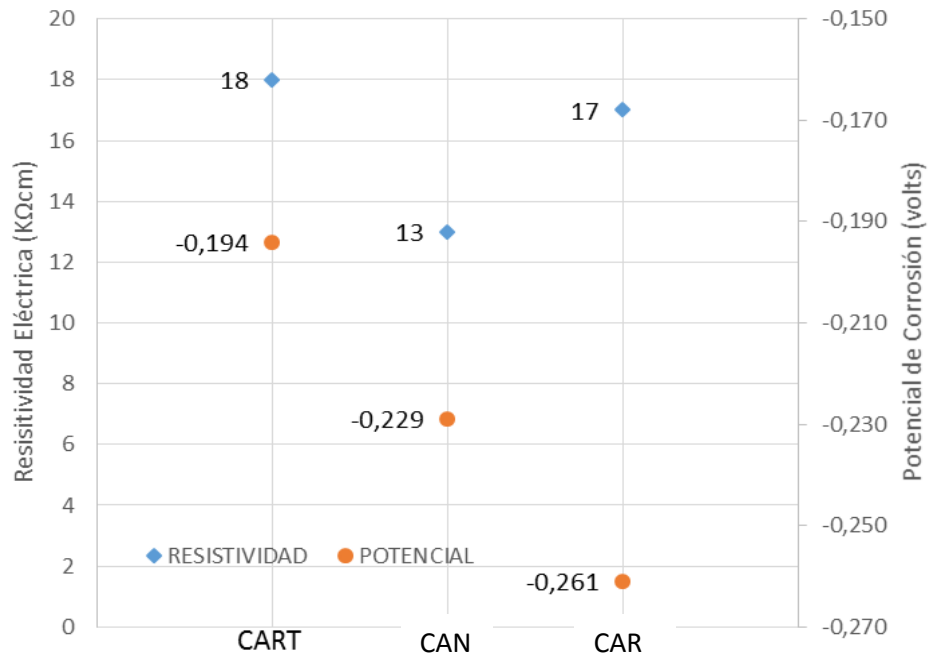


Figura 3.31.- Valores de resistividad y potencial después de la carbonatación.

A continuación se muestran cortes de distintos tipos de probetas, antes y después de la carbonatación.



Figura 3.32.- Concreto con agregado natural antes de la carbonatación.



Figura 3.33.- Concreto con agregado reciclado antes de la carbonatación.

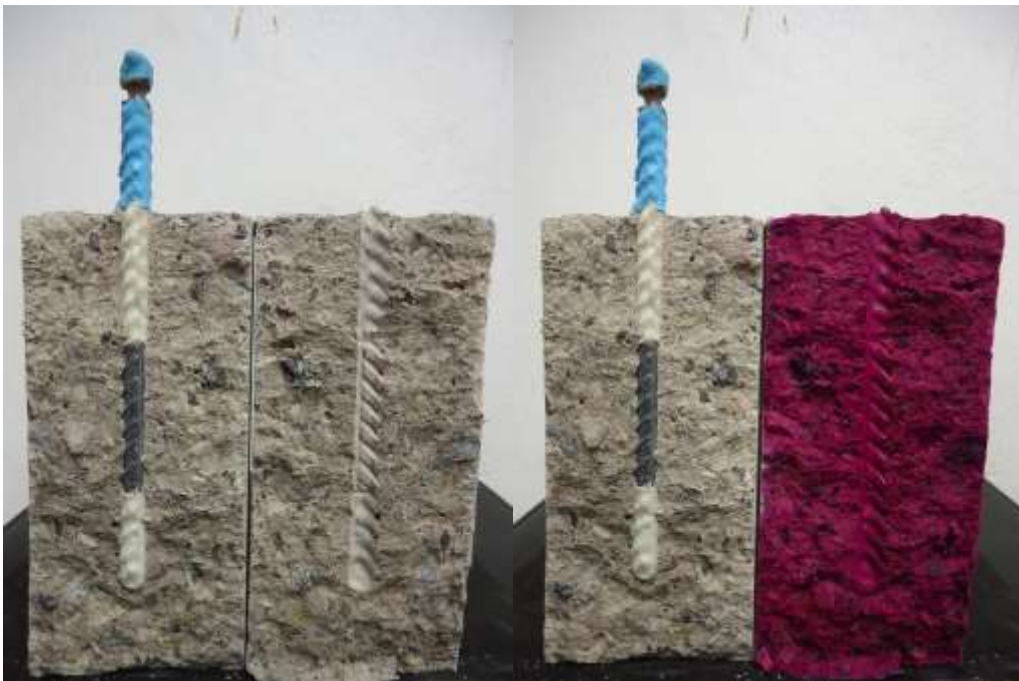


Figura 3.34.- Concreto con agregado reciclado tratado antes de la carbonatación.



Figura 3.35.- Concreto con agregado natural carbonatado.



Figura 3.36.- Detalle del concreto con agregado natural carbonatado.



Figura 3.37.- Concreto con agregado reciclado carbonatado.



Figura 3.38.- Detalle concreto con agregado reciclado carbonatado.

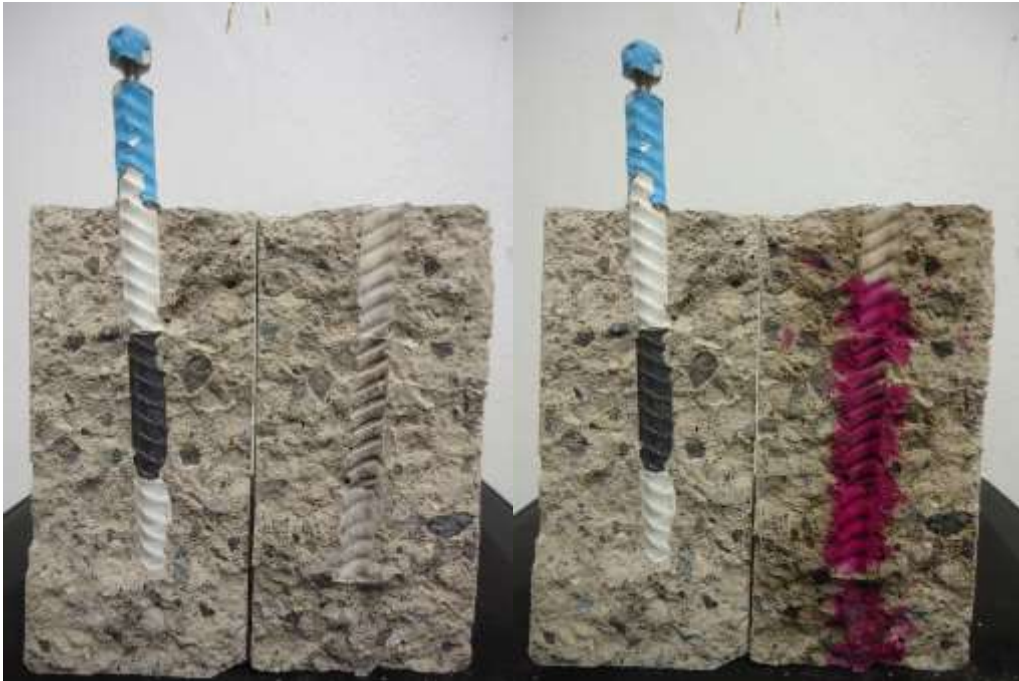


Figura 3.39.- Concreto con agregado reciclado tratado carbonatado.



Figura 3. 40.- Detalle concreto con agregado reciclado tratado carbonatado.

En las figuras anteriores se puede observar la aplicación de fenolftaleína antes de la inducción de la carbonatación acelerada y todas presentan una buena coloración porque el concreto está sin carbonatar. Sin embargo, después inducirse la carbonatación el concreto con agregado natural y el concreto con agregado reciclado al aplicar la fenolftaleína ya no se colorean debido a que su pH se encuentra por debajo de 9.0, en tanto que la probeta elaborada con agregado reciclado tratado en la zona centro donde se ubica la varilla mantiene un pH alcalino, esto quiere decir que el tratamiento retrasa la carbonatación en este tipo de concreto.

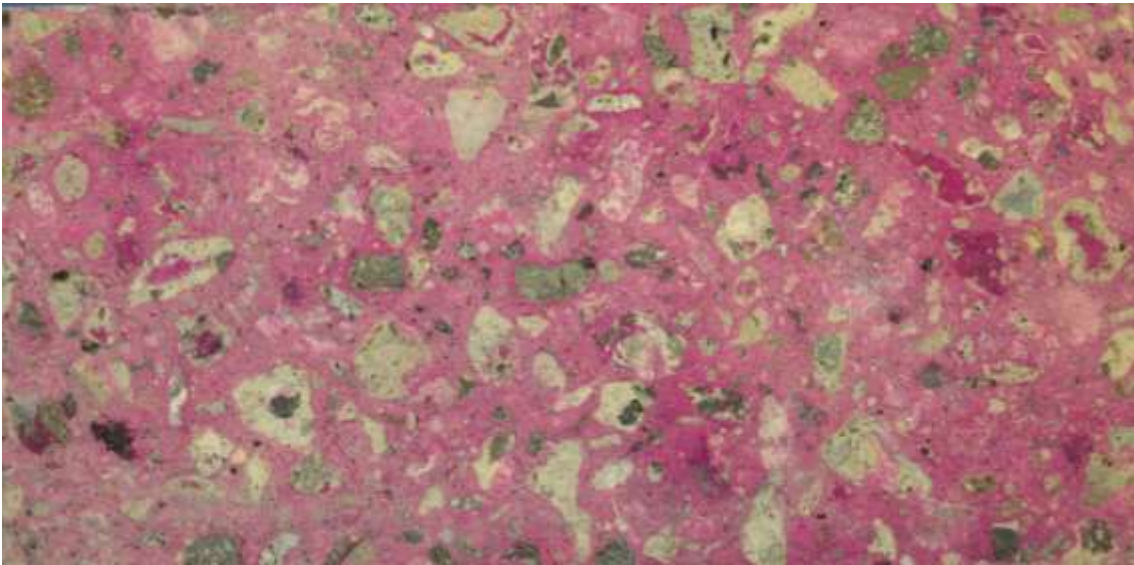


Figura 3.41.- Fases del concreto entre agregado reciclado y pasta nueva.

En la figura 3.41 se observa una probeta fabricada con agregados reciclados en donde se le hizo una prueba de fenolftaleína en la cual solo se coloreo la pasta nueva y varios agregados reciclados quedan sin colorear por tener un Ph menor, en este caso se observa la fase entre agregados reciclados y la pasta nueva en este concreto hecho a base de agregados reciclados.

3.8.6 PRUEBA DE PERMEABILIDAD DEL ION CLORURO

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro. Se llevó a cabo como lo marca la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014.

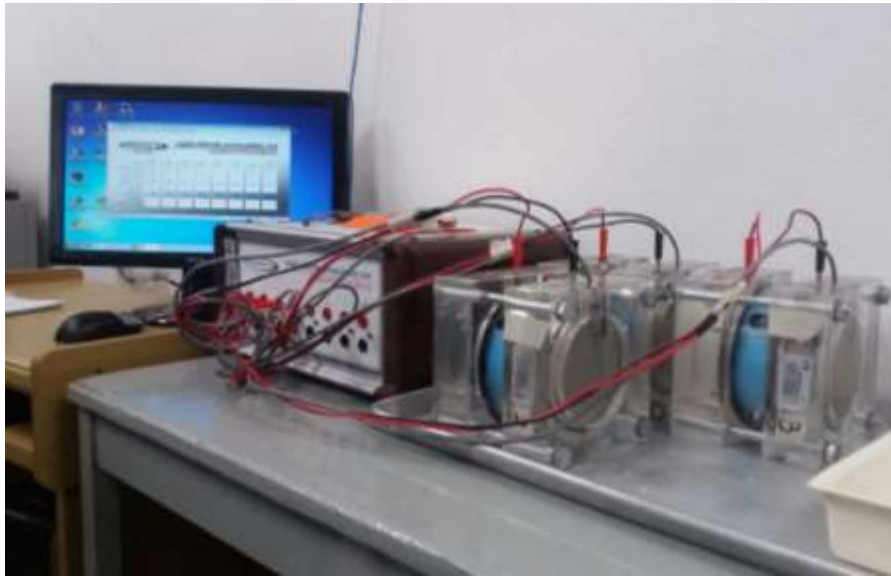


Figura 3.42.- Prueba de permeabilidad ion cloruro.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de esta prueba con tres muestras de concreto de cada tipo.

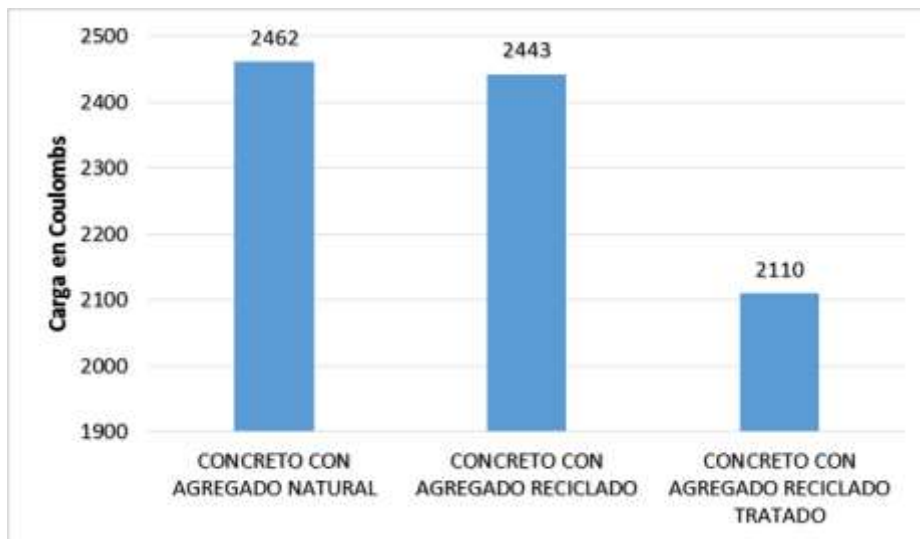


Figura 3.43.- Gráfica de permeabilidad ion cloruro.

De acuerdo con la tabla 2.2 del capítulo dos estos concretos se clasifican con permeabilidad moderada; se puede decir que el concreto con agregado reciclado tratado presenta 14% menor permeabilidad en comparación con el concreto con agregados naturales y 14.3% menor permeabilidad en comparación con el concreto con agregado reciclado sin tratar. Esto muestra un mejor comportamiento del concreto con agregado reciclado tratado, es decir, indica que el concreto con agregados reciclados tratados es menos permeable al ion cloruro, resiste mas al paso de la corriente eléctrica.

3.9 ANÁLISIS DE COSTO DEL CONCRETO

A continuación se analiza el costo por metro cúbico de cada concreto, los precios de los materiales cotizados al mes de enero del 2016. El análisis se llevo a cabo en base a la dosificación utilizada para cada tipo de concreto. En la siguiente tabla se muestra el precio obtenido para cada uno, Concreto con Agregado Natural (CAN), Concreto con Agregado Reciclado (CAR), Concreto con Agregado Reciclado Tratado (CART).

Tabla 3.14.- Costo del concreto por metro cúbico.

| MATERIALES | COSTO | CANTIDAD X M ³ | PRECIO POR M ³ (CAN) | PRECIO POR M ³ (CAR) | PRECIO POR M ³ (CART) |
|----------------------------------|-------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| CEMENTO (saco de 50 kg.) | \$135 | 422 | \$1139.40 | \$1139.40 | \$1139.40 |
| GRAVA NATURAL (M ³) | \$275 | 0.56 | \$154 | --- | --- |
| GRAVA REICLADA (M ³) | \$212 | 0.56 | --- | \$118.72 | \$118.72 |
| ARENA NATURAL (M ³) | \$260 | 0.58 | 150.80 | \$150.80 | \$150.80 |
| AGUA (M ³) | \$3 | 0.228 | \$0.68 | \$0.68 | \$0.68 |
| SELLADOR (LT) | \$53 | 5 | --- | --- | \$265.00 |
| TOTAL | | | \$1444.88 | \$1409.60 | \$1674.60 |

El tratamiento que se le realiza al agregado reciclado como se puede observar en la tabla aumenta su costo, esto se compensa con las propiedades que se obtienen en cuanto a resistencia mecánica, retraso de la carbonatacion y buena adherencia. El concreto con agregado reciclado tratado aumenta un 14% el costo en comparacion al de un concreto con agregado natural, esto se debe al tipo de sellador utilizado en este trabajo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

El objetivo de la presente tesis fue evaluar el comportamiento físico y mecánico de concreto grado estructural, elaborado con agregado grueso tratado con un sellador base polímero. En una primera etapa, se obtuvieron los residuos de concretos viejos (elementos estructurales, probetas de concreto, etc.), particularmente los que provienen de los desechos del laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. De manera paralela, mediante el empleo de una trituradora de quijadas, dichos residuos fueron transformados en agregado grueso reciclado con una granulometría de tamaño nominal de 12.7 mm.

En una segunda etapa, se llevó a cabo una investigación de mercado para seleccionar y adquirir diferentes tipos y marcas de selladores poliméricos, conocidos éstos tradicionalmente como productos de sellado para mampostería y concreto. En total fueron ubicados diez diferentes productos. Con el propósito de evaluar estos selladores, se diseñó una campaña de pruebas, la cual consistió en impregnar por inmersión (24 hrs) las distintas muestras de agregado tratadas con los selladores. En este sentido, se detectaron variaciones en el grado de impregnación (profundidad de penetración) del sellador en la estructura de poro del agregado reciclado, esto puede ser explicado en términos de las diferentes calidades de agregados reciclados, es decir, la porosidad de la pasta es distinta según la relación agua/cemento utilizada.

El criterio de selección para obtener el mejor sellador, se basó en la obtención de la mayor resistencia a tensión diametral de probetas cilíndricas elaboradas con los diferentes agregados tratados. De estos resultados se desprende que el sellador de base química *Estiren-Acrílico* favoreció la mayor resistencia mecánica de las probetas; de acuerdo con la literatura éste tipo de compuesto es usado frecuentemente para fabricar impermeabilizantes.

Con el fin de evaluar el comportamiento de los agregados reciclados tratados, también se usaron agregados reciclados no tratados y agregado grueso natural de origen andesítico. Se obtuvieron las propiedades físicas de los tres tipos de agregados. El diseño de la mezclas se hizo para $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, se uso una resistencia de sobre diseño 50 kg/cm^2 , por lo tanto los tres tipos de mezclas fueron calculadas para un $fcr = 300 \text{ kg/cm}^2$, usando las mismas cantidades de materiales para las tres mezclas.

De acuerdo con las propiedades físicas obtenidas de este estudio, se desprende que el agregado reciclado sin tratar presentó una absorción de agua de 9.5%, lo que significa estar dentro del rango encontrado por otros autores (0.8 a 13%). Una vez realizado el tratamiento con el sellador Estiren-Acrílico, la absorción disminuyó a 5.8%, de esta manera se corrobora el efecto benéfico en el decremento de la absorción. Por otro lado, desde el punto de vista de la densidad volumétrica de los agregados, la norma NMX C-299 establece que el valor límite máximo para considerarse agregados ligeros es de 900 kg/m^3 , en este sentido, los agregados reciclados tratados presentaron un valor de 1136 kg/m^3 , por lo tanto pueden ser considerados como agregados para concretos convencionales. En cuanto a la densidad, se obtuvo un valor de 2.26 kg/dm^3 , mismo que puede ser considerado normal para este tipo de agregado, incluso puede ser equiparable con un agregado natural de tipo andesita. El coeficiente volumétrico de forma del agregado reciclado tratado fue de 0.26, situándose éste como de buena forma de acuerdo con la especificación de la norma NMX C-111. Otro parámetro importante de los agregados reciclados es el contenido de mortero adherido, en este estudio se encontró un valor de 33%, mismo que corresponde al intervalo de 25-60% reportados en la literatura.

El comportamiento mecánico del concreto con agregado reciclado fue evaluado mediante pruebas de resistencia a compresión, tensión diametral y módulo de elasticidad. En relación con el esfuerzo de tensión, los valores encontrados fueron de 29 kg/cm^2 para concreto con agregado natural, 27 kg/cm^2 para concreto con agregado reciclado sin tratar y 26 kg/cm^2 para concreto con agregado reciclado tratado, de estos resultados se desprende que no hay una influencia importante del sellador en la adherencia entre la pasta y el agregado. En cuanto a resistencia a compresión, como se esperaba el concreto elaborado con agregado natural tuvo el mejor comportamiento con un esfuerzo de 284 kg/cm^2 , en tanto que el concreto con agregado reciclado tratado alcanzó un valor de 271 kg/cm^2 , es decir apenas un 5% menos que el natural, el valor más bajo de resistencia de 252 kg/cm^2 fue para el concreto con agregado reciclado sin tratar; de estos resultados se desprende que el tratamiento con sellador Estiren-Acrílico incrementa la resistencia en compresión en 8%. En relación con el módulo de elasticidad, se obtuvo un valor de 157309 kg/cm^2 para concreto con agregado natural,

de 150 775 kg/cm² para concreto con agregado reciclado y 155669 kg/cm² para concreto con agregado tratado con sellador; efectivamente se corrobora que el módulo de elasticidad para concretos con agregado reciclado tiende a disminuir, no obstante comparando los resultados de concreto con agregado natural y concreto con agregado reciclado tratado no hay diferencias significativas. Asimismo, tomando en consideración la fórmula para estimación del módulo de elasticidad propuesta por las NTC-Estructuras de Concreto, para concreto Clase 2 ($8000 \sqrt{f'c}$), se observa que los valores experimentales con agregado reciclado tratado son 15% más altos que los obtenidos con la referida fórmula.

En el presente estudio también se evaluó el comportamiento de durabilidad del concreto fabricado con agregados reciclados tratados con sellador polimérico de Estiren-Acrílico. Los parámetros utilizados para esta etapa fueron la velocidad de carbonatación, potencial de corrosión, resistividad eléctrica y la permeabilidad al ion cloro.

Desde el punto de vista de la carbonatación, se observó que durante los primeros 20 días de inducción del proceso acelerado, no hubo diferencias significativas en la velocidad de carbonatación, no obstante después de este tiempo y hasta el final del periodo de inducción se detectó que el concreto con agregado natural presentó la mayor tasa de carbonatación y el concreto con agregado reciclado tratado mostró la menor velocidad de carbonatación. Las constantes de carbonatación acelerada "K" (10% CO₂) encontradas fueron las siguientes: 68 mm/año^{1/2} para concreto con agregado reciclado tratado, 72 mm/año^{1/2} para concreto con agregado reciclado y 89 mm/año^{1/2} para concreto con agregado natural, considerando que los tres tipos de concreto fueron elaborados y curados bajo las mismas condiciones y además con idénticas cantidades de materiales, el efecto de las diferencias pudiera ser atribuido a cambios químicos y de porosidad en la zona de transición, en este sentido se propone que en futuras investigaciones se lleve a cabo un estudio minucioso microscópico de la zona de transición que explique el estatus que guarda ésta región.

En lo que respecta a los potenciales de corrosión se puede decir que antes de la carbonatación los resultados fueron como se esperaba, es decir, potenciales de corrosión bajos que indicaban según la tabla 2.4 que hay 90% de probabilidad que no

haya corrosión en el acero, ya que el concreto se encontraba en buenas condiciones de alcalinidad. Después de inducirle la carbonatación acelerada los potenciales se volvieron más negativos entrando en la zona de incertidumbre ya que los valores promedio oscilaban entre -0.19 y 0.27; de acuerdo con la tabla que se mencionó anteriormente y las fotografías obtenidas indican que hay inicios de corrosión en el acero de refuerzo.

En cuanto a la resistividad eléctrica, se encontró que el concreto fabricado con agregado reciclado tratado mostró un mejor comportamiento dando una mayor resistividad eléctrica aunque en todos los casos los valores fueron superiores a 20 kΩcm., lo que se traduce en una baja probabilidad de que se produzca la corrosión, según la tabla 2.3. La resistividad eléctrica del concreto después de inducir la carbonatación acelerada disminuyó a valores de entre 10 y 20 kΩcm. Lo que quiere decir que hay baja o moderada probabilidad de corrosión, según la tabla anteriormente mencionada. En los tres tipos de concreto los resultados fueron similares.

En relación con las pruebas de permeabilidad al ion cloruro se encontró que para concreto con agregado natural la carga pasada fue de 2462 C, para concreto con agregado reciclado no tratado fue de 2443 C y para concreto con agregado reciclado no tratado fue de 2110 C; en general se puede decir que los niveles de carga para estos concretos corresponden a una permeabilidad moderada, no obstante, se observa que el concreto con agregado tratado presenta el valor más bajo de permeabilidad; esto pudiera ser atribuido una vez más al efecto de la zona de transición, es decir, probablemente la porosidad en esa región está influyendo en la permeabilidad global del concreto, esto parece corresponder con las velocidades de carbonatación encontradas en este estudio.

Después de un análisis de costos de concretos utilizados en esta investigación, se obtuvo que el precio por metro cúbico de concreto con agregado reciclado tratado es 16% mayor con respecto al del concreto hecho con agregados reciclados sin tratar. Por otro lado, considerando el costo referenciado a concreto con agregado natural, se encontró un incremento del 14%. No obstante lo anterior, en general se observa que los

beneficios del tratamiento pueden verse reflejados en el mejoramiento de propiedades mecánicas y de durabilidad.

Finalmente, de este estudio se concluye que es posible utilizar agregados reciclados provenientes de concretos de demolición. Particularmente, se encontró un mejoramiento en propiedades mecánicas y de durabilidad, cuando el agregado es impregnado con un sellador de base química de Estiren-Acrílico.

4.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Estudiar una gama más amplia de selladores que pudieran ser utilizados para dar un tratamiento a los agregados reciclados.
- Hacer un estudio a nivel microestructural para valorar el efecto del sellador a nivel de la zona de interfaz entre la pasta nueva y pasta del agregado reciclado tratado.
- Proponer y estudiar otros tipos de tratamientos que pudieran ser implementados en los agregados reciclados.
- Promover el estudio exploratorio de otras posibilidades de aplicación de los agregados reciclados.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 201.2R-01. Guide to Durable Concrete.
- ACI 211.1R-02 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- ACI 555 R-01. Removal and Reuse of Hardened Concrete.
- Adam M. Neville. Tecnología del concreto, 1999, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- Anna M. Grabiec, Justyna Klama, Daniel Zawal, Daria Krupa, (2012), Construction and Building Materials, No. 34, Pág. 145-150.
- ASTM C 876 -09. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- European Demolition Association (EDA). "Demolition and construction debris: Questionnaire about an EC priority waste stream." The Hague 1992.
- Hansen, T. C., ed., 1992, "Recycling of Demolished Concrete and Masonry," *RILEM Report 6*, Chapman and Hall, London.
- Kendel Frank, Raul Jauberthie and Grantham Mike, 2002, "Deteriorated Concrete" Inspection and Physicochemical Analysis, Thomas Telford, London.
- Kumar Mehta y Paluo Monteiro (1998). Concreto, estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. México.
- Mena Ferrer Manuel. Durabilidad de estructuras de concreto en México. 2005, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- León Fernández Orozco. Laboratorio de Materiales de Construcción y Control de Calidad. Construcción I. tomo I. 2009 Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Reformada 2013. Diario Oficial de la Federación.

- Malhotra, V.M., 1969, "A Low-cost Concrete Building," Engineering News Record, pp. 62-63.
- Malhotra, V. M., 1976, "Use of Recycled Concrete as a New Aggregate," Report 76-18, Canada Center for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Canada.
- Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (1994), "Concreto: Estructura, propiedades y materiales" editora Peni san Pablo, pág. 553.
- Marta Sánchez de Juan. (2004) "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 77.
- Martínez Soto Iris Esmeralda (2005) "Reciclaje de concreto premezclado para la fabricación de agregados" Universidad Nacional Autónoma de México pág. 31.
- RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Recycled Aggregates and Recycled Aggregates concrete. Recycling of demolished concrete and Masonry. RILEM Report 6.London SE 18, first edition 1992.
- Nicholas Lippiatt, Florent Bourgeois (2012), "Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing" journal Minerals Engineering No. 31 pág. 71–81.
- Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-030-ONNCCE-2004
Industria de la construcción – Agregados – Muestreo.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004
Industria de la construcción – Agregados – Masa volumétrica – Método de Prueba.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-077- ONNCCE-1997

Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis
Granulométrico – Método de prueba.

- Norma Oficial Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002
Industria de la construcción – Determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004
Industria de la construcción – Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de prueba.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-128-ONNCCE-1997
Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión-Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de poisson.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014
Industria de la construcción – Concreto Hidráulico – Dosificación en masa – Especificaciones y métodos de ensayo.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-156-ONNCCE-2010
Industria de la construcción – Concreto Hidráulico – Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-157-ONNCCE-2006
Industria de la construcción – Concreto Hidráulico – Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-162-ONNCCE-2010
Industria de la construcción – Concreto Hidráulico – Determinación de la masa unitaria, cálculo de rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2002
Industria de la construcción - Agregados - determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.

- Norma Oficial Mexicana NMX-C-170-ONNCCE-1997
Industria de la construcción – Agregados – Reducción de las muestras de Agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-299-ONNCCE-2010.
Industria de la construcción – Concreto hidráulico estructural – Agregados ligeros – Especificaciones y métodos de ensayo.
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-436-ONNCCE-2004
Industria de la construcción – Agregados para concreto – coeficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso – método de prueba.
- Norma Oficial Mexicana NMX-K-227. Método de prueba determinación de la viscosidad mediante el viscosímetro Stormer.
- Norma Oficial Mexicana NMX-U-024. Pinturas, barnices, lacas y productos relacionados, determinación de la densidad absoluta.
- Norma Oficial Mexicana NMX-U-093. Pinturas, recubrimientos y productos a fines, determinación de brillo.
- Norma ASTM C- 33 standard specification for concrete aggregates.
- Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-rnat-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el distrito federa.
- Sallehan Ismail, Mahyuddin Ramli, (2013) “Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications”, journal: Construction and Building Materials, Pág. 464-476.
- Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon (2010), “Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates” Cement & Concrete Composites vol.32, Pág. 649–654.

- Valerie Spaeth, Assia Djerbi Tegguer,(2013), “Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments” International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 2 Pág. 143–152.
- Vidaud Quintana Eduardo, Vidaud Quintana Ingrid (2015), “Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados” Revista Construcción y Tecnología en Concreto. Noviembre 2015 pág. 22-27.
- Verbeck, G.J.,(1958), “Carbonation of Hydrated Portland Cement”, Research Department Bulletin RX087, Portland Cement Association.
- Ya-Guang Zhu, Shi-Cong Kou (2013). “Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete”, Cement & Concrete Composites.
- Yuwu Sui, Anette Mueller, (RILEM 2012) “Development of thermo mechanical treatment for recycling of used concrete” Materials and Structures, Volume 45, Number 10.
- Zhan Bao-jian, Poon Chi-Sun (2014), “Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates”, Cement & Concrete Composites, Pág. 22–28.