



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA**

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS CLASIFICADOS POR EL CRITERIO DE pH

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**IRVING ROBERTO AGUILAR GARCÍA
ARTURO SEBASTIAN GALINDO LUNA
MARCO ANTONIO ORTÍZ IBARRA**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO JAVIER OLGUÍN COCA

CODIRECTOR:

DR. LUIS DAIMIR LÓPEZ LEÓN

PACHUCA DE SOTO, HIDALGO, MÉXICO



Oficio No: INCI/AAI/686/2015

M. en C. Cesar Leines Medécigo
Director de Administración Escolar de la UAEH
Presente

Por este conducto le comunico que el **Jurado** asignado a los pasantes **Irving Roberto Aguilar García, Arturo Sebastián Galindo Luna y Marco Antonio Ortiz Ibarra** quienes presentan el trabajo de tesis con el Título **“Análisis del comportamiento mecánico del concreto elaborado con agregados reciclados clasificados por el criterio de pH.”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

Presidente: Ing. Alfredo Romero González
Secretario: Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola
Primer Vocal: Dr. Francisco Javier Olguín Coca
Segundo Vocal: Dra. Yamile Rangel Martínez
Tercer Vocal: Arq. Valeria Volpi León
Primer Suplente: Ma. Del Refugio González Sandoval
Segundo Suplente: Dr. Luis Daimir López León

Sin otro particular y no dudando de su apoyo, aprovechamos para reiterarle las seguridades de nuestra distinguida consideración.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”
Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 2 de noviembre de 2015.

Dr. Francisco Javier Olguín Coca
Coordinador de la Licenciatura de Ingeniería Civil



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
Colonia Carboneras
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Tel. +52 771 7172000 exts. 4000 y 4001, Fax 2109
aai_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

Resumen

El concreto reciclado es una alternativa para el uso de concreto convencional, este es usado para favorecer el desarrollo sostenible en el ámbito de la construcción, por medio de la reutilización de los desechos producidos por la misma. El objetivo de este trabajo es clasificar el concreto demolido de acuerdo con su pH y analizar si existe una relación directa entre la resistencia a la compresión de un concreto reciclado y el pH de los agregados que este contiene. Se decidió utilizar la clasificación de las muestras por este criterio, debido a la poca existencia de estudios que relacionen la resistencia a la compresión y el pH del concreto. En el proceso de metodología experimental se realizaron las pruebas necesarias; absorción, densidad relativa, módulo de finos y peso específico de los sólidos para conocer las propiedades de los agregados reciclados clasificados previamente, ya que dichas propiedades son fundamentales para realizar un diseño de mezcla óptimo según los criterios del *American Concrete Institute*. Partiendo del diseño antes mencionado se procedió a elaborar 2 especímenes por cada muestra de pH (9, 10, 11, 12), que fueron sometidos a la prueba de compresión bajo la norma NMX-C-083-ONNCE-2002. En todos los especímenes se realizó un proceso de curado por el método de inmersión, al cual fueron sometidos por 28 días, sumergidos en un tanque con agua. Para establecer un parámetro del valor del pH para el concreto elaborado con agregados naturales se elaboraron especímenes con estos agregados, siguiendo los mismos criterios de proporciones de los materiales y el tiempo de curado al que fueron sometidos mismo que fue usados para los especímenes con agregados reciclados, así también se realizó una comparativa de la resistencia que alcanzó cada espécimen con agregados reciclados respecto de la resistencia de los especímenes con agregados naturales para determinar cómo varía su resistencia a la compresión al utilizar los agregados reciclados.

Los resultados de las pruebas de compresión indicaron que la resistencia de los especímenes con agregados naturales presentan una resistencia superior en comparación con los especímenes con agregados reciclados sin importar el pH del concreto reciclado con el que fueron elaborados, todos los especímenes de agregados reciclados obtuvieron resultados de resistencia similares, concluyendo que la variación de pH en el concreto no es directamente proporcional a la resistencia del mismo.

ÍNDICE

CAPITULO 1. GENERALIDADES	5
1.1 Introducción	5
1.2 Antecedentes	5
1.3 Problemática	6
1.4 Justificación	7
1.5 Hipótesis	7
1.6 Objetivo general	7
1.7 Objetivos específicos	7
1.8 Metas	8
1.9 Metodología	8
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Concreto	11
2.3 Clasificación del concreto según su fluidez	11
2.4 Clasificación según su resistencia a la compresión	11
2.5 Tipos de curado	11
2.6 Inundación o inmersión	13
2.7 Curado con vapor	13
2.8 Cemento	14
2.9 Clasificación del concreto según su procedencia	16
2.10 Clasificación del concreto según su densidad	16
2.11 Concreto reciclado	16
2.12 Carbonatación	16
2.13 Agregado grueso	17
2.14 Agregado fino	18
2.16 Agua de lavado de agregados	18
2.17 Agua de mezclado	18
2.18 Agua de curado	19
2.19 Calidad del agua	19
2.20 Efecto de las impurezas en el agua de mezcla	20
2.21 Aspectos históricos	20
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Materiales	24
3.2 Recolección de muestras	24

3.3	Proceso de trituración	24
3.4	Granulometría	25
3.5	Medición de pH.....	26
3.7	Prueba de densidad relativa.....	29
3.8	Prueba de módulo de finos.....	30
3.9	Prueba de peso específico de los sólidos	30
3.10	Diseño de mezcla por el método ACI	31
3.11	Resistencia a la compresión	32
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1	Granulometría	34
4.2	Clasificación según el pH	34
4.3	Porcentaje de absorción	35
4.4	Densidad relativa de los materiales	37
4.5	Peso específico de los sólidos	37
4.6	Diseño de mezclas	38
4.7	Prueba de resistencia a la compresión	39
4.8	pH post-tronado.....	39
	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
5.1	Conclusiones	41
5.2	Recomendaciones.....	41
	LITERATURA CITADA	42

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1.1 Clasificación y elementos de mezclas.....	9
Grafica 2. 1 Ciclo de curado a vapor (Association, 2013).....	12
Grafica 2. 2 Resistencia del concreto de acuerdo al tipo de curado (Association, 2013)	14
Gráfica 4. 1 Curva granulométrica	34
Gráfica 4. 2 Porcentajes de absorción agregados gruesos reciclados	36
Gráfica 4. 3 Porcentajes de absorción agregados naturales	36
Gráfica 4. 4 Densidad de la grava	37
Gráfica 4. 5 Peso específico de los solidos.....	38
Gráfica 4. 6 Resultado de pruebas a la compresión	39
Gráfica 4. 7 Comparativa pH concreto post-tronado	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Dimensión de cilindro	10
Figura 3. 1 Trituración de concreto	25
Figura 3. 2 Muestra de granulometría.....	26
Figura 3. 3 Calibrado del medidor de pH	27
Figura 3. 4 pH de concreto reciclado.....	27
Figura 3. 5 pH de concreto reciclado.....	28
Figura 3. 6 pH de concreto reciclado.....	28
Figura 3. 7 Absorción de materiales	29
Figura 3. 8 Densidad de agregados gruesos	30
Figura 3. 9 Peso específico de solidos	31
Figura 3. 10 Prueba de resistencia a la compresión	33
Figura 3. 11 Prueba de resistencia a la compresión	33
Figura 4. 1 Niveles de pH obtenidos por muestra.....	34
Figura 4. 2 Grupos de pH en base a rangos	35
Figura 4. 3 Nuevo pH de la muestra con pH original de 12	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. 4 Nuevo pH de la muestra con pH original de 11.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. 5 Nuevo pH de la muestra con pH original de 10.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. 6 Nuevo pH de la muestra con pH original de 9	¡Error! Marcador no definido.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

El concreto es uno de los materiales más importantes y más empleados en la construcción. Este regularmente está compuesto por una mezcla de agregados finos y gruesos de origen natural designados para este trabajo como agregados naturales (AN) y un componente aglutinante, normalmente cemento Portland. Estos al ser mezclados con agua reaccionan en conjunto para crear un material de alta resistencia a la compresión. A lo largo de la historia se han probado diferentes combinaciones de agregados y componentes aglutinantes, esto con el objeto de lograr mejorar el comportamiento del material a las fuerzas y esfuerzos a los que se verá sometido durante su vida útil. Durante las últimas dos décadas se ha tratado de implementar el diseño sostenible en el ámbito de la construcción, desde reutilizar piedras en muros para cimentaciones hasta reutilizar el asfalto en calles y avenidas para volverlo a incorporar en la rehabilitación del camino, siendo parte de este intento el uso de los materiales reciclados. En este documento se presenta un análisis del comportamiento mecánico de un concreto elaborado con agregados reciclados gruesos (ARG) entendiendo por comportamiento mecánico la resistencia a compresión; por reciclados se hace referencia a productos de la trituración de concretos demolidos o de desperdicio. Teniendo presente que para lograr un diseño sostenible exitoso se debe considerar las ventajas y desventajas del diseño propuesto comparado con las alternativas existentes, se presentarán comparativas del comportamiento del concreto con materiales reciclados y el concreto convencional. Dentro del análisis realizado se tienen pruebas para la medición del comportamiento del material de estudio a fuerzas de compresión. Con esta investigación se busca conocer el comportamiento que puede alcanzar un concreto cuando se implementan agregados reciclados gruesos, para establecer dichos parámetros, se realizarán cuatro muestras de diferentes pH cada una, que parten desde pH 12 (agregados naturales), 11, 10 y 9. El análisis realizado está fundamentado con pruebas y ensayos hechos con materiales de la zona de Pachuca en el estado de Hidalgo por lo que los parámetros que se establecen son aplicables a condiciones climatológicas y materiales similares.

1.2 Antecedentes

El tema que se abarca en este trabajo está enfocado al análisis del comportamiento mecánico del concreto elaborado con agregados reciclados gruesos. Sin embargo, se ha tomado en cuenta un conjunto de estudios relacionados con el deterioro del concreto, con la finalidad de tener un panorama más amplio en cuanto a las reacciones que puede tener el material cuando existen variaciones de agregados o de cualquier otro de sus componentes. Dentro de los estudios de revisión se encontraron temas importantes

como lo son:

- Reducción de la resistencia mecánica del concreto. Esta problemática se analizó con simulaciones de comportamiento mecánico del concreto cuando varía la proporción de agregado reciclado y agregado virgen; así también cuando el agregado reciclado proviene de concretos triturados a diferentes tiempos de vida. Los resultados de este estudio arrojan que las propiedades del concreto, cuando se utilizan materiales reciclados, se ven reducidas en función de la proporción de agregados reciclados que se utilizan en la mezcla del concreto (Katz, 2003).
- Incorporación de agregado fino reciclado al concreto. En este estudio se muestran comparativas del comportamiento del concreto cuando se incorpora agregado fino proveniente de concreto triturado y ladrillos triturados. Las pruebas realizadas para estas comparativas muestran que la implementación de hasta un 50% de agregado fino proveniente de ladrillos triturados en la mezcla de concreto reduce sólo el 10% de la resistencia del concreto a 28 días de fraguado. (Khatib, 2005).
- Variaciones de la resistencia a la compresión debidas al proceso de hidratación, esta problemática fue abarcada con pruebas a muestras de concretos que tenían agregados reciclados y carecían de hidratación después del fraguado, dichas muestras se compararon con concreto de las mismas características pero con un correcto proceso de hidratación post-fraguado y se obtuvieron resultados que indican mejoramiento en la resistencia a la Compresión cuando existe un proceso correcto de hidratación. (Koenders, Pepe, & Martinelli, 2013)
- Reducción de la resistencia mecánica del concreto, esta problemática se analizó con simulaciones de comportamiento mecánico del concreto cuando se varia la proporción de agregado reciclado y agregado virgen, así también cuando el agregado reciclado proviene de concretos triturados a diferentes tiempos de vida. Los resultados de este estudio arrojaron que las propiedades del concreto cuando se utilizan materiales reciclados se ven reducidas en función de la proporción de agregados reciclados que se utilizan en la mezcla del concreto. (Katz, 2003)

Para este trabajo se tomarán en cuenta las propiedades mecánicas del concreto con materiales reciclados por lo que, es necesario contar con parámetros de resistencia y propiedades químicas (pH) para realizar los ensayos aplicables a la zona de estudio particular de este trabajo.

1.3 Problemática

Los materiales de desperdicio en obra provenientes de demolición o desperdicio (concreto) son un problema para las empresas constructoras, debido a que sólo se utiliza como escombros y no se da un uso posterior a su desecho. Lo anterior genera gastos por concepto de acarreo, pago por disposición del material y agotamiento de recursos

naturales.

El concreto reciclado es un material que no se implementa para la construcción de manera habitual debido a que en la mayoría de los estudios sólo se aborda el tema de la resistencia a la compresión pero no se analiza su pH para determinar la edad del concreto reciclado y el impacto que tiene éste en su resistencia.

1.4 Justificación

Hoy en día es una tendencia utilizar materiales provenientes del reciclado que cumplan con las características de los materiales convencionales; con esto se busca disminuir el impacto ambiental y producir materiales de calidad. En el caso del concreto, se busca implementar material reciclado para su elaboración, obteniendo resultados óptimos en su comportamiento mecánico y garantizar una vida útil prolongada.

El consumo de recursos naturales para sostener el crecimiento de la industria de la construcción, aumenta día a día, comprometiendo al deterioro del medio ambiente y el progreso de generaciones futuras. Citando cifras, en países desarrollados se ha reportado que la producción de residuos va de 520 hasta 760 kg per cápita al año sin considerar guerras y desastres naturales (Domínguez, 2004).

Desde un enfoque ambiental, el reciclado de concreto es trascendente pues evita la degradación de recursos naturales no renovables.

1.5 Hipótesis

El pH del concreto reciclado es proporcional a la resistencia del mismo. Entre más bajo el pH del concreto reciclado, menor será su resistencia a la compresión. Con base en la clasificación de las muestras por su pH, se obtendrá un comportamiento uniforme.

1.6 Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico del concreto (resistencia a la compresión) empleando agregados gruesos reciclados, para clasificarlo como un concreto reciclado con base en su pH y realizar una comparación de resultados con concreto convencional y así dar un parámetro más específico de las diferencias entre ambos.

1.7 Objetivos específicos

- Realizar un proceso de selección de materiales aptos para ser reciclados y lograr especímenes con una composición semejante en cada muestra. excluyendo materiales cerámicos, escorias o desechos ajenos a la composición de un concreto ordinario. Para elaborar agregados reciclados con los materiales seleccionados.
- Obtener a partir de tamizado con la malla del no.200, 1g de agregado fino de cada muestra previamente seleccionada para obtener el pH de cada muestra.
- Clasificar el concreto de acuerdo con su pH en una escala de 9 a 12, y organizar las

muestras en grupos para realizar el análisis de sus propiedades.

- Realizar el triturado del material reciclado para obtener agregados gruesos.
- Realizar prueba de granulometría para la selección del material según su tamaño de partícula.
- Medir el pH a la muestra base (elaborada con agregados naturales) para conocer el pH del concreto nuevo. Y establecer los parámetros de alcalinidad de un concreto convencional.
- Realizar cilindros de concreto reciclado con resistencia de 200 kg/cm^2 por cada muestra que se tenga clasificada previamente por su pH.
- Realizar pruebas necesarias a cada cilindro para conocer sus propiedades y su comportamiento mecánico.
- Medir el pH de cada uno de los cilindros para medir la posible variación que éste tuvo al ser sometido a la mezcla con el cemento portland..
- Realizar gráficas de comparativas de las pruebas realizadas para cada muestra.
- Realizar conclusiones y recomendaciones fundamentadas en los resultados obtenidos.

1.8 Metas

Obtener una clasificación a partir de un proceso de selección en los materiales de desecho, tomando como referencia su pH.

Mediante el análisis del comportamiento mecánico del concreto hecho con agregados gruesos reciclados y agregados finos en estado natural, se compararán los nuevos valores con los concretos de agregados en estado natural. Para ello, se fabricaron cilindros con concreto convencional para someterlos a las pruebas de comportamiento mecánico, tomando como referencia el pH de los agregados reciclados y determinando la influencia del mismo en su resistencia a la compresión.

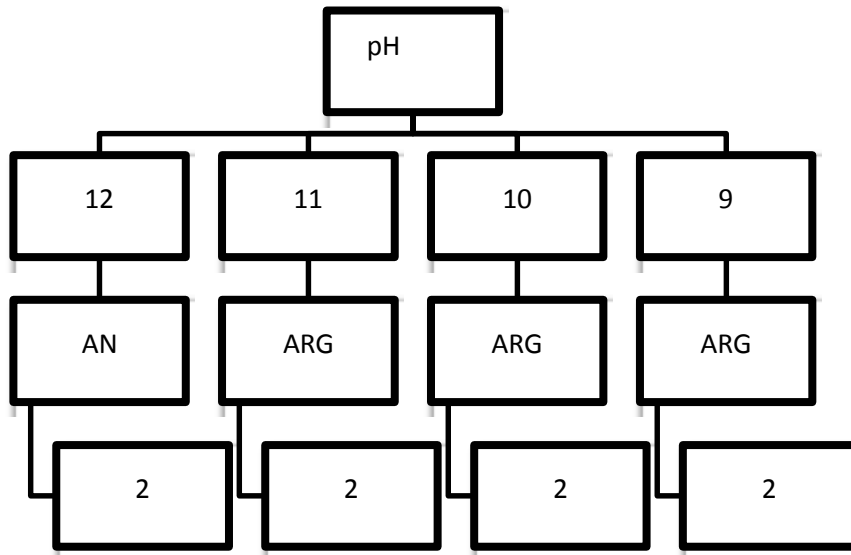
1.9 Metodología

Se realiza una selección de materiales aptos, estos no deben ser materiales cerámicos o concreto reforzado. Después de haber recibido el concreto proveniente de demolición procederemos a la trituración, procurando el tamaño de un agregado grueso. Los agregados finos serán los únicos que se encontrarán en estado natural.

Teniendo el material triturado, se elaborarán dos especímenes por cada nivel de pH (9, 10, 11, 12). Estos especímenes se utilizarán para tomar lecturas y determinar su pH. Se tomará como referencia una escala de 9 a 12 unidades, siendo la última el valor de pH que tiene el concreto elaborado con agregados de origen natural; con esta comparativa se evaluará la calidad y el deterioro del nuevo material.

Se separará cada lote de concreto según su pH y a cada uno de los lotes se le aplicarán pruebas de compresión, absorción, deshidratación relativa y módulo de finos, mezclándolos con un cemento Portland compuesto con diferentes proporciones de agregado, con base en

el método de diseño de mezcla del ACI (2006) -ACI-211- con las siguientes proporciones: (Gráfica 1.1):



Gráfica 1.1 Clasificación y elementos de mezclas

Entiéndase por AN a los agregados naturales y ARG a los agregados reciclados gruesos. El número expresa la cantidad de cilindros realizados.

Después de haber conformado los cilindros con el diseño de mezcla correspondiente, se dejarán fraguar durante un periodo de 28 días (Figura 1.1). Una vez terminado el periodo de fraguado, se realizará el tronado de cilindros para medir su capacidad de resistencia a la compresión ($f'c$). Esto se hará con una prensa Marshall eléctrica de 5T, especial para el tronado de cilindros de concreto, depositando el cilindro entre dos placas de acero previamente cabeceado con azufre y aplicando una carga hasta el punto de falla; este instrumento nos proporcionará el valor de la resistencia de compresión del nuestro concreto en kg/cm^2 .

Los cilindros tendrán las siguientes medidas:

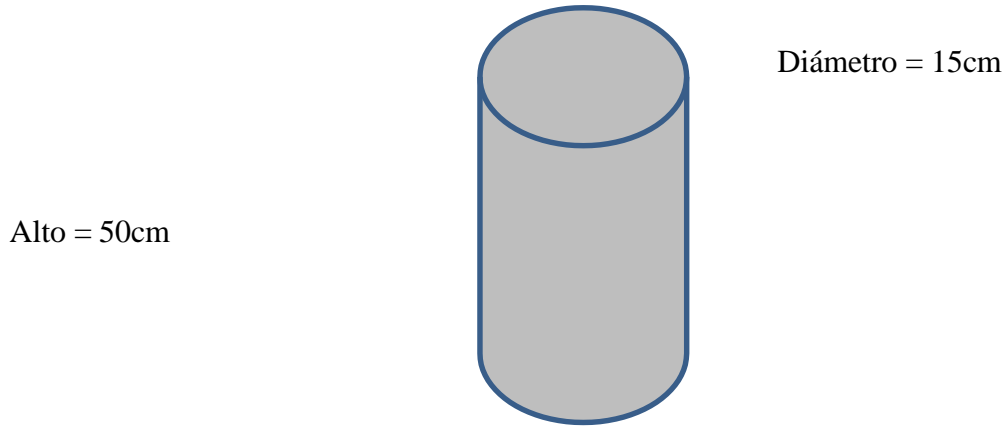


Figura 1.1 Dimensión del cilindro

Una vez teniendo los resultados de cada prueba, se medirá el pH de cada cilindro y se compararán los resultados, señalando el concreto con la proporción de agregados y el pH que presentó un mejor comportamiento mecánico.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Concreto

El concreto es un material de uso común para la construcción. Éste se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales en algunas ocasiones se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo (Carrillo, 2004). La mezcla de estos componentes produce una masa plástica que puede ser modelada con facilidad cuando el concreto permanece en estado fresco; gradualmente se pierde esta característica hasta que finalmente adquiere el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido por las reacciones químicas de sus componentes (Carrillo, 2004).

2.2 Clasificación del concreto según su consistencia

La consistencia de un concreto o un mortero se refiere a su estado de fluidez, es decir, que tan dura o blanda es la mezcla cuando se encuentra en estado fresco, por lo cual se dice que es el grado de humedad de la mezcla (Sánchez de Buen, 2001).

2.3 Clasificación del concreto según su fluidez

El método para caracterizar la fluidez del concreto es la prueba de revenimiento medido mediante el cono de Abrams. La consistencia de un concreto se determina a partir de esta prueba, por lo tanto, la clasificación del concreto según su consistencia en estado fresco depende de: el tamaño de la sección que se vaya a construir, el acomodo del acero de refuerzo, las condiciones de colocación de la muestra y el sistema de compactación (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1 Clasificación del concreto según su consistencia (Sánchez de Buen, 2001).

Clasificación	Tipo	Usos	Beneficios	Información técnica
Por su consistencia	Fluido	-Rellenos. -Estructuras con abundante acero de refuerzo. -Bombeo a grandes alturas.	-Facilita las operaciones de colocación y acabado. -Facilita las operaciones de bombeo. -Propicia el ahorro en mano de obra.	-Revenimiento superior a 19 cm. -Resistencia similar a la del concreto convencional.
	Normal o convencional	Todo tipo de estructuras de concreto.	Adecuada consistencia para cada tipo de estructura.	Revenimiento entre 2.5 y 19 cm.
	Masivo	Colados en elementos de gran dimensión.	-Ahorra en materia prima y mano de obra. -Bajo desarrollo en calor de hidratación.	-Revenimiento entre 2.5 y 5 cm. -Resistencia similar a la del concreto convencional.
	Sin revenimiento	Concretos que no se colocan bajo los métodos convencionales empleados en la industria de concreto premezclado.	-Bajo consumo de cemento. -Facilita las operaciones.	Revenimiento máximo de 2.5 cm -Baja resistencia la compresión.

2.4 Clasificación según su resistencia a la compresión

Teniendo en cuenta que la resistencia a la compresión es la principal característica de las mezclas de concreto, existe una clasificación respecto a esa propiedad. (Tabla 2.2)

Los concretos que normalmente se utilizan en construcción tienen una resistencia a la compresión comprendida entre 70 y 420 kg/cm² a los 28 días de edad; el valor más común dentro de este rango presente en las construcciones fundidas *in situ* es de 210kg/cm² (Sánchez de Buen, 2001).

Tabla 2. 2 Clasificación de concreto según su resistencia (Sánchez de Buen, 2001).

Clasificación	Tipo	Usos	Beneficios	Información técnica
Por su resistencia	Baja resistencia	-Losas aligeradas -Elementos de concreto no estructurales.	-Bajo costo.	-Resistencia a la compresión menor a 150 kg/cm ²
	Resistencia moderada	Edificaciones de tipo habitacional o baja altura.	-Bajo costo.	-Resistencia a la compresión entre 150 y 250 kg/cm ²
	Resistencia normal	Todo tipo de estructuras de concreto.	-Funcionalidad. -Disponibilidad.	-Resistencia a la compresión entre 250 y 420 kg/cm ²
	Alta resistencia	-Columnas de edificios muy altos. -Elementos estructurales. -Elementos pre-esforzados.	-Mayor área aprovechable en plantas bajas en edificios altos. -Elementos más esbeltos.	-Resistencia a la compresión entre 420 y 800 kg/cm ²
	Alta resistencia temprana	-Pavimentos. -Elementos pre-esforzados. -Elementos pre-fabricados. -Para minimizar tiempo.	-Elevada resistencia temprana. -Optimización de uso de cimbra. -Mayor avance de obra.	Se consigue la resistencia de diseño a partir del cuarto día de edad.

2.5 Tipos de curado

Las propiedades del concreto, tales como la durabilidad frente a los ciclos de congelación y deshielo, resistencia a la compresión e impermeabilidad, mejoran con la edad mientras existan condiciones favorables para la continuidad del proceso de hidratación del cemento. Este mejoramiento crece rápidamente a edades tempranas y continúa, más lentamente, por un lapso indefinido. Dos condiciones se requieren para que tengan lugar tales mejoras: la presencia de humedad y una temperatura adecuada (Figura 2.1).

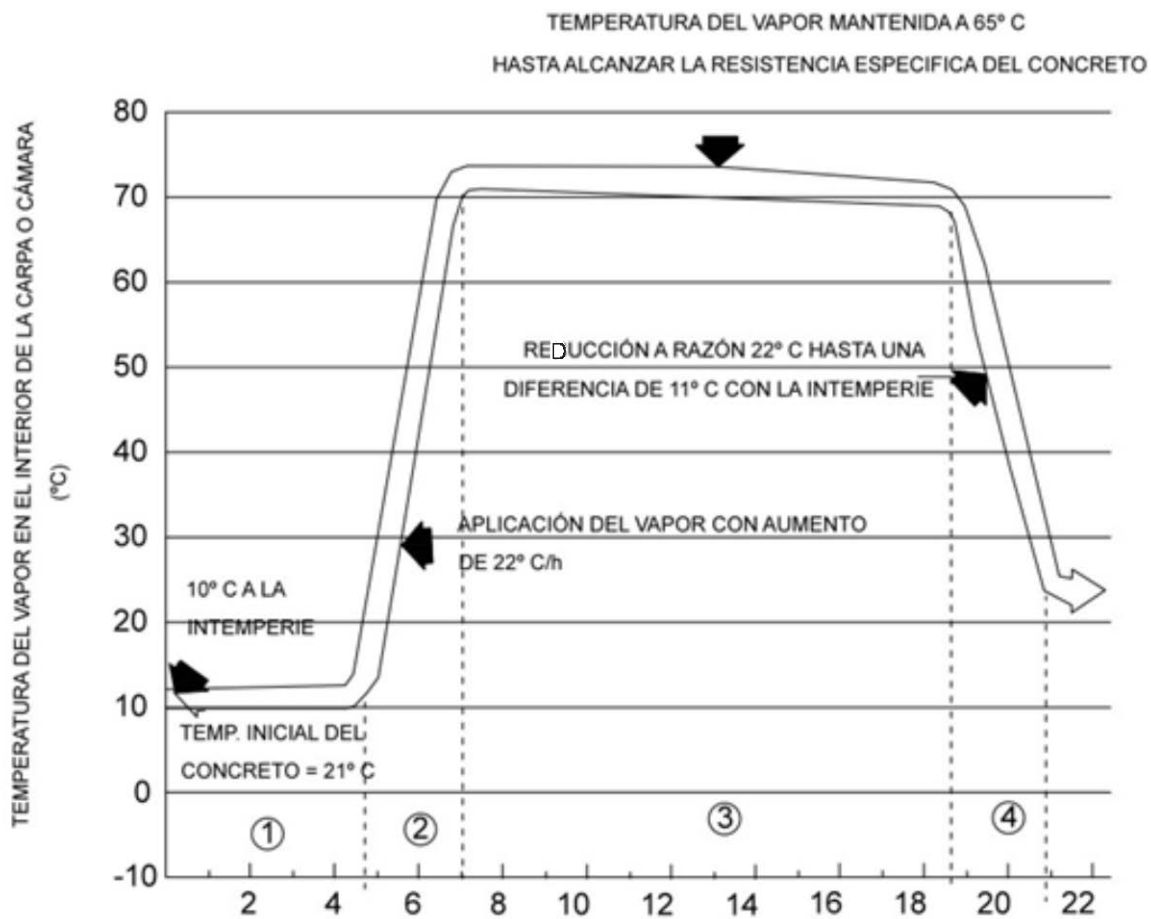


Figura 2. 1 Ciclo de curado a vapor (Portland Cement Association, 2013)

Cuando se interrumpe el curado húmedo, el aumento de resistencia continúa por un corto periodo y luego se detiene; pero si el curado se reinicia, la resistencia vuelve a incrementarse. Los mejores resultados se obtienen mediante el curado húmedo continuo del concreto desde el momento en que es colocado hasta que ha adquirido la calidad deseada.

Una evaporación excesiva de agua en el concreto recién colocado puede retardar apreciablemente el procedimiento de hidratación del cemento a edad temprana. La pérdida de agua también provoca la retracción del concreto, generando tensiones de tracciones en la superficie expuesta. Si estas tensiones se desarrollan antes que el concreto haya alcanzado suficiente resistencia, pueden aparecer fisuras superficiales. Todas las superficies expuestas, incluyendo las de bordes y juntas, deben ser protegidas contra la evaporación (*Portland Cement Association, 2013*).

La hidratación progresa muy lentamente cuando la temperatura del concreto es baja. Por ejemplo, las temperaturas por debajo de los 10 °C son desfavorables para el desarrollo de resistencias a edad temprana; debajo de los 4.5 °C el aumento de resistencia a edades tempranas se retarda considerablemente; en temperaturas similares al punto de congelación hay muy poco o ningún aumento de la resistencia. De aquí se deduce que el concreto debe ser protegido para mantenerlo a una temperatura adecuada para la hidratación del cemento y para evitar pérdidas de humedad durante el período inicial de endurecimiento. (*Portland Cement Association, 2013*)

2.6 Inundación o inmersión

Este es un método eficiente para evitar pérdidas de humedad en el concreto. El curado por inundación es efectivo para mantener una temperatura uniforme. Sin embargo, la temperatura del agua de curado no deberá estar a más de unos 11 °C por debajo de la del concreto, para prevenir tensiones de origen térmico que podrían fisurarlo. Como este método requiere considerable supervisión y mano de obra, frecuentemente no resulta práctico, excepto para pequeñas obras. El método de curado húmedo más efectivo, aunque raramente usado, consiste en la total inmersión en agua del elemento de concreto terminado.

2.7 Curado con vapor

El curado con vapor es ventajoso cuando es importante desarrollar una resistencia temprana en el concreto o cuando se requiere calor adicional para completar la hidratación. Dos métodos se usan actualmente para desarrollar mayor resistencia inicial mediante curado por vapor, estas son: curado con vapor a la presión atmosférica y curado a alta presión en autoclave.

El ciclo de curado por vapor consiste en: 1) un intervalo inicial de espera, previo a la acción del vapor; 2) un periodo de incremento de temperatura; 3) un periodo en el que se mantiene la temperatura constante; 4) un periodo de disminución de temperatura; 5) un típico ciclo de curado por vapor a la presión atmosférica. En muchos casos el lapso comprendido entre el modelo y el cierre del vapor es aproximadamente de 18 horas (*Portland Cement Association, 2013*).

El curado con vapor a la presión atmosférica se realiza generalmente en una cámara de vapor u otro recinto cerrado, para disminuir al mínimo las pérdidas de calor y humedad. Las lonas impermeables se usan frecuentemente para formar el recinto (carpa). La aplicación de vapor dentro del recinto deberá demorarse como mínimo dos horas después de finalizada la colocación del concreto, para permitir cierto endurecimiento del colocado recientemente. No obstante, una demora de 4 a 5 horas, previa a la inyección del vapor, permitirá obtener resistencias iniciales máximas, como indica la Figura 2.2. La resistencia no aumenta significativamente si la temperatura máxima del vapor es llevada de 65 a 80 °C. Deberán evitarse temperaturas máximas del vapor por encima de los 82 °C, ya que son poco económicas y pueden conducir a una reducción de la resistencia final.

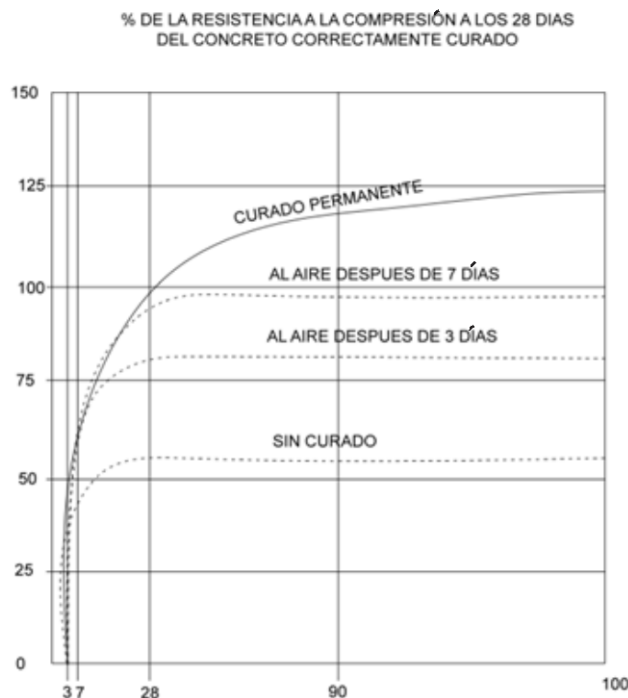


Figura 2. 2 Resistencia del concreto de acuerdo con el tipo de curado (Portland Cement Association, 2013)

La temperatura máxima del vapor dentro del recinto deberá ser mantenida hasta que el concreto haya alcanzado la resistencia deseada. El tiempo necesario depende de las características de la mezcla y de la temperatura del vapor. Para el curado con vapor a alta presión en autoclave se emplean temperaturas más elevadas, en el rango de 165 a 190 °C, y presiones correspondientes de alrededor de 5.5 a 12.0 kg/cm². La hidratación se acelera grandemente y las elevadas temperaturas y presiones pueden producir reacciones químicas adicionales beneficiosas entre los agregados y/o las sustancias que no ocurren durante el curado con vapor a baja presión (*Portland Cement Association, 2013*).

2.8 Cemento

Desde hace siete mil años ya se usaban mezclas que contenían agua, arena, grava y cal, que eran cocidas. Los egipcios usaban estas mezclas para unir las piedras usadas en la construcción de edificaciones y monumentos. Alrededor de año 600 a.C se comenzó a utilizar por los griegos y romanos construyendo edificios que se conservan hasta la fecha.

El nombre de cementos hidráulicos proviene de la reacción que produce el agua en las mezclas de cal combinada con puzolanas; a esta reacción se le conoce como fraguado. Posteriormente se utilizaron arcillas con calizas que eran más resistentes que las calizas puras, utilizando este material cementante en la construcción de un faro. En el siglo XVIII se creó el cemento Portland obtenido de piedra caliza de color blanco plateado llamado así por el lugar de extracción de dicha piedra en la península de Portland, en Inglaterra (*Hurtado, 2010*).

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico que al tener contacto con el agua se solidifica. El cemento se obtiene de un proceso industrializado donde se trituran de manera muy fina arcillas y cales cocidas, el resultado de este compuesto se denomina Clinker.

Cuando se necesitan otras propiedades en el cemento se le adicionan otros componentes como puzolanas, escoria granulada, humo de sílice o caliza. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua.

El cemento Portland se obtiene por pulverización del Clinker, mediante molienda conjunta con un regulador de fraguado, generalmente sulfato cálcico dihidrato o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y adiciones. Los materiales utilizables, que están normalizados como adiciones, son las escorias vítreas de alto horno, los esquistos calcinados, el humo de sílice, las puzolanas naturales, las cenizas volantes y la caliza. Es así como mediante el empleo de adiciones se fabrican los diferentes tipos de cemento Portland existentes; las adiciones le otorgan características específicas a cada tipo de cemento. Durante la fabricación, se hace un análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

En el proceso de clinkerización, entre $550\text{ }^\circ\text{C}$ y $1,000\text{ }^\circ\text{C}$, se produce la deshidratación de las arcillas y posterior disociación en los correspondientes óxidos, así como la descarbonatación de las calizas. Entre $1,000\text{ }^\circ\text{C}$ y $1,250\text{ }^\circ\text{C}$, tiene lugar la formación por reacción en estado sólido de los compuestos de silicato dicálcico (C_2SiO_4), aluminato tricálcico (C_3A) y ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). A temperaturas superiores a $1,250\text{ }^\circ\text{C}$ se forma, a velocidad lenta, C_3S por reacción en estado sólido entre el C_2S y el CaO . A partir del eutéctico del sistema cuaternario $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, a $1,338\text{ }^\circ\text{C}$ se produce la fusión parcial de C_3A , C_4AF junto con una porción de C_2S , C_3S y CaO formando una fase líquida que facilita el transporte de iones, incrementando la velocidad de formación de C_3S . De esta manera entre $1,400\text{ }^\circ\text{C}$ y $1,450\text{ }^\circ\text{C}$, una parte del C_2S formado reacciona con la cal restante para producir C_3S con cierta cantidad de iones en disolución sólida. El proceso se considera acabado cuando no queda CaO libre (Taylor, H.F.W, 1978).

Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar la pasta de cemento. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada u otro material granular), la pasta actúa como un aglutinante y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Hurtado, 2010).

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en reagudización, endurecimiento y desarrollo progresivo de la resistencia. La reagudización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura, tipo de mezclado, colocación, etc. Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece (Kosmatka, 2004).

2.9 Clasificación del concreto según su procedencia

De acuerdo con su origen se clasifican en agregados naturales y agregados artificiales. Los agregados naturales provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastre fluviales (arenas y gravas de río) y de canteras de diversas rocas. Los agregados artificiales se obtienen a partir de productos o procesos industriales (Remolina, 2013).

2.10 Clasificación del concreto según su densidad

Ésta propiedad depende de la cantidad de masa por unidad de volumen. Esta distinción se hace porque afecta la densidad del concreto que se desea producir: ligero, normal y pesado. La densidad es la cantidad de agua que requiere el concreto por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco (Remolina, 2013).

2.11 Concreto reciclado

Concreto elaborado con materiales producto de desperdicio de construcción, compuesto al igual que el concreto convencional a partir de agregados finos y gruesos, cemento y agua. A diferencia del concreto convencional los agregados son provenientes de la demolición y trituración de elementos de concreto que han sido desechados tales como losas, trabes, columnas, banquetas, etc.

Para clasificar los agregados finos y gruesos se siguen los parámetros establecidos por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2002) estos indican que un agregado grueso parte de 4.76 mm hasta 38.1 mm y un agregado fino puede tener diámetros de hasta 4.75 mm.

Los procesos más comunes para la obtención de agregados reciclados gruesos y finos son:

Trituración por medios mecánicos

Trituración por medios manuales

Una vez triturado el concreto, se debe realizar un proceso de cribado con mallas para llevar a cabo la separación de gruesos y finos, tomando como límite la malla no. 4 (4.6 mm).

2.12 Carbonatación

La carbonatación del concreto está asociada a la corrosión del acero de refuerzo y a la contracción del concreto. La carbonatación es el resultado de la disolución de CO₂ en los poros del concreto, y de la reacción del mismo con el hidróxido de calcio y los silicatos de calcio hidratado de la calcita (CaCO₃).

El proceso de carbonatación comienza a partir de la reacción antes mencionada; se da inicialmente en la superficie del concreto y penetra gradualmente en el elemento con una relación aproximada de \sqrt{t} (cuando t= tiempo en años) para concreto usual, a razón de 5 mm/año en concreto poroso o permeable (Winter, 2012).

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutro. El concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado

contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelantes y ambientes marinos.

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor -100 ppm o menos-. (Montani, 2000).

2.13 Agregado grueso

Son gravas naturales obtenidas mediante trituración y cribado con partículas de tamaño máximo comprendido entre 19 milímetros (3/4") y 75 milímetros (3") (Tabla 2.3).

Tabla 2. 3 Límites granulométricos para agregados gruesos (SCT, 2002)

Malla mm (designación)	Tamaño nominal mm												
	90 a 40	64 a 40	50 a 25	50 a 5	40 a 20	40 a 5	25 a 13	25 a 10	25 a 5	20 a 10	20 a 5	13 a 5	10 a 2,5
Porcentaje retenido acumulado													
101 (4")	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
89 (3½")	0 - 10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
75 (3")	--	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
63 (2½")	75 - 40	0 - 10	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--
50 (2")	--	30 - 65	0 - 10	0 - 5	0	0	--	--	--	--	--	--	--
37,5 (1½")	85 - 100	85 - 100	30 - 65	--	0 - 10	0 - 5	0	0	0	--	--	--	--
25 (1")	--	--	85 - 100	30 - 65	45 - 80	--	0 - 10	0 - 10	0 - 5	0	0	--	--
19 (¾")	95 - 100	95 - 100	--	--	85 - 100	30 - 65	45 - 60	15 - 60	--	0 - 10	0 - 10	0	--
12,5 (½")	--	--	95 - 100	70 - 90	--	--	90 - 100	60 - 90	40 - 75	45 - 60	--	0 - 10	0
9,5 (¾")	--	--	--	--	95 - 100	70 - 90	95 - 100	85 - 100	--	85 - 100	45 - 80	30 - 60	0 - 15
4,75 (N°4)	--	--	--	95 - 100	--	95 - 100	--	95 - 100	90 - 100	95 - 100	90 - 100	85 - 100	70 - 90
2,36 (N°8)	--	--	--	--	--	--	--	--	95 - 100	--	95 - 100	95 - 100	90 - 100
1,18 (N°16)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	95 - 100

2.14 Agregado fino

Tanto el agregado fino como el agregado grueso, constituyen los elementos inertes del concreto, debido a que no intervienen en las reacciones químicas. El agregado fino debe ser durable, fuerte, limpio, duro y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarras, álcalis y materias orgánicas. No debe tener más del 5% de arcillas o limos ni el 1.5% de materias orgánicas (Harmen, 2005) (Tabla 2.4).

Tabla 2. 4 Límites granulométricos de agregados finos (SCT, 2002)

Malla		Fino	Grueso				
		Tamaño nominal mm					
Abertura mm	Designación	5 a 0,15	25 a 13	25 a 5	20 a 5	13 a 5	10 a 2,5
Porcentaje retenido							
37,5	1½"	--	0	0	--	--	--
25	1"	--	0 - 5	0 - 5	0	--	--
19	¾"	--	--	--	0 - 10	0	--
12,5	½"	--	90 - 100	40 - 75	--	0 - 10	0
9,5	⅜"	0	--	--	40 - 80	20 - 60	0 - 20
4,75	Nº4	0 - 15	--	90 - 100	90 - 100	80 - 100	60 - 95
2,36	Nº8	--	--	--	--	90 - 100	80 - 100
1,18	Nº16	20 - 60	--	--	--	--	--
0,3	Nº50	65 - 90	--	--	--	--	--
0,15	Nº100	75 - 95	--	--	--	--	--

Es una arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros (malla No. 200) y 4.75 milímetros (malla No. 4) (SCT, 2002).

2.15 Agua

El agua es un componente que se utiliza para generar las reacciones químicas cementantes del concreto hidráulico, puede ser agua potable que por sus características físicas y químicas es apta para el consumo humano; para que no se pierdan estas características se debe tener especial cuidado en su transporte y almacenamiento.

2.16 Agua de lavado de agregados

Es la utilizada durante el proceso de trituración, para retirar impurezas y exceso de finos presentes en los conglomerantes de los que provienen, así como las partículas muy finas formadas durante la trituración. Debe ser lo suficientemente limpia como para no introducir contaminación a los materiales procesados, como puede ser exceso de partículas en suspensión, especialmente materia orgánica o sales, que posteriormente afectan la calidad del concreto producido con estos.

2.17 Agua de mezclado

Se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita este último para producir una

pasta hidratada con fluidez tal, que permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentre en estado plástico. Dependiendo de la cantidad de agua adicionada la fluidez de la pasta, ésta será mayor o menor y, al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura, mientras que otra cantidad, permanecerá como agua libre. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y, por consiguiente, el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que con el tiempo esta agua libre se evapora, dejando unos pequeños conductos en el interior del concreto endurecido. Con este aumento se disminuye la resistencia y el concreto se hace más permeable. De ahí la importancia del control de la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

2.18 Agua de curado

Una vez que el concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento. Esta agua adicionada depende de la temperatura y humedad del ambiente donde se encuentre el concreto, ya que a menor humedad relativa, la evaporación es mayor. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento.

El agua que se utiliza en la mezcla generalmente es apta para el curado sin embargo, la causa más común de las manchas en las superficies del concreto son por la presencia de una alta concentración relativa de hierro o materia orgánica. Así mismo, bajas concentraciones de estas impurezas pueden causar manchas si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora. No existe ningún método práctico y confiable que relacione las posibilidades de manchas con los contenidos de impurezas orgánicas de hierro contenido en el agua.

En la evaluación de las impurezas que contienen el agua de curado se deben tener las siguientes consideraciones:

- Que no manchen las superficies del concreto.
- Que no ataquen ni deterioren el concreto.

En algunos casos, las manchas superficiales no son tan importantes, pero siempre es necesario que el agua de curado esté libre de sustancias como ácidos minerales, ácidos orgánicos, bases, sales, alcoholes, soluciones de azúcar, aceite vegetal y animal que ataquen al concreto endurecido.

2.19 Calidad del agua

Las exigencias de calidad, varían en algunos países en función de las características propias del cemento, pero en general existe uniformidad de criterios, fruto de los resultados de investigaciones desarrolladas en diferentes países. En nuestro país en general, fuera de los perímetros urbanos, se corre el riesgo de utilizar aguas de calidad desconocida, las cuales no son estudiadas para su empleo en la elaboración de concretos. De ahí la necesidad de difundir esta información, que permita tratar de adquirir la mejor información de la bondad del abastecimiento, en cuanto a la calidad de los concretos que puedan generar.

2.20 Efecto de las impurezas en el agua de mezcla

Existe la creencia popular que si el agua es apta para beber, es óptima para hacer concreto. Sin embargo, esto no es del todo cierto, pues algunos acueductos o plantas de tratamiento de agua, utilizan o adicionan para el consumo sustancias que pueden interferir con el fraguado del cemento, o pueden promover la corrosión del refuerzo o manchar el concreto, tales como, sulfatos de aluminio, cloro, sabores artificiales, flúor, azúcares, etc.

Así mismo, un agua apta para mezclar o curar concretos puede no ser necesariamente buena para tomar cuando el agua para una obra proviene de un pozo. En estos casos es conveniente analizarla periódica y sistemáticamente para comprobar que no varía el pH, o las impurezas a través del tiempo. Las impurezas pueden interferir con el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie y provocar, además, la corrosión del aceros de refuerzo.

2.21 Aspectos históricos

Durante el siglo pasado, el uso de materiales en la construcción aumentó ocho veces y como resultado, la humanidad utiliza actualmente casi 60 millones de toneladas de materiales por año. Lo más importante a la amenaza ambiental asociado a su producción no es tanto el agotamiento de materias primas no renovables, sino los impactos ambientales ocasionados por su extracción (Pacheco-Torgal, 2013).

El reciclaje de materiales de desecho de la construcción es muy atractivo en comparación con el uso de los recursos naturales no renovables, promoviendo la protección del medio ambiente y permitiendo el desarrollo de nueva materia prima. Además, el uso de materiales reciclados es de gran importancia debido al impacto económico que involucra el desaprovechamiento de este material. Ningún país tiene un plan específico de procesamiento de estos materiales provenientes de la demolición; la mayoría se envían a vertederos, en lugar de darle un uso adecuado dentro de la misma rama de la construcción (Zega *et. al.*, 2011). Se espera que el mercado mundial de agregados para la construcción aumente un 5.2% hasta 48.3 mil millones de toneladas (Zega *et al.*, 2011). En estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (U.S. EPA, 2003) estima que la generación de desechos de construcción, demolición y renovación residencial y no residencial en el año 2003, estaba cerca de 170 millones de toneladas. De acuerdo con Eurostat (Oficina estadística de la Comisión Europea, que produce datos sobre la Unión Europea y promueve la armonización de los métodos estadísticos de los estados miembros), la cantidad total de residuos derivados de la construcción generados en la Unión Europea en el año 2010 fue de mayor a 860 millones de toneladas (Silva, 2014). Dentro de las causas principales por las cuales no se recicla el material proveniente de la demolición en las construcciones se debe al desconocimiento del manejo de estos materiales debido a la falta de conocimiento además de normas y especificaciones que los productores de concreto pueden tener en cuenta para su uso.

En la actualidad en nuestro país, la alternativa más extendida para la eliminación de estos residuos de construcción y demolición es el vertido. Es importante tener en cuenta que estos ocupan un gran volumen dentro de los vertederos lo cual reduce el tiempo de vida útil de los mismos y, generando a su vez un gran problema debido a la falta de lugares de depósito

apropiados. Esto se convierte en un grave problema, ya que si no se gestiona correctamente, puede provocar impactos ambientales, deteriorar los recursos naturales, contaminación y destrucción de flora y fauna (Cruz García *et al.*, 2004).

Dentro de la demolición es importante un proceso de selección de materiales que sean aptos para el reciclaje, debido a que aumenta los beneficios en su uso y evita un impacto negativo al utilizar medios de transporte innecesarios. En un estudio (Coelho *et. al.*, 2012) se realizó una evaluación del ciclo de vida en el medio ambiente de varios escenarios de demolición por un método convencional y selectivo. Los resultados fueron muy claros en donde la demolición selectiva asegura una reducción significativa del impacto ambiental causado específicamente por el cambio climático, la acidificación, la nitrificación y la cantidad de metales pesados. También se encontró que, en caso de no reutilizar este tipo de materiales, puede incluso agravar ligeramente el impacto sobre el medio ambiente a través del aumento de las distancias de transporte y otros impactos. Esto es en gran parte debido a que los medios de transporte que se utilizan sobre todo en la construcción y demolición son carreteras donde se utilizan camiones diesel. Hong-Kong y Taiwán también han iniciado programas para promover la utilización de concreto de desperdicio en un nuevo concreto (Silva, 2014). Cerca de 14 millones de toneladas de concreto de desperdicio se generan en Hong Kong cada año. En el pasado, la parte inerte de este material se reutilizó en la recuperación de tierras (Fon Winston *et al.*, 2002). Sin embargo, debido a la creciente oposición, la mayoría de estos proyectos han ocasionado que dicha recuperación se retrase drásticamente. La planta de reciclaje Pilot & Materials, produce material para suplir ambos agregados, gruesos y finos. Sólo se utilizan rocas trituradas y concretos en este centro como parte de las medidas de control de calidad, que incluyen descartar a los contaminantes tales como ladrillos y tejas, y un muestreo diario y prueba de productos. (Fon Winston *et al.*, 2002)

Para los componentes que integrarán la mezcla se deben tomar en cuenta diversos factores inherentes al comportamiento del agregado grueso y el agregado fino. Uno de los factores determinantes en la obtención de la resistencia a la compresión es la cantidad de grava que contiene la mezcla. Para este trabajo se analizará el comportamiento de un concreto reciclado, por lo que es importante analizar la influencia que tiene la grava reciclada en la resistencia a la compresión. Para obtener los resultados de la influencia, se recurrió a la revisión de literatura específica sobre este tema, encontrando un análisis realizado por (Etxeberria *et al.*, 2007) en el cual se explica que la cantidad de gravas presente en una mezcla; altera la resistencia a la compresión en una proporción máxima de 25%. Esto ocurre al sustituir un 100% del agregado grueso en estado natural por gravas producto de la trituración mecánica de concretos de desecho. Esta información se utilizará en este trabajo como un parámetro de comparación en la parte de experimentación con los especímenes elaborados a partir de concreto convencional, así como para los de concreto reciclado.

Para establecer parámetros de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de las mezclas que contengan agregados finos reciclados, se realizó una revisión de casos de estudio similares y se tomaron en cuenta los análisis realizados por (Evangelista, 2007), en donde se muestra que la sustitución del agregado fino en estado natural por uno reciclado, no reducía ni

alteraba el comportamiento a fuerzas de compresión, pero alteraba el módulo de elasticidad, reduciendo este en 18.5% al sustituir el 30% del agregado fino. Este autor realizó pruebas para analizar el comportamiento de una mezcla con 100% de agregado fino reciclado. Al tomar en cuenta los parámetros de reducción del módulo de elasticidad, se podrá definir su comportamiento a la compresión, respecto de la cantidad de agregado fino que se incorpora a la mezcla.

Con el objetivo de analizar diferencias entre el comportamiento de un concreto con agregado grueso reciclado y un concreto con agregados finos y gruesos reciclados, se realizó una revisión de artículos relacionados con la sustitución de ambos tipos de agregado, encontrando un estudio del mecanismo de falla de concretos reciclados realizado por (Qionj *et al.*, 2011), en el cual se muestran los resultados de ensayos de comportamiento mecánico, para mezclas de agregados gruesos reciclados, arena y cemento, así como para agregados gruesos reciclados, morteros reciclados y cemento. En estos se concluyó que la sustitución de ambos agregados no afecta considerablemente el comportamiento mecánico, pero si se ve reducido cuando la proporción de los agregados varía. También se menciona que el factor más considerable en la afectación del comportamiento mecánico es la incorporación de mortero a la mezcla. Para este trabajo se considera la implementación de ambos agregados en un 100%, por lo que es importante considerar la reducción en el comportamiento mecánico que provoca la implementación de morteros reciclados. En otros estudios se obtiene que los agregados reciclados tienen una mayor capacidad de absorción y ésta influye en la resistencia y en su porcentaje de porosidad, como lo ha demostrado (Poon, 2004). Este autor realizó pruebas con porcentajes de agregados naturales y reciclados en proporciones 100% natural, 80% natural + 20% reciclado, 50% natural + 50% reciclado y 100% reciclado. La resistencia del concreto se determinó en tiempos de 3, 7 y 28 días para ser curados en agua a 27 °C. Todas las muestras observadas obtuvieron una resistencia mínima de 35MPa a los 28 días. Los agregados reciclados que se encuentran en el mercado por lo general son de tamaño grueso y se realizan pruebas para determinar su comportamiento. Con muestras de estos agregados se evaluó la resistencia del concreto a 25Mpa y se utilizó la misma cantidad de agua en la elaboración; además, los agregados reciclados fueron pre-saturados durante 10 minutos. Según (Sagoe-Crentsil, 2001), la absorción de agua de los agregados reciclados es un poco mayor comparada con agregados naturales, al igual que la carbonatación.

Un factor que caracteriza al concreto es su resistencia al esfuerzo cortante. Se analizan esta característica en el concreto reciclado y se determina su influencia en la resistencia al esfuerzo cortante. La grava del concreto reciclado tiene mortero adherido a su superficie y más agregados en una unidad de volumen, lo que genera que su capacidad de distribución de carga sea diferente a la del concreto con agregados naturales. (ACI, 2006).

En otro estudio se realizaron pruebas con diferente proporción de grava reciclada, se someten a compresión y se analizan los resultados de las grietas generadas por el esfuerzo cortante. Xiao (2012) concluyó que:

La transferencia del cortante a través de las grietas es similar para un concreto de agregados reciclados contra uno de agregados naturales. Para las muestras de agregados reciclados de

concreto con los mismos diseños de mezcla, el rendimiento de la transferencia de cortante, incluyendo la rigidez inicial y la fuerza de cortante último, se mejora significativamente con el aumento de la restricción de rigidez lateral.

En lo referente al comportamiento mecánico, es importante realizar un análisis de la resistencia a la compresión. Dentro de la revisión de literatura se encontraron varios artículos que hablan acerca de factores específicos que afectan el comportamiento mecánico:

Para realizar un proceso de curado óptimo y con esto lograr el comportamiento deseado del concreto, se revisó un artículo que habla acerca de la relación que tienen el proceso de hidratación y la resistencia a la compresión. Dentro de los resultados y conclusiones de dicho artículo se tiene que “Para el correcto desarrollo de la fuerza de compresión, existen dos componentes clave: la humedad del agregado reciclado y la relación agua cemento” (Koenders *et al.*, 2014). Dentro de los resultados arrojados por dicho estudio, se tiene que la relación agua-cemento óptima para alcanzar la resistencia más alta posible es de 0.45.

Para complementar el estudio del comportamiento mecánico del concreto con agregados reciclados, se realizó una revisión de estudios de pruebas de compresión axial para concretos similares, con el objetivo de verificar si existe alguna variación significativa en el comportamiento mecánico, que esté en función de la excentricidad de la carga. Las conclusiones de los autores (Jianzhuang *et al.*, 2005) explican que la resistencia a la compresión de un concreto con agregados reciclados, disminuye respecto de la cantidad de agregado grueso que se incorpora a la mezcla y que la excentricidad de la carga aplicada no representa cambios drásticos en el comportamiento del concreto reciclado. Para este trabajo se realizarán pruebas de compresión axiales, con las cuales se analizará si existen variaciones de resistencia, esto respecto de la incorporación de cada tipo de agregado (grueso y fino).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hace una semblanza de las pruebas necesarias para llegar al diseño de las mezclas para cada tipo de agregado, así como de los procesos de clasificación que deben llevarse a cabo. Como primer paso se realiza la recolección de muestras de concreto de demolición, para su almacenamiento y posterior trituración. Al llevar a cabo la recolección de muestras se debe realizar una clasificación preliminar para poder diferenciarlas, esto con el fin de interpretar los resultados de una manera más adecuada.

3.1 Materiales

El material que se ocupó se muestra a continuación (Tabla 3.1):

Tabla 3. 1 Equipo de laboratorio utilizado en pruebas de laboratorio

Agua destilada	Juego de tamices (ASTM-KR 11/2” -200)
Marro (Truper 8 lbs)	Vidrio de reloj
Martillo (Truper 1 lb)	Vaso de precipitado
Barreta (Truper 12 lbs)	Agitador basculante
Balanza analítica (Adventure AR1140)	Probeta 1L (SM-1238 Cimatec)
Medidor de pH (Hanna instruments HI 2211 pH/ORP meter)	Probeta 25 mm (SM-1238 Cimatec)
Parilla eléctrica (G-22)	Piceta
Charolas	Matraz de bola (SM-0461 Cimatec)

3.2 Recolección de muestras

Para la obtención de muestras de concreto se llevó a cabo la recolección de especímenes de concreto de demolición en diferentes puntos de Pachuca, el Valle de Tulancingo y Real del Monte, tomando en cuenta como clasificación preliminar el tipo de elemento de concreto , siendo algunos de estos trabes, columnas, losas, banquetas etc. Posteriormente, se realizó la trituración de los elementos clasificados anteriormente.

3.3Proceso de trituración

Una vez clasificadas las muestras se realiza el proceso de trituración (manual o mecánica): el tamaño de las partículas comprenderá de la malla No. 200 a la de 1 ½ ” ya que estos son los tamaños que se requieren para la elaboración del concreto (SCT, 2002). El proceso de trituración se llevó a cabo de manera manual, teniendo como resultado agregados reciclados (Figura 3.1).



Figura 3. 1 Trituración manual de concreto reciclado

Dentro de este proceso se debe procurar que la trituración produzca agregados que puedan ser clasificados como gruesos de 9.5 mm a 37.5 mm.

3.4 Granulometría

Posteriormente se realizó la clasificación de los agregados reciclados por medio de la prueba granulométrica (Juárez Badillo, 2005). Ésta consiste en un proceso de cribado por medio de mallas de diferentes aberturas, tomando como límites superior e inferior las mallas de 1 ½” y No. 200 respectivamente. Para realizar la clasificación se toma como punto de separación de agregado grueso y agregado fino la malla No. 4. (ACI, 2006). Esto significa que todo material que haya pasado la malla No. 4 se considera agregado fino: aquel que queda retenido en la malla se considera agregado grueso.

En cada una de de las mallas utilizadas (1 ½” a la No. 200) se peso todo el material retenido en la báscula y los datos arrojados cueron registrados para elaborar una gráfica que expresará

lo ocurrido en este proceso (Figura 3.2).



Figura 3. 2 Pesado de la muestra de agregado fino y grueso durante la prueba de granulometría

3.5 Medición de pH

Una vez realizada la clasificación del material por granulometría se realizó la medición del pH. Para ello, se utilizó un medidor de pH (Hanna Instruments, Modelo HI2211PH-RP METER), agua destilada y buffer 7. Siguiendo el método establecido por la norma ASTM-D4972 (ASTM, 2013) para obtener el pH de una muestra sólida, lo primero que se debe realizar es asegurarse que el medidor de pH se encuentre calibrado, esto con la ayuda de agua destilada, que nos debe arrojar una medición de 7 (Figura 3.3).



Figura 3. 3 Calibrado del medidor de pH.

Después de tener calibrado el medidor de pH, se necesita tomar del material previamente tamizado por la prueba granulométrica, 1g de agregado fino que haya pasado la malla No. 200: se mide 20 mL de agua destilada y procede a mezclar la muestra con el agua en un recipiente limpio. Para que no afecte la medición, se coloca la punta del medidor de pH dentro del recipiente para que realice la medición y se espera 10 min para que se estabilice la lectura y ésta sea más exacta (Figura 3.4).



Figura 3. 4 Lectura del pH clasificado como 9 en una muestra de concreto reciclado.



Figura 3. 5 Lectura del pH clasificado como 10 en una muestra de concreto reciclado.

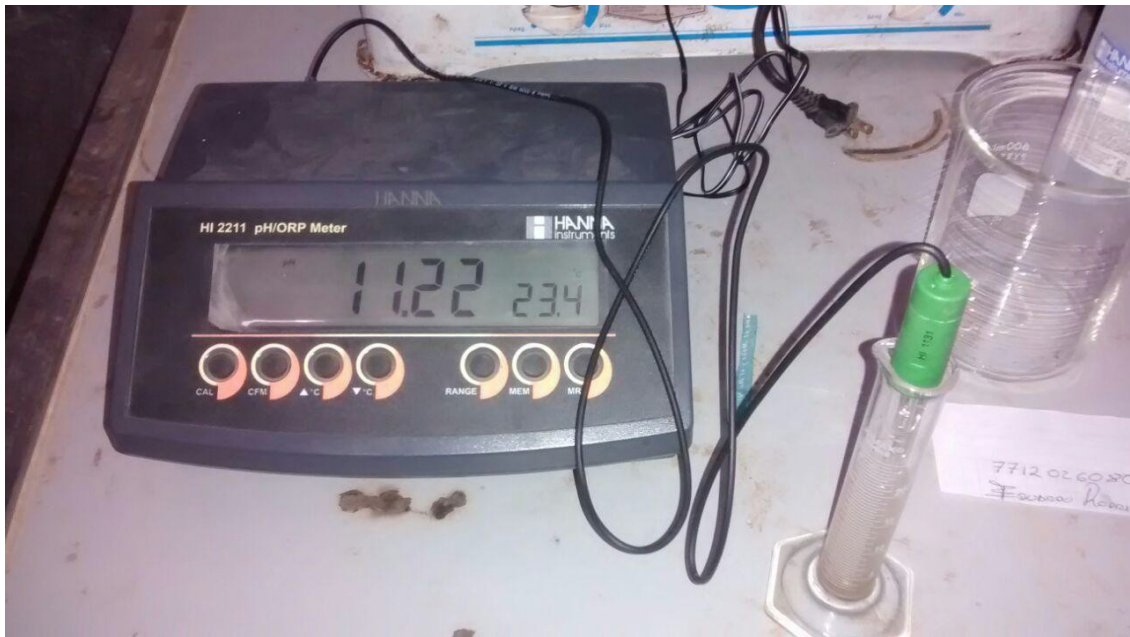


Figura 3. 6 Lectura del pH clasificado como 11 en una muestra de concreto reciclado.

Después de haber clasificado las muestras respecto de su pH, se continúa con las pruebas que arrojan los datos para el diseño de las mezclas. Estas se muestran a continuación:

3.6 Pruebas de absorción

Las pruebas de absorción se realizaron a partir de los métodos establecidos por la norma

C127-01 (ASTM, 2004a) para agregados gruesos y con la norma C128-01 (ASTM, 2004b)

3.6.1 Absorción para cada tipo de agregado

En esta prueba se mide la cantidad de agua que absorbe el material (Figura 3.5). El proceso es el siguiente:

- 1) Se pesa una muestra de material (arena o grava) seca y se toma el dato obtenido.
- 2) Se sumerge el material en una charola con agua por aproximadamente 5 minutos o hasta percibir la saturación del material.
- 3) Se extrae el material del agua. Para la grava su secado será manual y en el caso de la arena se coloca en otra charola que se calentara en una parrilla para eliminar el exceso de agua (secado parcial).
- 4) Se procede a pesar el material saturado y se toma el dato.
- 5) La fórmula a utilizar para la determinación del porcentaje de humedad es la siguiente (Fórmula 1):

1)
$$\% \text{ Absorción} = \frac{W_{hum} - W_{seco}}{W_{seco}}$$



Figura 3. 7 Absorción de materiales.

3.7 Prueba de densidad relativa

Esta prueba se realizó bajo los métodos establecidos por la norma C127-04 (ASTM, 2004c). Esta prueba ayuda a determinar la relación que existe entre el peso específico del material (grava) y el peso específico de la sustancia de referencia (agua) (Figura 3.8) El proceso es el siguiente:

- 1) Pesar 100 o 200 gr. de grava seca.

- 2) Verter en un una probeta de 1L, 500 ml de agua.
- 3) Depositar el material en la probeta y tomar la lectura del aumento en el nivel de agua.
- 4) La fórmula para determinar la densidad relativa es la siguiente (Fórmula 2):

$$2) \quad \text{Densidad} = \frac{W_{\text{material}}}{\text{Vol. inicial} - \text{Vol. final}}$$



Figura 3. 8 Medición de la densidad de agregados gruesos.

3.8 Prueba de módulo de finos

Indica el porcentaje de finos respecto del peso total de una muestra.

Realizar la prueba de granulometría utilizando las mallas comprendidas entre 1 ½” y No. 200.

Se separan los agregados finos a partir de la malla 4 hacia la malla No. 200

El peso de los agregados finos se divide entre el peso total de la muestra y se obtiene el módulo de finos.

3.9 Prueba de peso específico de los sólidos

Esta prueba indica el peso que refleja una sustancia por unidad de volumen (Figura 3.9).

- 1) Pesar 200 gramos de agregado fino.
- 2) Llenar con agua un matraz de bola de 500ml.
- 3) Pesar el matraz lleno.
- 4) Verter el material previamente pesado.
- 5) Pesar el matraz aforado.

6) Aplicar la fórmula para obtener el peso específico (Fórmula 3):

$$3) \quad S_s = \frac{100}{W_{matrazagua} + W_{material} - W_{aforado}}$$



Figura 3. 9 Peso específico de solidos.

Una vez obtenidos los datos de las pruebas anteriores se procede al diseño de las mezclas.

3.10 Diseño de mezcla por el método ACI

Paso 1. Apoyándonos del “Criterio general de diseño de mezclas por el método del ACI”, se diseñaron una mezcla de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad, con un revenimiento de 10 cm empleando un cemento tipo CPO (Cemento Portland Ordinario).

Paso 2. Se empleó un tamaño máximo de la grava es de 25 mm (1").

Paso 3. Para un concreto sin aire incluido, se empleó un revenimiento de 10 cm., y tamaño máximo de grava de 25 mm (1"), según la tabla 6.3.3 (Criterio general de diseño de mezclas por el método del ACI) con un valor de 193 kg/m^3 (L). El aire atrapado estimado indica un valor de 2.0 %.

Paso 4. En la tabla 6.3.4 (a) (Criterio general de diseño de mezclas por el método del ACI) indica un valor de 0.68 de relación agua / cemento necesaria para producir una resistencia de 210 kg/cm^2 en concreto sin aire incluido.

Paso 5. Con base en la información obtenida en los pasos 3 y 4, se concluye que el consumo de cemento es de: $193/0.68 = 283.82$ (284) kg/m^3 .

Paso 6. De la tabla 6.3.6 se estimó la cantidad de grava; para un módulo de finura de 2.7%, se utilizó un tamaño máximo de grava de 25 mm (1"). Puede emplearse 0.63 metros cúbicos de

grava, por lo tanto, el peso de la grava es de $1450 \times 0.63 = 914 \text{ kg/m}^3$.

Paso 7. Conociendo los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido en los especímenes.

Paso 8. Con base en el peso, según los valores de la tabla 6.3.7.1 (Criterio general de diseño de mezclas por el método del ACI) se estima el peso de un metro cúbico de concreto sin aire incluido = 2380 kg. Por lo tanto, los pesos ya conocidos son:

Agua= 205 kg

Cemento= 302 kg

Grava= 914 kg

Total= 1421 kg

Paso 8 (a). Con base en el volumen absoluto, conocidas las cantidades de los materiales tenemos (Tabla 3.2):

Tabla 3.2 Peso, densidad y volumen de los materiales en base a su volumen absoluto

Materiales	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (L)
Agua	205	1.00	205
Cemento	302	3.15	96
Grava	914	2.33	392
Vol. del aire	-----	-----	20
Total	1421	-----	713

(b). A continuación comparamos los pesos por metro cúbico de concreto son (Tabla 3.3):

Tabla 3.3

Materiales	Basado en peso Estimado (kg)	Basado en volumen absoluto (L)
Agua	205	205
Cemento	302	302
Grava	914	914
Arena	934	677
Vol. aire	20	20
Total en peso	2375	2098
Vol. total (L)	1109	1000

Por lo tanto, el peso de la arena puede estimarse como se indica a continuación: $2380 - 1421 = 959 \text{ kg}$.

3.11 Resistencia a la compresión

Para conocer la resistencia a la compresión de cada muestra caracterizada por su pH se debe

realizar un ensaye de cada espécimen, sometiéndolos a una carga axial de compresión ejercida por medios mecánicos. Ejerciendo la carga hasta el límite de falla, las unidades estarán representadas en kg/cm^2 .

Los ensayes deben ser realizados por personal calificado y con la maquinaria correctamente calibrada para evitar variaciones en los resultados y asegurar la precisión (Figuras 3.8 y 3.9).



Figura 3. 10 Prueba de resistencia a la compresión



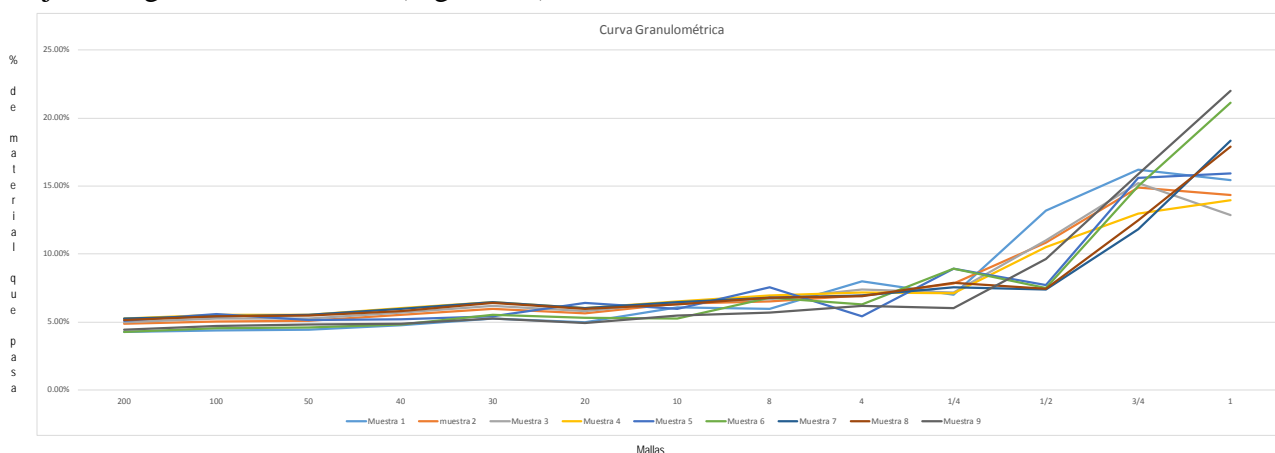
Figura 3. 11 Prueba de resistencia a la compresión

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del capítulo anterior. Se indican por medio de tablas, gráficos e imágenes los datos recabados de todas las pruebas realizadas. Además, se discuten dichos datos con el fin de obtener respuestas a la hipótesis planteada para aceptarla o en su defecto refutarla.

4.1 Granulometría

La prueba de granulometría que se realizó después de la trituration y clasificación del concreto arrojó los siguientes resultados (Figura 4.1):



Gráfica 4. 1 Curva granulométrica

En la gráfica muestra el porcentaje de material retenido en cada tamiz, siendo que del tamiz de 1" hasta el no. 4 donde se retuvo más materia.

4.2 Clasificación según el pH

Una vez clasificadas cada una de las muestras en arenas y gravas se procedió a la medición del pH, la cual indica si el concreto disminuirá su resistencia de forma lineal en función a su pH. De las mediciones realizadas se obtuvieron los siguientes datos (Tabla 4.1).

Tabla 4. 1 Niveles de pH obtenidos por muestra

Nivel de pH	
Muestra	pH
Muestra 1	11.22
Muestra 2	10.88
Muestra 3	11.27
Muestra 4	10.77
Muestra 5	10.3
Muestra 6	10.89
Muestra 7	11.8
Muestra 8	9.39
Muestra 9	10.48
Muestra 10	9.46

La medición del pH de las muestras se realizó una sola vez a cada una, debido a que antes de hacerlo, el medidor de pH se calibró para no tener error en la medición de las mismas. Para agrupar los resultados de las mediciones del pH, se tomó un criterio de redondeo en los valores obtenidos, tomando como rango 5 décimas antes de la unidad y 5 décimas después de la unidad (Tabla 4.2).

Tabla 4. 2 Grupos de pH en base a rangos

Clasificación de pH			
<i>Nivel de pH</i>	<i>pH 9</i>	<i>pH 10</i>	<i>pH 11</i>
<i>Rango</i>	8.5 - 9.4	9.5 - 10.4	10.5 - 11.4
	Muestra 8	Muestra 5	Muestra 1
	Muestra 10	Muestra 9	Muestra 2
			Muestra 3
			Muestra 4
			Muestra 6
			Muestra 7

De la clasificación anterior se procede con la realización de las siguientes pruebas para cada grupo de pH (Ecuación 4.1):

$$4.1) \quad \% \text{ Absorción} = \frac{W_{hum} - W_{seco}}{W_{seco}}$$

- Absorción: cantidad de líquidos que retiene el material (%).
- Densidad relativa: relación entre el peso específico del cuerpo y el peso específico de la sustancia de referencia (kg/m³)(Ecuación 4.2):

$$4.2) \quad \text{Densidad} = \frac{W_{material}}{Vol. \text{ final} - Vol. \text{ inicial}}$$

- Peso específico de los sólidos (Ss): relación entre el peso de una sustancia y su volumen (Ecuación 4.3):

$$4.3) \quad Ss = \frac{100}{W_{matrazagua} + W_{material} - W_{aforado}}$$

- Módulo de finos: cantidad de finos de la muestra adimensional.

4.3 Porcentaje de absorción

En la Figura 4.2 se muestran los porcentajes de absorción obtenidos en agregados gruesos reciclados para cada una de las muestras respecto de la clasificación de muestras por su pH.

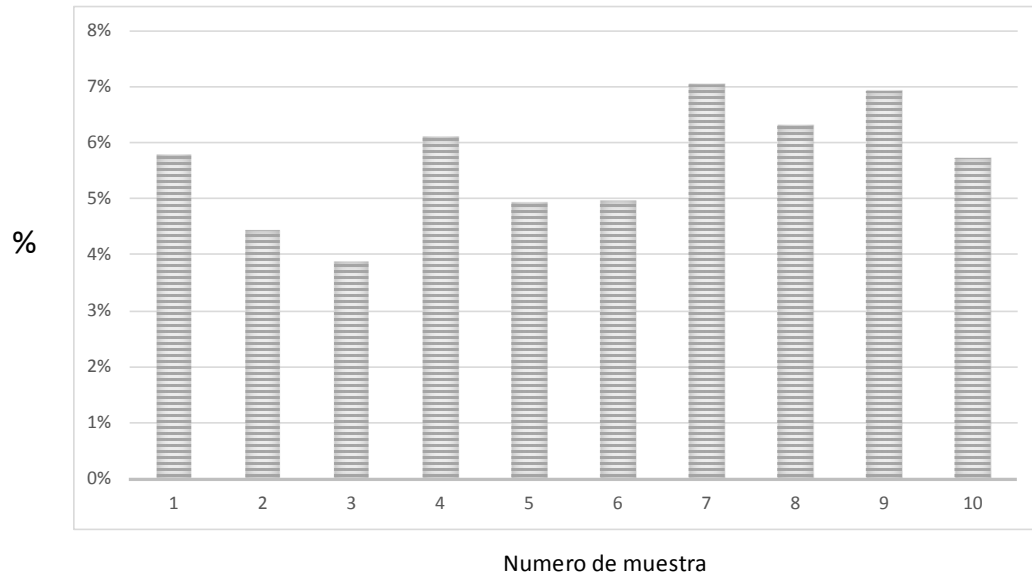


Figura 4. 2 Porcentajes de absorción agregados gruesos reciclados

Dentro de los resultados se puede apreciar que se tiene un rango de porcentajes de absorción que oscila entre el 4% y el 7%, cuando los agregados son reciclados.

En la Figura 4.3 se muestran los porcentajes de absorción obtenidos en agregados finos y gruesos naturales. Es importante resaltar que las muestras de agregado natural presentaron un porcentaje de absorción muy similar al porcentaje promedio de absorción que se presenta en los materiales basálticos.

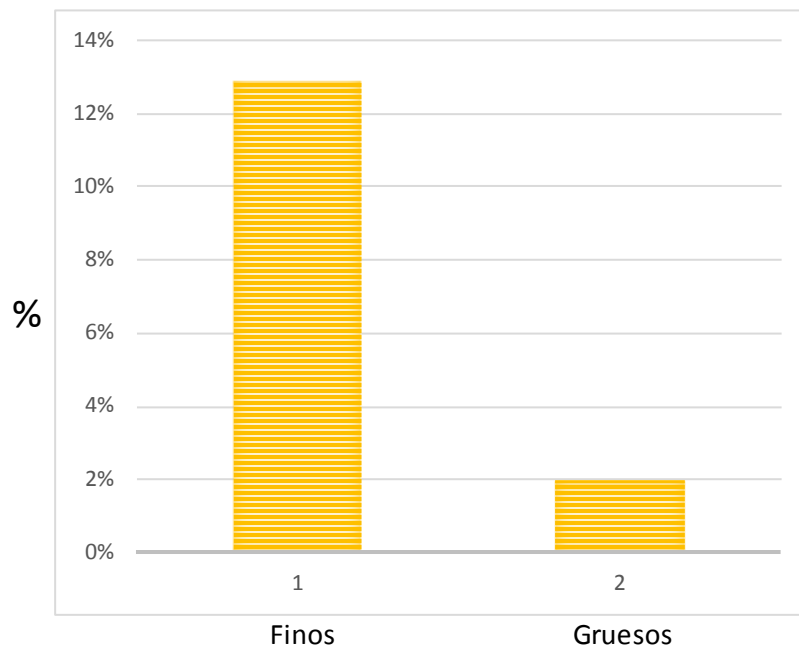


Figura 4. 3 Porcentajes de absorción agregados naturales

4.4 Densidad relativa de los materiales

En la Figura 4.4 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de densidad relativa, específicamente para los agregados gruesos. Dentro de la figura se muestra una columna designada con el número 11, esta columna indica la densidad de los agregados naturales.

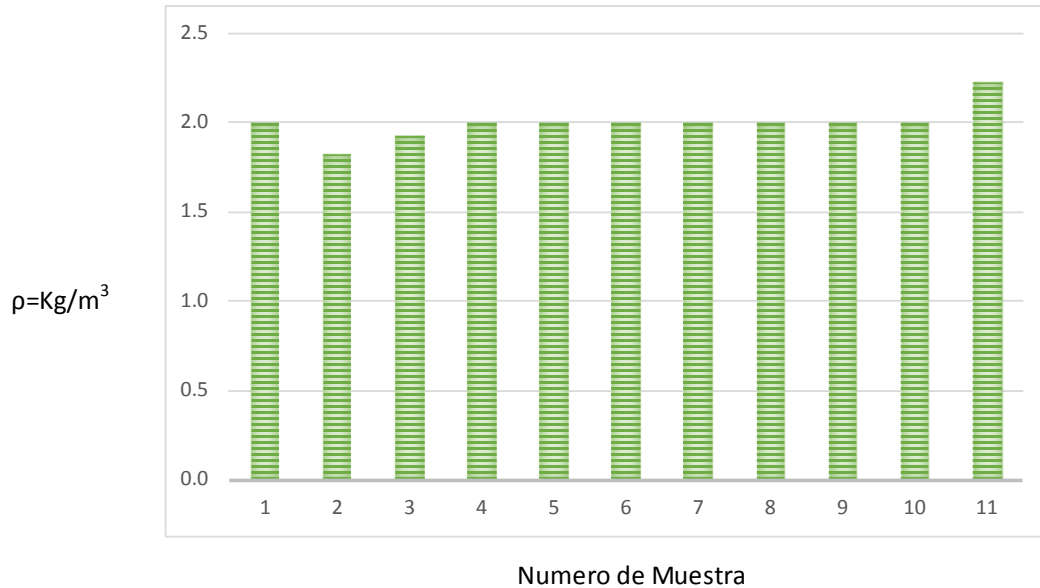


Figura 4. 4 Densidad de los agregados gruesos.

En la figura anterior se puede apreciar que la densidad de los agregados reciclados es menor que la de los agregados naturales.

4.5 Peso específico de los sólidos

En la Figura 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de peso específico de los sólidos, la columna designada como muestra 11; indica los resultados de la prueba para agregados naturales.

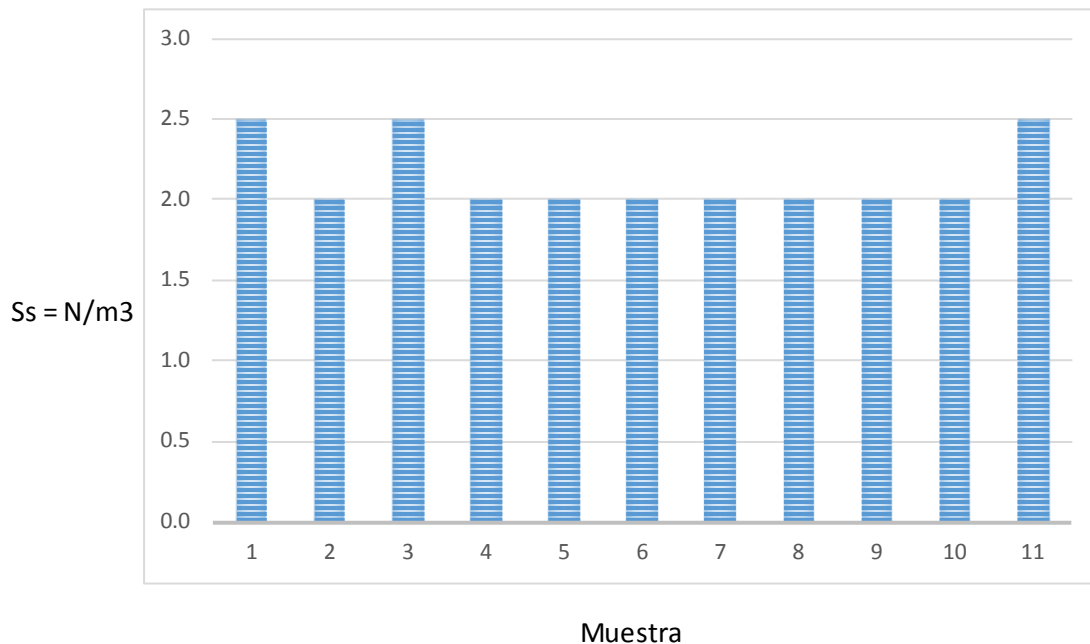


Figura 4. 5 Peso específico de los sólidos

4.6 Diseño de mezclas

Para el diseño de las mezclas (ACI, 2006) se utilizaron los datos enlistados en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 4.1, además de los siguientes datos:

- Revenimiento: muestra la trabajabilidad del concreto.
- Relación agua-cemento: cantidad de agua por kg de cemento.
- Peso específico de los materiales (arena y grava): relación del peso de un objeto (kg) en una unidad de volumen (m³).

Además de tener el pH de cada muestra se clasificaron estas muestras por grupos, redondeando valores para trabajar de una manera más sencilla con valores de pH: 9,10 y 11.

Partiendo del análisis de los primeros resultados obtenidos en la clasificación de los materiales con base en su pH, se observó que el pH disminuye de manera uniforme de acuerdo con los diversos factores involucrados, como lo son: la edad del concreto, la exposición que este tuvo a carbonatación e intemperismo. Se observó que para que el material tenga una variación significativa en este resultado, estos factores que generan la reducción del pH deben estar presentes en abundancia.

La implementación de agregados reciclados a una mezcla para concreto, produce la segregación del agregado fino durante el proceso de mezclado por medios mecánicos; el proceso de mezclado por medios mecánicos debe ser monitoreado principalmente en la etapa de vertido a los cilindros o, en su defecto, que el proceso de mezclado sea por medios manuales.

Existe una variación en el porcentaje de absorción de los agregados naturales con respecto a los agregados reciclados. Se observó que en las pruebas para agregados gruesos, esta variación aumenta del 2% de absorción al 7% cuando el agregado es reciclado, considerando el 2% es el porcentaje promedio de absorción de agregados naturales.

Con los resultados obtenidos de la pruebas de densidad relativa se llega a esta conclusión, el valor de la densidad relativa en agregados reciclados gruesos es menor que el valor promedio de densidad relativa en agregados naturales, esta disminución es debida a la presencia de cemento Portland en el concreto reciclado.

Los datos arrojados de la pruebas de peso específico de los sólidos indica que el peso específico de los sólidos en los agregados reciclados gruesos es menor respecto al peso específico de los sólidos de los agregados naturales. El pH no resulto ser un factor determinante para esta disminución, ya que esta variación es provocada por la consistencia heterogénea de los agregados reciclados.

4.7 Prueba de resistencia a la compresión

Los especímenes con agregado reciclado grueso presentan una resistencia más baja que los especímenes con agregado natural. De los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión, se aprecia que, para los especímenes que contienen agregados de pH 9 se tiene una resistencia muy baja, en comparación con el espécimen de agregados naturales (Figura 4.6)

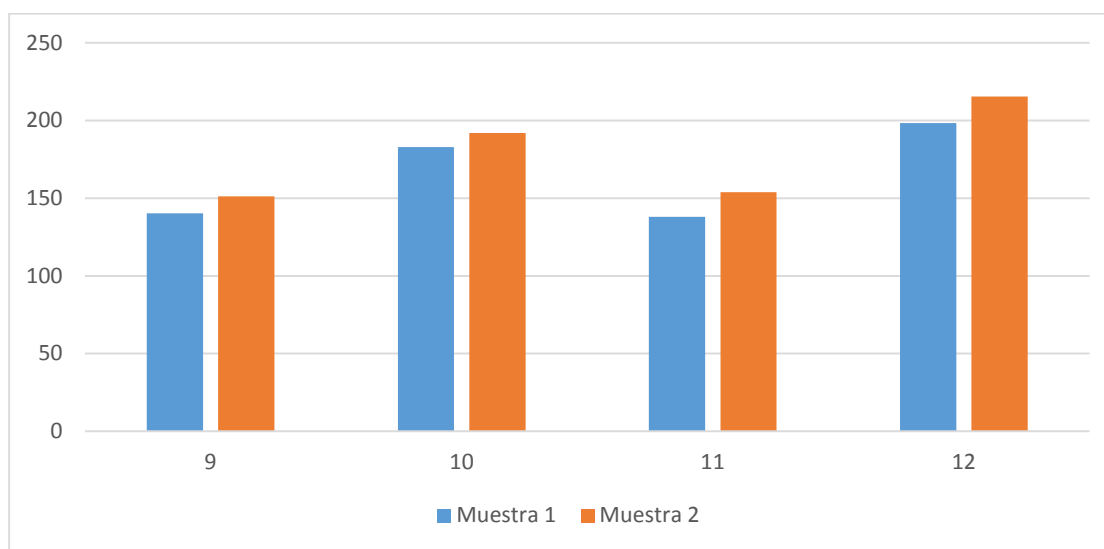


Figura 4. 6 Resultado de pruebas a la compresión

Para el espécimen con agregados de pH igual a 10, respecto de los demás especímenes con agregado reciclado, se observa una variación considerable en cuanto a la resistencia a la compresión. El espécimen con agregado de pH igual a 10 tiene una resistencia superior a la de cualquier otro espécimen con agregados reciclados. En la segunda muestra, su resistencia fue la esperada, muy parecida a la resistencia del anterior espécimen del mismo pH, por lo tanto se deduce que hubo un error de ensaye con el segundo espécimen. Los resultados obtenidos no son acordes a la hipótesis planteada para este trabajo; se observa que el comportamiento de la resistencia a la compresión no se comporta de una forma uniforme.

4.8 pH post-tronado

A continuación se muestran los resultados del pH de los especímenes después de haber sido sometidos a la prueba de resistencia a la compresión (Figura 4.3):

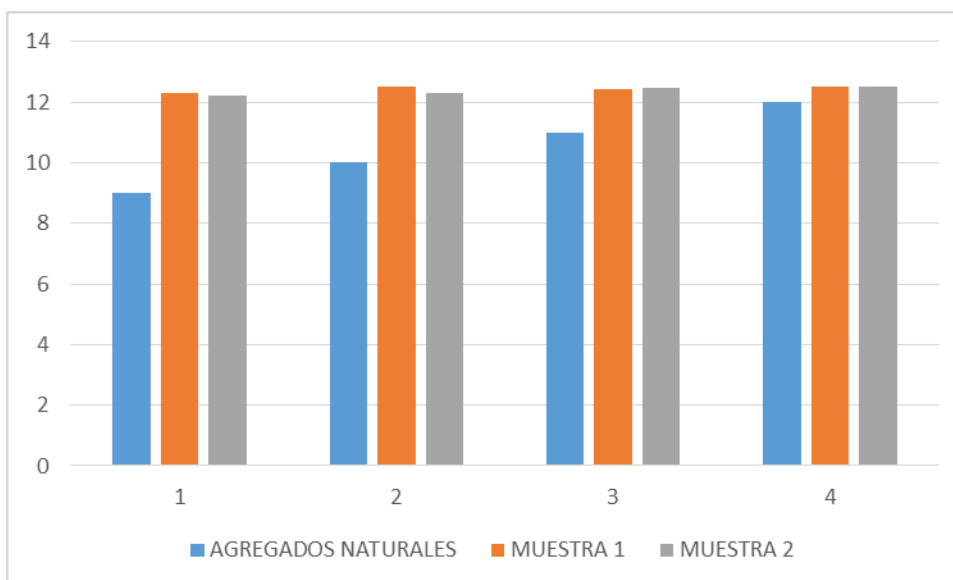


Figura 4. 3 Comparativa pH concreto post-tronado.

Partiendo de los resultados obtenidos en las mediciones de pH post-tronado, se aprecia un incremento considerable en el pH de los especímenes. Dicho incremento es producido debido a la incorporación del cementante a la mezcla, ya que este material al ser el más fino de la mezcla, se homogeniza casi perfectamente con los agregados, y por consecuencia se hace presente en toda la muestra.

Dentro del análisis se observa que el incremento del pH en las muestras es lineal, esto es debido a que el límite del incremento es denotado por el pH más alcalino, con un valor de 12, es decir el del cemento.

Por lo tanto, la implementación de un aglomerante a la mezcla de agregados reciclados, se observa que produce un aumento en la alcalinidad general de la muestra, teniendo como límite de alcalinidad el pH del aglomerante, con un valor de 12.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los agregados reciclados gruesos procedentes de concreto presentan un elevado nivel de poros, con posibilidad de absorber más agua y una densidad más baja que los agregados de uso acostumbrado.
- Los resultados de concretos reciclados apuntan a un incremento en su porcentaje de absorción, y a una reducción en su densidad y resistencia; dichas reducciones son proporcionales y producidas por el incremento de la cantidad de reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados gruesos procedentes de concreto.
- El comportamiento de los especímenes en las pruebas de resistencia a compresión, es de carácter no lineal. Se demostró que la resistencia a la compresión de los especímenes reciclados elaborados no sigue un comportamiento ascendente uniforme respecto del pH de cada espécimen. Por lo tanto, se concluye que el pH del concreto no presenta un comportamiento proporcional ni uniforme con respecto a su resistencia.
- El comportamiento de las mezclas de concreto con agregado reciclado, se mantiene dentro de los parámetros establecidos por (Etxeberria *et al.*, 2007), ningún espécimen presentó variaciones superiores al 25% de la resistencia respecto del concreto convencional.
- De las mediciones realizadas a los especímenes se demostró que después de implementar cemento ordinario a la mezcla de concreto reciclado, el pH se incrementa.

5.2 Recomendaciones

Realizar un análisis petrográfico y una microscopía electrónica de barrido para conocer la composición mineralógica y estructura de los materiales de la masa del concreto y sus enlaces. Esta información ayudará a tener una seguridad de por qué el concreto con pH = 10 aumentó su resistencia de manera importante.

LITERATURA CITADA

- ACI. (2006). *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI-211.1)*. Association, P. C. (8 de Julio de 2013). *Instituto del cemento portland argentino*. Obtenido de http://www.icpa.org.ar/publico/files/curado_del_hormigon.pdf
- ASTM. (2004a). C127-01. *Metodo de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad especifica) y de absorcion de agregados gruesos*.
- ASTM. (2004b). C128-01. *Metodo de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad especifica) y de absorcion de agregados finos*.
- ASTM. (2004c). T 128. *Metodo para la determinación de la gravedad específica y absorcion de agregado fino*.
- ASTM. (2013). D4972-13. *Standard test method for pH of solids*.
- C.S. Poon, e. a. (Junio de 2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates. *Pergamon*, 34(1), 31-36.
- Carrillo, T. (2004). *Curso Básico de Tecnologia del Concreto para Ingenieros Civiles*. Lima, Perú.
- Coelho, A., & De Brito, J. (2012). Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. *Waster Manage*, 32, 532-541.
- Cruz García, J. A., Velázquez Yáñez, R., & Castro Usla, M. (2004). *Concreto Reciclado. Instituto Politécnico Nacional*, 1, 16.
- Domínguez, e. a. (2004). *Revista Cemento-Hormigón. Hormigones reciclados: una alternativa sustentable y rentable*, 10-21.
- Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Elsevier*, 37, 735-742.
- Evangelista, L. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Elsevier*, 29, 397-401.
- F. Pacheco-Torgal, J. L. (2013). *Eco-Efficient Concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 1.
- Harmen, E. T. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado* (4 ed.). Fondo editorial de la pontificia universidad catolica de peru.
- Hurtado, S. (2010). Eficiencia anticorrosiva de primarios en acero 1018 embebido en concreto contaminado expuesto al ambiente. *XXVII Congreso de la SMEQ*. Zacatecas.
- Jianzhuang, X., Jiabin, L., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35, 1187-1194.
- Juarez Badillo, R. R. (2005). *Mecánica de suelos, Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- K. K. Sagoe-Crentsil, T. B. (2001). Performance of concrete made with commercially produce coarse recycled concrete aggregate. *Elsevier*, 31, 701-712.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Elsevier*, 33, 703-711.
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Elsevier*, 35, 763-

- Koenders, E. A., Pepe, M., & Martinelli, E. (2013). Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. *Elsevier*, 56, 203-212.
- Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Montani, R. (Diciembre de 2000). *Instituto mexicano de concreto y cemento - ciencia y tecnología*.
Obtenido de <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>
- Pacheco-Torgal, F. (2013). Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. *Elsevier*, 10-13.
- Qionj, L., Jianzhuang, X., & Zhihui, S. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Elsevier*, 41, 1050-1057.
- R.V. Silva, e. a. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction. *Construction and Building Materials*, 1-2.
- Remolina, N. (2013). *Los agregados en el concreto*. Obtenido de <http://www.argos.com.co>
- Sánchez de Buen, D. (2001). Tecnología del Concreto y Mortero. *Bhandar* , 12-19.
- SCT. (2002). N-CMT-2-02-002-02.
- Taylor, H.F.W. (1978). *La química de los cementos*. España: Urmo.
- Winter, N. B. (2012). *Understanding Cement* (Vol. 1). Londres, United Kingdom: WHD Microanalysis Consultants Ltd.
- Xiao, J. (2012). Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. *Elsevier*, 42, 700-709.
- Zega, C. J., & Di Maio , A. A. (2011). Use of Recycled Fine Aggregates in Concretes with Durable Requirements. *CONICET*, 2336-2340.
- Zega, e. a. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *ELSEVIER*, 31, 2336-2340.