



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

**“RECICLAJE DE CONCRETO PREMEZCLADO PARA LA
FABRICACIÓN DE AGREGADOS”**

Tesis que presenta:

IRIS ESMERALDA MARTÍNEZ SOTO

Como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería (Construcción)

Dirigida por:

**ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES
M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**

Ciudad Universitaria, México D.F.
Febrero de 2005



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.

A Bogart, mi esposo

A mi madre

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por esta oportunidad.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

Al M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por su confianza y porque sin su gran apoyo este trabajo simplemente no hubiera sido posible, gracias.

Al Ing. Juan Luis Cottier Caviedes, por su apoyo incondicional

A mis profesores, sinodales, compañeros y amigos por sus enseñanzas y comentarios.

A los Sres. Concho Hernández y Raymundo Mondragón, por su gran ayuda, paciencia y amabilidad para sacar adelante todo el trabajo de laboratorio.

A mi familia por su gran apoyo y confianza.

A Wayne y Joan Fox por creer todo el tiempo que lo lograríamos. Thank you padrinos!

A CONACyT, porque sin su apoyo ésto no hubiera sido posible.

A todos los que participaron directa o indirectamente en el cumplimiento de esta meta, ¡gracias!.

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	i
Objetivos	ii
Alcance del trabajo	iii
Lista de tablas	vi
Lista de figuras	viii
CAPÍTULO PRIMERO	
1 Generalidades del Reciclaje de Concreto	1
1.1 Introducción	1
1.2 Terminología	1
1.3 Antecedentes	3
1.4 Importancia del reciclaje de concreto	9
1.5 Métodos actuales de reciclaje de concreto	9
CAPÍTULO SEGUNDO	
2 Fabricación de agregados	11
2.1 Introducción	11
2.2 Descripción general del equipo	12
2.3 Descripción del material utilizado	13
2.4 Procesamiento del material para la elaboración de los agregados	14
2.4.1 Procesamiento del agregado fino	18
2.5 Almacenamiento de los agregados	19
2.6 Cemento y agua	20

CAPÍTULO TERCERO	
3 Propiedades físicas de los agregados	21
3.1 Introducción	21
3.2 Granulometría	21
3.2.1 Agregados reciclados	21
3.2.2 Agregados naturales	24
3.2.2.1 Gravas	24
3.2.2.2 Arena	24
3.3 Tamaño máximo de agregado	25
3.4 Coeficiente de forma	25
3.5 Humedad	26
3.6 Absorción	27
3.7 Densidad relativa o peso específico	28
3.8 Peso volumétrico	31
3.9 Forma de las partículas y textura superficial	33
3.10 Dosificación de mezclas	34
3.10.1 Elección de las características de las mezclas	34
CAPÍTULO CUARTO	
4 Resultados y Discusión	40
4.1 Introducción	40
4.2 Elaboración de los concretos	40
4.3 Propiedades del concreto en estado fresco	43
4.3.1 Peso volumétrico fresco	43
4.3.2 Contenido de aire	46
4.3.4 Revenimiento	48
4.4 Propiedades del concreto en estado endurecido	52
4.4.1 Resistencia a la compresión	52
4.4.2 Módulo de elasticidad	56
4.4.3 Resistencia a flexión	63
4.4.4 Resistencia a tensión	68
CAPÍTULO QUINTO	
5 Conclusiones	74
Referencias	78

RESUMEN

Se elaboraron agregados a partir de dos tipos de concreto premezclado, el primero que provenía de especímenes de concreto para control de calidad ya ensayados y el segundo, de unas vigas que se ensayaron en el laboratorio hace varios años. El primer tipo de concreto estaba compuesto de agregado natural calizo y el segundo de andesita.

Se trituraron y cribaron en el laboratorio para obtener un tamaño máximo de los agregados (TMA) de 19mm (3/4"). Se controlaron las granulometrías de los agregados reciclados y naturales y se obtuvieron las propiedades físicas de absorción, humedad, coeficiente de forma, peso volumétrico y densidad de cada uno de los agregados.

Todas las mezclas de concreto se elaboraron con arena de andesita natural y para cada tipo de agregado se utilizaron consumos de cemento de 200, 300 y 400 kg/m³, se fabricaron 12 mezclas en total.

Se estudiaron las propiedades mecánicas de los concretos; a la edad de 7, 14 y 28 días a compresión simple, y a 28 días a tensión por compresión diametral, flexión y módulo de elasticidad.

Con los resultados obtenidos se hicieron comparaciones entre los comportamientos de los concretos reciclados y los naturales, encontrando que los agregados reciclados tienen un comportamiento aceptable y que es posible utilizarlos de la misma manera que se emplean los concretos naturales.

Los resultados obtenidos indicaron que el comportamiento de los concretos reciclados es semejante al de los concretos naturales y que la calidad del material que se recicla influye drásticamente en las propiedades mecánicas de los concretos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar las propiedades físicas de los agregados reciclados elaborados a partir de concretos premezclados fabricados con agregado calizo y con agregado andesítico. Asimismo, confrontar las propiedades mecánicas de los concretos hechos con agregados reciclados y naturales. Finalmente, determinar bajo que condiciones es factible la utilización de los concretos reciclados para sustituir a los naturales.

Objetivos particulares

- Obtener el material necesario para elaborar los dos tipos de agregado reciclado.
- Estudiar las propiedades físicas del agregado reciclados y de los naturales.
- Elaborar mezclas de concreto con los agregados reciclados y naturales.
- Ensayar los concretos para conocer sus propiedades mecánicas y compararlas con las de los concretos naturales.

ALCANCE DEL TRABAJO

Los resultados presentados en este trabajo son válidos para agregados que cumplan con las características que tuvieron los utilizados en este experimento. Sin embargo, estos resultados pueden tomarse como indicativos del comportamiento de los agregados reciclados y de los concretos fabricados con ellos en la región de que provienen.

Palabras clave: concreto premezclado, elaboración de agregados reciclados, agregados naturales, comportamiento mecánico de los concretos reciclados.

LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1.1	Análisis granulométrico de agregado grueso proveniente de concreto reciclado y agregado de basalto	6
1.2	Nomenclatura de las mezclas y detalles de las mezclas de los especímenes de concreto	6
3.1	Rangos de clasificación del coeficiente de forma	25
3.2	Valores de coeficiente de forma obtenidos en el laboratorio de los agregados utilizados en este trabajo	26
3.3	Humedad de los agregados	26
3.4	Absorción de los agregados utilizados en los experimentos	28
3.5	Densidades relativas	29
3.6	Estimación de la densidad de un agregado reciclado, obtenido de un concreto normal proporcionado de acuerdo con la figura 3-3	30
3.7	Densidades de los materiales utilizados por otros autores	30

3.8	Pesos volumétricos compactados obtenidos	31
3.9	Pesos volumétricos de los agregados obtenidos por otros autores	32
3.10	Proporcionamientos originales de las mezclas de este trabajo	37
3.11	Revenimientos de las mezclas elaboradas medidos en laboratorio	37
3.12	Consumos medios de agua por m ³ de mezcla para diferentes tipos de agregado y un revenimiento de 10 cm	38
3.13	Proporcionamientos ajustados al peso volumétrico fresco obtenido en laboratorio	38
4.1	Pesos volumétricos promedio de las mezclas elaboradas	44
4.2	Contenidos de aire obtenidos	46
4.3	Revenimientos obtenidos	49
4.4	Resistencias de todas las mezclas a diferentes edades de ensaye, porcentajes de resistencias normalizadas a los 28 días de edad	53
4.5	Módulos de elasticidad promedios de todas las mezclas	58
4.6	Módulos de ruptura de las doce mezclas de concreto	64
4.7	Resistencias a la tensión de todas las mezclas elaboradas	69

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.1	Producción de ACR (tomado y adaptado de Chen <i>et al</i> [29])	4
1.2	Resistencia a la compresión del concreto nuevo con agregado triturado a diferentes edades comparadas con los concretos de referencia	8
2.1	a) Trituradora, b) cribadora	12
2.2	Material cribado	13
2.3	(a) Escombros de vigas demolidas, para hacer agregado andesítico grueso. (b) Agregado calizo reciclado tamaño 19 mm (3/4"), producto de cilindros estándar de concreto	13
2.4	Equipo utilizado para conocer la distribución de tamaños de todos los agregados	15
2.5	Granulometría de los agregados reciclados	16
2.6	Curvas granulométricas del agregado natural en su estado original	16
2.7	Granulometría de los agregados naturales una vez procesados	17

2.8	Curvas granulométricas de los agregados reciclados y naturales como se utilizaron	17
2.9	Curva granulométrica de la arena como se utilizó en los experimentos	18
2.10	Envasado de material natural y reciclado. (a) En tanques y plataformas, (b) en costales con 30 kg de los materiales que pasan la malla 9.5 mm (3/8") y con 40 kg de los que pasan la 19 mm (3/4")	19
3.1	Curva granulométrica de los experimentos realizados por Katz (modificado de [27])	23
3.2	Curva granulométrica de los experimentos realizados por How-Ji Chen (modificado de [29])	23
3.3	Proporciones de los componentes de un concreto normal	29
3.4	Especimen fallado a tensión por compresión diametral	34
3.5	Dosificación de las mezclas de concreto	35
4.1	(a) Mezcla en reposo en la revolvedora utilizada. (b) Primera etapa de llenado de cilindros	42
4.2	(a) Cilindros enrasados. (b) Descimbrado de especímenes	42
4.3	(a) Especímenes en cámara de curado. (b) Especímenes cabeceados	42
4.4	Pesos volumétricos frescos (PVF) medidos en laboratorio a) de los agregados naturales vs reciclados b) de los agregados reciclados sin saturar vs los agregados reciclados saturados	44
4.5	Pesos volumétricos frescos de varios autores	45
4.6	Contenidos de aire obtenidos	46

4.7	Contenidos de aire obtenidos por otros autores	47
4.8	Revenimientos obtenidos	49
4.9	Consumos de agua vs revenimiento	49
4.10	Consumos medios de agua vs revenimientos promedio	51
4.11	Relación agua-cemento vs revenimiento de todas las mezclas de este trabajo	51
4.12	Relación agua-cemento vs revenimiento (Resultados de otros autores)	52
4.13	Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión de las mezclas con andesita	54
4.14	Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión de las mezclas con caliza	54
4.15	Resistencias a la compresión obtenidos por otros autores	56
4.16	a) Vista de cilindro ensayado a módulo de elasticidad, b) Cilindro fallado	57
4.17	Resistencia a la compresión (f_c) vs módulo de elasticidad (E) de calizas	59
4.18	Resistencia a la compresión (f_c) vs módulo de elasticidad (E) de andesitas	60
4.19	Relación agua-cemento vs módulo de elasticidad medido en laboratorio	61
4.20	Resistencia a la compresión vs deformación unitaria máxima, a) calizas y b) andesitas	61

4.21	Consumo de cemento vs módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio	62
4.22	Módulos de elasticidad obtenidos por Katz	62
4.23	Vigas ensayadas a flexión: a) espécimen 1, b) espécimen 2	64
4.24	$(f'c)^{1/2}$ vs módulo de ruptura	65
4.25	Consumo de cemento vs módulo de ruptura	66
4.26	Relación agua-cemento vs módulo de ruptura	66
4.27	Resistencia a la compresión vs Módulo de ruptura obtenidos por Abdol	67
4.28	$(f'c)^{1/2}$ vs resistencia a la tensión	70
4.29	Consumo de cemento vs resistencia a la tensión	70
4.30	Relación agua-cemento vs resistencia a la tensión	71
4.31	Resistencia a la tensión vs resistencia a la flexión (MR)	72
4.32	Raíz cuadrada de la resistencia a la compresión vs resistencia a la tensión, comparación con lo obtenido por Abdol	72

CAPÍTULO PRIMERO

1. Generalidades del Reciclaje de concreto

1.1 Introducción

El reciclaje de concreto es relativamente nuevo en México. Esta práctica beneficia a la economía de las empresas, al ambiente, a la sociedad y crea la necesidad de avances tecnológicos desde su implementación.

Las ventajas que el reciclaje de concreto trae consigo son mayores que las desventajas mismas. Respecto de las bondades del reciclaje, se puede decir que los componentes del concreto son reutilizables aplicando cualquiera de los métodos existentes para reciclarlo, en vez de considerarlos como un desperdicio, así como también representa una reducción en el uso de recursos no renovables.

Cuando se opera una planta de trituración, ésta genera ruido, vibraciones y polvo. Sin embargo, la selección adecuada de la ubicación de la planta puede mejorar la situación para evitar molestias a las personas que vivan cerca de ella, cuidando también las condiciones ambientales y legales que lleve consigo.

En este capítulo se presentan los antecedentes del reciclaje del concreto, su importancia y los métodos actuales que se utilizan.

Para facilitar la comprensión de este trabajo se presenta un glosario con los términos utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación.

1.2 Terminología

Agregados naturales: Agregados convencionales (grava y arena) a partir de los cuales se produce el concreto original. Los agregados originales pueden ser finos o gruesos, de origen natural o manufacturados.

Agregados reciclados: Agregados que se producen mediante el tratamiento de la fracción pétreo de los residuos de la construcción, demolición o concreto endurecido. Tales agregados pueden ser finos o gruesos.

Concreto: Material conformado por una mezcla de arena y grava embebida en una matriz de cemento y agua. Muy frecuentemente se emplean grava y arena trituradas debido a la falta de disponibilidad de los agregados completamente naturales. El peso volumétrico de los concretos elaborados con los agregados usuales oscila entre los 2,100 y 2,400 kg/m³ y su resistencia a la compresión excede los 100kg/cm². Se le conoce también con el nombre de concreto hidráulico para diferenciarlo del concreto asfáltico, y porque endurece bajo agua.

Concreto CPO: Concreto reciclado producido a partir de la utilización de una pasta con cemento portland ordinario.

Concreto CPB: Concreto reciclado producido a partir de una pasta de cemento portland blanco.

Concreto CPEG: Concreto reciclado producido a partir de una pasta de cemento portland con escoria granulada.

Concreto CPP: Concreto reciclado producido a partir de una pasta de cemento portland puzolánico.

Concreto original: Concreto con o sin acero de refuerzo proveniente de estructuras o de unidades prefabricadas que puede utilizarse como materia prima para la producción de agregados reciclados (u otros propósitos útiles).

Concreto reciclado: Concreto que se produce usando agregados reciclados o combinaciones de agregados reciclados con otros tipos de agregados.

Escombros: Residuos que se producen durante la demolición o la construcción de edificaciones, constituidos fundamentalmente por concreto, ladrillos, bloques, tabiques, roca, metales, madera, plásticos, papel y otros.

Módulo de elasticidad: Relación que existe entre la magnitud de los esfuerzos que provocan la deformación elástica de un sólido y el valor que alcanza dicha deformación.

Reciclaje: Proceso simple o complejo que sufre un material o producto para reincorporarlo a un ciclo de producción o de consumo, ya sea éste el mismo en que fue generado u otro diferente.

Relación agua-cemento: Razón entre la cantidad de agua y cemento presentes en una mezcla para la elaboración de concreto. Es la principal variable de diseño puesto que determina la resistencia del concreto, a menor relación agua-cemento mayor resistencia.

Reusar, reutilizar: Volver a usar un producto o material sin tratamiento. Equivale a “reciclar directamente”.

ACR: Agregados producidos de concreto reciclado mediante un proceso de trituración.

1.3 Antecedentes

La producción de agregado grueso a partir de concreto reciclado es una práctica relativamente nueva que se ha venido desarrollando en gran medida en la última década. La investigación al respecto se ha enfocado a dos procedimientos distintos: uno es el de producir ACR a partir de los residuos sólidos de la construcción y demolición, propiamente dicho, del escombros, y el segundo, es el de obtener ACR a partir del concreto premezclado nuevo proveniente de cilindros de concreto elaborados para el control de calidad de distintas obras, o del desperdicio de las propias plantas premezcladoras.

Respecto del primer procedimiento, se han publicado distintos trabajos, como el de Stamatia y Taichi en 1977 [24], quienes observaron que se producía una gran cantidad de escombros de concreto en las áreas metropolitanas, por lo que decidieron estudiar la factibilidad económica de obtener ACR. En su estudio encontraron que el costo del concreto con agregado reciclado era menor en un 38% que el concreto fabricado con agregado natural.

También en 1977, Nixon [25] presentó un estado del arte sobre el concreto reciclado, en el cual concluye que varios investigadores han examinado las propiedades básicas del concreto en las que el agregado es producto de la trituración de otro concreto; muchos han trabajado con materiales limpios sin contaminar, frecuentemente viejos especímenes de laboratorio, uno de los casos de este trabajo.

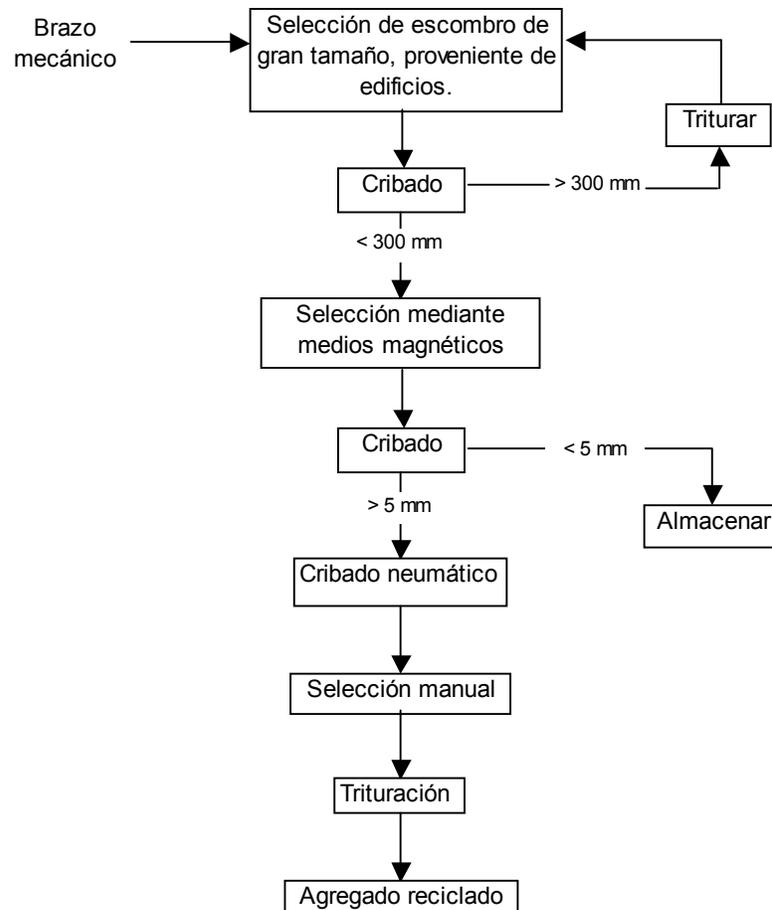


Fig. 1-1. Producción de ACR (tomado y adaptado de Chen *et al* [29])

Acerca de las propiedades del concreto hecho con ACR, existe una gran cantidad de investigación al respecto [26 - 35]. En el caso de la producción de ACR a partir de escombros, se han reportado las propiedades de concretos fabricados con este tipo de ACR en investigaciones recientes. Chen *et al* [29] llevaron a cabo estudios experimentales utilizando ACR de distintas composiciones obtenidos de escombros de concreto proveniente de diferentes edificios dañados o demolidos.

Los escombros que recolectaron contenían diferentes porcentajes de contaminantes como desperdicios de concreto, azulejo, ladrillo, acero, madera, plástico, papel, entre otros. Dentro de estos materiales, la madera, el papel y el plástico eran los que afectaban más seriamente la resistencia del concreto reciclado. Para minimizar el contenido de estos contaminantes, implementaron un sistema de limpieza (figura 1-1) y de esta forma obtuvieron dos grupos de agregado reciclado de diferentes regiones de Taiwán que seleccionaron para someterlos a prueba.

Mediante sus estudios, Chen *et al* concluyeron lo siguiente:

1. Los escombros de edificios pueden ser transformados en ACR útil, mediante el procedimiento adecuado. Las propiedades mecánicas del concreto reciclado fueron generalmente menores que las del concreto normal. El efecto en las propiedades mecánicas del contenido de azulejo y ladrillo (0-67%) es relativamente limitado.
2. El utilizar ACR sin lavar, en la fabricación de concreto, afecta su resistencia. El efecto se vuelve más evidente a relaciones agua-cemento bajas. Para una relación agua-cemento de 0.38, la resistencia a la compresión del concreto reciclado mantiene solo el 60% de la resistencia de un concreto normal. Sin embargo, la resistencia se puede incrementar a más de 75% cuando la relación agua-cemento es mayor de 0.60.
3. El módulo de elasticidad del concreto reciclado fue de alrededor de 70% de la del concreto normal. Cambiar la relación agua-cemento o el contenido de ladrillo y azulejo en los agregados reciclados no representa un efecto significativo en el valor del módulo de elasticidad.
4. Bajo las mismas proporciones de mezcla, las propiedades mecánicas del concreto reciclado fueron menos buenas que las del concreto normal. Cuando se utilizó ACR lavado, los efectos negativos se mejoraron significativamente. Esto es particularmente cierto para la resistencia a la flexión del concreto reciclado.
5. Para relaciones agua-cemento altas, la resistencia a la compresión del concreto reciclado es similar a la del concreto normal. Para relaciones agua-cemento bajas, la resistencia a la compresión del concreto reciclado es mucho menor que la del concreto normal. Se puede obtener concreto reciclado de alta resistencia incrementando la proporción de cemento en la mezcla, aunque no sería un proporcionamiento económico.

De las conclusiones que obtuvieron Chen *et al* de sus experimentos, es posible observar que la producción de concretos de alta resistencia a partir de ACR obtenidos de escombros, es antieconómico en comparación con los concretos naturales.

De los concretos fabricados con ACR producidos comercialmente, también existe investigación al respecto [26-28, 30-32, 35]. K.K. Sagoe *et al* [26] realizaron un estudio del comportamiento de un concreto fabricado con ACR comercial. El experimento consistió en fabricar concretos reciclados y concretos naturales, con agregados de características como las mostradas en la tabla 1-1. Los detalles de los concretos realizados se muestran en la tabla 1-2. El agregado fino para todas las mezclas fue arena natural.

Los resultados de sus experimentos mostraron que los ACR producidos comercialmente en una planta, están compuestos de partículas relativamente redondeadas, lo que lleva a

Tabla 1-1. Análisis granulométrico de agregado grueso proveniente de concreto reciclado y agregado de basalto

Agregado grueso	Pasa la malla, en %						
	19	13.5	9.5	6.7	4.75	2.35	150 μ m
Tamaño máximo (mm)							
Agregado de concreto reciclado	100	91.4	28.7	7.6	5.4	0.2	0.5
Basalto	100	84.0	43.7	5.6	2.1	1.0	0.2

Tabla 1-2. Nomenclatura de las mezclas y detalles de las mezclas de los especímenes de concreto

Designación de la mezcla	Contenido de cemento (kg/m ³)	Tipo de Cemento	Relación A/C	Revenimiento (mm)	P. V. F. (kg/m ³)	Cont. de aire %	Agregado grueso
C0912A	242.00	CPO	0.76	90	2466.00	2.40	basalto
C0912B	240.00	CPO	0.73	75	2335.00	2.40	reciclado
C1212A	238.00	CPEG	0.74	95	2321.00	1.80	reciclado
C1212B	254.00	CPO	0.70	80	2335.00	2.30	reciclado

mejorar la trabajabilidad del concreto en comparación con los concretos naturales producidos con agregado grueso a base de basalto, con una granulometría equivalente.

Encontraron también, que para las mezclas con proporción volumétrica y trabajabilidad similar, no hubo diferencia significativa, para el 95% de nivel de confianza, a la edad de 28 días, en la resistencia a la compresión, entre los concretos fabricados con ACR comercial y los fabricados con basalto natural. Sin embargo, se observaron valores más altos de contracción lineal en los concretos reciclados.

Respecto de la resistencia a la tensión, Sagoe *et al* encontraron que los especímenes fabricados de concreto reciclado curados por un periodo de 365 días, no mostraron una reducción estadísticamente significativa en la resistencia en el periodo de 91 a 365 días. Se observó también que los concretos reciclados mostraron una reducción en la resistencia a la abrasión de 12% respecto del concreto natural, y además la absorción no mostró gran diferencia entre ambos concretos.

Las características de concretos reciclados elaborados con cemento blanco también se han examinado. Katz [27] realizó estudios experimentales sobre concretos reciclados hechos a base de cemento portland ordinario (CPO) y de cemento portland blanco (CPB), para investigar sus propiedades. El programa experimental consistió en realizar un estudio de las propiedades del concreto nuevo hecho con ACR preparado con concreto viejo parcialmente hidratado.

El término de “concreto viejo” se refiere a los desperdicios de concreto utilizados para producir los ACR, mientras que al decir “concreto reciclado” se refiere al concreto nuevo elaborado con los ACR. El ACR es el agregado producido mediante la trituración del concreto viejo, mientras que el “agregado natural” se refiere al agregado nuevo obtenido mediante la trituración de roca natural.

El concreto viejo utilizado en este trabajo de tesis, se obtuvo a partir de elementos de concreto utilizados en pruebas estándar en el proceso de aseguramiento de la calidad en la fabricación del concreto y de vigas, producto de la demolición de especímenes de laboratorio ya ensayados.

Como resultado de los experimentos realizados, Katz encontró que las propiedades de los ACR triturados a diferentes edades fueron muy similares y que la distribución granulométrica de los ACR fue la misma para las tres edades de los concretos utilizados en el experimento para fabricar los ACR, al igual que otras propiedades como la absorción, peso específico y contenido de cemento. Estas observaciones indican que a estos niveles de resistencia y estructura del concreto viejo, los agregados hechos de éste, tienen propiedades similares. Sin embargo, los agregados triturados a un día de edad aún cuentan con cierta capacidad de cementación, pero ésta decrece rápidamente en unos pocos días.

Katz concluyó que el concreto hecho 100% con ACR es menos resistente que el concreto natural, para la misma relación agua-cemento.

Sin importar la edad a la que fue triturado el concreto viejo para fabricar los agregados, el concreto reciclado hecho con el mismo tipo de cemento portland y la misma relación agua-cemento que el concreto viejo del que se obtuvieron los agregados, tuvo una resistencia 25% menor que el concreto original, aproximadamente.

En el caso del concreto reciclado elaborado con cemento blanco, la reducción fue del orden de 30-40%, dependiendo de la edad a la que fue triturado el concreto viejo (ver figura 1-2). También encontró que otras propiedades como la resistencia a la flexión, absorción, entre otras, mostraron tendencias similares.

Las propiedades del concreto reciclado elaborado con CPB y agregado triturado a los 3 días de edad fueron significativamente mejores que aquellos concretos hechos con agregado triturado a 1 y 28 días de edad. Se observaron tendencias opuestas en el caso del concreto reciclado elaborado con CPO en donde la nueva matriz de cemento fue menos resistente que la del concreto con CPB para la misma relación agua-cemento.

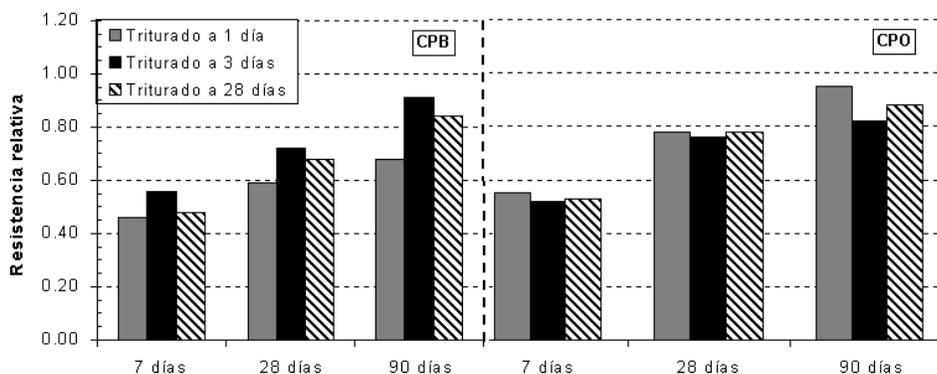


Fig. 1-2. Resistencia a la compresión del concreto nuevo con agregado triturado a diferentes edades comparadas con los concretos de referencia

Concluyó también que al parecer existen dos mecanismos opuestos que afectan las propiedades del concreto nuevo: las propiedades físicas del concreto viejo y la presencia de cemento sin hidratar en el ACR. Estos efectos son más notables cuando la nueva matriz de cemento y agua es significativamente más fuerte que la del concreto viejo. En un concreto con estas características, la combinación de resistencia y capacidad de cementación de los agregados reciclados triturados a los 3 días, proveen mejores resistencias sobre los agregados reciclados triturados a 1 y 28 días de edad.

Finalmente, Katz concluye que las propiedades de los agregados hechos de concreto triturado (ACR) y el efecto de los agregados en el nuevo concreto en sus propiedades mecánicas (resistencia, modulo de elasticidad, etc.) son similares a las de los concretos hechos con agregados ligeros, por lo que se aplican consideraciones similares cuando se utiliza este tipo de agregados. Esta conclusión concuerda con la encontrada por Chen *et al.* Estas son algunas de las investigaciones más recientes respecto de los ACR. Existen múltiples aplicaciones para estos agregados, entre ellas su utilización para fabricar pavimentos [32, 34, 35].

También es posible utilizar concreto reciclado en aplicaciones estructurales. Un estudio de este tipo fue desarrollado en 1977 por Stamatia y Taichi [24], en donde encontraron que los elementos estructurales construidos con concreto reciclado eran 20% más grandes en volumen, respecto a los fabricados con concreto natural.

Para utilizar un concreto reciclado en la construcción de elementos estructurales, los agregados reciclados deben cumplir ciertas características, como por ejemplo ser un material limpio, bien triturado y graduado, y debe cumplir también con ciertos límites de graduación, contenido mínimo de contaminantes y cumplir otros requerimientos de

estabilidad y durabilidad. Estas regulaciones están marcadas por el comité RILEM 121-DRG [36], al igual que en las recomendaciones emitidas por Bélgica [37], Japón [38] y otras especificaciones o recomendaciones [39].

1.4 Importancia del reciclaje de concreto

El reciclaje del concreto prefabricado de las plantas premezcladoras es muy importante desde el punto de vista de prevención de molestias públicas y de preservación de los recursos naturales. El desecho de concreto se ha vuelto no sólo un problema ambiental, sino también social.

El concreto se devuelve a la planta premezcladora por muchas razones, ya sea que la cantidad ordenada es mayor que la necesitada, porque el concreto no cumple con las especificaciones requeridas, o porque surge algún problema en el sitio que causa el retraso del colado. Cualquiera que sea la razón, es necesario dar solución al problema del desperdicio, puesto que con esto se beneficiarían tanto las empresas, como la sociedad, el ambiente y la creación de nuevas tecnologías que exigiría la necesidad de un reciclado más efectivo.

El uso de escombros y de concreto premezclado no utilizado como fuente de agregado para producir concreto nuevo se ha vuelto más común en la última década. Esto se debe, por una parte, a que los precios de los tiraderos autorizados se han incrementado, y por otro lado, la escasez de los agregados naturales, impulsan el uso del escombros y de los sobrantes de las fábricas de concreto premezclado como recurso para la producción de agregado.

Respecto de la utilización de escombros para producir agregado, el método promete una solución al problema de los 200 millones de toneladas de escombros por año que se generan tan solo en los Estados Unidos [40]. Actualmente, en la ciudad de México (delegación Iztapalapa), se abrió la primera planta de reciclaje de escombros que produce arenas y gravas, con una capacidad de reciclaje de 2000 toneladas diarias. Se pretende utilizar los agregados, principalmente, para la construcción de elementos no estructurales como banquetas y guarniciones, entre otros [41].

El reciclaje de concreto ha cobrado mucha importancia a nivel mundial, tanto es así que existen regulaciones para la utilización de los agregados reciclados [36-39].

1.5 Métodos actuales de reciclaje

Se pueden mencionar tres métodos de reciclaje de concreto: El primero, cuando todavía se encuentra en estado fresco, consiste en lavar el concreto que regresa a la planta, llevándolo

a la recicladora para separar el agregado (gravas y arenas), ya sea hidráulicamente o mecánicamente. Este método tiene ciertas variaciones, como el de Bibko and Enviro-Port [46] que permite a los productores reciclar el agua de lavado para no desperdiciarla, lo que preocupa a los recicladores después de separar los agregados.

El segundo método, consiste en vaciar el concreto que regresa a la planta en pequeños moldes del tamaño de bloques. Éstos se montan en bandas que se mueven a una velocidad determinada que permite al concreto fraguar en un periodo específico de tiempo. Luego, los bloques se envían a una trituradora. Una vez triturado el material, éste se criba y queda listo para usar en una nueva mezcla de concreto [43-44].

La ventaja del segundo método con respecto del primero es que este último no crea absolutamente ningún desperdicio, en comparación con el primero, el cual desperdicia la pasta de cemento, el agua de mezclado del concreto y el agua de lavado para recuperar los agregados.

El tercer método consiste en reutilizar los escombros de concreto y en general de producto de la construcción. El método funciona igual que el segundo, aunque en este tercero el concreto utilizado puede tener mucha más edad que el del segundo método [29], además de una combinación de elementos y ya no sólo pasta de cemento y agregados.

Existen recomendaciones para la utilización de los agregados producidos a partir de los escombros producto de la construcción, en donde se mencionan también las recomendaciones para agregados producto de concreto triturado, como en el caso de los métodos segundo y tercero mencionados anteriormente. Las recomendaciones más utilizadas para éste propósito son las del comité de la RILEM [36], en donde se clasifica a los agregados en tres grupos:

Grupo I: agregados que se componen principalmente de producto de demolición

Grupo II: agregados obtenidos principalmente de escombros de concreto

Grupo III: una mezcla de agregado natural (>80%) y escombros provenientes de los otros dos grupos (con más de 10% del grupo I).

Los agregados del grupo III pueden ser utilizados para producir cualquier tipo de concreto, mientras que existen restricciones que limitan la aplicación de los otros dos grupos.

CAPÍTULO SEGUNDO

2. Fabricación de agregados

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la fabricación de los agregados. Éstos se fabricaron a partir de concreto premezclado, estudiándose dos casos. En el primero, se utilizaron especímenes de concreto endurecido provenientes de un laboratorio de control de calidad, *i.e.*, ya ensayados. Se aseguró que todos los especímenes tuvieran el mismo agregado natural grueso: roca caliza, sin embargo, los especímenes provenían de mezclas distintas con resistencias diferentes. El segundo caso, se utilizó concreto endurecido de alta resistencia, fabricado con agregado grueso de andesita natural, producto de la demolición de elementos estructurales (trabes) provenientes del mismo lote, *i.e.*, de una misma mezcla con resistencia homogénea. A diferencia del primer caso, este último sí tuvo un uso previo a su demolición.

El producto de la demolición de concreto en los casos mencionados, fue agregado grueso reciclado, obteniéndose para el primer caso, caliza reciclada, y andesita reciclada para el segundo.

Durante el proceso de reciclaje (trituración y cribado), pudieron observarse diferencias en el número de ciclos de trituración que necesitaron ambos materiales para la obtención del tamaño deseado.

Como se comentó anteriormente los agregados producidos están compuestos de materiales calizos y andesíticos por lo que cada uno de éstos fueron tratados por separado.

En este capítulo se describe el equipo utilizado y el tratamiento que se le dio al material que sirvió para producir los agregados.

2.2 Descripción general del equipo

El equipo utilizado para la demolición del concreto, fue la trituradora eléctrica de muelas (figura 2-1a) que se encuentra en el laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El equipo acepta un tamaño máximo de partícula de 75 mm (3") a la entrada, mientras que el tamaño de la abertura de salida se regula manualmente mediante un tornillo. La trituradora funciona a través de bandas que producen un movimiento excéntrico de las placas para producir el impacto que tritura el material. El equipo está firmemente colocado sobre una base de concreto de una altura tal que permite colocar un recipiente o incluso una carretilla debajo de la trituradora para recibir el material procesado (ver figura 2-1a). La alimentación del material en el equipo es manual, debiendo introducirse una pieza a la vez. El tiempo máximo de operación continua del equipo es de cuatro horas, para evitar sobrecalentamiento en el motor.

Para la separación granulométrica del material triturado, se utilizó la criba eléctrica (figura 2-1b) que se encuentra en el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto de Ingeniería, UNAM.



(a)



(b)

Fig. 2-1. Trituradora (a), cribadora (b)



Fig. 2-2. Material cribado

Este equipo cuenta con tres mallas: la 19 mm (3/4"), la 9.5 mm (3/8") y la 4.76 mm (# 4), entregando por separado cuatro tipos de materiales: retenido 19 mm (3/4"), pasa la 19 mm (3/4"), pasa la 9.5 mm (3/8") y el que pasa la malla 4.76 mm (#4) (ver figura 2-2). El tiempo aproximado para cribar 50 kg, es de 4 minutos.

2.3 Descripción del material utilizado

En la figura 2-3 se muestra el material utilizado en este trabajo. En la parte (a) de la figura se presenta el concreto demolido a partir de las trabes de andesita. Nótese el rastro del acero de refuerzo en los trozos de material.



(a)



(b)

Fig. 2-3. (a) Escombros de vigas demolidas, para hacer agregado andesítico grueso. (b) Agregado calizo reciclado tamaño 19 mm (3/4"), producto de cilindros estándar de concreto

De igual forma, es posible observar los pedazos de andesita incrustados en la matriz de pasta endurecida. En la parte (b) de la misma figura, se presenta la caliza reciclada triturada que pasa la malla 19 mm (3/4"). En lo sucesivo, al agregado proveniente de concreto reciclado se le denominará caliza reciclada y andesita reciclada.

2.4 Procesamiento del material para la elaboración de los agregados

Para la fabricación del agregado grueso de concreto reciclado elaborado con caliza, se utilizaron 70 cilindros de concreto de tamaño estándar. Éstos se obtuvieron del laboratorio de Cottier Consultores S.A. de C.V. y fueron traídos al laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM para su procesamiento.

Como primer paso se procedió a romper los cilindros con marro (trituración primaria), de manera que se obtuvieran pedazos no mayores de 75 mm (3"), para poder introducirlos a la trituradora, que previamente se limpió, se engrasó y se le dio la abertura de 19 mm (3/4") para la primera trituración (trituración secundaria). El material triturado se recogió en cubetas. Éste se iba cribando conforme se llenaban las cubetas de las que se disponía. La cribadora separó el material en cuatro tamaños (figura 2-2) de los cuales solamente se utilizó el que pasó la malla 19 mm (3/4") y el que pasó la malla 9.5 mm (3/8"). El que pasó la malla de 4.36 mm (# 4) se desechó debido a que la finalidad de este trabajo fue reciclar agregado grueso únicamente. El material retenido en la malla 19 mm (3/4") se trituró dos veces más hasta obtener el tamaño requerido. En la última trituración se cerraron las placas de la máquina a 9.5 mm (3/8") para obtener más material pequeño que grande ya que el material que había pasado la malla 19 mm (3/4") era suficiente y faltaba un poco del que pasaba la malla 9.5 mm (3/8").

El procesamiento del material con agregado andesítico fue similar. Debido a que éste procedía de un elemento de concreto reforzado, se cuidó que no incluyera trozos de alambre o acero incrustado. Este segundo material solamente requirió de dos trituraciones, la primera con las placas en una abertura de 19 mm (3/4") en la que se trituró el material grande y la segunda con una abertura de 9.5 mm (3/8") en la que se trituró el material ya más pequeño que había quedado retenido en la malla de 19 mm (3/4").

Una vez que el material reciclado estaba separado en tamaños, se homogeneizó manualmente a base de palas. La cantidad homogeneizada fue de aproximadamente 500 kg del tamaño < 19 mm (3/4") y 250 kg del < 9.5 mm (3/8"), para los dos tipos de agregado reciclado.



Fig. 2-4. Equipo utilizado para conocer la distribución de tamaños de todos los agregados

Esta homogeneización se realizó antes de tomar una muestra para probar el proporcionamiento elegido de acuerdo a la norma ASTM C 33 [7], para que cumpliera con los requisitos granulométricos de agregado para concreto que ahí se establecen.

El proporcionamiento seleccionado fue de 65% del agregado que pasa la malla de 19 mm (3/4") y 35% del que pasa la de 9.5 mm (3/8"). Para conocer la distribución de tamaños de las muestras con el proporcionamiento elegido, se utilizó un equipo ROTABS (figura 2-4) que contaba con todas las mallas que marca la norma ASTM C 33 [7]. Con este equipo fue posible separar todos los tamaños que se obtuvieron mediante la trituración de los materiales, ya que estaban mezclados debido a que la criba sólo tenía mallas de 3 tamaños. De esta forma, fue posible trazar las curvas granulométricas de las muestras de los agregados reciclados, de acuerdo a la norma ASTM C 136 – 84 [13], mismas que se muestran en la figura 2-5. En esta figura se incluyen los límites granulométricos correspondientes al tamaño máximo de agregado (TMA) utilizado, 19 mm (3/4"), según la norma ASTM C 33. En la figura 2-5, se observa que el material cumplió adecuadamente con la norma para agregados de concreto (*op. cit.*), por lo que el proporcionamiento propuesto, se consideró adecuado para utilizarse.

De igual forma, se tomó una muestra de los materiales naturales (caliza y andesita), tal y como se encontraban almacenados, y se le hizo un análisis granulométrico para conocer si estaba bien graduado de acuerdo a la norma ASTM C 33. Esto, con la finalidad de que todos los materiales, tanto naturales como reciclados, cumplieran con las mismas condiciones de granulometría.

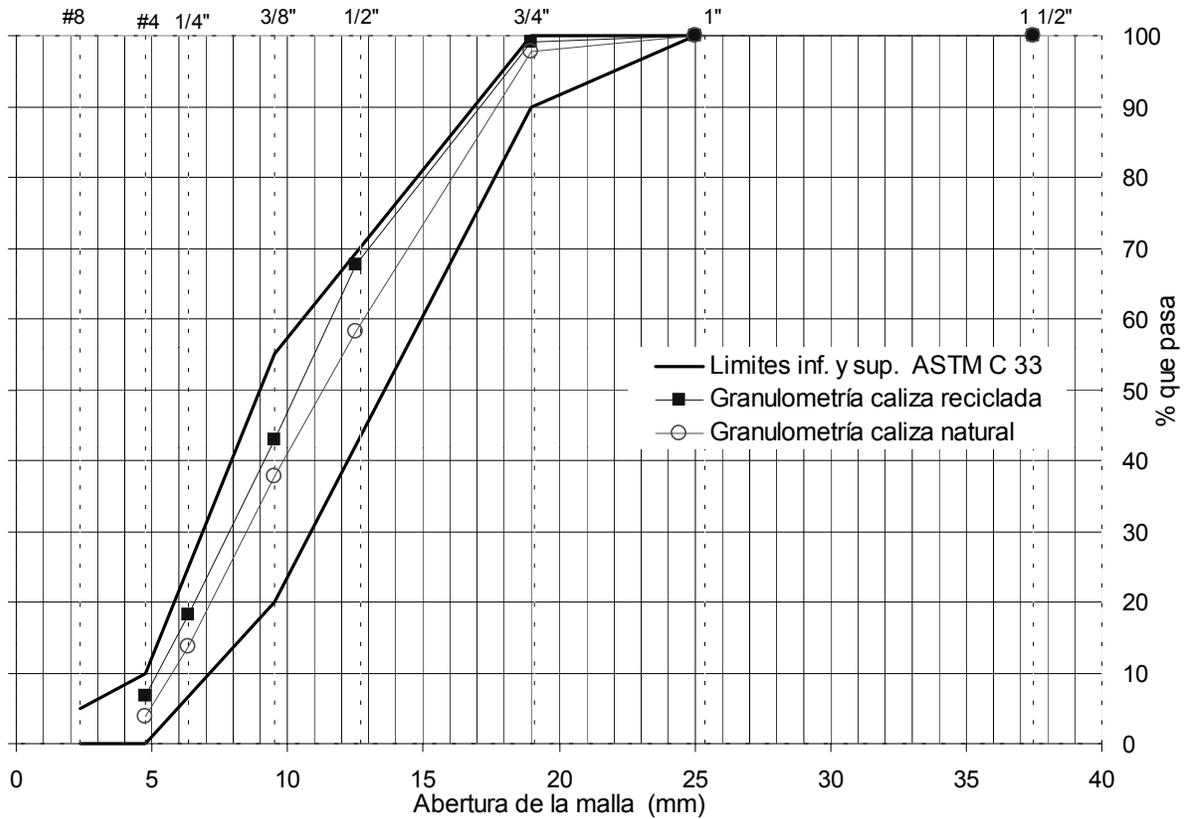


Fig. 2-5. Granulometría de los agregados reciclados

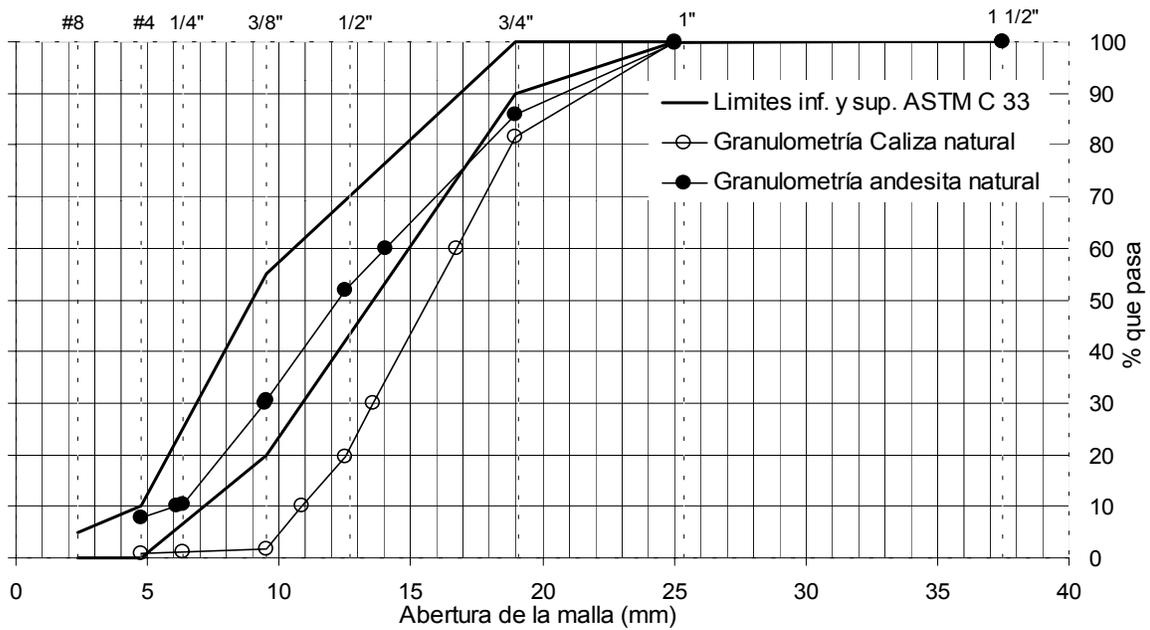


Fig. 2-6. Curvas granulométricas del agregado natural en su estado original

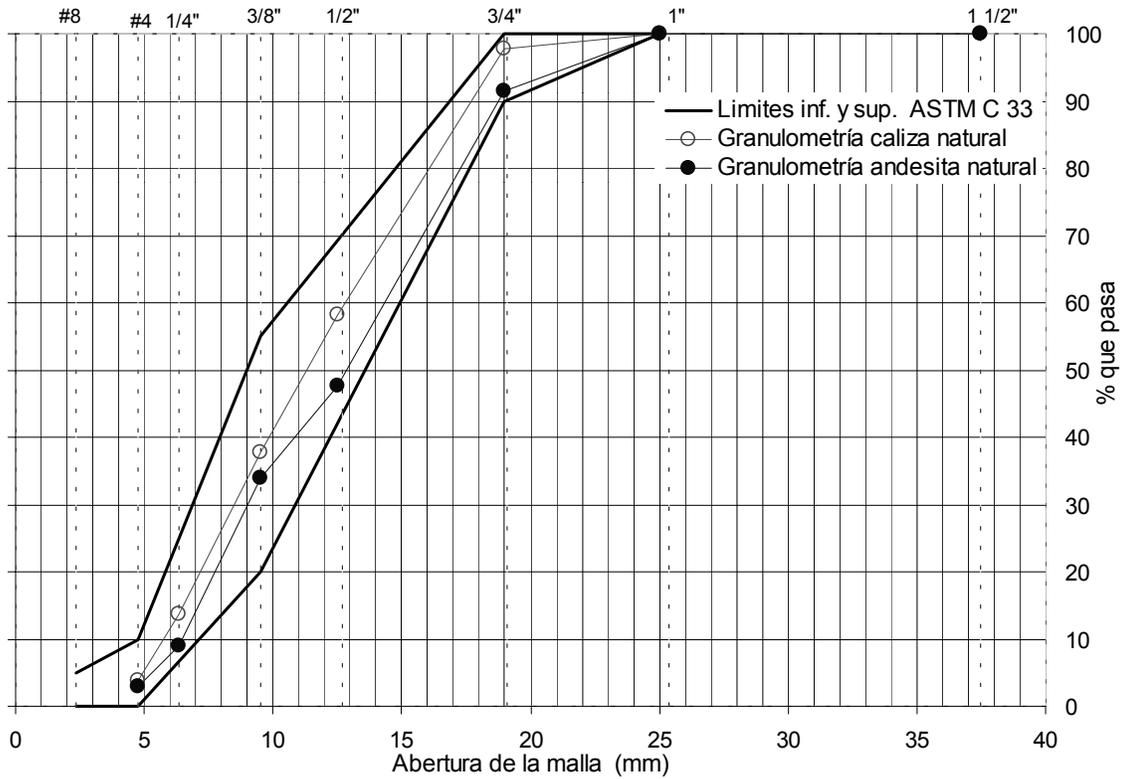


Fig. 2-7. Granulometría de los agregados naturales una vez procesados

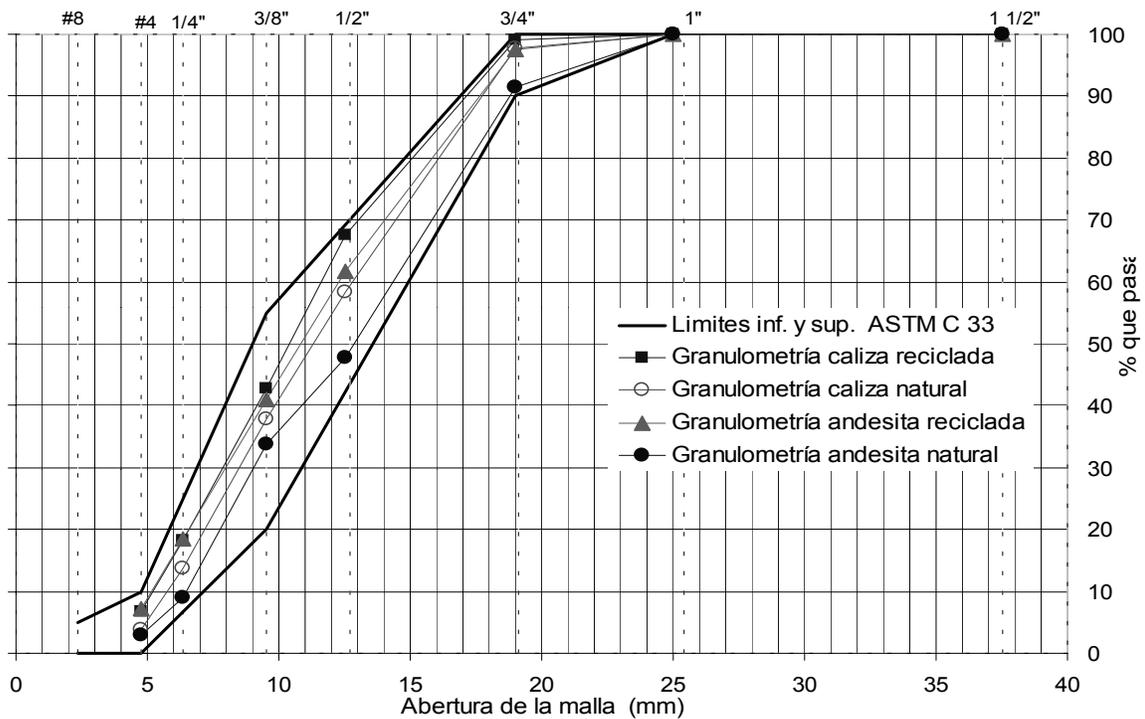


Fig. 2-8. Curvas granulométricas de los agregados reciclados y naturales como se utilizaron

Los agregados naturales estaban mal graduados (figura 2-6), por lo que se procedió a darles el mismo tratamiento que al material reciclado, es decir, triturarlos, cribarlos y homogenizarlos para proporcionarlos de la misma forma que a los agregados reciclados. En la figura 2-7 se presentan las curvas granulométricas de los agregados naturales con el proporcionamiento elegido, y en la figura 2-8 se presentan las curvas granulométricas finales de los cuatro agregados gruesos.

2.4.1 Procesamiento del agregado fino

El agregado fino que se utilizó en este trabajo fue arena de andesita natural para todos los casos de agregado grueso, tanto natural como reciclado. El tratamiento que se le dio a la arena fue el mismo que a los agregados gruesos naturales, es decir, se obtuvo su granulometría original, a partir de una muestra de 30 kg aproximadamente. La curva que se obtuvo quedó aproximadamente dentro de los rangos que establece la norma ASTM C 33 [7]. A diferencia de los agregados gruesos, se optó por utilizar la arena en su estado original, debido a que su graduación era relativamente adecuada, según la norma ASTM (*op. cit.*) y no se justificaba el trabajo que representaba mejorar su granulometría.

En la figura 2-9 se muestra la curva granulométrica de la arena utilizada en los experimentos.

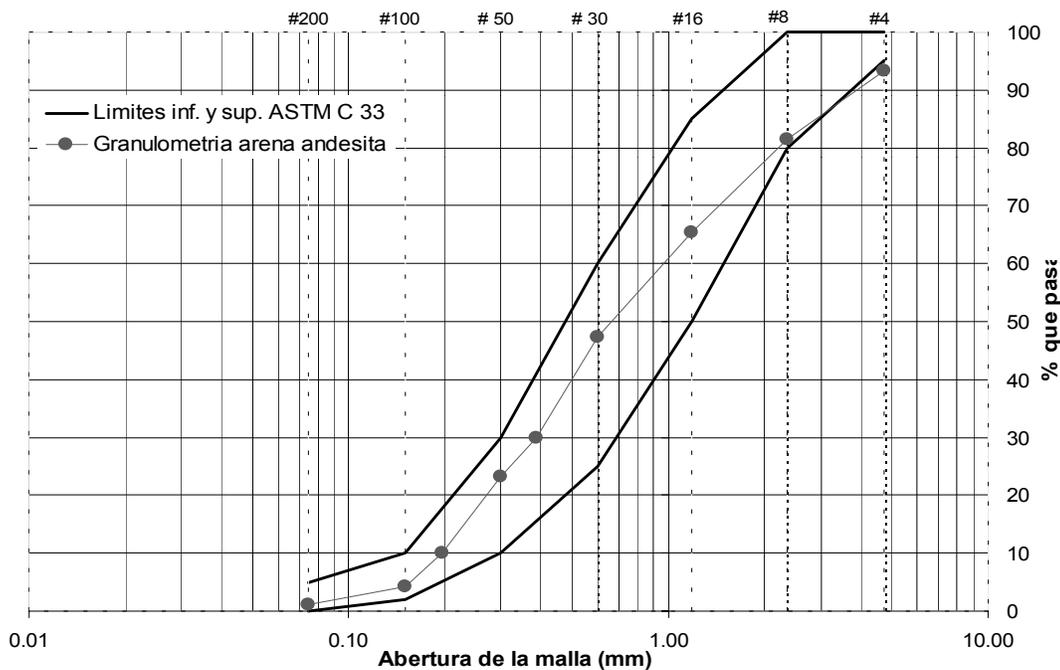


Fig. 2-9. Curva granulométrica de la arena como se utilizó en los experimentos

Como se observa en la figura, las condiciones de la arena eran relativamente buenas, por lo que se supuso que la afectación que ésta pudiera tener en la resistencia de las mezclas sería despreciable.

2.5 Almacenamiento de los agregados

Los agregados gruesos se almacenaron en el laboratorio de concretos del Instituto de Ingeniería en dos etapas. Durante la primera etapa, todos los agregados ya cribados se almacenaron en tanques y plataformas (sin homogeneizarlo, ver figura 2-10a), mientras se reunía la cantidad necesaria para la elaboración de las mezclas: 500 kg de los agregados < 3/4" y 250 kg del material < 3/8". La segunda etapa consistió en envasar el material en costales (figura 2-10b). Previo al envasado se homogeneizó manualmente, a base de palas, el material de cada tamaño. Los dos objetivos principales del envasado del material, fueron reducir el espacio que ocupaban en el laboratorio donde se iban a hacer las mezclas y tener el material ya homogeneizado en costales para un fácil manejo al momento de fabricar los concretos.

La arena se mantuvo cubierta en una tolva del laboratorio para evitar cambios de humedad.



(a)



(b)

Fig. 2-10. Envasado de material natural y reciclado. (a) En tanques y plataformas, (b) en costales con 30 kg de los materiales que pasan la malla 9.5 mm (3/8") y con 40 kg de los que pasan la 19 mm (3/4")

2.6 Cemento y agua

El cemento que se utilizó fue cemento tipo CPP. Éste se mantuvo almacenado en un lugar libre de humedad, para evitar su posible hidratación con la humedad del ambiente durante las tres semanas que duró la elaboración de las mezclas.

El agua a utilizar en cada mezcla, agua común de la llave, se pesó minutos antes de la elaboración, para evitar pérdidas por evaporación.

CAPÍTULO TERCERO

3. Propiedades físicas de los agregados

3.1 Introducción

Los agregados como parte fundamental para la obtención de los resultados de este trabajo, tuvieron un tratamiento cuidadoso para lograr que cumplieran con los rangos establecidos en la norma ASTM C 33 [7] de un agregado fino y grueso bien graduados para concretos, por lo que una vez separados por tamaños, se proporcionó el material para obtener un agregado con buena calidad de graduación. Una vez que se proporcionó el material, tanto natural como reciclado, se le hicieron las pruebas de laboratorio necesarias para conocer sus respectivas características físicas para hacer los proporcionamientos de las mezclas. Estas características físicas fueron: granulometría, tamaño máximo del agregado, coeficiente de forma, humedad, porcentaje de absorción, peso volumétrico compacto y peso específico. Las propiedades como forma de partículas y textura superficial, también se presentan y se comparan los resultados aquí obtenidos con los de otros autores que han realizado experimentos similares.

3.2 Granulometría

3.2.1 Agregados reciclados

En este trabajo se controló la granulometría para tener las mismas condiciones en todos los agregados, tanto naturales como reciclados, y así tener una base de comparación entre ellos.

Los agregados gruesos reciclados como ya se mencionó en el capítulo 2, fueron triturados y cribados en dos tamaños: el que pasa la malla 19 mm (3/4") y el que pasa la malla 9.5 mm (3/8"). El proporcionamiento elegido fue de 65% del primero y 35% del último (misma proporción para todos los tipos de agregado grueso). En la figura 2-5 se presentan las

curvas granulométricas de los agregados reciclados, obtenidas de acuerdo con la norma ASTM C 136-84 [13]. En la figura se observa que la andesita reciclada se ubicó aproximadamente en el centro del área delimitada por las fronteras superior e inferior establecidas en la norma ASTM C 33 [7], lo que indica que está bien graduada. A pesar de que a ambos materiales reciclados se les dio el mismo tratamiento, en la figura 2-5 se observa que para los tamaños inferiores a 12.5 mm (1/2") de la caliza reciclada, su curva se localizó aproximadamente en el centro del área, y las partículas de diámetro mayor al indicado, quedaron dispuestas prácticamente sobre el límite superior, indicando que el agregado tiende hacia los tamaños menores de 12.5 mm (1/2"). Puesto que ambas curvas granulométricas quedaron dentro del área en cuestión se consideró que los materiales estaban bien graduados.

Otros autores han hecho experimentos similares, aunque bajo condiciones distintas a las de este trabajo. Específicamente, Katz [27] obtuvo propiedades de concreto hecho con agregado reciclado a partir de concreto viejo parcialmente hidratado, que corresponde al caso de calizas recicladas de este trabajo. En ese estudio la granulometría no cumplió estrictamente con las especificaciones de la norma para agregados de concreto bien graduados, ASTM C 33 (ver figura 3-1). Una buena granulometría produce mezclas más trabajables, influye en los requerimientos de agua y cemento, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto [2].

Cabe aclarar que la curva que se presenta en la figura 3-1 no es la misma que presenta Katz, ya que Katz, en una sola curva, presenta todos sus datos de agregados gruesos y finos, por lo que se tomaron sus datos y se hizo una curva con características similares a las de este trabajo, que sólo involucrara la parte de agregado grueso y se colocaron los límites de la norma ASTM C 33 para T.M.A. de 19 mm (3/4"), con fines de comparación. A pesar de que Katz no controló estrictamente la granulometría, los resultados que obtuvo en sus experimentos son muy similares a los que aquí se encontraron.

Por otra parte, How-Ji Chen, *et al* [29], obtuvieron propiedades de concretos elaborados con agregado reciclado fabricado a partir de escombros producto de demolición. En sus experimentos se hicieron dos grupos, A y B de agregado reciclado. El primero tenía una composición de 67.55% de desperdicios de concreto, 18.68% de ladrillos, 13.32% de azulejos y 0.45% de otros elementos, mientras que el segundo tuvo 75.37%, 19.91, 4.30% y 0.42%, de los mismos grupos antes mencionados, respectivamente. A diferencia de Katz, Chen controló mejor la granulometría de sus agregados, como se observa en la figura 3-2.

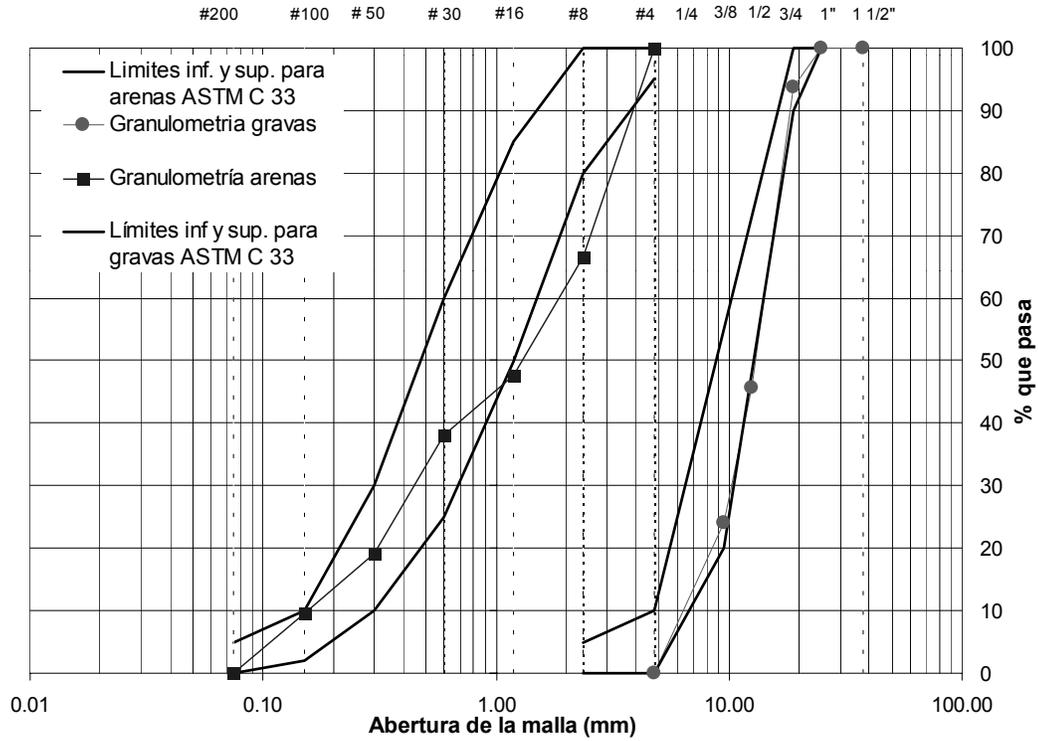


Fig. 3-1. Curva granulométrica de los experimentos realizados por Katz (modificado de [27])

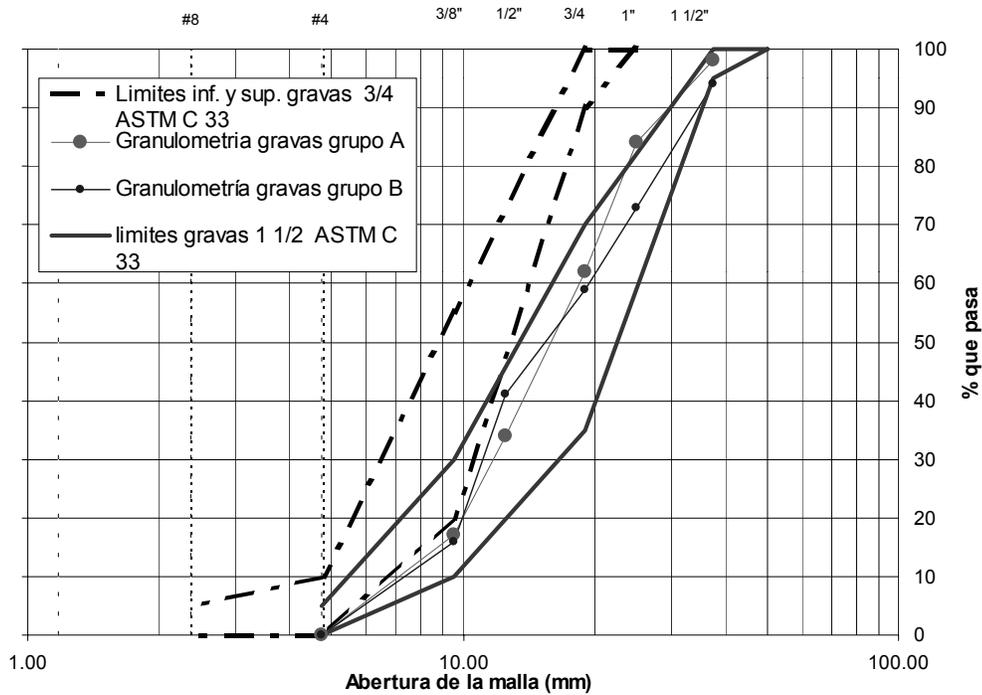


Fig. 3-2. Curva granulométrica de los experimentos realizados por How-Ji Chen (modificado de [29])

En la figura 3-2, se aprecia también que el tamaño máximo de agregado utilizado por Chen, fue de 37.5 mm (1 ½”), en lugar de 19 mm (¾”) que fue el utilizado en esta investigación. En la figura 3-2, se presentan los límites de la norma ASTM C 33 para ambos TMA (19 mm (¾”) y 37.5 mm (1 ½”).

Algunos otros autores proporcionaron sus agregados gruesos reciclados de forma distinta a la utilizada en este trabajo. Por ejemplo, Gómez-Soberón [28] utilizó 55% de grava gruesa (pasa la 19 mm (¾”), por ejemplo) y 45 % de grava fina (pasa la 9.5 mm (3/8”)) para el agregado reciclado, y 70% de grava gruesa y 30% de grava fina para el agregado natural. Como se menciona anteriormente, esta proporción difiere a la utilizada en esta investigación, tanto en porcentaje como en distribución, ya que en este trabajo se usó la misma proporción para agregados reciclados y naturales, mientras que Gómez-Soberón utilizó proporciones distintas para cada tipo.

3.2.2 Agregados naturales

3.2.2.1 *Gravas*

A los agregados gruesos naturales que sirvieron como base de comparación de los agregados reciclados, se les hizo un análisis de granulometría para ver si se encontraba bien graduados, como éstos no cumplían con los límites que establece la norma ASTM C 33 [7], se procedió a separar el material en tamaños para darles el mismo tratamiento y proporción que a los agregados reciclados (capítulo 2). Después de que los agregados gruesos pasaron por el proceso de separación por tamaños y recomposición de la granulometría, se realizaron nuevamente los análisis granulométricos, logrando así que la curva de la caliza natural quedara localizada en la mitad de los límites superior e inferior que establece la norma, mientras que la curva de la andesita natural se localizó muy cerca del límite inferior. En la figura 2-7 se muestran las dos curvas. Como ambos materiales quedaron dentro de los límites de buena graduación, se procedió a utilizar esa proporción para las mezclas de concreto.

3.2.2.2 *Arena*

Se utilizó arena natural de andesita para todos los casos, los de agregados gruesos reciclados y naturales. A la arena se le hizo un análisis granulométrico para conocer su graduación. Aunque todos sus puntos no quedaron localizados dentro de los rangos que marca la norma ASTM C 33 de arenas bien graduadas para mezclas de concreto, se utilizó así para la realización de las mezclas de este trabajo, ya que como podemos apreciar en la

figura 2-9 (ver capítulo 2), la curva se sale del área sólo entre las mallas 2.36 mm (#8) a 4.76 mm (#4), esta incongruencia puede ser aceptable, puesto que el resto de los puntos quedan localizados en la mitad de los límites superior e inferior de la curva.

Otros autores que hicieron experimentos con agregados reciclados [26 y 29], utilizaron arena natural pero no presentan los resultados de granulometría.

3.3 Tamaño máximo de agregado

El tamaño máximo de agregado (TMA) que se utilizó en este trabajo es de 19 mm (3/4"). Esto se debe a dos razones: que los resultados fueran comparables con los obtenidos en la práctica, ya que el TMA de 19 mm (3/4") es una de las medidas comerciales más utilizadas en la construcción. Además, el tamaño máximo de la malla con que se contaba en la criba es de 19 mm (3/4").

3.4 Coeficiente de forma

La presencia de partículas planas y/o alargadas, tanto en los agregados naturales como en los triturados, se considera indeseable porque reduce la manejabilidad de las mezclas, dificulta el acomodo y la compactación del concreto fresco en las cimbras y afecta la resistencia mecánica del concreto endurecido [2]. El método más usual para conocer de manera más precisa la forma de las partículas de los agregados es el denominado coeficiente volumétrico medio o coeficiente de forma, que es igual a la relación entre el volumen de la partícula y el volumen de la esfera en que resulta inscrita y cuya determinación es aplicable a partícula mayores a 6.35 mm (1/4"), según la norma francesa NFP 18-301. En la tabla 3-1, se presentan los rangos de clasificación del coeficiente de forma [2] y en la tabla 3-2 se presentan los valores de coeficiente de forma obtenidos de los agregados utilizados en este trabajo.

Tabla 3-1. Rangos de clasificación del coeficiente de forma

Coeficiente de forma	
Rango	Clasificación
< 0.15	Indicativo de mala forma de partícula
0.15 – 0.20	Indicativo de partículas de forma regular
> 0.20	Representativo de partículas con buena forma

Tabla 3-2. Valores de coeficiente de forma obtenidos en el laboratorio de los agregados utilizados en este trabajo

Agregado	Coeficiente de forma
Caliza Natural	0.20
Andesita Natural	0.28
Caliza Reciclada	0.24
Andesita Reciclada	0.21

Como se observa en la tabla 3-2 los valores de coeficiente de forma obtenidos quedan dentro de la clasificación de agregados con partículas de buena forma, principalmente la andesita natural la cual obtuvo el coeficiente más alto de todos los agregados, seguida de la caliza reciclada.

3.5 Humedad

La humedad de los materiales se obtuvo en el laboratorio, de acuerdo a la norma ASTM C 566-89 [21]. Este parámetro es uno de los que influyen directamente en el diseño de mezclas, ya que permite estimar la cantidad neta de agua requerida para alcanzar una cierta consistencia en el concreto. En la tabla 3-3 se muestran los valores de humedad de todos los agregados en el momento de hacer las determinaciones.

Como se aprecia en la tabla 3-3, los materiales gruesos reciclados presentaron una humedad claramente mayor que los naturales. Es posible que esto se deba a que el material a partir del cual se obtuvieron los agregados se encontraba almacenado a la intemperie antes de utilizarlo para fabricar los agregados, mientras que los naturales estaban cubiertos.

Tabla 3-3. Humedad de los agregados

Agregado	Humedad %
Gravas	
Caliza natural	0.04
Andesita natural	0.53
Caliza reciclada	3.33
Andesita reciclada	5.33
Arena	
Andesita natural	6.93

En los trabajos de otros autores consultados no se muestran los datos de humedad que contenía el material que utilizaron, por lo que no es posible realizar una comparación con los datos obtenidos en este trabajo.

3.6 Absorción

La absorción se define como la capacidad que tiene el material de retener agua en su estructura, en condición saturado y superficialmente seco (SSS), se mide como el incremento en el peso del agregado debido al agua en los poros del material sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas y se expresa como el porcentaje respecto del peso seco [11]. Este es un parámetro importante que se debe conocer para hacer un buen diseño de mezclas. Las pruebas de absorción para los agregados gruesos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM C 127-88 [11], y para la arena de acuerdo con la norma ASTM C 128-88 [12]. En la tabla 3-4 se presentan los valores obtenidos.

Se utilizó grava caliza y andesita natural del D.F, cuyos valores normales son de 0.8% para la primera y de 4.4% para la última [4]. En las pruebas realizadas se encontró que la caliza tuvo una absorción de 0.42%, poco menor que el valor usual, mientras que la andesita obtuvo un valor de 7.39%, absorción muy alta que puede deberse a la presencia de partículas de inferior calidad o muy porosas.

En los experimentos de otros autores no se especifica el tipo de agregado natural que componía el material que utilizaron para fabricar los agregados reciclados. Solamente presentan los resultados como agregado reciclado sin definir los componentes de éste. Por ejemplo, la absorción del agregado reciclado de los experimentos hechos por Katz [27], varió entre 3.2% a 9.7%, para agregado grueso y medio, siendo éste un rango muy amplio si lo comparamos con las absorciones que se presentan en la tabla 3-4.

Los resultados de Katz se podrían comparar con el caso de caliza reciclada de este trabajo, puesto que los agregados fueron fabricados a partir de viejos especímenes de laboratorio. Sin embargo, es posible que esos especímenes utilizados por Katz, fueran de distintos tipos de agregado natural, provocando que esto generara el rango de variación tan amplio de la absorción de su material. Lo que se puede inferir de este rango de absorciones tan amplio, es que probablemente no se homogeneizó el material fabricado para establecer un conjunto de condiciones similares en todas las muestras tomadas para las mezclas.

Tabla 3-4. Absorción de los agregados utilizados en los experimentos

Agregado	Absorción %
Gravas	
Caliza natural	0.42
Andesita natural	7.39
Caliza reciclada	2.62
Andesita reciclada	3.25
Arena	
Andesita natural	6.03

Por otro lado, los agregados reciclados utilizados en los experimentos hechos por How-Ji Chen [29], tuvieron valores de absorción del orden de 7.54 % para el grupo A y de 5.04% para el B, siendo el grupo B el que tiene condiciones más aproximadas a las del caso de andesita reciclada de este trabajo. Estos valores son congruentes con los aquí obtenidos, ya que el grupo B, está constituido por escombros que incluye pedazos de ladrillo, azulejos y principalmente desperdicios de concreto (75.37%), mientras que el que se utilizó para los experimentos de este trabajo es sólo concreto producto de la demolición de unas vigas. A pesar de que los elementos que integran el grupo B tienen diferentes absorciones, su absorción global es un buen indicador de la absorción obtenida en el caso de andesita reciclada de este trabajo, ya que esta última está por debajo de aquella, lo que es congruente ya que la del grupo B debe ser más alta por tratarse de escombros.

3.7 Densidad relativa o peso específico

Conocido como la relación del peso del agregado respecto al peso del volumen absoluto de agua desplazada por inmersión, el peso específico es un parámetro adimensional que se usa en ciertos cálculos para el proporcionamiento de mezclas de concreto. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9 [2]. De manera que al utilizarlos se obtienen concretos con peso volumétrico en estado fresco de 2200-2550 kg/m³. Para el caso de los agregados naturales más utilizados en el Distrito Federal, andesita y caliza, las densidades usuales son 2.42 y 2.63, respectivamente [4].

En la tabla 3-5 se muestran las densidades de los agregados obtenidas en el laboratorio, de acuerdo con la norma ASTM C 127 y 128 [11 y 12], para agregados gruesos y finos, respectivamente.

Todos los agregados presentaron baja densidad respecto de los límites arriba mencionados, a excepción de la caliza natural que quedó dentro del rango.

Tabla 3-5. Densidades relativas

Agregado	Densidad
Gravas	
Caliza natural	2.71
Andesita natural	2.19
Caliza reciclada	2.36
Andesita reciclada	2.24
Arena	
Andesita natural	2.31

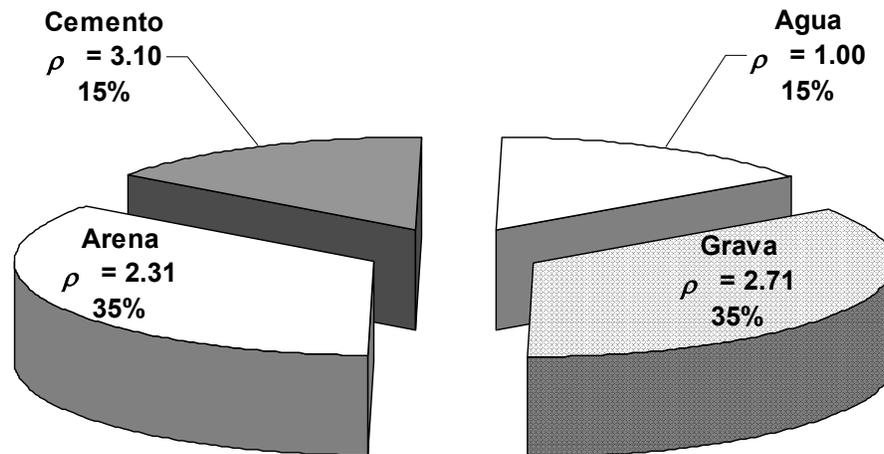


Fig. 3-3. Proporciones de los componentes de un concreto normal

Es posible que la baja densidad en la andesita natural y en la arena se deba, como se mencionó anteriormente, a que provienen de un banco de material de baja calidad, contaminado con agregado ligero. Estos valores de densidad no son aptos para producir concreto con peso volumétrico normal, como se verá en el capítulo cuatro. Para el caso de los agregados reciclados, puede ser que su baja densidad se deba al contenido de pasta en el material triturado. En la figura 3-3 se presenta un proporcionamiento típico de un concreto normal, como del que se obtuvo el agregado reciclado. La densidad de cada material, ρ , se muestra con sus respectivos porcentajes.

La densidad de la grava que se muestra en la figura 3-3, es la que se obtuvo de la caliza natural que se presenta en la tabla 3-5. De igual forma, el valor de la densidad de la arena se tomó de la tabla 3-5.

En la proporción de la figura 3-3, el agua y el cemento se adicionan en partes iguales, así como también la grava y la arena.

Tabla 3-6. Estimación de la densidad de un agregado reciclado, obtenido de un concreto normal proporcionado de acuerdo con la figura 3-3

Material	%	ρ	ρ'	ρ''	ρ_R
Grava	35.00	2.71	2.51	1.76	2.37
Arena	35.00	2.31			
Agua	15.00	1.00	2.05	0.62	
Cemento	15.00	3.10			

Tabla 3-7. Densidades de los materiales utilizados por otros autores

Autor	Edad de trituración	Tipo de Agregado	Densidad	Contenido de pasta (%)
Katz	1 día	grueso	2.59	6.90
		mediano	2.35	15.80
		fino	2.23	26.60
	3 días	grueso	2.60	6.10
		mediano	2.38	15.20
		fino	2.25	25.40
	28 días	grueso	2.55	6.80
		mediano	2.32	13.20
		fino	2.23	24.50
Chen	grava natural		2.63	-
	reciclado Grupo A		2.28	N/A
	reciclado Grupo B		2.29	N/A

Entonces, la densidad de la pasta está dada por el promedio aritmético, ρ' , de las densidades del agua y el cemento, despreciando cualquier efecto adverso debido a la reacción química durante la hidratación del cemento.

De igual forma, la densidad del agregado (grava más arena), es el promedio aritmético de ambas densidades. Ahora, la densidad del agregado reciclado, ρ_R , producto de la trituración del concreto proporcionado de acuerdo con la figura 3-3, será, aproximadamente, la suma de los promedios ponderados, ρ'' , de las densidades obtenidas para la pasta y el agregado. El procedimiento se muestra en la tabla 3-6, donde se observa que la densidad estimada para el agregado reciclado que se obtendría de un concreto normal con las proporciones

mostradas en la figura 3-3, se asemeja a los valores obtenidos en el laboratorio para los dos tipos de agregados reciclados (tabla 3-5). Esto se debe a la influencia de la densidad estimada para la pasta, 2.05, que se encuentra en el material triturado, la cual, comparada con las densidades de la grava y la arena: 2.71 y 2.31, respectivamente, es muy baja.

Esta densidad resultó menor que las de los agregados naturales, aún despreciando el posible efecto adverso de la reacción química durante la hidratación del cemento, como se mencionó anteriormente.

Los resultados de la discusión anterior respaldan la idea de que el contenido de pasta en un agregado triturado provoca una disminución en su densidad. Esto concuerda con los resultados de otros autores, quienes han encontrado que el contenido de pasta en el agregado reciclado es inversamente proporcional a la densidad del mismo, como se observa en la tabla 3-7 [27]. En esta tabla se presentan también las densidades obtenidas por Chen [29], que como se aprecia, son muy parecidas a las obtenidas en este trabajo.

Se desconoce la edad del concreto utilizado para fabricar los agregados reciclados de este trabajo, por lo que a diferencia de otros autores aquí no se consideró este factor.

3.8 Peso volumétrico

También llamado peso unitario de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal varía desde 1,200 kg/m³ a 1,760 kg/m³, aproximadamente [2]. Se utilizó la norma ASTM C 29 [6] para realizar los ensayos de laboratorio de la arena y los agregados gruesos, reciclados y naturales.

Los pesos volumétricos compactados aquí obtenidos se muestra en la tabla 3-8. Los pesos volumétricos de todos los agregados estuvieron dentro del rango de valores normales.

Tabla 3-8. Pesos volumétricos compactados obtenidos

Agregado	Peso volumétrico kg/m³
Gravas	
Caliza natural	1563
Andesita natural	1216
Caliza reciclada	1309
Andesita reciclada	1223
Arena	
Andesita natural	1584

Tabla 3-9. Pesos volumétricos de los agregados obtenidos por otros autores

Autor	Denominación de la fracción gruesa	Densidad	Peso volumétrico (kg/m³)
Katz	Grueso	2.59	1462
	Mediano	2.35	1220
	Fino	2.23	1324
	Grueso	2.60	1433
	Mediano	2.38	1234
	Fino	2.25	1342
	Grueso	2.55	1433
	Mediano	2.32	1278
	Fino	2.23	1321
Chen	Grava natural	2.63	1533
	Reciclado Grupo A	2.28	1241
	Reciclado Grupo B	2.29	1252

Las andesitas alcanzaron los pesos volumétricos más bajos, lo cuál es congruente puesto que la andesita siempre tiende a pesos volumétricos bajos debido a que es un material muy poroso. Los pesos volumétricos obtenidos corresponden bastante bien con los valores de densidad obtenidos, ya que a menor densidad, menor peso volumétrico.

La razón por la cuál la correspondencia entre los pesos volumétricos y las densidades fue aproximada, se puede deber a la angulosidad de los agregados, puesto que el reciclado fue un poco más anguloso que el natural, lo que pudiera ocasionar un acomodo deficiente de las partículas en el molde, resultando en un peso volumétrico inexacto. Esta diferencia en la forma de las partículas, puede resultar del tipo de trituradora utilizada para la fabricación del material.

En este experimento sólo se utilizó una trituradora de quijadas que produce material muy anguloso, mientras que en otros trabajos, como en el de Hincapié, *et al* [40], además de triturar el material en equipos de quijadas, lo trituraron también en equipos de rodillos dos veces, lo que le da al agregado producido formas redondeadas mejorando el acomodo entre

partículas.

Los pesos volumétricos de los agregados reciclados que presentan otros autores, específicamente How-Ji Chen [29] se presentan en la tabla 3-9, donde se aprecia que los pesos volumétricos de los agregados están dentro de los límites normales al igual que los utilizados en este trabajo.

Respecto de los valores del grupo A y B, del trabajo de Chen, éstos son congruentes entre sí, debido a que este último tiene un porcentaje mayor de desechos de concreto que el primero. Por el contrario, no todos los pesos volumétricos obtenidos por Katz [27] concuerdan con sus respectivos valores de densidad, ya que como se observa en la tabla 3-9, no todos los pesos volumétricos aumentan proporcionalmente a la densidad del material. Es probable que esto se deba a las características granulométricas del material y a la forma de sus partículas, como se mencionó anteriormente.

3.9 Forma de las partículas y textura superficial

Estas dos características influyen más en las propiedades del concreto fresco, que en las del concreto endurecido. Las partículas elongadas, angulares y de textura rugosa, necesitan más agua que los agregados compactos, redondeados y lisos. Como consecuencia, para mantener la misma relación agua-cemento necesitan un mayor contenido de cemento. Sin embargo, con una granulometría satisfactoria, los agregados triturados y no triturados (de los mismos tipos de roca) generalmente dan la misma resistencia para el mismo factor de cemento. Además, la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado aumenta a medida que las partículas cambian de lisas y redondeadas a rugosas y angulares [2].

Las partículas de los agregados utilizados para este trabajo fueron de textura rugosa y de formas elongadas y angulares, por lo que es posible que este factor haya influido en el incremento de agua al momento de la elaboración de las mezclas como se comenta más adelante. Aunque como el objetivo no fue controlar una relación agua-cemento específica en las mezclas, el contenido de cemento no se incrementó. Sin embargo, la granulometría fue un factor que se controló muy estrictamente, y como se encontró en la literatura, al controlar esta característica generalmente dan la misma resistencia para el mismo factor de cemento y el mismo tipo de agregado.

El agregado de este trabajo presentó una buena adherencia con la pasta, como se puede observar en la figura 3-4, donde se observa en una de las pruebas realizadas a tensión por compresión diametral, cómo el agregado trabajó en conjunto con la pasta, ya que ambos fallaron a tensión, como se observa en la superficie de falla.



Fig. 3-4. Espécimen fallado a tensión por compresión diametral

Otros autores, *e.g.*, Chen *et al* [29], hicieron un análisis de forma a las partículas de agregado reciclado que utilizaron, encontrando que éstos tiene una forma de partícula similar al de los agregados naturales de roca triturada usada en concreto normal, y que ambos agregados cumplen con los estándares de requerimientos para agregados utilizados en concretos.

3.10 Dosificación de mezclas

En este trabajo se buscó que las mezclas elaboradas estuvieran en condiciones similares a las que se utilizan comúnmente en la práctica, para poder hacer comparaciones con estas últimas. Para lograr tal objetivo, se buscó que las mezclas tuvieran las propiedades siguientes: (1) En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable. (2) En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme y (3) economía [2].

Para cumplir con esas propiedades fue necesaria una elección adecuada de las características de la mezcla y la correcta ejecución de las pruebas a los materiales que la componen.

3.10.1 Elección de las características de las mezclas

La dosificación de las mezclas se llevó a cabo atendiendo a las características de las mezclas de concreto comúnmente utilizadas en la práctica.

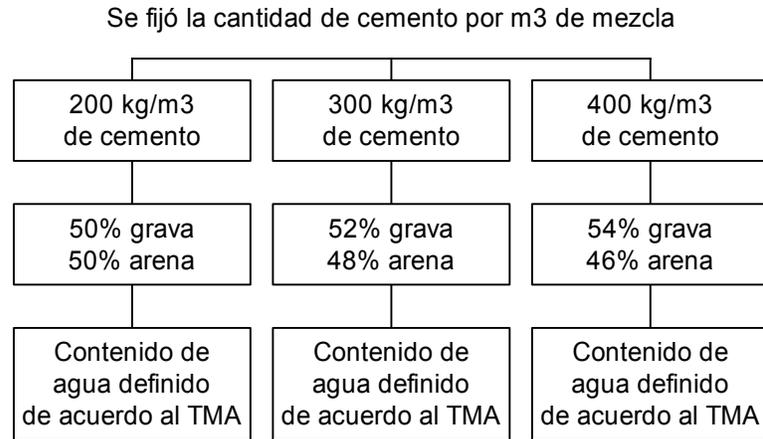


Fig. 3-5. Dosificación de las mezclas de concreto

El procedimiento utilizado fue distinto al que normalmente se emplea en la práctica, donde generalmente se fija la resistencia a la compresión del concreto endurecido y el tamaño máximo del agregado. El procedimiento utilizado en este trabajo se presenta en la figura 3-5. Este procedimiento también fue diferente al establecido por la norma ACI-211.1-89 [23]. No se estableció la relación agua-cemento como lo marca la norma, sino que primero se fijó la cantidad de cemento a utilizar por cada metro cúbico de mezcla, 200, 300 y 400 kg para todos y cada uno de los tipos de agregado. Se esperaban unas resistencias aproximadas de 150, 220 y 330 kg/cm² para cada uno de los contenidos de cemento, respectivamente, lo cual comentaremos más ampliamente en el siguiente capítulo. Paralelamente, con el TMA y el revenimiento propuesto para las mezclas (fijado para todas en 10 cm), de acuerdo con el método del ACI se seleccionó una cantidad de agua por m³ de mezcla. Después, se definieron los porcentajes de agregado grueso y fino para cada contenido de cemento. Normalmente los agregados representan del 60 al 70% del volumen absoluto de todos los componentes.

El volumen de agregados del método ACI resulta del TMA y del módulo de finura de la arena. Dado que la arena fue la misma para todas las mezclas, y que ésta tenía un módulo de finura muy alto, 3.15, se decidió asignarles cantidades de agregado congruentes con su contenido de cemento y agua.

Las arenas con módulos de finura mayores a 3.10 resultan demasiado gruesas y se les juzga inadecuadas porque tienden a producir mezclas de concreto ásperas y con tendencia al sangrado.

Sin embargo, si la calidad intrínseca de sus partículas es aceptable, es posible utilizarlas corrigiendo sus efectos adversos en el concreto mediante un apropiado diseño de la mezcla que tome en cuenta los sobretamaños y el uso de aditivos minerales, reductores de agua o inclusores de aire [2].

Los porcentajes de agregado para cada mezcla se muestra en la figura 3-6. Nótese que la suma de los porcentajes de agregado en la figura, es igual a 100% cada uno. Esto se refiere al volumen total de agregado que conforma un metro cúbico de concreto. Si se le resta el volumen de cemento, de agua y contenido de aire a un metro cúbico de concreto para el que se está proporcionando, el resultado será el total del agregado de ese metro cúbico, el cual se repartió en los porcentajes establecidos inicialmente.

La cantidad de agua de mezclado por metro cúbico que se obtiene a partir del método ACI en función del TMA, no cambia con el contenido de cemento y es de 202 litros para un agregado de TMA de 19 mm (3/4") y un revenimiento de 10 cm, considerando que el agregado se encuentra en condiciones saturadas y superficialmente secas. Con esta cantidad de agua se obtienen relaciones agua-cemento de 1.0, 0.67 y 0.50 para cada contenido de cemento de 200, 300 y 400 kg/m³, respectivamente. El contenido de agua obtenido del método ACI se ajusta restando y sumando los porcentajes de humedad y absorción de ambos materiales (grava y arena), respectivamente, ya que el agregado que se utiliza en las mezclas no tiene un estado saturado y superficialmente seco.

En la tabla 3-10 se muestran los proporcionamientos originales de las mezclas que se elaboraron para este trabajo. El agua que se muestra en esta tabla es la de mezclado y la cantidad de agregados representa al material si éste se encontrase en condiciones saturadas y superficialmente secas. Como ya se ha comentado anteriormente las cantidades de cemento que se presentan en esta tabla son los que dan origen a la nomenclatura utilizada para cada mezcla de concreto elaborada.

Los revenimientos que se obtuvieron de las mezclas de este trabajo se presentan en la tabla 3-11 , como se observa, los revenimientos medidos son en la mayoría de los casos mayores o menores al que se fijó por diseño (10 cm).

Para alcanzar el revenimiento de 10 cm la cantidad de agua puede variar de acuerdo con las características de los agregados y con el contenido de cemento. Si se ajustan los consumos de agua de mezclado aumentando o disminuyendo, según sea el caso, 2.4 lt/m³/cm de revenimiento, hasta alcanzar el revenimiento de diseño, se obtendría para los agregados que se estudiaron y los consumos de cemento empleados, los consumos medios de agua que se presentan en la tabla 3-12.

Tabla 3-10. Proporcionamientos originales de las mezclas de este trabajo

Mezcla	Agua de mezclado kg/m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/m ³	Arena kg/m ³	Suma kg/m ³	P.V.F. laboratorio kg/m ³	Rendimiento
CN200	202.00	200	969.59	893.41	2265.00	2246.68	1.01
AN200	179.23	200	736.23	893.41	2008.87	2060.25	0.98
CR200	260.31	200	883.55	894.43	2238.29	2124.05	1.05
AR200	256.42	200	866.54	893.41	2216.37	2064.36	1.07
CN300	216.03	300	963.10	819.17	2298.29	2250.78	1.02
AN300	202.00	300	758.01	792.47	2052.47	2061.67	1.00
CR300	256.15	300	875.95	820.63	2252.73	2115.70	1.06
AR300	253.95	300	860.74	819.17	2233.86	2092.50	1.07
CN400	223.57	400	953.12	748.12	2324.82	2251.20	1.03
AN400	202.00	400	723.73	748.12	2073.86	2066.48	1.00
CR400	271.67	400	865.43	750.01	2287.11	2122.21	1.08
AR400	244.10	400	851.83	748.12	2244.05	2082.32	1.08
CRS400	211.47	400	835.00	701.69	2148.16	2144.70	1.00
ARS400	202.00	400	792.00	699.67	2093.67	2101.27	1.00

C = caliza A = andesita R = reciclado N = natural S = saturado 200, 300, 400 kg/m³ de cemento

Tabla 3-11. Revenimientos de las mezclas elaboradas medidos en laboratorio

Mezcla	Agua de mezclado kg/m ³	revenimiento (cm)
CN200	200.37	8.87
CN300	211.56	10.00
CN400	216.49	9.17
AN200	183.81	8.60
AN300	202.91	11.23
AN400	201.28	14.95
CR200	247.02	8.10
CR300	240.57	6.93
CR400	252.08	8.65
AR200	238.83	5.95
AR300	237.88	7.55
AR400	226.51	10.60
CRS400	211.13	9.73
ARS400	202.73	4.70

En algunas mezclas se presentaron pequeñas variaciones en el consumo de agua determinado en los proporcionamientos, por lo que al momento de hacer el mezclado hubo necesidad de modificar el consumo de agua para mejorar su trabajabilidad. Esto concuerda con lo mencionado anteriormente sobre el consumo de agua requerida para agregados con forma angulosa y textura rugosa.

Sin embargo, de acuerdo con la literatura [2], no es necesario ajustar el contenido de cemento de acuerdo con estas variaciones en el agua de la mezcla, ya que aunque la relación agua-cemento se modifica, sus propiedades no cambian significativamente.

Tabla 3-12. Consumos medios de agua por m³ de mezcla para diferentes tipos de agregado y un revenimiento de 10 cm

Tipo de agregado	Consumo de agua (kg/m ³)
Caliza natural	211
Caliza reciclada	252
Andesita natural	192
Andesita reciclada	239

Tabla 3-13. Proporcionamientos ajustados al peso volumétrico fresco obtenido en laboratorio

Mezcla	Relación a/c	Agua de mezclado kg/m ³	Cemento kg/m ³	Grava kg/m ³	Arena kg/m ³	P.V.F. kg/m ³
CN200	1.01	200.37	198.38	961.75	886.18	2246.68
AN200	0.90	183.81	205.12	755.06	916.26	2060.25
CR200	1.30	247.02	189.79	838.45	848.78	2124.05
AR200	1.28	238.83	186.28	807.11	832.13	2064.36
CN300	0.72	211.56	293.80	943.19	802.23	2250.78
AN300	0.67	202.91	301.34	761.40	796.02	2061.67
CR300	0.85	240.57	281.75	822.67	770.71	2115.70
AR300	0.85	237.88	281.02	806.27	767.33	2092.50
CN400	0.56	216.49	387.33	922.94	724.43	2251.20
AN400	0.51	201.28	398.58	721.16	745.46	2066.48
CR400	0.68	252.08	371.16	803.03	695.93	2122.21
AR400	0.61	226.51	371.17	790.44	694.21	2082.32
CRS400	0.53	211.13	399.36	833.66	700.56	2144.70
ARS400	0.51	202.73	401.45	794.87	702.21	2101.27

Esto concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo, en donde se modificó el agua sin que esto provocara mucha variación en el peso volumétrico fresco (ver rendimiento en la tabla 3-10).

Los componentes para cada mezcla se pesaron un día antes de elaborarla. Al momento de la elaboración se adicionaba más o menos agua de la que se había pesado, según lo requiriera la mezcla. Siendo el agua la única variación de contenidos que sufrió la mezcla, es decir, que no se adicionó ni se restó cantidad alguna de los otros materiales. Los agregados reciclados fueron los que demandaron la mayor cantidad de agua. Posiblemente esto se deba al contenido de pasta de cemento en los agregados reciclados, además de las formas angulosas de las partículas, a las partículas finas producto de la trituración adheridas al contorno de los agregados.

Tal vez si el agregado se hubiera lavado antes de utilizarlo, como algunos autores lo han

hecho [29], no se hubiera presentado esta demanda de agua adicional.

Por otra parte, las calizas y andesitas naturales requirieron consumos de agua más pequeños debido a la forma de sus partículas.

En la tabla 3-13 se muestran las cantidades ajustadas al peso volumétrico fresco que se obtuvo en el laboratorio, ya que el rendimiento que se obtuvo con la suma de los componentes de cada mezcla y el peso volumétrico fresco obtenido en laboratorio es mayor a un metro cúbico (ver tabla 3-10). Además, con estas cantidades ajustadas se presenta la relación agua-cemento que se obtuvo de cada mezcla.

Al igual que en este estudio, otros autores modificaron el procedimiento estándar de diseño de mezclas (ACI). Por ejemplo, Gómez-Soberón [28] utilizó una combinación de las normas ACI 211.1 y 211.2 para dosificar las mezclas de sus experimentos, debido a la dificultad para determinar la relación agua-cemento real, por la gran variación de absorción en sus agregados reciclados.

CAPÍTULO CUARTO

4. Resultados y discusión

4.1 Introducción

Una vez que se elaboraron los agregados y se determinaron sus características físicas para realizar los proporcionamientos de las mezclas, se elaboraron los especímenes necesarios para conocer sus propiedades mecánicas. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados al concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Al concreto en estado fresco se le determinó el peso volumétrico fresco, contenido de aire y revenimiento. Se elaboraron y ensayaron 223 especímenes: 187 cilindros estándar, de los cuales, 115 se ensayaron a compresión simple, 36 a tensión por compresión diametral y 36 a módulo de elasticidad. También se ensayaron a flexión 36 vigas de 15x15x60 cm. Se elaboraron 12 tipos distintos de mezclas (ver tabla 3-10 para nomenclatura). Todos los especímenes tuvieron las mismas condiciones de mezclado, vibrado, descimbrado, curado, cabeceo¹ y ensaye con base en las normas ASTM correspondientes. Para fines de comparación, se presentan los resultados que otros autores han obtenido en experimentos similares, junto con los resultados de este trabajo.

4.2 Elaboración de los concretos

Las primeras mezclas que se elaboraron fueron las de agregados naturales, para sensibilizarse con la fabricación de mezclas, ya que el agregado natural era abundante, a diferencia del reciclado. Un día antes de la elaboración de cada mezcla se pesaban cada uno de los componentes que se utilizarían, a excepción del agua que se pesaba el mismo

¹ Sólo se cabecearon los especímenes para las pruebas de compresión simple y módulo de elasticidad

día antes de iniciar el colado para evitar pérdidas por evaporación. Las mezclas se hicieron en dos bachadas debido a que la revolvedora utilizada tenía capacidad de 90 litros (figura 4-1a). El proceso de mezclado fue distinto al establecido por la norma ASTM C 192 [16], fracción 6.1.2. El proceso de mezclado realizado se describe enseguida: los primeros materiales que se colocaban en la revolvedora eran la arena y la grava, seguidos del agua de absorción de los agregados. Éstos se mezclaban por espacio de uno a dos minutos, dependiendo de la cantidad de agregado. Después se agregaba el cemento permitiendo su incorporación con el agregado. Una vez mezclados los tres elementos, se fue agregando el agua poco a poco, atendiendo a la nota 9 de la fracción 6.1.2 *op.cit.* A partir de ese momento se contaban tres minutos de mezclado, y una vez pasado ese tiempo, se contaban cinco minutos más en los que se mantenía en reposo la revolvedora tapada con un trapo húmedo para que no perdiera agua por evaporación, el reposo permitiría el fraguado falso, en caso de que lo tuviera el cemento utilizado (figura 4-1a). Por último, se accionaba de nuevo la revolvedora por tres minutos más, para romper el fraguado falso, en caso de que hubiera existido. Esa bachada se vaciaba en una charola y se seguía el mismo procedimiento para la segunda bachada. Posteriormente, se homogenizaban las dos bachadas a base de palas e inmediatamente después se obtenía el peso volumétrico fresco, el contenido de aire y el revenimiento (normas ASTM C 138, 231 y 143, respectivamente) [14, 17, 15]. Posteriormente se procedía al llenado de los moldes en dos etapas de vibrado, como lo marca la tabla 1 de la norma ASTM C 192 (figura 4-1b). Por último, se enrasaban todos los especímenes (figura 4-2a) de acuerdo a la fracción 6.5.1 de la norma ASTM C 192 - 90a [16], y se dejaban en el laboratorio hasta el día siguiente cuando se les descimbraba (figura 4-2b), por último, se llevaban a la cámara de curado (figura 4-3a) (ASTM C 511 – 85) [20], previa rotulación de los especímenes, como se aprecia en la figura 4-2b.

Los especímenes que requerían cabeceo para los ensayos (figura 4-3b), ASTM C 617 [22] (compresión simple y módulo de elasticidad), se preparaban unas horas antes de los ensayos. Los especímenes se ensayaron a la edad de 7, 14 y 28 días a compresión simple y sólo a 28 días el resto de los ensayos: tensión por compresión diametral, módulo de elasticidad y flexión (normas ASTM C 39, 496, 469 y 78, respectivamente) [8, 19, 18, 9].

El proceso de mezclado de los concretos con agregados reciclados utilizado por otros autores también fue diferente a lo especificado en la norma ASTM C 192. Por ejemplo, Gómez-Soberón [29], para garantizar lo más posible que no hubiera variación en la cantidad de agua en la mezcla debido a la gran absorción de sus agregados, llevó a cabo el proceso siguiente:



(a)



(b)

Fig. 4-1. (a) Mezcla en reposo en la revolvedora utilizada. (b) Primera etapa de llenado de cilindros



(a)



(b)

Fig. 4-2. (a) Cilindros enrasados. (b) Descimbrado de especímenes



(a)



(b)

Fig. 4-3. (a) Especímenes en cámara de curado. (b) Especímenes cabeceados

a) Colocó la grava y el agua de mezclado en la revolvedora; b) éstos se mezclaron por dos minutos; c) se dejó en reposo por tres minutos más; d) las etapas b) y c) se repitieron dos veces; e) se agregó el cemento y se mezcló por tres minutos más; y f) se agregó la arena y se mezcló por otros tres minutos.

4.3 Propiedades del concreto en estado fresco

4.3.1 Peso volumétrico fresco (PVF)

Es la suma de los pesos del cemento, del agua de mezclado, del agregado fino y grueso en la condición usada, y de cualquier otro material sólido o líquido añadido [2]. Utilizando la norma ASTM C 138 [14], se determinó el peso por metro cúbico de concreto fresco de todas las mezclas elaboradas. A partir del rendimiento de las mezclas, se ajustaron las cantidades requeridas en el proporcionamiento para obtener un m^3 de concreto, tabla 3-13.

Como se observó en la tabla 3-10, el rendimiento de las mezclas naturales fue casi uno en todos los casos, mientras que en las mezclas recicladas fue notablemente mayor. Esto puede atribuirse a la ligera variación en la densidad de las muestras de los agregados reciclados, ya que éstos están compuestos de pasta de cemento y agregado natural, a diferencia de las muestras de agregados naturales, ya que en este caso, todos sus componentes son sólo de agregado natural.

En la tabla 4-1 se presentan los pesos volumétricos promedio de cada concreto.

En la figura 4-4a se presentan los PVF de todas las mezclas de concreto naturales vs reciclados, en esta figura se puede apreciar que las mezclas de andesita reciclada tuvieron mayores PVF que las de andesita natural, mientras que en las mezclas de caliza ocurrió lo contrario, como se ha comentado anteriormente esto se debe a que las calidades de las andesitas son diferentes pues provienen de bancos de materiales que ya no existen.

También se hicieron dos mezclas con agregado reciclado sumergido en agua de 7 a 9 horas, aproximadamente, sólo para contenidos de cemento de 400 kg/m^3 . Los PVF obtenidos en el laboratorio de esas dos mezclas, ARS400 y CRS400, fueron ligeramente más altos que los obtenidos de concretos hechos con agregado reciclado sin saturar, obteniéndose en ambos casos 20 kg/m^3 sobre el PVF de su homólogo sin saturar, aproximadamente, como se observa en la figura 4-4b. Los incrementos en los PVF de los concretos ARS400 y CRS400 fueron aproximadamente del 1%, respecto de los concretos con agregados sin saturar. Asumiendo que el porcentaje de absorción es proporcional al tiempo de inmersión, es posible que ese incremento se deba al agua que absorbió el material en el tiempo que permaneció en inmersión, ya que los porcentajes de absorción que tienen la caliza y la

Tabla 4-1. Pesos volumétricos promedio de las mezclas elaboradas

Tipo de agregado utilizado en la mezcla	PVF promedio de cada concreto kg/m^3
Caliza Natural	2249.55
Andesita Natural	2062.80
Caliza Reciclada	2120.65
Andesita Reciclada	2079.73
Caliza Reciclada Saturada	2144.70
Andesita Reciclada Saturada	2101.27

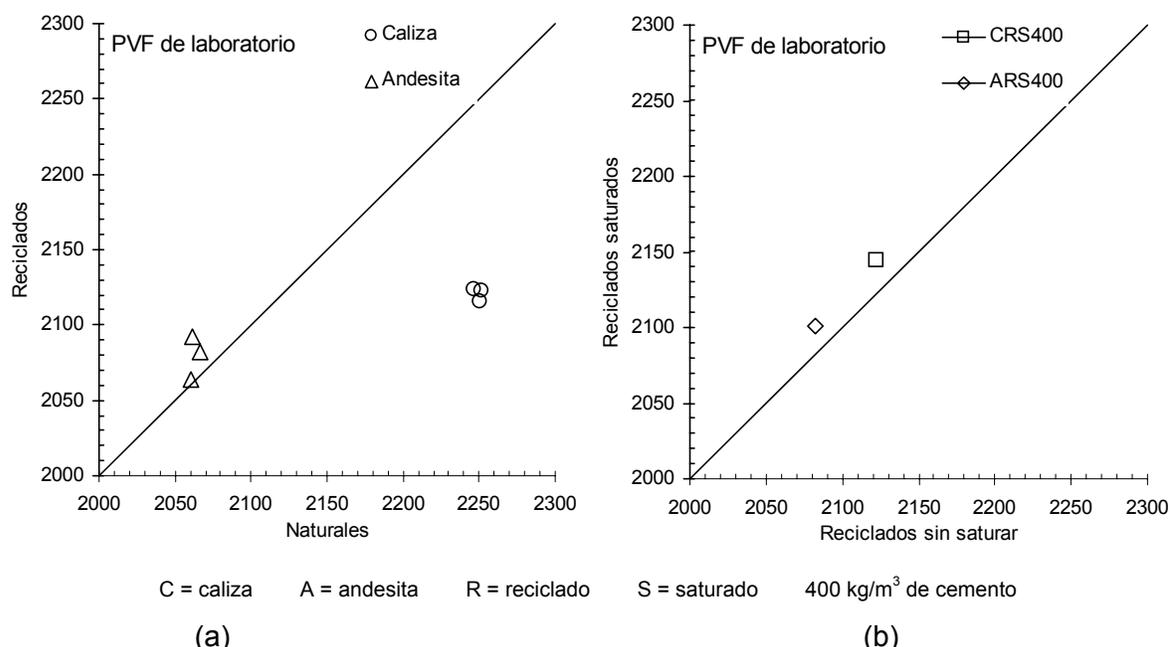


Fig. 4-4. Pesos volumétricos frescos (PVF) medidos en laboratorio a) de los agregados naturales vs reciclados b) de los agregados reciclados sin saturar vs los agregados reciclados saturados

andesita reciclada son, 2.62 y 3.25%, respectivamente.

La intención de estas mezclas con agregado reciclado “saturado” fue comprobar si la saturación del material provoca una mejor adherencia entre la pasta adherida al agregado reciclado y la pasta del concreto nuevo, ocasionando una mayor resistencia a la compresión de estos concretos. Al respecto se hablará más adelante.

De la discusión anterior es posible decir que los concretos de andesita reciclada tuvieron pesos volumétricos frescos muy semejantes al de los concretos naturales elaborados con el mismo agregado.

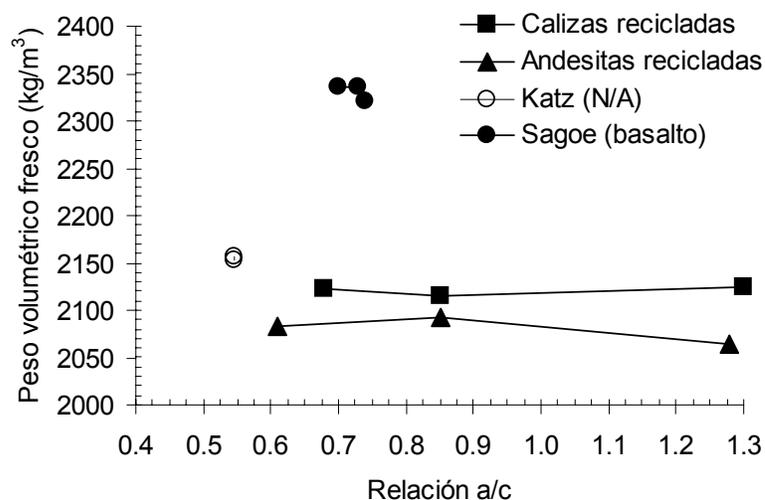


Fig. 4-5. Pesos volumétricos frescos de varios autores

En el caso de los concretos elaborados con calizas, los naturales obtuvieron PVF notablemente más altos que los reciclados.

El PVF obtenido para todos los concretos elaborados con calizas recicladas se encontró dentro del rango establecido para un concreto normal clase 2, según el reglamento de NTC del D.F. [5A], establecido en pesos volumétricos frescos de entre 1.9 – 2.2 ton/m³. Mientras que los concretos elaborados con agregados de caliza natural obtuvieron PVF mayores a 2.2 ton/m³, quedando en la clasificación de concreto normal clase 1. Por otra parte, los concretos elaborados con andesitas recicladas y naturales, obtuvieron pesos volumétricos dentro del rango de 1.9 – 2.2 ton/m³, correspondiente a concretos clase 2 [5A].

Al comparar los PVF de los concretos reciclados obtenidos en este trabajo, con los resultados de otros autores (figura 4-5), se observa que los resultados de Katz [28], de concretos elaborados con cemento blanco y ordinario, fueron ligeramente mayores que los obtenidos en este trabajo para la caliza y la andesita. Es posible que esto se deba a que el peso volumétrico de los agregados utilizados por Katz fue mayor, lo que es congruente con la diferencia en PVF observado, al menos para esa relación agua-cemento (0.55).

En la misma figura se aprecia que los resultados de Sagoe [27] son mucho mayores a los de este trabajo y a los de Katz. Esto es consistente con la tendencia observada, ya que Sagoe utilizó agregado reciclado de basalto, el cual tiene el mayor peso específico de los tres agregados presentados en la gráfica 4-5.

4.3.2 Contenido de aire

Todos los concretos contienen aire atrapado aunque no se les agreguen aditivos inclusores de aire. Los concretos elaborados con las características que tienen los de este trabajo deben tener un contenido de aire aproximado del 2.0% [4]. De acuerdo con la norma ASTM C 231 [17] se realizó la prueba de contenido de aire de concretos frescos a todas las mezclas, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 4-2.

La mayoría de las mezclas tuvieron un contenido de aire de 2.0%, a excepción de las mezclas de andesita natural que tuvieron contenidos de aire superior al 2.0% para los tres contenidos de cemento. Esto se puede deber principalmente a que el agregado era muy poroso y no estaba totalmente saturado, lo que concuerda con el bajo peso volumétrico obtenido del agregado (ver tabla 3-8).

En la figura 4-6 se presentan los datos de la tabla 4-2. Se observa que los concretos hechos con andesita natural tuvieron un contenido de aire entre el 2.80 y 3.30%, el cual es mucho mayor que el normal de 2.0%, mientras que los concretos reciclados hechos de andesita tuvieron contenidos de aire normales, oscilando entre el 1.60 y el 2.0%, como se observa en la figura 4-6. También se aprecia que en los concretos elaborados con andesita natural, el contenido de aire es directamente proporcional al contenido de cemento, con una tendencia claramente lineal ($R^2 = 0.89$). Así mismo, para los concretos de andesita reciclada sucede lo contrario, ya que se aprecia una relación inversamente proporcional entre el contenido de aire y la cantidad de cemento.

Tabla 4-2. Contenidos de aire obtenidos

Mezcla	contenido de aire (%)
CN200	2.00
CR200	1.80
AN200	2.80
AR200	2.00
CN300	2.00
CR300	2.10
AN300	2.90
AR300	1.80
CN400	2.00
CR400	2.00
CRS400	1.70
AN400	3.30
AR400	1.60
ARS400	1.50

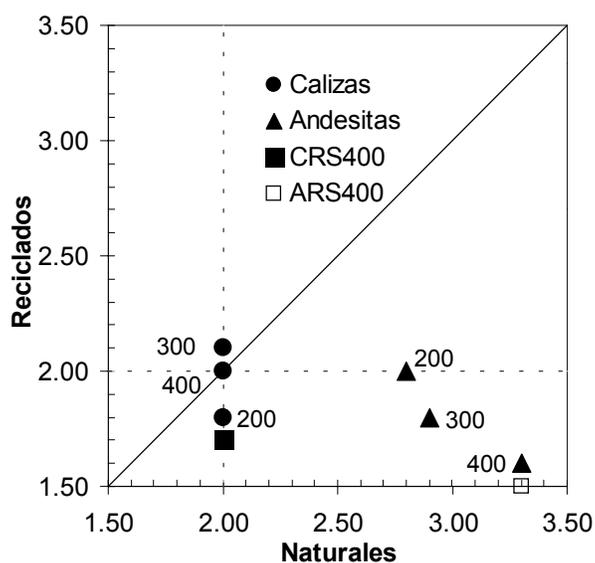


Fig. 4-6. Contenidos de aire obtenidos

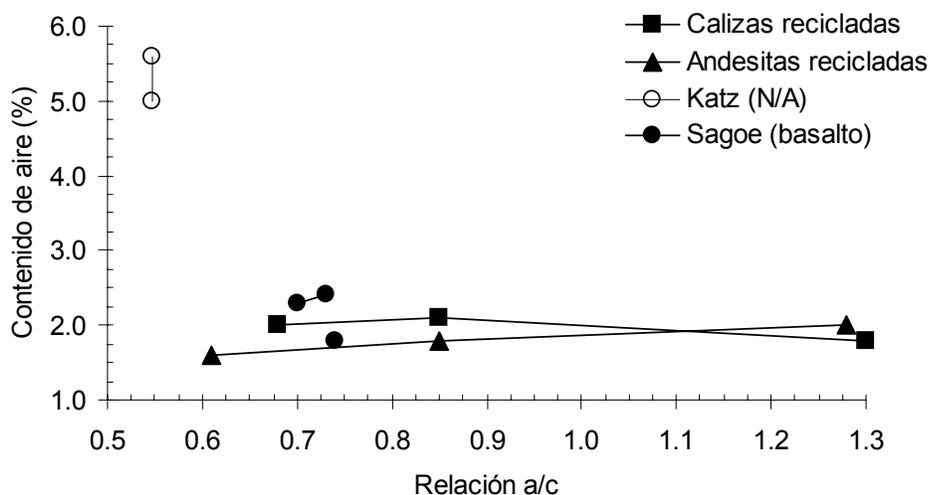


Fig. 4-7. Contenidos de aire obtenidos por otros autores

Los agregados naturales y reciclados de andesita no tienen la misma calidad ya que provienen de bancos distintos, como se ha comentado anteriormente.

Los agregados calizos provienen de la misma época de extracción del material y de bancos de agregados de calidades semejantes.

En el caso de los concretos hechos con calizas recicladas, se aprecia que la cantidad de cemento influyó ligeramente en su contenido de aire, el cual estuvo dentro de los rangos normales, mientras que en los naturales no hubo influencia alguna (figura 4-6).

Por otra parte, los concretos hechos con caliza y andesita reciclada saturada tuvieron contenidos de aire menores que los de caliza y andesita reciclada sin saturar, sólo 0.30 y 0.1 % menos, respectivamente. Probablemente esto se deba a que durante la saturación, el agua que absorbió el agregado cubrió los poros, redundando en un menor contenido de aire en la mezcla.

Además, en la figura 4-6 se observa que los concretos de andesitas naturales tuvieron mayores diferencias en el contenido de aire, respecto de los concretos con calizas.

Por otra parte, el alto contenido de aire en los concretos de andesita natural, influyó en el peso volumétrico fresco, obteniendo valores de PVF ligeramente mayores para los concretos reciclados que para los naturales, como se observa en la figura 4-4a.

La diferencia en contenidos de aire del agregado natural y el reciclado de andesita, puede deberse a que como el último tiene pasta de cemento adherida, ésta hace que se cubran los poros que conforman el agregado y que la calidad del agregado natural que conformaba el concreto reciclado con andesita provenía de una fuente de mejor calidad que el natural

utilizado en las mezclas de este experimento. También es posible que se deba a que el material que se recicló era concreto de alta resistencia, por lo tanto, la calidad de la pasta del material que se recicla influye drásticamente en el contenido de aire que pueda contener el nuevo concreto fabricado con los agregados producto de este material.

Otros autores han obtenido contenidos de aire similares a los aquí presentados para relaciones agua-cemento dentro del rango utilizado. Por ejemplo, Sagoe [27] obtuvo contenidos de aire entre el 1.80 y el 2.40% para concretos hechos con basalto reciclado, manteniendo prácticamente constante la cantidad de cemento utilizada (figura 4-7).

Por otra parte, Katz [28] obtuvo contenidos de aire excesivamente altos respecto del normal (2.0%). Aunque Katz no encontró una explicación de los contenidos de aire tan altos que obtuvo, es posible que esto se deba a la edad que tenía el concreto que trituró para obtener sus agregados reciclados, 1, 3 y 28 días, ya que los concretos triturados por Sagoe y los de este trabajo para elaborar agregados, tenían una edad mayor (figura 4-7).

4.3.3 Revenimiento

El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a las condiciones de trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto. La consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir. La plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto. Si se usa más agregado en una mezcla de concreto o si se agrega menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldear [2].

Según el ACI, la prueba de revenimiento es una medida de la consistencia del concreto recientemente mezclado. Para determinadas proporciones de cemento y de agregados sin aditivos, entre más alto es el revenimiento más agua contiene la mezcla. El revenimiento es un indicador de la trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares [2].

El revenimiento que se seleccionó en las proporciones de todas las mezclas elaboradas fue de 10 cm (figura 4-8). En la tabla 4-3 se presentan los valores de revenimiento obtenidos de las mezclas elaboradas. Como se puede apreciar en ella, más de la mitad de las mezclas no alcanzaron el revenimiento de proyecto, aunque quedaron dentro de los límites de tolerancia permitidos. Estas tolerancias de los revenimientos se encuentran establecidas en la fracción 6.1.2 de la norma ASTM C 94 [10], donde se establece una tolerancia de ± 2.5 cm para revenimientos de proyecto de 10 cm.

De las mezclas hechas con agregado reciclado, sólo tres fueron las que obtuvieron revenimientos fuera de los límites de tolerancia, mientras que las elaboradas con agregado

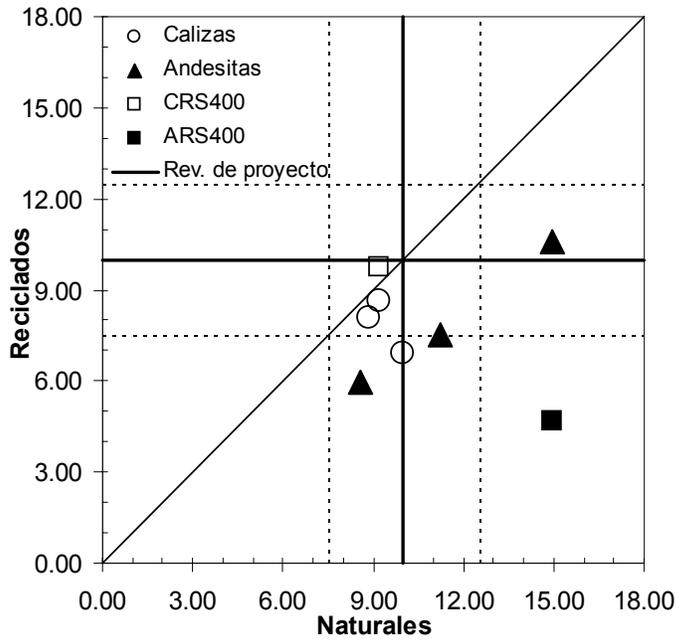


Fig. 4-8. Revenimientos obtenidos

Tabla 4-3. Revenimientos obtenidos

Mezcla	revenimiento (cm)
CN200	8.87
CR200	8.10
AN200	8.60
AR200	5.95
CN300	10.00
CR300	6.93
AN300	11.23
AR300	7.55
CN400	9.17
CR400	8.65
CRS400	9.73
AN400	14.95
AR400	10.60
ARS400	4.70

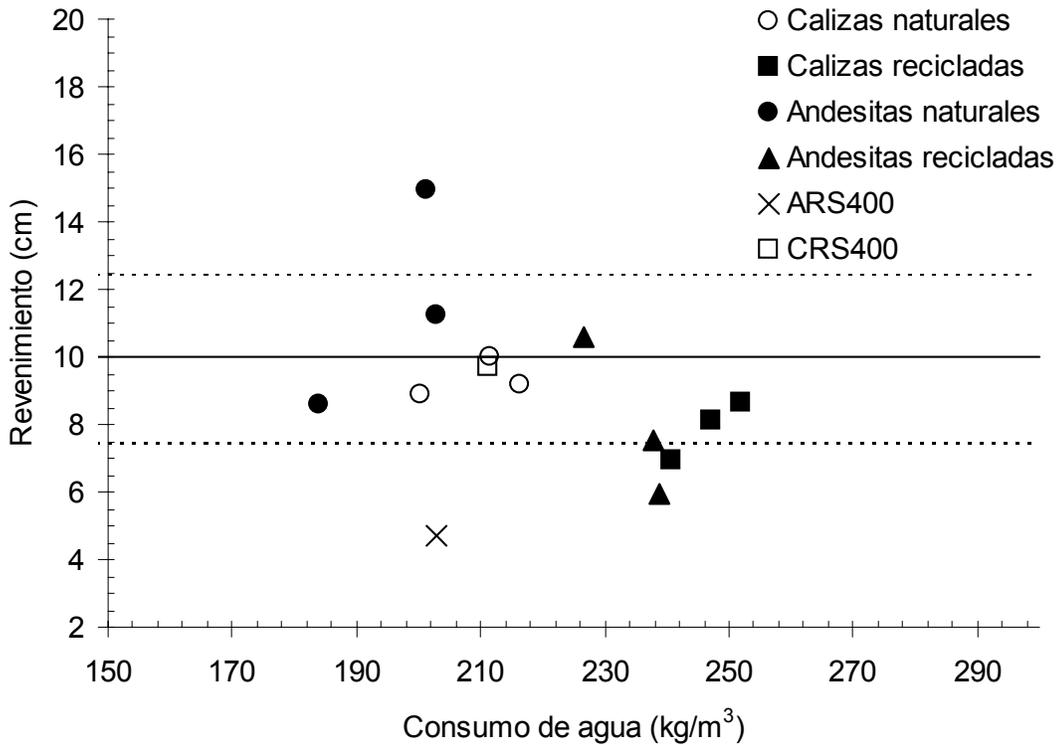


Fig. 4-9. Consumos de agua vs revenimiento

natural, sólo una excedió las tolerancias.

Los revenimiento que se presentan en la tabla 4-3, son los obtenidos de los concretos mezclados de las dos batchadas.

En la figura 4-9, se presenta una gráfica que involucra consumos de agua vs revenimiento para visualizar más claramente su comportamiento, como se puede observar es difícil hacer una relación entre los consumos de agua y los revenimientos de cada una de las mezclas, pero si graficamos los consumos medios de agua con los revenimientos promedios de cada mezcla obtendríamos la figura 4-10.

Si se promediaran los consumos medios de todos los agregados naturales y reciclados calizas y andesitas, excepto los saturados, se obtendría un consumo medio promedio de 222 kg/m³ aproximadamente, para un revenimiento medio promedio de 9.22 cm.

Lo anterior se puede considerar una estimación de agua de mezclado para elaborar mezclas con agregados naturales y reciclados de andesitas ó calizas, que tengan condiciones similares a las utilizadas en este trabajo. Esto es debido a que como se puede observar en la figura 4-9 el revenimiento medido de cada mezcla quedó por debajo del de diseño con los consumos de agua de mezclado utilizadas.

Entonces, para el diseño de mezclas con agregados que cumplan estas condiciones en vez de utilizar la cantidad de 202 litros como agua de diseño que proponen las tablas de la norma del ACI-211, para una revenimiento de 10 cm y un TMA de 19 mm (3/4"), utilizar la cantidad de 222 litros y a partir de esa cantidad hacer las correcciones por humedad y absorción del agregado que se vaya a utilizar.

Esto con la finalidad de que el revenimiento que se obtenga de las mezclas sea más aproximado a 10 cm.

Por otra parte, en la figura 4-10 se observa que la tendencia de las mezclas recicladas siempre fue la misma, es decir, la trabajabilidad de las mezclas elaboradas con agregado reciclado siempre fue menor que la de las mezclas elaboradas con agregado natural.

Además se observa que prácticamente en todos los casos la tendencia fue que la caliza reciclada tuviera la trabajabilidad más baja, mientras que la andesita natural, la más alta.

En la figura 4-11 se observa la gráfica de relación agua-cemento vs revenimiento, en la cual la tendencia de las mezclas elaboradas en este trabajo son diferentes a las presentadas por otros autores, por ejemplo las de la figura 4-12, ya que en esta figura los revenimientos obtenidos para ese rango de relaciones agua-cemento (0.6-1.3), casi todos los puntos caen por abajo del revenimiento de diseño de 10 cm a diferencia de los obtenidos en este trabajo, donde la mayoría de los puntos obtenidos se encuentran dentro del rango de 7.5 -12.5 cm,

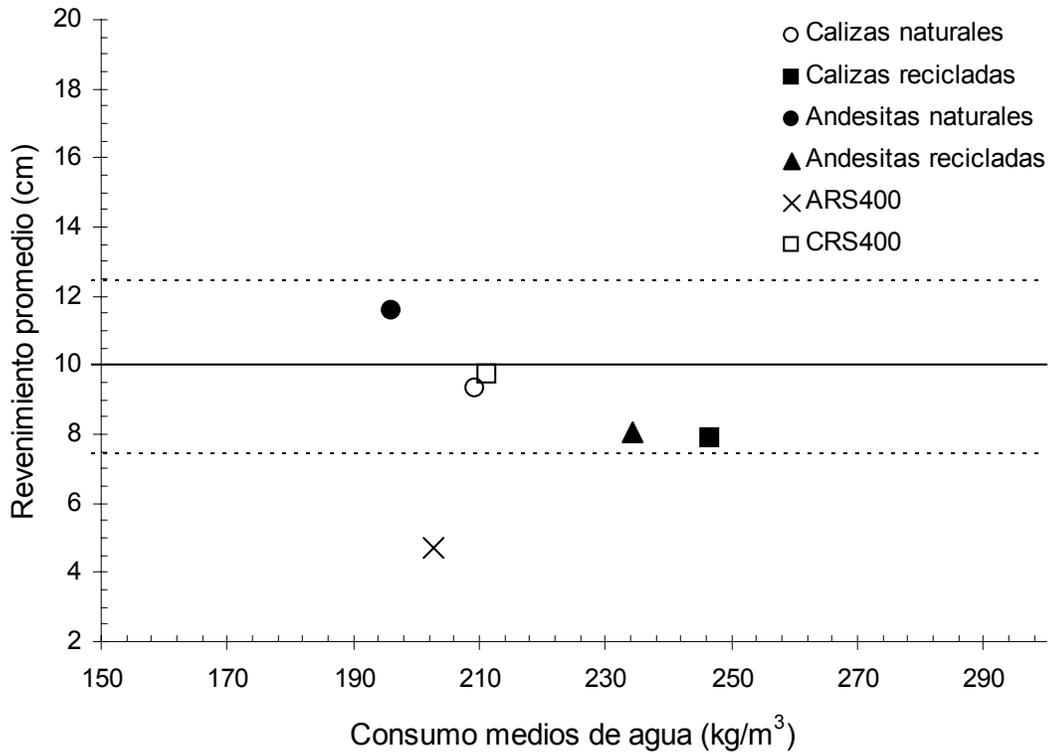


Fig. 4-10. Consumos medios de agua vs revenimientos promedio

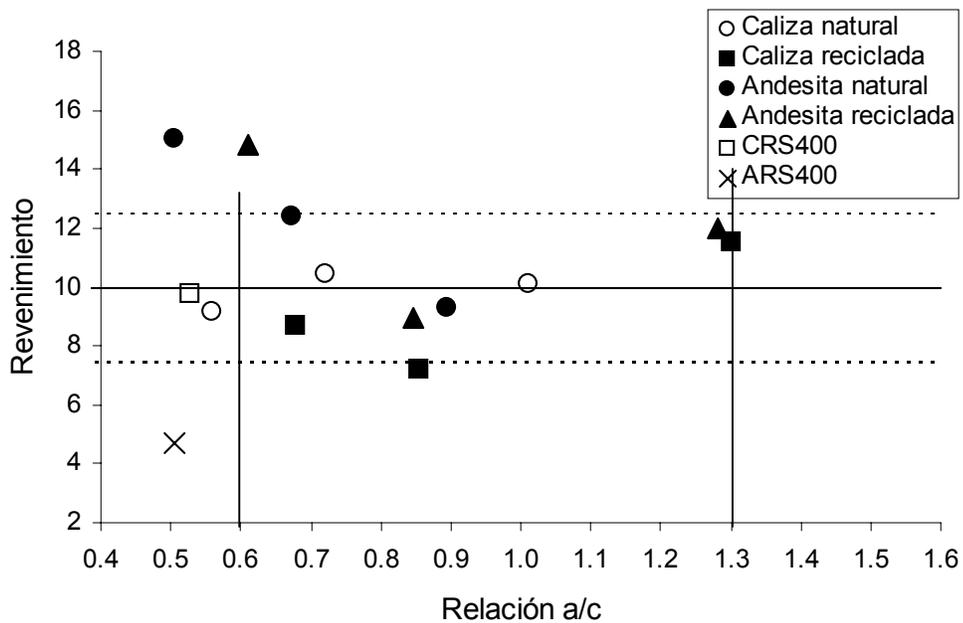


Tabla 4-11. Relación agua-cemento vs revenimiento de todas las mezclas de este trabajo

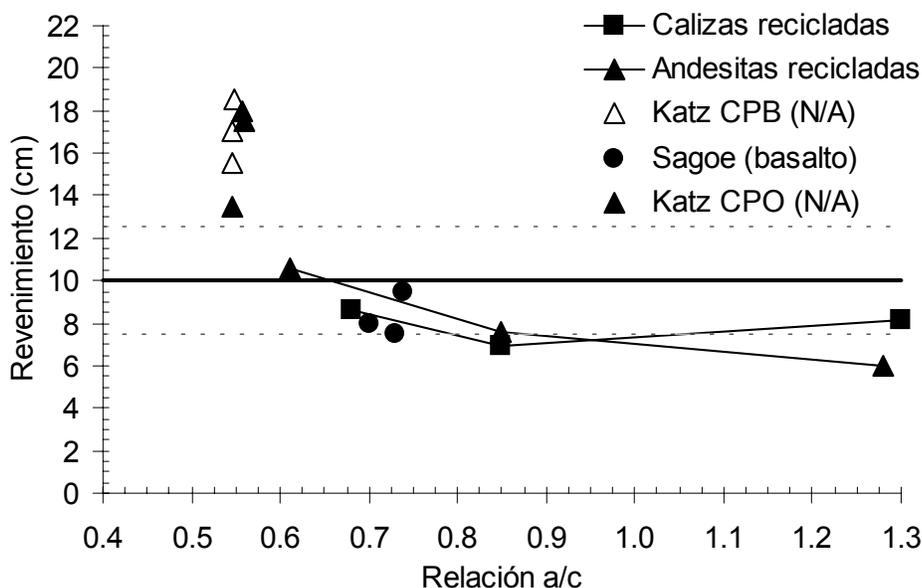


Fig. 4-12. Relación agua-cemento vs revenimiento (Resultados de otros autores)

lo que indica que las mezclas elaboradas en este trabajo fueron más trabajables para el mismo rango de relaciones agua-cemento que presentan otros autores.

En la figura 4-12, se presentan los resultados de Sagoe [27] y Katz [28], donde se observa que Sagoe, obtuvo resultados similares a los aquí obtenidos, es decir, que los agregados reciclados producen mezclas menos trabajables. Sin embargo, los resultados de Katz contradicen los resultados que aquí se presentan, pues indican que son mezclas más trabajables, aunque es posible que esto se deba a que el material que utilizó para fabricar los agregados tenía poca edad (1, 3 y 28 días), por lo tanto, la adherencia entre la pasta y el agregado natural que conformaba el material con el que se produjo el agregado reciclado, no era muy buena o era nula, por lo que es posible que los componentes de los agregados reciclados utilizados en sus mezclas hayan sido en su mayoría agregado natural sin recubrimiento de pasta, lo que concordaría, con lo descrito anteriormente, acerca de que los agregados naturales producen mezclas más trabajables que los reciclados.

4.4 Propiedades del concreto en estado endurecido

4.4.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima capacidad de carga axial por unidad de área de un espécimen de concreto o de mortero, generalmente a la edad de 28 días. Usualmente se expresa en kilogramos sobre centímetro cuadrado (kg/cm^2) y se le

designa con el símbolo f_c [2]. Los especímenes elaborados para compresión (115) se ensayaron a las edades de 7, 14 y 28 días, utilizando una velocidad de aplicación de carga de 25 ton/min, según lo especifica la norma ASTM C 39 [8].

Según las relaciones agua-cemento obtenidas de cada mezcla, 0.50, 0.67 y 1.0 aproximadamente, se estimaban resistencias de 320, 220 y 150 kg/cm^2 , respectivamente, a edades de 28 días, a partir del diseño de mezclas del ACI, como se comentó en el capítulo tres. En la tabla 4-4, se presentan los valores de resistencia promedio (3 especímenes para cada mezcla) obtenidas de todas las mezclas a las diferentes edades de ensayo. Como se observa en la tabla 4-4, todas las mezclas rebasaron las resistencias a compresión esperadas.

Probablemente esto se deba a las características de los agregados principalmente, ya que para que un concreto alcance altas resistencias, ésta depende de la capacidad del agregado y para bajas resistencias, de la pasta de cemento.

En la figura 4-13 y 4-14 se muestra la relación agua-cemento de las mezclas contra su resistencia obtenida, andesitas y calizas, respectivamente, para una mejor apreciación de las diferencias. Como se observa en estas figuras, todas las mezclas tuvieron relaciones agua-cemento diferentes. Para el grupo de las mezclas que se fabricaron con cantidades de cemento de 400 kg/m^3 , con andesita o caliza, la relaciones agua-cemento oscilaron entre 0.51 y 0.68 tanto para las naturales como para las recicladas. Para el grupo de las mezclas que se fabricaron con 300 kg/m^3 , oscilaron entre 0.67 y 0.85 y entre 0.90 y 1.30 para el de 200 kg/m^3 .

Tabla 4-4. Resistencias de todas las mezclas a diferentes edades de ensayo, porcentajes de resistencias normalizadas a los 28 días de edad

Edad (días)	Relación	7	14	28	7	14	28
Mezcla	a/c	Resistencia a la compresión (kg/cm^2)			Resistencia normalizada a 28 días (%)		
CN200	1.01	116.70	145.08	188.20	62%	77%	100%
CR200	1.30	103.52	140.48	185.53	56%	76%	100%
AN200	0.90	95.84	113.22	155.48	62%	73%	100%
AR200	1.28	116.72	153.31	182.76	64%	84%	100%
CN300	0.72	218.20	252.25	306.86	71%	82%	100%
CR300	0.85	209.97	266.99	300.73	70%	89%	100%
AN300	0.67	169.88	214.27	263.32	65%	81%	100%
AR300	0.85	225.21	294.85	331.36	68%	89%	100%
CN400	0.56	286.85	330.78	385.61	74%	86%	100%
CR400	0.68	256.43	281.63	360.36	71%	78%	100%
CRS400	0.53	N/A	N/A	355.35	N/A	N/A	100%
AN400	0.51	248.17	284.11	330.79	75%	86%	100%
AR400	0.61	279.17	342.73	414.76	67%	83%	100%
ARS400	0.51	N/A	N/A	402.84	N/A	N/A	100%

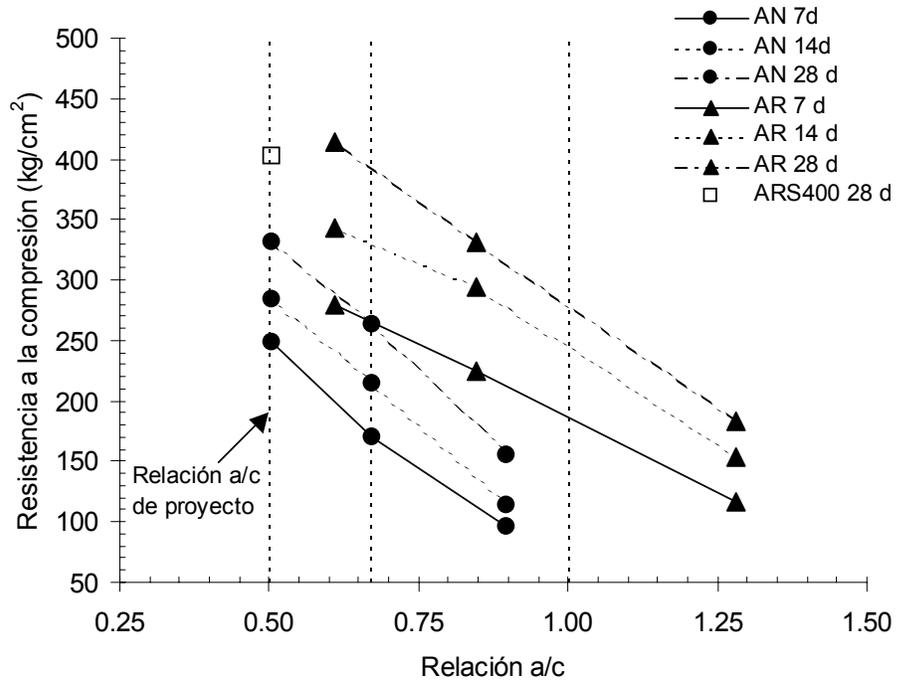


Fig. 4-13. Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión de las mezclas con andesita

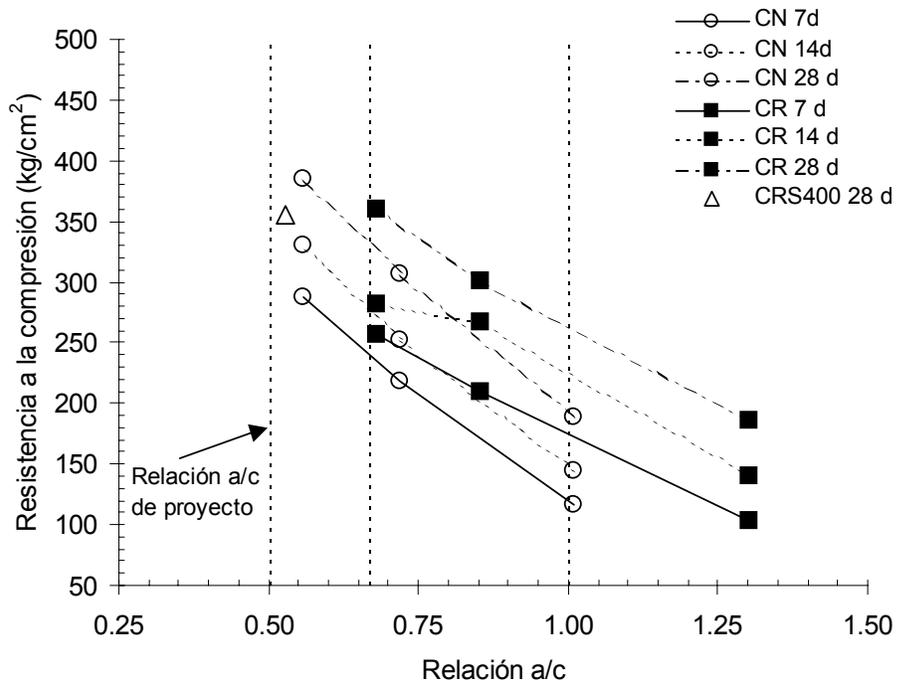


Fig. 4-14. Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión de las mezclas con caliza

Como se observa en la figura 4-13, del grupo de mezclas elaboradas con consumos de cemento de 400 kg/m^3 (relaciones agua-cemento bajas), la andesita reciclada fue la que alcanzó la mayor resistencia. Si se compara con la mezcla elaborada con caliza natural de su grupo (figura 4-14), la mezcla AR400 alcanzó una resistencia a la compresión 7% mayor que la mezcla CN400; a edades tempranas, 7 y 14 días, las resistencias de la AR400 fueron menores que las de CN400 (para nomenclatura ver capítulo tres).

La mezcla AR400 también fue mucho mayor que la AN400. Aunque las características físicas de los agregados reciclados fueron mejores que la de los naturales (para el caso de las andesitas), ya que como se ha comentado anteriormente el agregado de andesita que se recicló era de mejor calidad que el natural utilizado, ya que pertenecen a épocas de extracción diferentes. Lo que puede justificar las altas resistencias de la mezcla con andesita reciclada.

Por otra parte, las relaciones agua-cemento que tienen las mezclas CN400 y CR400 son congruentes con las resistencias obtenidas en los ensayos.

Respecto del grupo de mezclas elaboradas con consumos de cemento de 300 kg/m^3 , se observa en la figura 4-14 que las resistencias que se obtuvieron de las mezclas CN300 y CR300, son muy semejantes, a pesar de tener relaciones agua-cemento diferentes de 0.72 y 0.85, respectivamente.

Nuevamente, encontramos que las mezclas elaboradas con 300 kg/m^3 de consumo de cemento y andesitas recicladas presentaron mejores resistencias que las elaboradas con andesitas naturales, a pesar de tener relaciones agua-cemento muy diferentes, 0.67 y 0.85 respectivamente, con diferencias de casi 70 kg/cm^2 .

Por último, del grupo de mezclas elaboradas con consumos de cemento de 200 kg/m^3 , en la figura 4-13 y 4-14 se observa el fenómeno siguiente: para relaciones agua-cemento muy diferentes, las mezclas elaboradas con andesitas y calizas, naturales y recicladas se obtuvieron resistencias similares.

De todo lo comentado anteriormente se puede resumir que para relaciones agua-cemento altas, mayores o iguales que 1, las resistencias alcanzadas tanto por los agregados reciclados como por los naturales tienden a ser muy semejantes o iguales.

Para todas las relaciones agua-cemento obtenidas en este trabajo, las mezclas elaboradas con agregados recicladas obtuvieron resistencias mayores; para los concretos de andesitas esta diferencia fue notable debido a la mejor calidad del agregado natural que contenía el concreto que se recicló para fabricar los agregados.

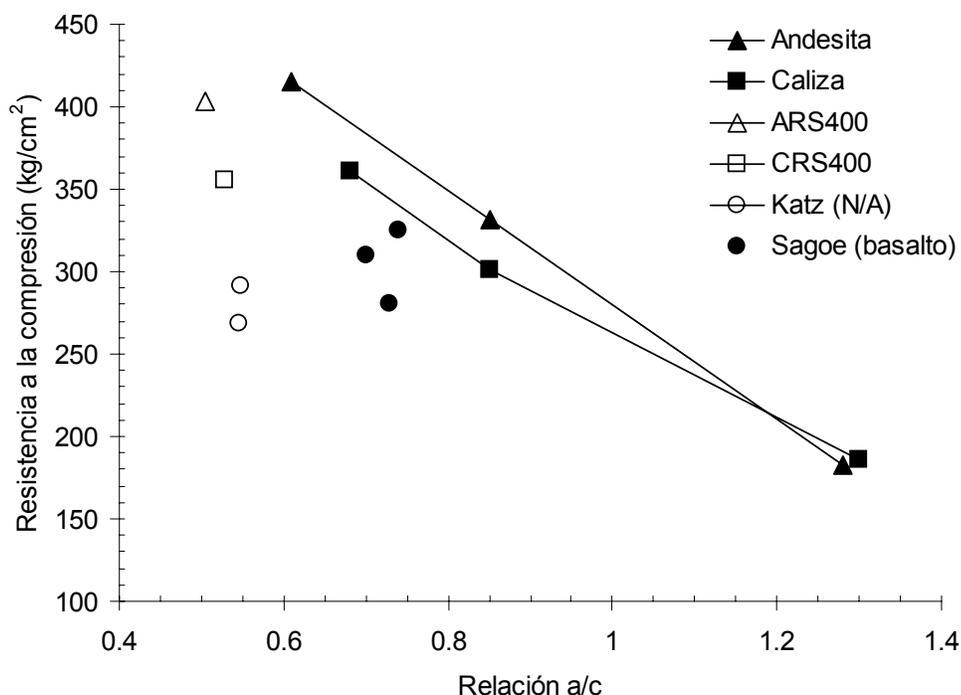


Fig. 4-15. Resistencias a la compresión obtenidos por otros autores

Otros autores han publicado las resistencias a la compresión a 28 días que obtuvieron de sus experimentos. Como se observa en la figura 4-15, éstas son relativamente bajas respecto de las de este trabajo.

Katz [28], por ejemplo, obtuvo una resistencia a la compresión máxima de 300 kg/cm² para una relación a/c de 0.55, y Sagoe [27], obtuvo una resistencia de aproximadamente 340 kg/cm² para una relación a/c de 0.75. Aunque son agregados diferentes los que componen las mezclas, habría de esperarse una resistencia mayor de los concretos de Sagoe, ya que éste utilizó agregados reciclados de basalto. Katz, también obtuvo resistencias bastante buenas a pesar de que los agregados que utilizó provenían de un concreto muy joven, del que se desconoce qué tipo de agregado natural lo componía. La edad del concreto utilizado por Katz para producir los agregados reciclados pudo dar lugar a una baja dureza de éstos, teniendo como consecuencia bajas resistencias, aunque esto no sucedió así.

4.4.2 Módulo de elasticidad

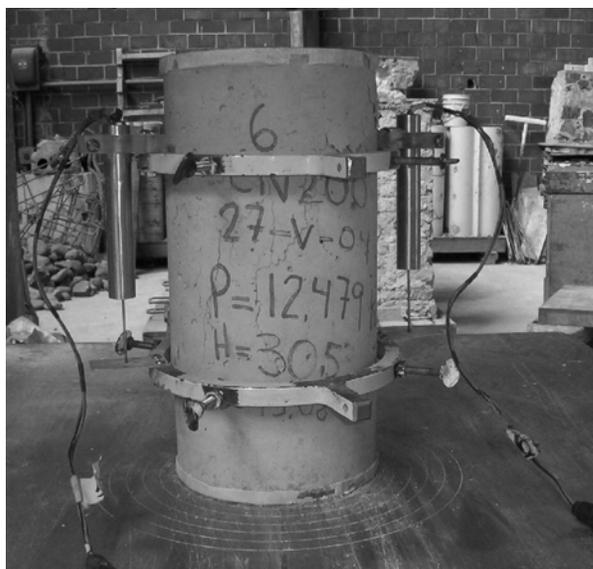
El módulo de elasticidad (E) definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación correspondiente a esfuerzos normales de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material, depende de factores tales como la resistencia a la

compresión y el tipo de agregado. Para concretos de calizas con resistencias a la compresión (f_c) entre 200 y 350 kg/cm^2 , el módulo de elasticidad puede estimarse como 14,000 veces la raíz cuadrada de f_c . Para concreto de andesita, como 8000 veces la raíz cuadrada de f_c [5A].

En este trabajo se ensayaron 36 cilindros estándar de 28 días de edad (figura 4-16 a y b), tres para cada una de las doce mezclas elaboradas. Los cilindros se ensayaron de acuerdo a la norma ASTM C 469 [18], con una velocidad de aplicación de carga de 25 ton/min. Se les hicieron 5 precargas aplicando el 40% de la carga máxima promedio soportada en los ensayos previos a compresión, a la misma velocidad de 25 ton/min. Los módulos de elasticidad promedio obtenidos de los ensayos se resumen en la tabla 4-5.

En la columna (5) y (6) de la tabla 4-5, se encuentran los módulos de elasticidad estimados a partir de la resistencia a la compresión obtenida a la edad de 28 días para calizas y andesitas, respectivamente, especificado en el reglamento del D.F. [5A]. En la columna (7) se presenta el factor para estimar el módulo de elasticidad de los concretos con sus respectivos agregados utilizados, a partir de los resultados que se obtuvieron de los experimentos en el laboratorio.

Se observa que los módulos de elasticidad promedio obtenidos de los ensayos son mayores que los estimados en gran parte de los casos. Esta estimación está basada en concretos de peso normal de clase 1 para el concreto elaborado con calizas y de clase 2 para los elaborados con andesitas, según el reglamento del Distrito Federal [5A].



(a)



(b)

Fig. 4-16. a) Vista de cilindro ensayado a módulo de elasticidad, b) Cilindro fallado

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Mezcla	Relación a/c	Resistencia a la compresión 28 d (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (E) x 10 ³ (Kg/cm ²)	(f'c) ^{1/2} x 14000 (calizas) E x 10 ³ (Kg/cm ²)	(f'c) ^{1/2} x 8000 (andesitas) E x 10 ³ (Kg/cm ²)	factor de E Elab / (f'c) ^{1/2}
CN200	1.01	188.20	227	192		16547
CN300	0.72	306.86	263	245		15014
CN400	0.56	385.61	264	275		13444
AN200	0.90	155.48	122		88	9784
AN300	0.67	263.32	137		94	8443
AN400	0.51	330.79	144		96	7917
CR200	1.30	185.53	170	191		12481
CR300	0.85	300.73	214	243		12340
CR400	0.68	360.36	188	266		9904
AR200	1.28	182.76	177		106	13093
AR300	0.85	331.36	198		113	10877
AR400	0.61	414.76	201		113	9870

Tabla 4-5. Módulos de elasticidad promedios de todas las mezclas

Los valores de módulo obtenidos para las mezclas con caliza natural fueron los que más se aproximaron a los valores estimados, mientras que los estimados para los concretos con caliza reciclada quedaron muy por encima de los obtenidos en el laboratorio.

En las mezclas elaboradas con andesita natural, se observó que ambas mezclas, las elaboradas con agregado reciclado y natural, tuvieron valores de módulo de elasticidad mayores a los estimados. Las mezclas con andesita natural obtuvieron valores menores que las elaboradas con agregados reciclados, pero esto se debe a lo comentado anteriormente, sobre la calidad del agregado natural que conforma el agregado reciclado debido a la época de extracción.

Por otra parte, las mezclas que se elaboraron con caliza reciclada presentaron valores de módulo bajos respecto de las elaboradas con caliza natural, conservando entre ellas la misma tendencia que se ha observado en todas las propiedades.

En la figura 4-17, se presenta la diferencia entre los valores de resistencia a la compresión vs módulo de elasticidad de las calizas. En ella se puede observar que las mezclas con caliza reciclada obtuvieron valores más bajos respecto de los que se establecen en el reglamento del Distrito Federal a partir del f'c medido de las mezclas, mientras que para las mezclas con caliza natural pasa lo contrario.

También se observa que los concretos de caliza reciclada resultaron ser más deformables de lo que se esperaría, de acuerdo a lo establecido en el reglamento del D.F., ya que alcanzaron una resistencia a la compresión muy alta respecto del módulo de elasticidad que obtuvieron.

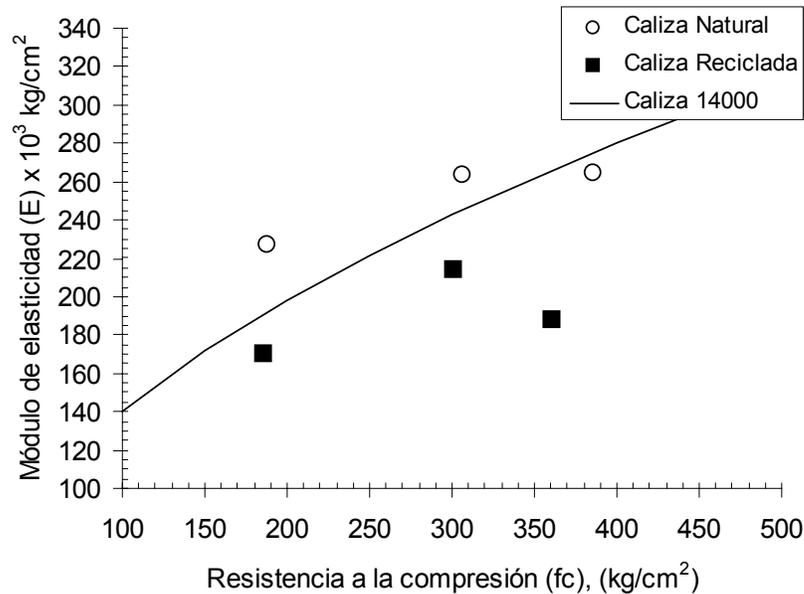


Fig. 4-17. Resistencia a la compresión (f_c) vs módulo de elasticidad (E) de calizas

En la figura 4-18 se presenta la gráfica que involucra los mismos parámetros que la figura 4-17, pero con los valores obtenidos de las mezclas con andesitas, en esta figura se observa que ambas mezclas obtuvieron valores por encima de los especificados en el reglamento para concretos clase 2, aunque si se comparara con concretos de clase 1, todos los valores obtenidos en laboratorio tanto de las mezclas con agregados naturales y recicladas quedarían por debajo de este límite.

Las mezclas con agregados reciclados, andesitas y calizas, obtuvieron módulos de elasticidad muy semejantes entre ellos principalmente en resistencias a la compresión bajas, además que obtuvieron mejores propiedades mecánicas que los concretos con agregado natural de andesita, aunque las condiciones de los agregados naturales y reciclados de andesita no son las mismas como se comentó anteriormente, mientras que en los concretos elaborados con agregados naturales se aprecia una notable diferencia entre ambos.

De esto es posible decir que a los concretos elaborados con agregado reciclado (caliza) se les puede usar como concretos clase 2, ya que en los experimentos estos concretos quedaron por debajo del límite para concretos clase 1.

Aunque los concretos con agregado reciclado de andesita tuvieron comportamientos semejantes a los reciclados de caliza, se reserva la recomendación para la utilización de ellos. Es necesario hacer experimentos con materiales de andesita reciclada y natural del mismo banco y época.

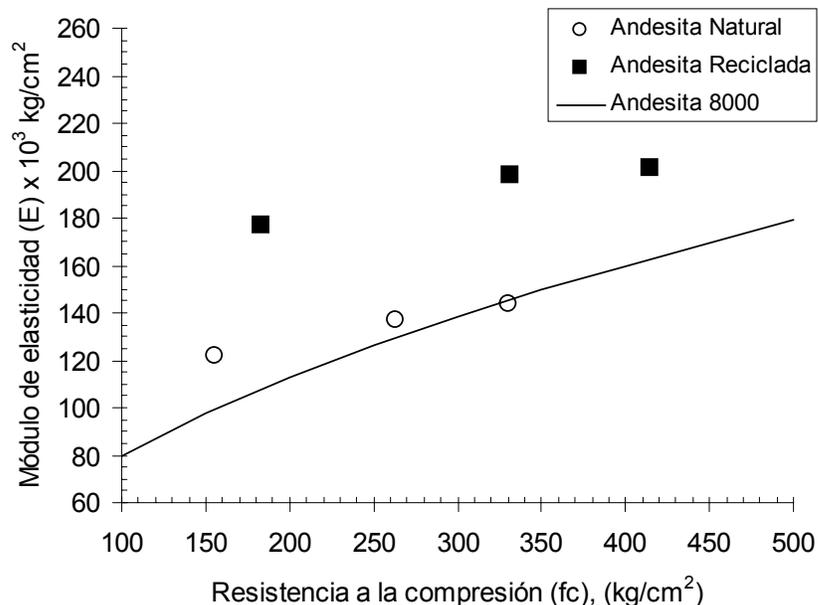


Fig. 4-18. Resistencia a la compresión (f_c) vs módulo de elasticidad (E) de andesitas

En la figura 4-19, se observa que para una misma relación agua-cemento, los módulos de elasticidad que alcanzan las mezclas elaboradas con los cuatro tipos de agregado son diferentes, siendo menos rígido el concreto elaborado con andesita natural. Por otra parte el más rígido, fue la caliza natural, conservando la misma tendencia observada. Los concretos elaborados con agregados reciclados para la misma relación agua-cemento observaron un módulo de elasticidad muy similar, pero la andesita reciclada alcanzó una resistencia a la compresión de aproximadamente 55 kg/cm^2 por encima de la caliza reciclada.

Por otra parte, en la figura 4-20a se observa que los concretos elaborados con calizas tienen deformaciones unitarias máximas del orden de 0.0029 a 0.0030 aproximadamente, mientras que las de los concretos con caliza reciclada se encuentran entre 0.0032 y 0.0037.

En la figura 4-20b, donde se representan las andesitas, se aprecia que las deformaciones unitarias máximas de las andesitas naturales son del orden de 0.0033 a 0.0035, mientras que las deformaciones unitarias máximas registradas de las andesitas recicladas son del orden de 0.0032 a 0.0037, un poco mayores que las de los concretos con agregado natural como sucedió con las calizas, pero en las andesitas los concretos reciclados tienen una tendencia inversa. Los concretos con calizas naturales a mayor resistencia a la compresión presenta mayor deformación unitaria, caso contrario de los concretos con andesita natural. Por otra parte los concretos de andesita y caliza reciclada a mayor resistencia a la compresión mayor deformación unitaria, indicando que la rigidez del agregado es baja.

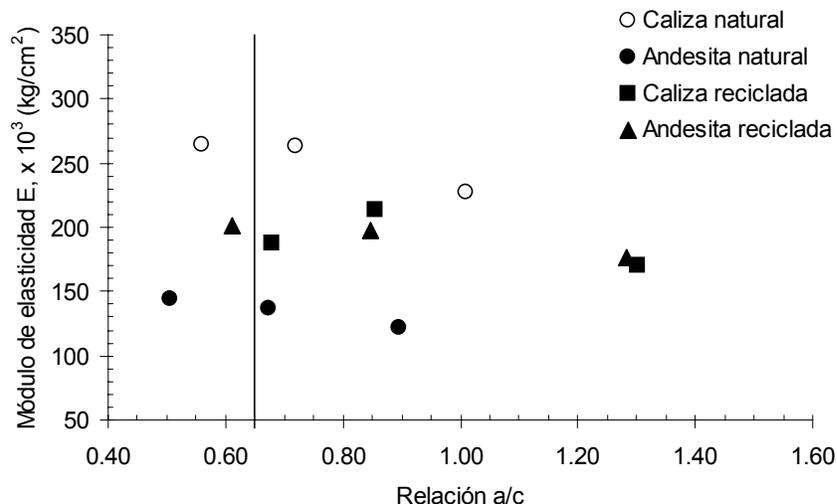


Fig. 4-19. Relación agua-cemento vs módulo de elasticidad medido en laboratorio

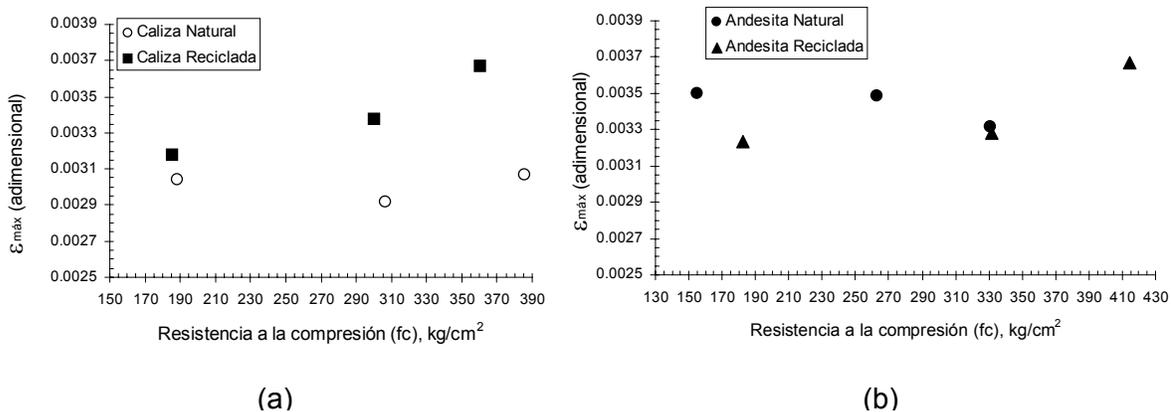


Fig. 4-20. Resistencia a la compresión vs deformación unitaria máxima, a) calizas y b) andesitas

Si se observan ambas figuras (4-20 a y b) se puede apreciar que los concretos con caliza y andesita reciclada presentan deformaciones semejantes a las de las calizas y andesitas naturales, respectivamente, para resistencias a la compresión similares. Esto es posible que se deba a que para bajas resistencias domina el comportamiento de la pasta y no el del agregado, o a que la andesita natural que conformaba el concreto con el que se fabricaron los agregados reciclados de andesita tenía propiedades similares a las de la caliza natural que se utiliza actualmente. De los resultados presentados en la figura 4-20, es posible afirmar nuevamente que a los concretos de caliza reciclada se les puede dar un uso similar al de los concretos con andesita natural.

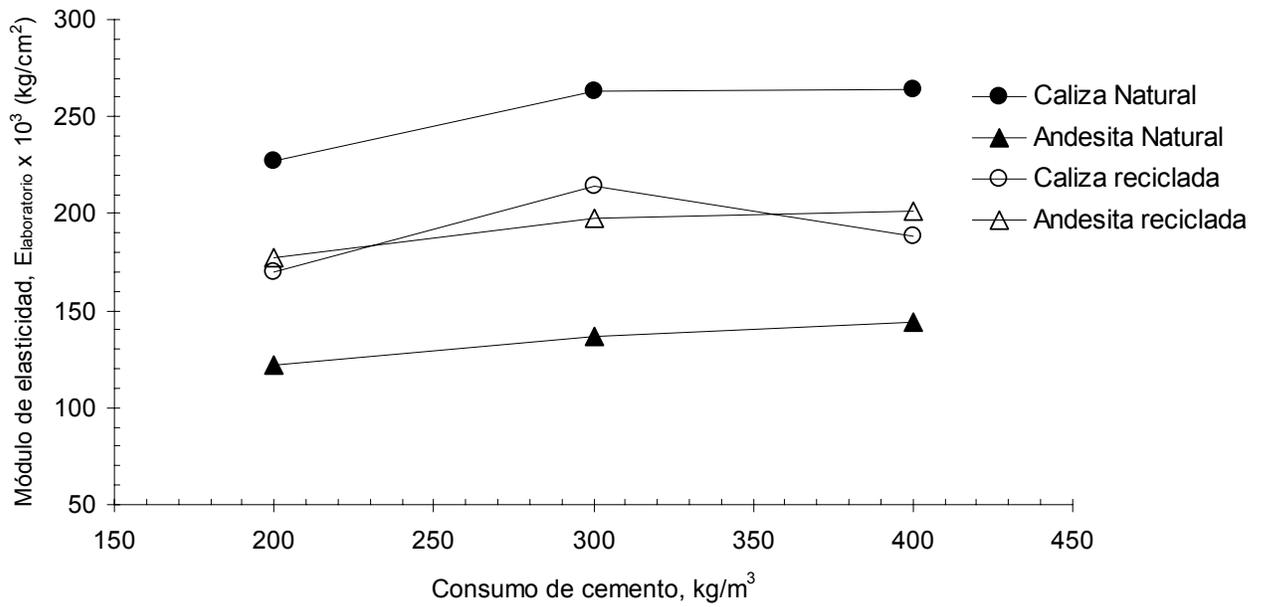


Fig. 4-21. Consumo de cemento vs módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio

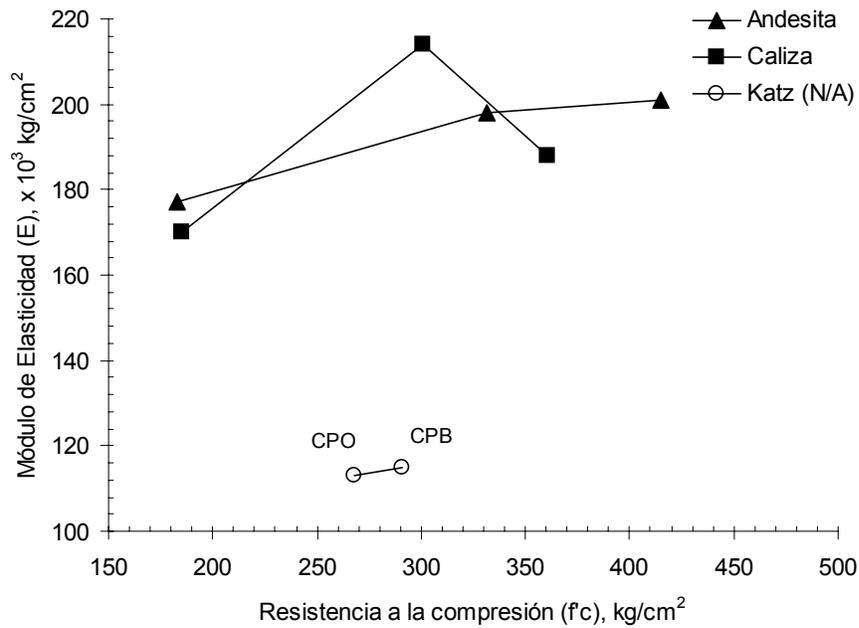


Fig. 4-22. Módulos de elasticidad obtenidos por Katz

Por último, si se observa el comportamiento de los módulos de elasticidad según sus consumos de cemento (figura 4-21), se puede apreciar que la rigidez varía muy poco con este parámetro.

Por otra parte, otros autores han encontrado valores de módulo de elasticidad muy bajos, específicamente Katz [28], quien encontró módulos de elasticidad por debajo de los que se obtuvieron en este trabajo, a pesar de que Katz utilizó consumos de cemento similares (300 kg/m^3 aprox.). Es probable, como ya se ha comentado anteriormente, que los valores tan bajos que Katz obtuvo de las mezclas elaboradas con agregados reciclados se deba a las edades del concreto con los que fabricó sus agregados (1, 3 y 28 días). La baja rigidez de sus concretos (ver figura 4-22) probablemente se deba a la baja rigidez en los agregados reciclados utilizados.

4.4.3 Resistencia a flexión

Para un concreto de peso normal, la resistencia a flexión, también llamada módulo de ruptura o rotura (MR), para concretos clase 1 se considera como 2.0 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión y para concretos clase 2 como 1.4 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión [5A]. El módulo de ruptura de los concretos elaborados en este trabajo se determinó de acuerdo a la norma ASTM C 78 [9], ya que ésta provoca que todo el tercio central del espécimen quede sometido al momento máximo de flexión y al correspondiente esfuerzo máximo de tensión, creando un estado constante de esfuerzo que da oportunidad para que la falla ocurra dentro de este tramo central.

Frecuentemente, se dice que este ensaye sobreestima la resistencia a la tensión del concreto. No obstante, se le considera la forma más apropiada para definir y verificar la resistencia de diseño de los pavimentos rígidos, debido a que esta prueba se considera representativa de las condiciones operativas del concreto en estas estructuras que trabajan a flexión [5].

En este trabajo se ensayaron 36 vigas de $15 \times 15 \times 60$ cm a flexión a la edad de 28 días, tres para cada tipo de mezcla elaborada (figura 4-23, a y b), obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 4-6. Como se observa en esta tabla, los módulos de ruptura que se midieron en laboratorio superaron los establecidos para concretos clase 1, excepto la mezcla CN200, que sólo obtuvo valores superiores al especificado para concretos clase 2 (columna 6 de la misma tabla). En la columna 8, se presentan las relaciones promedio del módulo de ruptura entre la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, cuyo resultado es el factor que en todos los casos fue mayor a 2.0 veces, el cual viene especificado para concretos clase 1 en el reglamento del D.F., excepto el de la mezcla CN200 que obtuvo un factor de 1.90, superior al de 1.4 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, especificada para concretos clase 2, pero menor al especificado para concretos clase 1.

Tabla 4-6. Módulos de ruptura de las doce mezclas de concreto

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Mezcla	Relación a/c	Resistencia a la compresión 28 d (kg/cm ²)	Módulo de ruptura (MR) (Kg/cm ²)	(f'c) ^{1/2}	Concretos clase 1 2.0 x (f'c) ^{1/2}	Concretos clase 2 1.4 x (f'c) ^{1/2}	Relaciones promedio MR / (f'c) ^{1/2}
CN200	1.01	188.20	26.11	13.72	27.44	19.21	1.90
CN300	0.72	306.86	42.22	17.52	35.03	24.52	2.41
CN400	0.56	385.61	52.11	19.64	39.27	27.49	2.65
AN200	0.90	155.48	25.80	12.47	24.94	17.46	2.07
AN300	0.67	263.32	35.95	16.23	32.45	22.72	2.22
AN400	0.51	330.79	37.46	18.19	36.38	25.46	2.06
CR200	1.30	185.53	29.26	13.62	27.24	19.07	2.15
CR300	0.85	300.73	39.89	17.34	34.68	24.28	2.30
CR400	0.68	360.36	41.58	18.98	37.97	26.58	2.19
AR200	1.28	182.76	32.04	13.52	27.04	18.93	2.37
AR300	0.85	331.36	42.79	18.20	36.41	25.48	2.35
AR400	0.61	414.76	44.80	20.37	40.73	28.51	2.20



Fig. 4-23. Vigas ensayadas a flexión: a) espécimen 1, b) espécimen 2

En la figura 4-24, se representan los módulos de ruptura obtenidos en laboratorio en las ordenadas y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en las abscisas, también medida en laboratorio para cada mezcla. En esta misma figura, se observa una tendencia muy parecida de todas las mezclas.

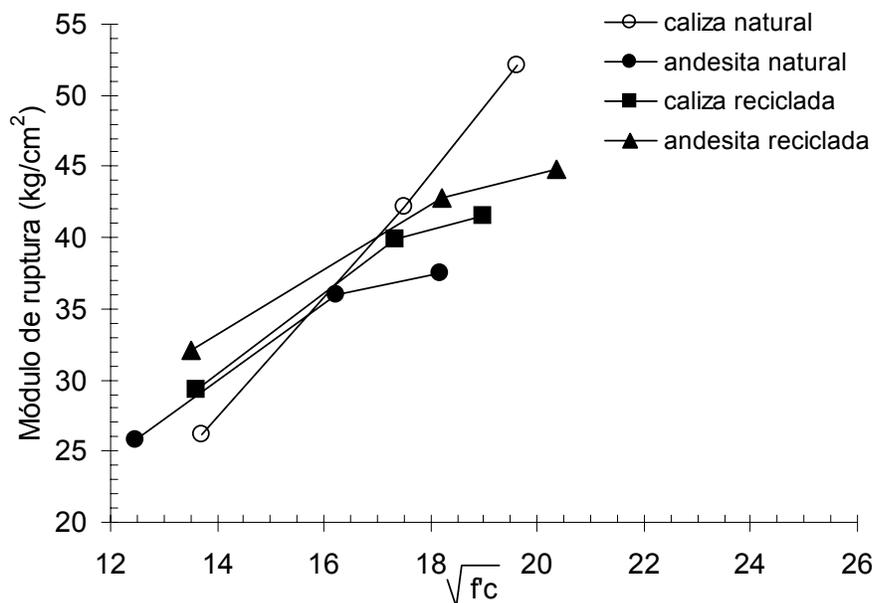


Fig. 4-24. $(f'c)^{1/2}$ vs módulo de ruptura

También se aprecia que las mezclas elaboradas con andesita natural tuvieron los módulos de ruptura más bajos de todas las mezcla, incluso los módulos que representan a los consumos de cemento más altos de 300 y 400 kg/m³ obtuvieron casi el mismo módulo de ruptura.

Por otra parte, se observa que las mezclas con ambos tipos de agregados reciclados tuvieron mejores módulos de ruptura que los concretos elaborados con andesita natural. La tendencia en los resultados obtenidos de estas pruebas vuelve a ser la misma que se ha observado en todas las pruebas realizadas a los concretos con los cuatro tipos de agregado, donde la caliza natural es la que ha alcanzado los mejores resultados y las mezclas con andesita natural los más bajos. En la figura 4-25 se observa una tendencia muy clara, en donde los consumos de cemento son directamente proporcionales al módulo de ruptura de los concretos. Nótese que el grado de proporcionalidad disminuye a partir del consumo de cemento de 300 kg/m³, excepto para los concretos elaborados con caliza natural.

Ahora, si se compara relación agua-cemento contra módulo de ruptura, es posible observar que para relaciones agua-cemento bajas, como las de la sección 1 de la figura 4-26 (a/c = 0.65 aproximadamente), se conserva la tendencia de comportamiento que se ha observado en los distintos ensayos, donde las mezclas de calizas naturales son las que tienen mejores resultados respecto de los concretos reciclados.

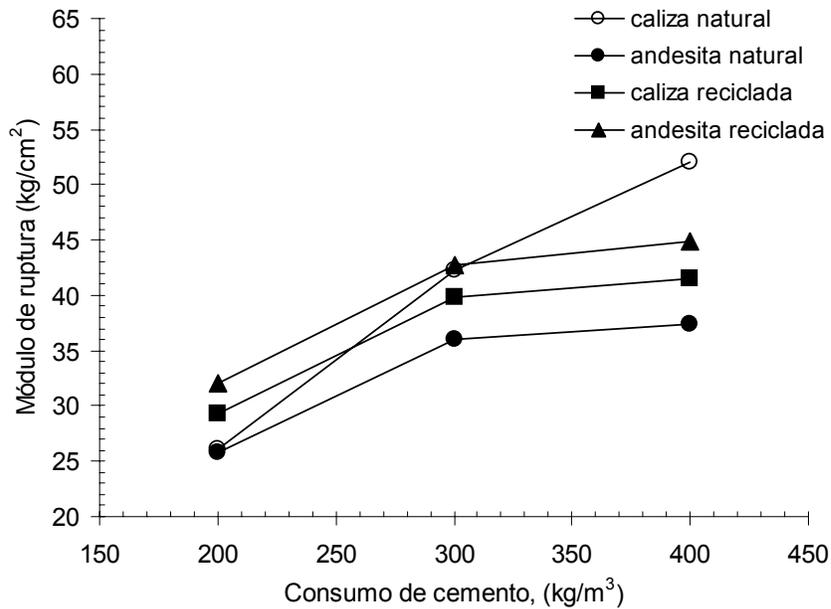


Fig. 4-25. Consumo de cemento vs módulo de ruptura

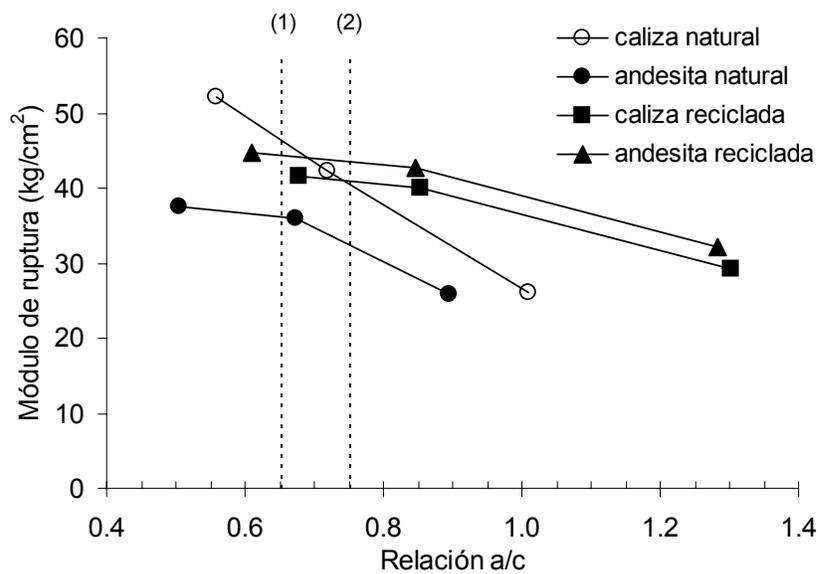


Fig. 4-26. Relación agua-cemento vs módulo de ruptura

Por otra parte, la sección 2 de la figura 4-26, es el parteaguas de otro fenómeno (relación $a/c = 0.75$). En esta sección se observa que ahora los concretos con agregados reciclados presentan los valores de módulo de ruptura más altos, mientras que las mezclas con agregados naturales los más bajos, aunque la andesita natural continúa teniendo los menores resultados conservando la tendencia que se ha observado en ella.

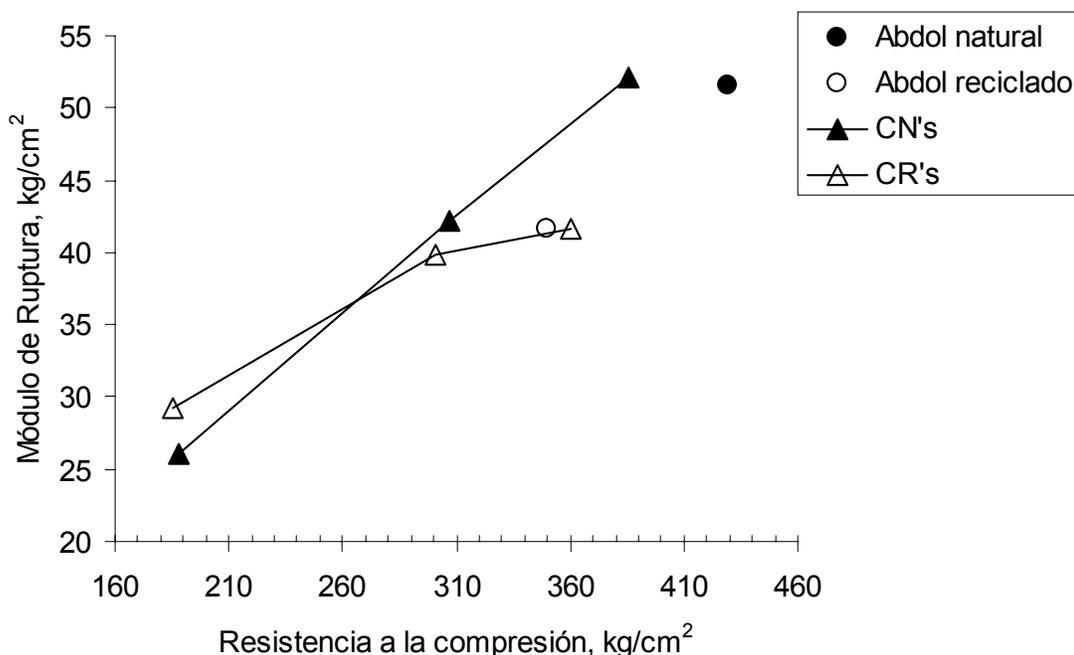


Fig. 4-27. Resistencia a la compresión vs Módulo de ruptura obtenidos por Abdol

Como ya se había comentado anteriormente, las mezclas elaboradas con agregados reciclados presentaron mejores propiedades mecánicas a relaciones agua-cemento bajas sobre las elaboradas con agregado natural. Probablemente esto se deba a que para resistencias altas (baja relación agua-cemento) influye predominantemente la calidad de los agregados y para resistencias bajas, la de la pasta.

Como se comentó en la introducción de esta sección, al módulo de ruptura se le considera la forma más apropiada para definir y verificar la resistencia de diseño de los pavimentos rígidos. Bajo esta consideración, otros autores han realizado experimentos con pavimentos elaborados con agregados reciclados para conocer su influencia en la vida útil de estos. Abdol *et al* [33] comprobaron que la vida útil de los pavimentos, tanto rígidos como flexibles, elaborados con agregados reciclados, se ha equiparado con la vida de servicio de los elaborados con agregados naturales.

En la figura 4-27 se observa como los resultados que presenta Abdol tienen una tendencia similar a la de los agregados naturales y reciclados que se utilizaron para este trabajo.

Se presentan sólo los resultados de calizas naturales y recicladas, para comparar con el mismo tipo de material que utilizó Abdol en sus experimentos.

4.4.4 Resistencia a tensión

Ésta depende de las resistencias a tensión propias de la pasta de cemento y de los agregados, así como de la adherencia que se genera entre ambos, aunque la influencia relativa de estos factores puede variar en función de los procedimientos que se utilizan para determinar la resistencia del concreto a tensión [5].

En la pasta de cemento endurecida influyen, como factores básicos de la resistencia a tensión, su grado de porosidad y la presencia de microfisuras y otras discontinuidades originales. Un factor adicional que tiende a producir variaciones significativas en la determinación de la resistencia del concreto a tensión, se refiere al grado de humedad del concreto de los especímenes en el ensaye, pues se dice que el concreto completamente seco manifiesta mayor resistencia a tensión que en estado saturado [5].

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente del 8 al 12 por ciento de su resistencia a la compresión [2] y a menudo se estima como 1.20 a 1.50 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, para concretos clase 2 y clase 1, respectivamente [5A].

En este trabajo se ensayaron 36 cilindros estándar a tensión indirecta: (prueba de tensión por compresión diametral) tres cilindros para cada tipo de mezcla elaborada según lo establece la norma ASTM C 496 – 90 [19]. Los resultados de tensión promedio obtenidos en los ensayos se resumen en la tabla 4-7.

Como se observa en esta tabla, todas las resistencias a tensión obtenidas en el laboratorio quedaron por debajo del límite para concretos clase 1, a excepción de la mezcla CN300 que quedó dentro de éste. Observándose un caso contrario a lo que ocurrió con las resistencias a flexión, donde todos menos una quedaron en los límites establecidos para concretos clase 1 según lo establecido en el reglamento del D.F.

Por otra parte, los cilindros ensayados tuvieron buena adherencia como se observa en la figura 3-4.

Las mezclas que obtuvieron más bajas resistencias a tensión fueron las elaboradas con andesita natural, es posible que esto se deba a la gran porosidad del agregado.

Por otra parte, es posible notar que todas las mezclas que fueron elaboradas con los mayores consumos de cemento, tanto naturales como recicladas, obtuvieron resistencias a la tensión por debajo del 8% de su resistencia a la compresión. Puesto que para altas resistencias se depende de la dureza de los agregados, esto quiere decir, que la resistencia a tensión de ellos es muy baja.

Tabla 4-7. Resistencias a la tensión de todas las mezclas elaboradas

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Mezcla	Relación a/c	Resistencia a la compresión	Resistencia a la tensión	(f _c) ^{1/2}	Concreto clase 1	Concreto clase 2	Relaciones promedio
		28 d (kg/cm ²)	(Kg/cm ²)		1.5 x (f _c) ^{1/2}	1.2 x (f _c) ^{1/2}	ft / (f _c) ^{1/2}
CN200	1.01	188.20	17.23	13.72	20.58		1.26
CN300	0.72	306.86	26.30	17.52	26.28		1.50
CN400	0.56	385.61	28.04	19.64	29.46		1.43
AN200	0.90	155.48	12.96	12.47		14.96	1.04
AN300	0.67	263.32	19.87	16.23		19.47	1.22
AN400	0.51	330.79	19.79	18.19		21.83	1.09
CR200	1.30	185.53	16.55	13.62	20.43		1.22
CR300	0.85	300.73	24.23	17.34	26.01		1.40
CR400	0.68	360.36	23.63	18.98	28.47		1.24
AR200	1.28	182.76	17.40	13.52		16.22	1.29
AR300	0.85	331.36	26.92	18.20		21.84	1.48
AR400	0.61	414.76	29.36	20.37		24.44	1.44

Para los consumos de cemento de 200 y 300 kg/m³, se obtuvieron resistencias a la tensión por encima del 8 % de sus resistencias a la compresión, por lo que se puede asumir que el uso de los agregados reciclados es factible para concretos con estos consumos de cemento. En la figura 4-28, podemos observar que nuevamente la tendencia en donde las mezclas con caliza natural resultaban con valores más altos que el resto de las mezclas se conserva, aunque llega un momento en que es superada por una de las mezclas con andesita reciclada con una diferencia muy ligera, aunque se ha comentado que la calidad de éste no es comparable con la de los agregados naturales utilizados debido a que proviene de otro banco y época de extracción.

En la figura 4-29, se observa que el consumo de cemento tiene una influencia notable en la resistencia a la tensión y que se mantiene la misma tendencia en el acomodo de las curvas. En la figura 4-30, se aprecia que para todas las mezclas, a relaciones agua-cemento bajas la resistencia a la tensión es mayor y con relaciones agua-cemento altas la resistencia a la tensión decae notablemente, en esta figura se aprecia más claramente lo comentado anteriormente de las diferencias de resistencias debido a la densidad de los agregados.

Por otra parte, las tendencias observadas en los módulos de ruptura comparados con las relaciones agua-cemento de las mezclas y ahora representadas en la figura 4-30 para las resistencias a tensión no se conservaron en la sección 1, pues se aprecia que para las relaciones agua-cemento bajas y hasta antes de 0.80, las resistencias a la tensión más

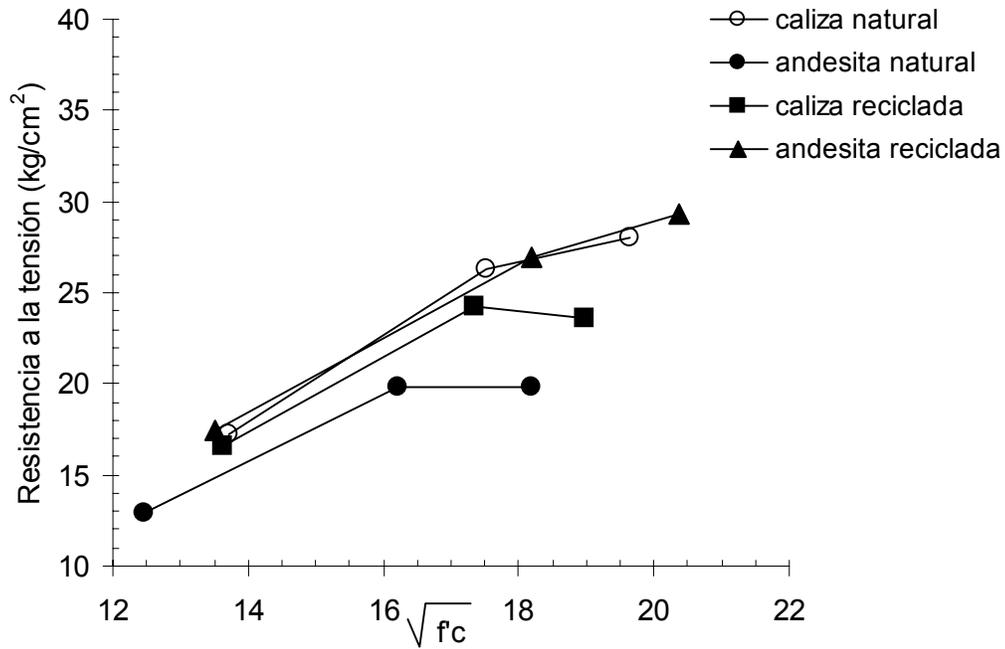


Fig. 4-28. $(f_c)^{1/2}$ vs resistencia a la tensión

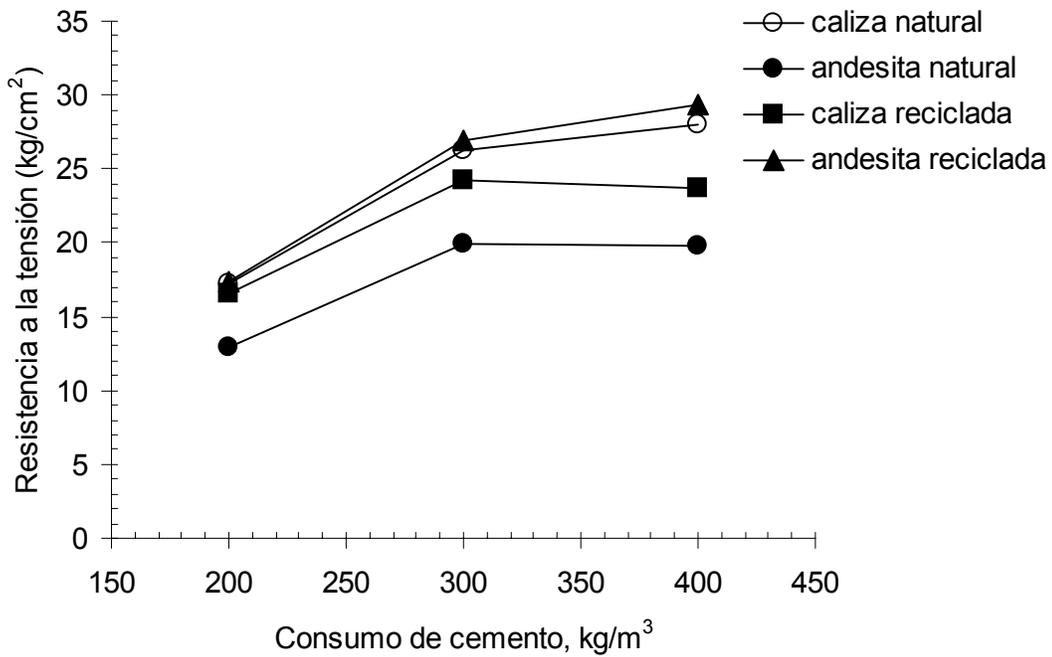


Fig. 4-29. Consumo de cemento vs resistencia a la tensión

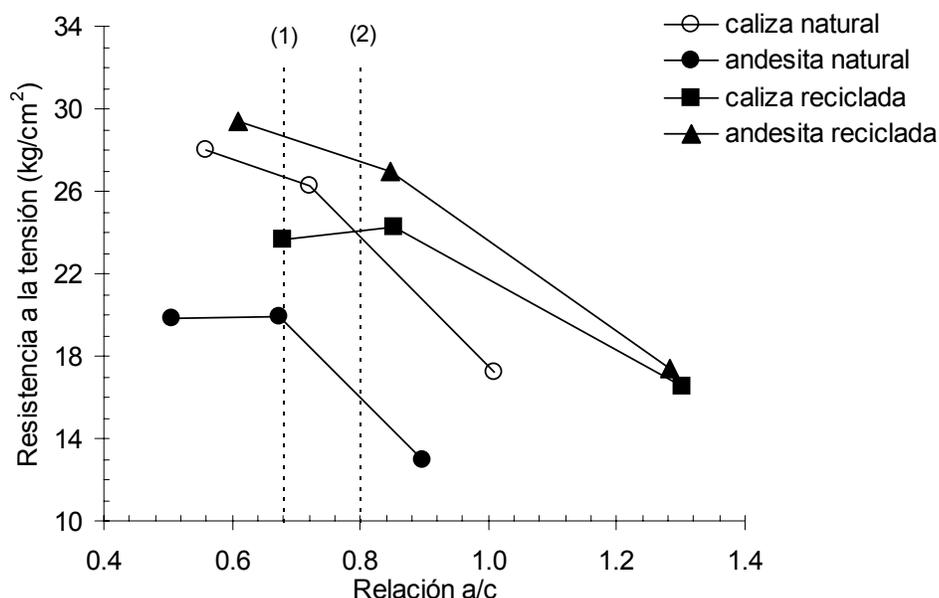


Fig. 4-30. Relación agua-cemento vs resistencia a la tensión

altas fueron de la andesita reciclada y no de la caliza natural como se vio en la gráfica 4-26 de la resistencia a la tensión.

Por otra parte en la sección 2, se observa el mismo orden de las curvas que presenta la resistencia a flexión.

Es posible que las diferencias en las tendencias se hayan debido principalmente a que la densidad de los agregados reciclados de andesita es mayor que la de los naturales de caliza.

Los resultados de baja resistencia a la tensión de los concretos con agregado natural de andesita se puede deber principalmente a la porosidad de los agregados.

Por otra parte, según la literatura, es normal que los resultados de tensión por flexión o módulo de ruptura hayan resultado mayores que los de resistencia por tensión. En la figura 4-31 se ilustra que en todos los casos las resistencia a flexión fueron notablemente mayores que la resistencia a tensión pues todos los puntos se ubicaron por encima de la línea a 45° con una tendencia claramente lineal.

Otros autores, específicamente Abdol *et al* [33], presentaron resultados de resistencia a la tensión los cuales se comparan con los de las mezclas de este trabajo compuestas del mismo tipo de agregado que Abdol utilizó en sus experimentos. La comparación se presenta en la figura 4-32, donde se observa que presentan una tendencia semejante a la de las mezclas elaboradas en este trabajo, siendo mayores los valores de resistencia a la

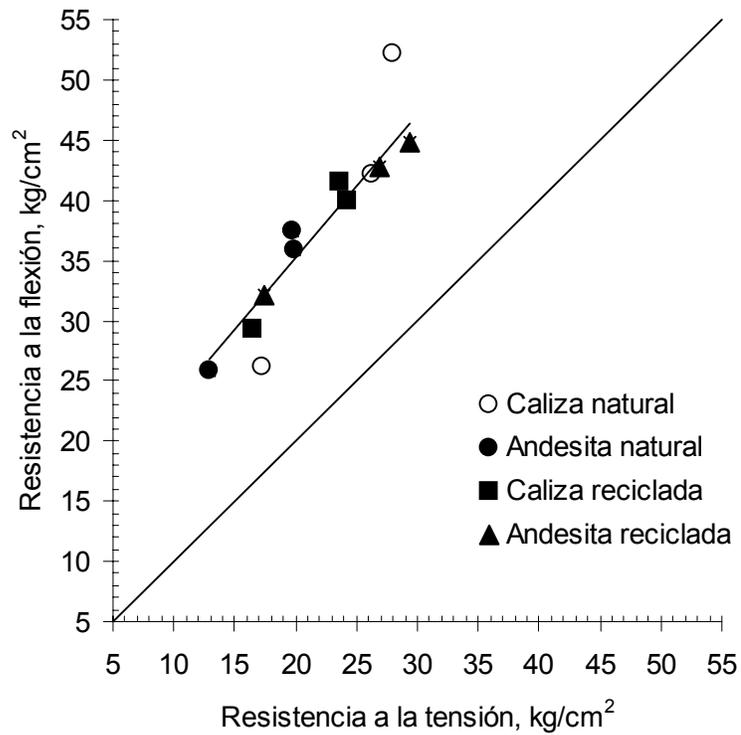


Fig. 4-31. Resistencia a la tensión vs resistencia a la flexión (MR)

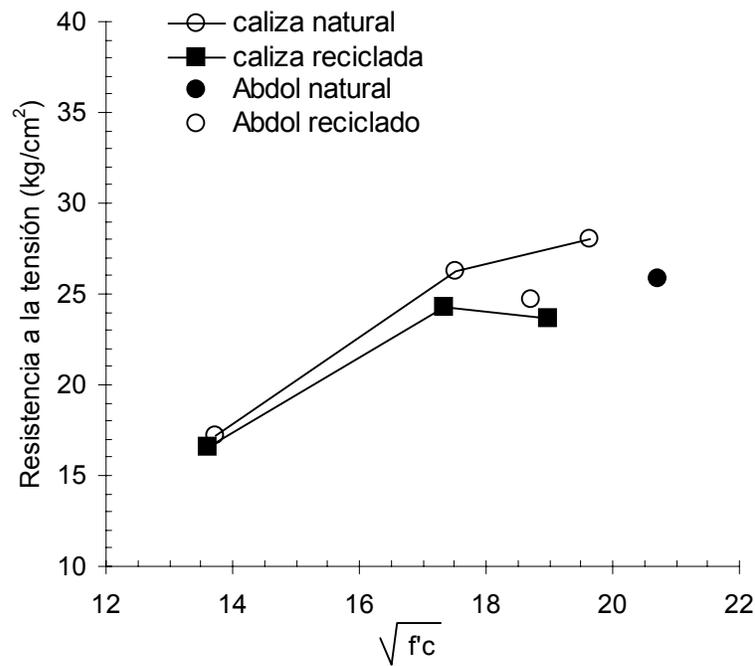


Fig. 4-32. Raíz cuadrada de la resistencia a la compresión vs resistencia a la tensión, comparación con lo obtenido por Abdol

tensión de las mezclas con agregado natural que las elaboradas con agregado reciclado.

A diferencia de la figura 4-27, en la figura 4-32 las mezclas ensayadas por Abdol no coincidieron con la tendencia de las curvas de este trabajo, aunque se aprecia que los resultados obtenidos por este autor son muy semejantes a las aquí obtenidas.

Las conclusiones que Abdol obtuvo de sus experimentos, es que los resultados de los concretos y agregados reciclados que fabricó son buenos, pudiendo utilizar los agregados reciclados para fabricar pavimentos de concreto asfáltico e hidráulico. De lo anterior, podemos asumir que como los resultados obtenidos en este trabajo en algunos casos fueron mejores que los obtenidos por Abdol, los agregados reciclados en la condiciones que se establecieron en este trabajo también se pueden utilizar para fabricar pavimentos de concreto asfáltico e hidráulico, aunque sería necesario realizar una investigación especial para el uso de los agregados reciclados en este tipo de estructuras.

CAPÍTULO QUINTO

5. Conclusiones

En este trabajo se estudiaron las propiedades físicas de los agregados reciclados así como las propiedades mecánicas de los concretos hechos a partir de éstos, para compararlas con concretos de agregados naturales. De los resultados de este estudio experimental es posible concluir lo siguiente:

- 5.1 El reciclaje de concreto ha tomado mucha importancia en la última década debido principalmente a factores ambientales. Estos factores tienen que ver con la escasez de agregados naturales para la fabricación de concreto, así como del creciente encarecimiento de terreno para tiraderos, debido a la falta de áreas despobladas cercanas a la ciudad. Los escombros producidos en las actividades de construcción y demolición son otro problema por el cual se le ha dado importancia al reciclaje de concreto.

- 5.2 Se han realizado múltiples investigaciones desde hace varios años, enfocadas a estudiar las propiedades de los concretos reciclados y a establecer criterios o recomendaciones para la utilización de los agregados producidos mediante la trituración de concreto y/o escombros de construcción. Los resultados de estas investigaciones han dado un gran impulso al reciclaje de concreto, ya que han demostrado que es factible obtener concretos reciclados de buena calidad que pueden ser utilizados para prácticamente cualquier aplicación de ingeniería.

- 5.3 El reciclaje de concreto es una práctica creciente alrededor del mundo debido a los beneficios que proporciona al mejorar las condiciones ambientales y proveer una solución para las miles de toneladas de escombros que se generan al año como producto de la industria de la construcción. Por lo tanto, el practicar el reciclaje de concreto en México traería todos estos beneficios al país.
- 5.4 El uso previo del concreto empleado para hacer los agregados reciclados no influye en las resistencias que alcancen las mezclas elaboradas con ellos, sino las características mismas de los agregados que compongan el concreto que se va a reciclar para fabricar nuevos agregados.
- 5.5 Las características físicas de los agregados reciclados, la forma de las partículas y la textura superficial, dependen principalmente del proceso de fabricación y de la maquinaria utilizada. Estas características influyen en la demanda de agua y trabajabilidad de las mezclas. Incluso puede influir en su peso volumétrico por el acomodo de las partículas dentro del molde.
- 5.6 Es importante que los concretos utilizados para fabricar los agregados tengan la edad en la que hayan alcanzado un porcentaje alto de su resistencia potencial, por ejemplo: 90 días.
- 5.7 Si el concreto utilizado para la fabricación de los agregados reciclados pertenece a un mismo lote, es decir, hecho con rocas del mismo origen, los agregados reciclados que se produzcan darán un mejor comportamiento a las mezclas, que si se utilizan concretos mezclados con características distintas.
- 5.8 A pesar de que las características físicas de los agregados reciclados resultaron similares a las de los agregados naturales, es importante establecer una dosificación de mezclas con este tipo de agregados, diferente a la que se aplica para agregados naturales, ya que el agua requerida por las mezclas elaboradas con agregados reciclados, probablemente no se deba únicamente a la forma de las partículas sino a la pasta de cemento adherida a éstas. Éste sería un aspecto importante por investigar para determinar una relación consumo de agua-revenimiento de las mezclas más aproximada a la realidad.

- 5.9 Manteniendo un buen control de la granulometría de los agregados reciclados se observa un mejor comportamiento mecánico de las mezclas.
- 5.10 A mayor contenido de pasta adherida en las partículas de los agregados reciclados la densidad de éstos será menor.
- 5.11 Las mezclas elaboradas con agregados reciclados fueron menos trabajables que las elaboradas con agregado natural.
- 5.12 Las resistencias mecánicas de las mezclas de concreto elaboradas con agregado reciclado dependen de la calidad de los agregados del concreto que se recicle para la fabricación de los nuevos agregados.
- 5.13 Las mezclas elaboradas con agregados reciclados con relaciones agua-cemento altas (mayores que 1), tuvieron resistencias a la compresión muy similares a las elaboradas con agregados naturales, mientras que para relaciones agua-cemento bajas las resistencias de las mezclas con agregado natural (caliza) son mayores que las de las mezclas con agregado reciclado, también de caliza.
- 5.14 En todos los casos, los concretos reciclados rebasaron las resistencias esperadas para su relación agua-cemento.
- 5.15 Los concretos elaborados con agregado reciclado saturado obtuvieron resistencias a la compresión ligeramente más bajas que los elaborados con agregado similar sin saturar. Es probable que esto se deba a que la pasta adherida al agregado reciclado tuvo saturados sus poros y esto haber generado una menor adherencia de las partículas de pasta del agregado reciclado en la matriz de pasta del concreto nuevo.
- 5.16 Las propiedades mecánicas de los concretos reciclados obtenidas por otros autores son similares a las que se obtuvieron en este trabajo.
- 5.17 El consumo de cemento influyó ligeramente en el módulo de elasticidad de todos los concretos elaborados. A mayor consumo de cemento mayor módulo de elasticidad.

- 5.18 Las propiedades de las mezclas elaboradas con caliza natural resultaron ligeramente superiores que las de los concretos elaborados con caliza reciclada, caso contrario a lo que sucedió con las mezclas elaboradas con andesitas.
- 5.19 Los concretos elaborados con agregados reciclados de caliza hechos bajo las condiciones utilizadas en este trabajo obtuvieron de un 2 a un 6.5 por ciento menos de resistencia que los naturales. Los concretos elaborados con agregados reciclados de andesita tuvieron resistencias de un 15 a un 20 por ciento superiores a la de los concretos de andesita natural, pero los agregados de estos últimos no son comparables con los de los concretos reciclados de andesita.
- 5.20 Debido a las propiedades obtenidas de los concretos reciclados de caliza, éstos se pueden utilizar como concretos clase 2. De los concretos de andesita reciclada se reserva la recomendación, ya que se requiere hacer más experimentos con agregados reciclados de andesita que sean de calidad similar a la de los agregados actuales.
- 5.21 Con consumos de cemento bajos, no es posible utilizar el concreto de caliza reciclada para pavimentos, ya que sus módulos de ruptura son menores a 40 kg/cm^2 . Por otra parte, a pesar de que en dos consumos de cemento, los concretos con agregados reciclados de andesita resultaron apropiados para utilizarlos en pavimentos, el agregado con esas propiedades ya no es factible de obtener, por tal razón no se puede recomendar su uso en pavimentos.
- 5.22 Los módulos de ruptura de los concretos con caliza natural son mayores que los de andesita natural y la pendiente de la curva del primero es mayor que la del segundo, probablemente, debido a las densidades tan diferentes de cada uno de los agregados. A diferencia de los concretos con agregado natural, los de agregado reciclado mantienen sus curvas paralelas respecto del otro a cualquier relación agua-cemento, mientras que las de los concretos con agregado natural se cortan a relaciones agua-cemento altas mayores que 0.80.
- 5.23 Los resultados obtenidos de resistencia a la tensión fueron más bajos que los obtenidos por flexión, lo que es congruente con lo comentado en la literatura.

REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas:

- (1) HANSEN, T.C., Recycling of demolished concrete and masonry, Ed. E&FN SPON, Gran Bretaña, 1996.
- (2) KOSMATKA STEVEN H., Panarese William C. Diseño y control de mezclas de concreto, Ed. IMCyC, México, 1992.
- (3) VEGA AZAMAR, Ricardo Enrique, Reciclaje y reaprovechamiento de residuos de la construcción y demolición, UNAM, 2001.
- (4) COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), Manual de tecnología del concreto, sección 1, Ed. Limusa, México, 1994.
- (5) COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), Manual de tecnología del concreto, sección 3, Ed. Limusa, México, 1994.
- (5A) Reglamento del Distrito Federal

Normas

- (6) ASTM C 29/ C 29M – 90, Standard test method for unit weight and voids in aggregate.
- (7) ASTM C 33 – 90, Standard specification for concrete aggregates.
- (8) ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- (9) ASTM C 78 – 84, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading).
- (10) ASTM C 94 - 90, Standard specification for ready-mixed concrete.

- (11) ASTM C 127 – 88, Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate.
- (12) ASTM C 128 – 88, Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate.
- (13) ASTM C 136 – 84a, Standard method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- (14) ASTM C 138 –81, Standard test method for unit weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
- (15) ASTM C 143 – 90a, Standard test method for slump of hydraulic cement concrete.
- (16) ASTM C 192 – 90a, Standard practice for making and curing test specimens in the laboratory.
- (17) ASTM C 231 – 91, Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method.
- (18) ASTM C 469 – 87a, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.
- (19) ASTM C 496 – 90, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- (20) ASTM C 511 – 85, Standard specification for moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes.
- (21) ASTM C 566 – 89, Standard method for total moisture content of aggregate by drying.
- (22) ASTM C 617, Standard practice for capping cylindrical concrete specimens.
- (23) ACI 211.1 – 89, Standard practice for selecting proportions normal, heavyweight, and mass concrete.
- (24) NMX C 414 – 2004, Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba.

Referencias Hemerográficas:

- (25) Stamatia A. Frondistou-Yannas y Taichi Itoh, Economic Feasibility of Concrete Recycling, Journal of the Structural Division, Vol. 103, No.4, April 1977, pp. 885-899.
- (26) Nixon, P.J. (1978), Recycled concrete as an aggregate for concrete – a review, RILEM TC-37-DRC. Materials and Structures (*RILEM*), 65, (1977), pp. 371-378.

- (27) SAGOE-CRENTSIL, K.K., BROWN, T., TAYLOR, A. H., (2001) Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 707-712.
- (28) KATZ, Amnon, (2003) Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 703-711.
- (29) José M.V. Gómez-Soberón. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate; An experimental study, *Cement and Concrete Research* 32 (2002), pp. 1301-1311
- (30) How-Ji Chen, Tsong Yen, Kuan-Hung Chen (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates, *Cement and Concrete Research* 33 (2003), pp. 125-132
- (31) Rashwan, M., y Aourizk, S. (1997). Factors affecting properties of concrete made with reclaimed material in ready mix plants, *ACE Concrete International*, Vol. 10 No. 7, pp. 56-60.
- (32) Rashwan, M., y Aourizk, S. (1997). The properties of recycled concrete, *ACE Concrete International*, Vol. 19 No. 7, pp. 56-60.
- (33) Abdol R. Chini, Shiou-San Kuo, Jamshid M. Armaghani, James P. Duxbury, (2001). Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No. 6, November/December, pp. 486-492.
- (34) Luc Taerwe, Peter De Pauw, Jan Desmyter (1999). Concrete with recycled materials as coarse aggregates: Shrinkage and creep behavior, *Materials and Construction: Exploring the Connection. Proceedings of the Fifth ASCE Materials Engineering Congress held in Cincinnati, Ohio, May 10-12, 1999*. pp. 720-727.
- (35) Shiou-San Kuo, Abdol R. Chini, and Jamshid M. Armaghani (1999). Testing and evaluation fo recycled concrete aggregate (ACR) as mixture and base material, *Materials and Construction: Exploring the Connection. Proceedings of the Fifth ASCE Materials Engineering Congress held in Cincinnati, Ohio, May 10-12, 1999*, pp. 704-711.
- (36) A. Nataatmadja and Y.L. Tan (2001). Resilient response of recycled concrete road aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No. 5, September/October 2001, pp. 450-453.
- (37) RILEM 121-DRG. Specification for concrete with recycled aggregates, *Materials and Structures* 27 (173) (1994), pp. 557-559
- (38) J. Vyncke, E. Rousseau, Recycling of construction and waste in Belgium: actual situation and future evolution, in: E.K. Lauritzen (Ed.), *Demolition and reuse of concrete and masonry, Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, E&FN SPON, Denmark, 1993, pp. 57-69.
- (39) J. Kasai, Y. Kasai, Guidelines and the present state of the suse of demolished concrete in Japan, in: E.K. Lauritzen (Ed.), *Demolition and reuse of concrete and*

- masonry, Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E&FN SPON, Denmark, 1993, pp. 93-104.
- (40) C.F. Hendriks, Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings, in: J.J.J.M. Goumans, H.A. Van Der Sloot, T.G. Aalbers (Eds.), Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1994, pp. 821-843
- (41) J. Bjorn-Jakobse, M. Elle, E.K. Lauritzen, On site use of regenerated demolition debris, in: Y. Kasai (Ed.), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Reuse of Demolition Waste, vol. 2, E&FN SPON, London, 1988, pp. 537-546.
- (42) Periódico Reforma, Ciudad y Metrópoli, sección Hábitat, México, D.F., p. 4B, fecha: 19 de septiembre de 2004.
- (43) Hincapie-Henao Ángela María, Aguja-López Elisa Andréa, Evaluación experimental del mortero de pega elaborado con agregado reciclado, e-Mat – Revista de Ciencia y Tecnología de Materiales de Construcción Civil, Vol. 1, No. 1, pp. 33-46, Medellín, Colombia, Mayo 2004.

Referencias de Internet:

- (44) *Concret Reclamation Project*, dirección: <http://irc.construction.ualberta.ca/nsercbrochure.pdf>, fecha de consulta: 19 de abril de 2003.
- (45) *Concret Reclamation Project*, dirección: <http://irc.construction.ualberta.ca/html/research/concretereclamation.html>, fecha de consulta: 1 de mayo de 2003.
- (46) *Environmentally friendly construction technology- Interaction between construction and environment*, dirección: http://www.b-i-m.de/public/AddFrame.asp?url_left=Doku_Inhalt.htm&url_main=/public/Tudmassiv/dacon98gruebl.htm, fecha de consulta: 1 de mayo de 2003.
- (47) *How green is your concrete?*, dirección: www.permanentbuildings.com, fecha de consulta: 1 de mayo de 2003.
- (48) *Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados del concreto*, dirección: <http://www.imcyc.com/cyt/junio/cualidades.htm>, fecha de consulta: junio de 2003.