



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE
UN CONCRETO HIDRÁULICO FABRICADO CON AGREGADOS
RECICLADOS Y UN CONCRETO HIDRÁULICO CONVENCIONAL**

Para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por

Br. Maritza Barrantes Maradiaga

Br. Karla Mora Molina

Tutor

Ing. Silvia Lindo O'connors

Managua, Julio 2018

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios por el regalo de la vida y el presente, a mis padres por su apoyo incondicional, a la Ing. Silvia Lindo por enseñanzas y a mi compañera Karla Mora por su fortaleza a lo largo de este camino. Y por último a todos los jóvenes que dieron su vida y luchan día a día por salir adelante y tratamos de construir una nación con buenos valores.

Maritza Barrantes M.

Dedico este logro en primer lugar a Dios porque es por El que he llegado hasta aquí y a mamá María, por recordarme que todo iba a estar bien. A mi familia, mis padres, hermanos, Oscar D., mis amigos y comunidad SJ, por creer en mí. A Maritza, gracias por empujarme. Finalmente, a todos los que han dado su vida en la lucha por una Nicaragua mejor, y hoy nos dan fuerzas para no rendirnos.

Karla Mora M.

Agradecimientos

A Dios, por iluminarnos y darnos los dones para llegar a culminar esta etapa de nuestras vidas, y a la Virgen de Guadalupe, por interceder como madre por excelencia por nosotras.

A nuestros maestros, especialmente a nuestra tutora, Ing. Silvia Lindo, por guiarnos a lo largo de esta carrera.

A la empresa Concretos y Más por el apoyo brindado para obtener los materiales utilizados.

Al laboratorio de materiales INSUMA por brindarnos el apoyo incondicional en la elaboración de este proyecto, en especial al Ing. Danilo Espinoza por sus enseñanzas y el apoyo técnico y moral que nos ha dedicado y dedica a los jóvenes profesionales.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, que nos abrió las puertas para trabajar en el Laboratorio de Materiales y Suelos para poder desarrollar este trabajo. A los docentes y colaboradores del Laboratorio, que nos asistieron y compartieron sus conocimientos.

A todas las personas que de una u otra manera nos apoyaron, nos abrieron sus puertas y nos dieron de su tiempo y sus conocimientos de forma desinteresada para que pudiéramos desarrollar este trabajo final.

RESUMEN

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción. En ciudades de alta sismicidad como Managua, las estructuras a base de concreto, ya sea concreto reforzado, mampostería o prefabricados son las de mayor demanda. Sin embargo, el uso de este material tiene serias implicaciones en el medio ambiente durante todo su ciclo de vida, ya que para su elaboración se necesita explotar recursos no renovables en gran cantidad y una vez terminada su vida útil, generan grandes volúmenes de desechos sólidos difíciles de gestionar, para las ciudades como Managua. Es por ello que se necesita promover alternativas que permitan continuar el crecimiento del sector construcción disminuyendo el impacto al medio ambiente.

Como una de estas alternativas se propone la incorporación de materiales reciclados, en este caso como parte de los áridos en una mezcla de concreto nueva. Usar agregados reciclados de concreto ayuda a la conservación de los bancos de materiales y a disminuir la cantidad de desechos sólidos provenientes del sector construcción. Sin embargo, a nivel regional sus aplicaciones y características no son muy conocidas, mucho menos empleadas.

Este estudio pretende dar a conocer las características de los agregados reciclados de concreto y su desempeño dentro de mezclas de concreto nuevo. Así como las características y comportamiento de este material en las mezclas nuevas para fomentar su implemento en el territorio nacional.

El Capítulo 1 trata los aspectos generales del concreto, los materiales que lo conforman y sus propiedades. Muestra cómo se ha desarrollado el uso de agregados de concreto reciclado en la fabricación de nuevos concretos. Abarca también normativas y métodos para elaborar correctamente tanto el diseño como las mezclas de concreto, con materiales naturales y utilizando reciclados.

El Capítulo 2 es una caracterización de todos materiales utilizados en la elaboración de mezclas de concreto. A lo largo del capítulo se describen las

propiedades físicas del cemento, agregado fino y agregados gruesos reciclados y naturales y se analizan conforme la normativa actual para conocer su calidad y desempeño. Se hace un análisis comparativo de los agregados gruesos reciclados con relación al agregado grueso natural.

Los capítulos 3 y 4 tratan sobre las mezclas de concreto. En el Capítulo 3 se presentan los parámetros de diseño y su ajuste conforme la elaboración de la mezcla. El Capítulo 4 analiza las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de concreto producidas. Se describen las pruebas de control de calidad realizadas a las mezclas en estado fresco y en estado endurecido.

En el Capítulo 5 se muestran las conclusiones basadas en lo observado y aprendido acerca del comportamiento del agregado reciclado y las mezclas de concreto elaboradas con este material, y se detallan previsiones a tomar en cuenta con respecto al uso de este material en nuevas mezclas, desde sus propiedades hasta el diseño del concreto con los mismos.

INDICE

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. INTRODUCCION.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4. OBJETIVOS.....	8
1.4.1. Objetivo General.....	8
1.4.2. Objetivos Específicos.....	8
1.5. MARCO TEÓRICO.....	9
1.5.1. Concreto Hidráulico.....	9
1.5.2. Elementos que forman el concreto hidráulico.....	9
1.5.3. Propiedades del concreto.....	21
1.5.4. Pruebas de control de calidad realizadas al concreto.....	26
1.5.5. Concreto reciclado.....	29
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	36
2.1. Obtención de los materiales.....	36
2.1.1. Cemento.....	36
2.1.2. Agregado fino.....	36
2.1.3. Agregado grueso.....	36
2.2. Muestreo y reducción de muestras.....	38
2.3. Propiedades de los materiales.....	38
2.3.1. Cemento.....	38
2.3.2. Agregado fino.....	41
2.3.3. Agregado grueso.....	46
CAPÍTULO 3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	65
3.1. Diseño de mezclas.....	65
3.1.1. Supuestos de diseño.....	65
3.1.2. Proceso de diseño inicial.....	66
3.2. Elaboración de mezclas.....	70
3.2.1. Corrección por humedad.....	70
3.2.2. Proceso general de mezclado.....	71
3.2.3. Ajustes de diseño.....	73

3.3.	Diseños finales ajustados	75
CAPÍTULO 4. CONTROL DE CALIDAD AL CONCRETO.....		79
4.1.	Pruebas de control de calidad al concreto en estado fresco.....	79
4.2.	Pruebas de control de calidad al concreto en estado endurecido	84
4.3.	Resumen de resultados de las propiedades de los concretos.....	88
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		90
5.1.	Conclusiones	90
5.2.	Recomendaciones	92
BIBLIOGRAFÍA		94
ANEXOS		i
ANEXO 1.	Requisitos granulométricos ASTM C 33	ii
ANEXO 2.	Datos Técnicos del Cemento Canal	iv
ANEXO 3.	Análisis granulométrico de la segunda muestra de arena Motastepe.	vi
ANEXO 4.	Granulometrías combinadas y curvas de Fuller-Thompson.....	vii
ANEXO 5.	Tablas de diseño ACI.....	xi
ANEXO 6.	Diseños Iniciales de Mezclas de Concreto Reciclado.....	xvi
ANEXO 7.	Correcciones por humedad para mezclas con agregados reciclados.....	xix

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Vínculo entre resistencia a la compresión y relación a/c	25
Tabla 2	Resultados del ensayo de Densidad del cemento	39
Tabla 3	Datos del ensayo de consistencia normal	40
Tabla 4	Propiedades del cemento	40
Tabla 5	Peso volumétrico del agregado fino	42
Tabla 6	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino	43
Tabla 7	Granulometría Arena Motastepe	44
Tabla 8	PVSS de grava natural de 19 mm	47
Tabla 9	PVSS de grava natural de 12.7 mm	47
Tabla 10	PVSS de grava reciclada de 19 mm	47
Tabla 11	PVSC de grava natural de 19 mm	47
Tabla 12	PVSC de grava natural de 12.7 mm	48
Tabla 13	PVSC de grava reciclada de 19 mm	48
Tabla 14	Comparación de pesos volumétricos de agregado reciclado	49
Tabla 15	Gravedad específica y absorción agregado natural 19 mm	51
Tabla 16	Gravedad específica y absorción agregado natural 12.7 mm	51
Tabla 17	Gravedad específica y absorción agregado 19 mm rec.	51
Tabla 18	Granulometría grava de 19 mm natural	53
Tabla 19	Granulometría grava 19 mm reciclada	55
Tabla 20	Granulometría grava natural de 12.7 mm	57
Tabla 21	Granulometría de agregados combinados	60
Tabla 22	Resistencia al desgaste de muestras de agregados de 19 mm	63
Tabla 23	Primera estimación de masa de agregados	68
Tabla 24	Diseño Inicial de mezclas	69
Tabla 24(a)	Dosificación Diseño Inicial de mezclas	69
Tabla 25	Corrección de pesos por humedad para mezcla convencional	71
Tabla 26	Ajuste de materiales para mezcla convencional	73
Tabla 27	Ajuste de materiales para mezcla con agregado de 19 mm 30%R-70%N	74
Tabla 28	Ajuste de materiales para mezcla con agregado de 19 mm	74

50%R-50%N

Tabla 29	Ajuste de materiales para mezcla con agregado de 19 mm 75%R-25%N	75
Tabla 30	Diseño ajustado para concreto convencional	76
Tabla 30(a)	Dosificación de diseño ajustado	76
Tabla 31	Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 30%R-70%N	76
		77
Tabla 31(a)	Dosificación de diseño ajustado 30%R-70%N	
Tabla 32	Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 50%R-50%N	77
		77
Tabla 32(a)	Dosificación de diseño ajustado 50%R-50%N	
Tabla 33	Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 75%R-25%N	78
		78
Tabla 33(a)	Dosificación de diseño ajustado 75%R-25%N	
Tabla 34	Temperaturas registradas	79
Tabla 35	Datos de revenimiento	80
Tabla 36	Cantidad de pasta en mezclas	81
Tabla 37	Pesos Volumétricos del concreto	82
Tabla 38	Rendimiento de la mezcla	83
Tabla 39	Contenido de cemento	83
Tabla 40	Resistencias a la compresión de cilindros de concreto	85
Tabla 41	Promedio de la resistencia a la compresión	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Curva Granulométrica Arena Motastepe	45
Gráfico 2	Granulometría de agregado grueso de 19 mm	54
Gráfico 3	Granulometría de agregado 19 mm reciclado en tamaño #6	55
Gráfico 4	Granulometría de agregado de 19 mm reciclado en tamaño #67	56
Gráfico 5	Granulometría de grava de 12.7 mm en tamaño # 7	58
Gráfico 6	Curva de granulometría combinada	60
Gráfico 7	Grava natural de 19mm y de 12.7 mm (combinadas) vs. Curva ideal de Fuller-Thompson para tamaño nominal de 19 mm	62
Gráfico 8	Grava de 19 mm reciclada (R) y de 12.7 mm natural (combinadas) vs. Curva ideal de Fuller-Thompson para tamaño máximo nominal de 19 mm	62
Gráfico 9	Resistencia a la compresión por edad de cada mezcla de concreto	86
Gráfico 10	Comparación de mezclas por resistencias alcanzadas	87

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1	Concreto de un edificio en camino a la trituradora	3
Imagen 2	Escombros del Centro Histórico	6
Imagen 3	Ensayo de revenimiento en laboratorio	27
Imagen 4	Prueba de resistencia a la compresión de cilindros de concreto	29
Imagen 5	Proceso de reciclaje del concreto	30
Imagen 6	Cilindros antes y después de triturarse	37
Imagen 7	Trituradora modelo MS- L120 (Equipo)	37
Imagen 8	Trituradora modelo MS- L120 (Mandíbula)	37
Imagen 9	Material triturado, retenidos y pasantes por la malla de 19 mm	38
Imagen 10	Material pasante por la malla con abertura de 4.76 mm	38
Imagen 11	Arena en condición de saturado superficialmente seco	42
Imagen 12	Índice de contenido de impurezas	46
Imagen 13	Pesaje de material en molde para PVSS	46
Imagen 14	Pesaje de la muestra en condición saturada superficialmente seca (SSS)	50
Imagen 15	Pesaje de la muestra sumergida en la cesta	50
Imagen 16	Agregado de tamaño máximo nominal 19 mm retenido en el tamiz de 12.7 mm	53
Imagen 17	Material de 19 mm reciclado retenido en tamiz de 12.7mm	57
Imagen 18	Pesaje de material después de ensayo de desgaste sin lavar	64
Imagen 19	Determinación de la humedad de los agregados para concreto	70
Imagen 20	Elaboración de especímenes de prueba	72
Imagen 21	Curado de especímenes de prueba	72
Imagen 22	Ensayo de Revenimiento	80
Imagen 23	Ensayo de Peso Volumétrico	81
Imagen 24	Ensayo de Resistencia a la compresión	82

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1.INTRODUCCION

El concreto es usualmente fabricado con agregados naturales, con lo cual se consumen grandes cantidades de recursos no renovables. En busca de avanzar hacia una construcción menos dañina con el medio ambiente, países como Japón, Alemania, Colombia, México y otros, han implementado la práctica de utilizar agregados reciclados de concreto como agregados para nuevas mezclas de concreto. Varios de estos países cuentan ahora con normativas para la construcción utilizando desechos de concreto.

El concreto fabricado en Nicaragua emplea en su totalidad agregados naturales y actualmente no se cuenta con una regulación para la disposición adecuada de los desechos de construcción, ni prácticas para reutilizar o reciclar este tipo de desechos. En Managua el concreto de desecho (excedente de concreteras y de demolición) en el mejor de los casos es dispuesto como relleno sanitario.

La utilización de agregados reciclados de concreto como agregados para nuevas mezclas de concreto promete contribuir tanto a la sostenibilidad del sector construcción como de la gestión urbana. Sin embargo, para implementar esta práctica a nivel local, es necesario conocer las propiedades de los agregados reciclados de concreto e identificar los beneficios o perjuicios que dichos agregados confieren al nuevo concreto.

En este estudio se identifican las propiedades de los agregados de concreto, fino y grueso naturales, y las de un agregado grueso fabricado de la trituración de concretos de desecho. El agregado reciclado se utiliza como sustituto parcial del agregado grueso natural en mezclas de concreto, y se determina su incidencia en el desempeño de éstas. Para ello se ensayan cuatro mezclas de concreto, tres de ellas con agregados reciclados de concreto como sustituto del 30%, 50% y 75% del agregado grueso natural y una muestra de control de concreto convencional (con agregados naturales). Se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos de cada mezcla según su desempeño en contraste entre las mismas y

además con el concreto convencional. Finalmente se determina qué porcentaje de sustitución es el más adecuado técnicamente para que el concreto con agregados reciclados cumpla con los requerimientos establecidos por normativas vigentes y pueda competir con el concreto convencional.

Se elaboró los diseños de las mezclas en función del desempeño de las mezclas con agregados reciclados, buscando obtener una mezcla que se asemejara a un concreto convencional.

1.2. ANTECEDENTES

El uso de agregados reciclados en la construcción comenzó desde finales de la II Guerra Mundial, usando pavimento de concreto demolido como agregado reciclado en la estabilización de la capa base para la construcción de caminos (Olorusongo, 1999). La acumulación de escombros debido a la destrucción de edificios en este período, motivó a investigar sobre el uso de estos desechos para nuevas construcciones.

Imagen 1: Concreto de un edificio en camino a la trituradora



Fuente: Concrete Recycling, Wikipedia, 2017

En 1946, P. V. Gluzhge, en Rusia, investigó sobre el uso de desechos de concreto como agregados, encontrando que tenían pesos específicos menores que los naturales, por lo que el concreto hidráulico con este material tenía baja resistencia a la compresión, pero, su resistencia a la flexión era mayor que en las mezclas de control.

En una publicación del American Concrete Institute (ACI) en 1977, A. D. Buck concluyó que el uso de concreto reciclado como agregado en concreto nuevo era asequible y podía convertirse en rutinario. Encontró resistencias disminuidas, comparadas con las de una mezcla de control y que la resistencia del concreto nuevo puede ser más alta que la resistencia original del concreto demolido.

Durante varios años, la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción (RILEM, por sus siglas en francés) ha acopiado y realizado varias investigaciones sobre el uso de agregados de concreto reciclado. Entre estos el Reporte #6, editado por T.C. Hansen, Recycling of Demolished

Concrete and Masonry (Reciclaje de concreto demolido y mampostería), 1992, donde se aborda lo más novedoso en ese tiempo sobre “Agregados reciclados y agregados reciclados de concreto”, e incluye una pequeña reseña de reportes desde 1945 a 1977 y desde 1978 a 1989.

En el 2001 el ACI se reunió de nuevo para formar el Comité 555 “Remoción y Reutilización del Concreto Endurecido”. El informe de este comité presenta las recomendaciones para la extracción y demolición de estructuras de concretos y su depuración y procesamiento para su posible reutilización (procesos, herramientas, tipos de remoción y demolición, limpieza, etc.). Así como consideraciones para evaluar el procesamiento de los residuos de concreto para la producción de agregados reciclados adecuados que puedan ser utilizados en nuevos concretos

Dentro del contexto latinoamericano, también se ha avanzado en el uso de materiales reciclados, especialmente en México y en Colombia. En México D.F, en 1994 nace la empresa CONCRETOS RECICLADOS, S.A, que se dedica al reciclaje, trituración y clasificación de los desechos de la construcción y/o demolición. Y en Colombia, aunque aún no se cuenta con una normativa, existen numerosos estudios sobre las propiedades de concreto con agregado reciclados.

Actualmente en Nicaragua existen pocos estudios formales que demuestren el uso de agregados reciclados de concreto en concretos estructurales, entre estos está un estudio de grado, realizado en la UCA (2016), en que se analizó el uso de concreto reciclado como material estructural en la ciudad de Managua. El estudio concluyó que la respuesta estructural que aporta el concreto reciclado con porcentaje de sustitución del 30% es similar al concreto convencional de fuente y cumple con la normativa ACI 318-14 (Requisitos del código de construcción para concreto estructural). En ese estudio, la materia prima utilizada para el material reciclado se obtuvo de una sola fuente, con resistencia conocida e igual o mayor a la resistencia del concreto de diseño.

A diferencia del estudio antes mencionado, en el presente estudio se podrá conocer el desempeño de la sustitución de agregado grueso natural por agregado

de concreto reciclado en diferentes proporciones (30, 50 y 75%), obtenido de diversas fuentes con resistencias variadas con el objetivo de proveer una alternativa económica para el aprovechamiento de los desechos de concreto.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Junto con el crecimiento económico del país, especialmente en la capital, el sector construcción ha aumentado de forma paralela, provocando una sobreexplotación de los bancos de materiales existentes. En vista de esta problemática es necesario buscar nuevas alternativas que puedan disminuir el impacto negativo al medio ambiente. El uso de agregados reciclados de concreto en nuevos concretos, representa una alternativa que permitirá alargar la vida útil de los bancos, contribuyendo de esta manera, a la conservación de estos recursos naturales.

Imagen 2: Escombros del Centro Histórico de Managua.



Fuente: El Nuevo Diario, 3 junio

En conjunto con la alta sismicidad del país, la edad de las construcciones igual ha sido un factor por el que muchas edificaciones han llegado al límite de su vida útil, por lo que en los últimos años se han inhabilitado y demolido muchas de estas, sin disponer adecuadamente de los residuos generados. Igualmente sucede al

realizarse una mejora en la infraestructura pública, pues no se hace el manejo adecuado de los desechos. Además, con el auge en el sector construcción se generan aún más desechos de concreto en las obras y en las empresas concreteras (cilindros de ensayo, desperdicios, remoción de obras antiguas), que usualmente son depositados en predios baldíos de las constructoras. La falta de una regulación y alternativas de la gestión de residuos sólidos ha ocasionado que los escombros y materiales de desecho se acumulen, sub utilizando espacio del casco urbano, desaprovechando materia que aún puede ser productiva y contaminando el medio ambiente.

La utilización de agregados de concreto reciclado como sustituto parcial de los materiales naturales en mezclas de concreto, representa una alternativa para reducir el impacto de los desechos de construcción en el casco urbano de

Managua y el medio ambiente, ya que se disminuye la explotación de los bancos naturales y parte del material de construcción que no puede ser gestionado por la municipalidad tiene una nueva vida útil al ser empleado nuevamente en diversas obras.

Además, beneficia económicamente a la industria de la construcción ya que las fábricas de concreto y los laboratorios de materiales pueden reutilizar los desechos de concreto y los cilindros para ensayo desechados para generar un nuevo mercado de agregados reciclados.

1.4.OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Comparar el comportamiento físico-mecánico de mezclas de concreto hidráulico fabricado con agregados reciclados y una mezcla de concreto hidráulico convencional.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas de los materiales a utilizar en las diferentes muestras de concreto hidráulico a través de ensayos de laboratorio.
- Establecer la dosificación adecuada de los componentes para las diferentes mezclas de concreto hidráulico utilizando el método de diseño de mezclas del ACI.
- Comparar las propiedades de las mezclas de concreto hidráulico elaboradas con diferentes porcentajes de agregados reciclados y una mezcla de concreto hidráulico convencional para seleccionar la mezcla con el comportamiento óptimo.

1.5. MARCO TEÓRICO

1.5.1. Concreto Hidráulico

El American Concrete Institute (ACI) en su Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S) define como “concreto” a la mezcla de cemento pórtland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos (2011).

1.5.2. Elementos que forman el concreto hidráulico

1.5.2.1. Cemento hidráulico

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense sobre Fabricación, uso y manejo del cemento (2012) define el cemento hidráulico como “Cemento que reacciona y endurece por interacción química con el agua y que puede hacerlo aún bajo ella”.

Ordinariamente, la pasta de cemento (cemento y agua) constituye del 25% al 40% del volumen total del concreto. (Portland Cement Assoc., 1988).

a. Tipos de cemento hidráulico

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense sobre Fabricación, uso y manejo del Cemento (2012), clasifica el cemento hidráulico en:

- Cemento Tipo GU: de uso general en construcción.
- Cemento Tipo HE: de alta resistencia inicial o temprana.
- Cemento Tipo MS: de moderada resistencia a los sulfatos.
- Cemento Tipo HS: de alta resistencia a los sulfatos.
- Cemento Tipo MH: de moderado calor de hidratación.
- Cemento Tipo LH: de bajo calor de hidratación.

Sin embargo, el más utilizado es el cemento hidráulico Tipo GU, que es para usos generales.

b. Propiedades importantes del cemento

Densidad

Es la relación existente entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Según Sánchez (2001), no indica directamente la calidad del cemento, pero a partir de esta característica se pueden deducir otras.

Agrega que la utilidad principal de esta propiedad “está relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto, debido a que éstas se diseñan “por peso” para un volumen unitario de concreto (generalmente 1 m³). De manera que hay necesidad de conocer el volumen que ocupa una masa determinada de cemento dentro de un metro cúbico de concreto”. (Sánchez, 2001). Y el método más común usado por la ASTM para determinar la densidad del cemento es el de Le Chatelier, descrito en la norma ASTM C-188.

Consistencia normal

Esta consistencia es medida como la capacidad de la pasta para retardar (o resistir) la penetración de una aguja de tamaño y peso estándar. Se determina para conocer los requerimientos de agua de un cemento en particular y depende del contenido de agua de la pasta y varía entre cementos. (H. Panda)

Se mide utilizando el aparato de Vicat, equipado con una aguja y se logra cuando la aguja penetra a un punto entre 10±1 mm por debajo de la superficie original.

El contenido de agua de una pasta normal se expresa como porcentaje respecto al peso del cemento seco y suele variar entre 23 y 33 por ciento, dependiendo de las características del cemento. (Sánchez, 2001)

El método para conocer la cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico se describe en la norma ASTM C-187.

Tiempo de fraguado

El fraguado es el cambio del estado plástico al estado endurecido de la pasta de cemento. El tiempo de fraguado consta de dos partes: tiempo de fraguado inicial y tiempo de fraguado final. Estos tiempos son importantes, pues dan un aproximado del tiempo disponible para poder mezclar, transportar y trabajar concretos y morteros en obras. Los tiempos de fraguado se ven afectados por: la composición química del cemento, la fineza, el agua de amasado y la temperatura ambiente. Estos tiempos se determinan a través del ensayo descrito en la norma ASTM C-191.

1.5.2.2. Agregados

Los agregados, también llamados áridos, son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) conocido como concreto u hormigón. (Sánchez, 2001).

Los agregados se clasifican según su granulometría, en dos tipos: finos y gruesos. Los agregados finos son las arenas naturales o las prefabricadas, cuyos granos tienen aproximadamente menos de $\frac{1}{4}$ de pulgada; los agregados gruesos son los que tienen aproximadamente más de $\frac{1}{4}$ de pulgada. (Portland Cement Assoc., 1988).

El relleno o agregado “conforma aproximadamente el 75% del volumen de la mezcla del concreto. Se pueden utilizar varios materiales como agregados, siendo los más comunes de origen natural arena y grava.” (Akroyd, 1962).

“Los agregados, en combinación con la pasta fraguada, también proporcionan parte de la resistencia mecánica característica a la compresión” porque “tienen una resistencia propia que aportan al concreto como masa endurecida.” (Sánchez, 2001).

a. Tipos de agregado

· Agregado fino

Harmsen, detalla que: Sus partículas (del agregado fino), deben tener un tamaño menor a $\frac{1}{4}$ " y su gradación debe satisfacer los requisitos propuestos en la norma ASTM-C-33, ver requisitos en Anexo 1, Tabla A1(a).

· Agregado grueso

Sánchez (2001) dice que "la fracción gruesa, o sea aquellas partículas que tiene un diámetro superior a 4,76 mm, es la que normalmente se denomina agregado grueso o simplemente grava".

Para poder ser utilizado en la fabricación de concreto, el agregado debe satisfacer algunos requerimientos, entre los cuales está la granulometría. La especificación estándar de agregados para concreto (ASTM C-33) establece los requerimientos granulométricos para cada tamaño de árido grueso, ver en Anexo 1, Tabla A1 (b).

· Agregado grueso de concreto reciclado

Es el agregado grueso fabricado de la trituración de concreto desechado (de demolición y de concreteras), que en diferentes proporciones cumple la función de agregado natural en nuevas mezclas de concreto estructural.

b. Propiedades de los agregados para el concreto

Los agregados del concreto requieren cumplir con estándares mínimos de limpieza, fuerza y durabilidad, y estar sustancialmente libres de sustancias deletéreas. Los materiales que son blandos, muy débiles, muy porosos o que pueden reaccionar de forma perjudicial en el concreto deben ser excluidos. Por esta razón, pruebas minuciosas y examinación, incluyendo examinación petrográfica, deben hacerse antes que agregados nuevos o de fuentes desconocidas sean usados. (Alexander y Mindess, 2005).

Dentro de las propiedades de los agregados que comúnmente se ensayan para utilizar como parámetro en el diseño de las mezclas de concreto se encuentran:

- **Porosidad**

La porosidad, es el volumen interno de poros en proporción con el volumen total del sólido. La importancia de la porosidad del agregado recae en los efectos en la densidad del agregado y así en la densidad del concreto que se relaciona indirectamente con su resistencia y rigidez. Los agregados porosos tendrán menor densidad, módulo de elasticidad y resistencia.

- **Absorción y humedad superficial**

La absorción es la capacidad que tienen los agregados de captar agua para rellenar sus vacíos internos.

La humedad superficial es el agua extra que captan los agregados pero que no es la que absorben en sus poros internos. Puede afectar la resistencia del concreto, propiedades de movimiento y durabilidad. (Alexander y Mindess, 2005).

- **Contenido de agua (contenido de humedad)**

Es el agua total que contienen los agregados, tomando en cuenta la interior en sus poros y la superficial. El contenido de humedad afecta la densidad de los agregados y los requerimientos de agua de mezcla. Puede influir en la resistencia y las propiedades de movimiento del concreto. (Alexander y Mindess, 2005)

- **Peso volumétrico y contenido de vacíos**

Se conoce también como masa unitaria. Sánchez (2001) define esta característica como “la relación existente entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que ocupan esas partículas dentro de un recipiente de volumen conocido.” En pocas palabras, el peso volumétrico es simplemente la masa total de partículas de agregado ocupando un volumen.

El correcto acomodamiento de las partículas en el recipiente, y a consecuencia de esto, la menor cantidad de espacio entre las partículas (contenido de vacíos), depende del tamaño del agregado, de una buena granulometría, porosidad y la forma y textura del agregado.

Sánchez (2001) y Alexander y Mindess (2005) mencionan dos tipos de medidas prácticas del peso volumétrico (compacto o suelto). Las normas ASTM, sin embargo, los mencionan como métodos para conocer el peso volumétrico del agregado.

- *Peso Volumétrico Seco Suelto*

Es la masa “del material que se encuentra en estado normal de reposo porque el volumen que ocupa es mayor” y por tanto su peso volumétrico es menor. (Sánchez, 2001). Este peso volumétrico lo tienen los materiales cuando son vertidos de forma suelta (sin compactar) en los almacenajes o donde van a ser depositados para su uso.

Sánchez (2001) dice que este factor es importante al “manejar los agregados, ya que por ejemplo el transporte se hace por volumen y en estado suelto, de tal manera que el volumen de agregado a transportar y consumir será mayor que el volumen de agregados dentro del concreto a producir, colocar y compactar”.

- *Peso volumétrico Seco Compacto*

Es de mayor importancia para el concreto, pues representa el volumen absoluto del agregado en el diseño de mezclas, pues por la compactación, las partículas quedan confinadas ocupando la mayor cantidad de espacios, sin dejar muchos vacíos, a como en teoría se encontraría dentro del concreto. Este peso volumétrico calculado en laboratorio, con un método similar al del peso volumétrico seco suelto, es el que se utiliza al diseñar un concreto.

Granulometría

Está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría. (Sánchez, 2001).

A través de la granulometría, específicamente del análisis granulométrico, se identifican factores importantes que “constituyen una caracterización más de la distribución de tamaños, que posteriormente se utilizan como parámetros de diseño de una mezcla de concreto” (Sánchez, 2001). Estos factores son: Módulo de finura, Tamaño máximo y Tamaño máximo nominal. Según Sánchez de Guzmán, el primer factor aplicable al agregado fino y los siguientes (2) al agregado grueso.

- Granulometrías continuas

El texto Construcción: Hormigonería (1996) menciona la granulometría continua como aquella en que “el árido produce retenciones en todos los tamices, es decir, que existen granos de todos los tamaños”.

A veces los agregados son “analizados usando la graduación combinada de finos y gruesos juntos”, como expresan en Diseño y control de mezclas de concreto (1988), es decir granulometría continua, pues en la masa de agregados existen granos de todo tamaño, a como se da dentro de la mezcla de concreto. Los autores agregan también que el uso de granulometría combinada o continua “provee un análisis más a fondo de cómo los agregados van a funcionar en el concreto”.

Generalmente, los agregados disponibles localmente no cumplen con los estándares de gradación. En esos casos, los agregados deben ser combinados en proporciones adecuadas para que la gradación resultante (la combinada) se aproxime a una graduación continua parecida a la gradación deseada o estándar.

(Gambhir, 2013).

Mindess, Young y Darwing (2002) afirman que “si un agregado no se ajusta con los límites de gradación de la ASTM C-33, no necesariamente significa que no se puede hacer concreto con ese agregado. Quiere decir que el concreto va a requerir más pasta y será más propenso a segregarse durante el manejo y colocación”.

Por eso Sánchez (2001) dice que es interesante complementar con los procedimientos gráficos empleados por otros autores para poder contemplar aquellos agregados que sus granulometrías no cumplen con los límites requeridos, pero que pueden optimizarse.

Algunos métodos gráficos experimentales que se han utilizado para hacer granulometrías continuas son la granulometría combinada y la curva de Fuller-Thompson. Esta última se puede utilizar como referencia, para comparar una gradación lograda en la práctica.

- Granulometría combinada

En el Manual de Ingeniería Civil, sus autores afirman que “La graduación ideal es una que resulte en la menor cantidad de vacíos cuando el total de agregados, ambos finos y gruesos, son combinados”. Como los vacíos en el concreto deben ser llenados con la pasta cementante, es lógico que al utilizar una granulometría combinada, que consiste en procurar la menor cantidad de vacíos, conduzca a obtener un concreto más económico. Pero agregan que “la mejor graduación depende también de la forma de las partículas”.

Entonces se entiende, como dice N. Delatte (2014), que la graduación combinada “es importante para el concreto de cemento Portland porque minimiza la necesidad del segundo componente de mezcla importantísimo, la pasta...” y que “El volumen de pasta debe ser no más del necesario para proveer lubricación durante la colocación y unir las partículas de agregado inerte para resistir las fuerzas que afectarán la masa durante su vida útil”. Recalca que un volumen de pasta superior

al debido significará un gasto superior en cemento y agua.

“La graduación combinada (granulometría combinada) puede ser usada para un mayor control de la trabajabilidad, bombeabilidad, contracción y otras propiedades del concreto.

Crouch (2000) encontró en sus estudios sobre concreto con aire incorporado que la relación agua-cemento podría reducirse en más del 8% usando graduación de agregados combinados.” (Kosmatka, Kerkhoff y Panarese, 2002)

- Curva de Fuller-Thompson

Fuller y Thompson, en 1907, propusieron una curva, similar a las curvas tipo de gradación (curvas ya dadas de distribución de tamaños de partículas para utilizar en mezclas) que estaba basada en la suposición de que “para lograr densidad máxima y por tanto una mayor resistencia, la gradación debe ser de una manera que asegure que los vacíos entre las piedras más grandes sean llenados con piedras más pequeñas y mortero, ya que los vacíos en el concreto reducen considerablemente la resistencia.” (Akroyd, 1962)

Para trabajar con combinaciones de agregados (gruesos y finos como un todo) el ACI 211.1-91, en los Anexos (A5.3.2.1) dice que se deben combinar los tamaños de agregados disponibles para producir una gradación que logre la mayor densidad y mínimo de vacíos. Para combinar los agregados de diversos tamaños se puede utilizar el método del peso volumétrico seco compacto, sin embargo para ser un método práctico, debe ser para agregados de tamaño máximo nominal entre 1 ½” (37.5 mm). Para agregados de tamaño máximo nominal de 3” a 6”, el método anterior no se recomienda, pero el ACI facilita una ecuación (Ecuación 1), que brinda un porcentaje aproximado de material pasante por cada tamaño de tamiz requerido para un tipo de agregado dado.

$$Ec. 1 \quad P = \frac{d^x - 0.1875^x}{D^x - 0.1875^x} (100)$$

Donde:

P: % acumulado que pasa el tamiz de tamaño d

d: abertura del tamiz, en pulg. o mm

D: tamaño máximo de agregado, en pulg. o mm

X: exponente. 0.5 para ag. redondeados y 0.8 para ag. Triturados

La Ecuación 1 fue resultado de los trabajos de Fuller y Thompson, y su desarrollo genera una curva que se aproxima a la gradación ideal para máxima densidad y mínimos vacíos de acuerdo con la forma de las partículas de agregado. Inicialmente incluía como material fino al cemento, sin embargo se puede tomar sólo la fracción de agregados pétreos y de igual manera generan la curva.

La curva de Fuller-Thompson presenta un comportamiento elíptico en su fracción fina, el cual converge en una línea recta tangente a la elipse en las siguientes fracciones. (Sánchez, 2001)

En el ACI 301-05, especifican que “La curva pasa de una elipse o parábola a una tangente en el punto en que la fracción de agregado es 1/10 del tamaño máximo del agregado.”

Y Sánchez (2001) dice finalmente sobre la curva que “a medida que las partículas son más angulosas es más amplio el porcentaje de fino representado por la parte elíptica.”

Hay una curva distinta para cada combinación de tamaños de agregados, por lo que para en la práctica poder conocer el porcentaje de cada grupo de tamaño que se asemeje a la curva generada, se deben hacer múltiples ensayos de prueba y error para conseguirlo.

Gracias al trabajo de Fuller-Thompson y otros investigadores, se logró desarrollar varias curvas que se recomiendan como “ideales” para lograr máxima compacidad de los agregados. Por eso la curva de Fuller-Thompson puede usarse como

referencia para que mediante la combinación de otros áridos que no cumplen por sí solos los requerimientos granulométricos, se pueda obtener uno resultante cuya curva granulométrica (continua) se acerque a ella. De la granulometría se otras propiedades importantes de los áridos como son el módulo de finura, tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

- **Módulo de Finura**

El módulo de finura es un valor empírico que se utiliza para estimar qué tan fino o grueso es el material (Sánchez, 2001). Indica la distribución del tamaño de las partículas en su porción fina, es decir, si existe un predominio de partículas finas o de partículas gruesas.

- **Tamaño máximo**

El tamaño máximo del agregado se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado (Sánchez, 2001). Representa el tamaño máximo de la partícula más grande que hay dentro de la masa de agregados y debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de los elementos de una estructura.

- **Tamaño máximo nominal**

El tamaño máximo nominal corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más. Este factor es más representativo en la granulometría que el tamaño máximo, ya que representa el tamaño promedio de las partículas más grandes dentro de la masa del agregado grueso, mientras que el anterior solo indica la partícula más grande en esta fracción del agregado, la cual en algunos casos puede ser única (Sánchez, 2001)

- **Contenido de impurezas orgánicas**

Las impurezas orgánicas son sustancias generalmente formadas por sedimentos

(detrimentos) de origen vegetal, que se pueden dar en el agregado fino. La presencia de materia orgánica, en cantidad significativa, se determina a través de un ensayo donde se analiza el color del agregado en una sustancia.

Según Sánchez, la materia orgánica puede perjudicar notablemente al concreto, “especialmente en las reacciones químicas de hidratación durante el fraguado”. Afirma que la presencia de esta materia orgánica que se denomina “humus” puede “impedir parcial o totalmente el fraguado del cemento, por lo cual hay que controlar su presencia en los agregados, especialmente en la arena, la cual, debido al tamaño de sus partículas, suele retener la materia orgánica finamente dividida y que se encuentra en proceso de descomposición”. (Sánchez, 2001).

c. Pruebas de control de los agregados

De la calidad y características de los agregados, así como sucede con el cemento, depende el desempeño y calidad de la mezcla de concreto que conforman. Por lo que los agregados también pasan por pruebas para comprobar sus características, de las que depende el diseño de la mezcla de concreto y su desempeño en obra.

Los agregados para concreto son caracterizados usando pruebas estándar. Esto asegura que los agregados se ajusten a los criterios mínimos de especificación.

Entre estas pruebas están:

- Determinación de los pesos secos sueltos y secos compactos de los agregados, ASTM C-29.
- Determinación del contenido de humedad de los agregados, ASTM C-566-13.
- Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino, ASTM C-128.
- Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso, ASTM C-127.

Los ensayos antes mencionados para conocer la porosidad, absorción, humedad superficial y contenido de agua de los agregados.

-Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos, ASTM C-136. Sirve para determinar la distribución de tamaños en los agregados a utilizar, conocer qué tan gruesos o finos son y detectar algún desequilibrio en los tamaños.

-Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles, ASTM C-131. Este ensayo para conocer la dureza del agregado grueso.

-Método de Ensayo Normalizado para la Detección de Impurezas Orgánicas en Agregados Finos para Concreto, ASTM C-40.

1.5.2.3. Agua

El agua empleada en la mezcla debe ser limpia, libre de aceites, ácidos, álcalis, sales y materias orgánicas. En general, el agua potable es adecuada para el concreto. Su función principal es hidratar el cemento, pero también se usa para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. (Harmsen, T., 2005).

1.5.2.4. Aditivos

Son materiales que se agregan a la mezcla de concreto o mortero en cantidades específicas, para modificar alguna característica de la mezcla original de acuerdo con las necesidades específicas de una obra, si corresponde.

1.5.3. Propiedades del concreto

Las propiedades del concreto y del mortero se estudian primordialmente con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla, el cual se define como el proceso para seleccionar los ingredientes adecuados y determinar sus cantidades relativas, con el objeto de producir, tan económicamente como sea posible, un concreto o

un mortero con un mínimo de ciertas propiedades. (Sánchez, 2001).

Las cantidades relativas de cemento, agregados y agua mezclados juntos controlan las propiedades en el estado fresco así como en el estado endurecido; por ejemplo, mientras más agua y cemento se adicionen, más húmedo y fluido será el concreto. (Akroyd, 1962).

A continuación, se desarrollan las propiedades del concreto que son ensayadas de forma más común para comprobar su calidad.

a. Temperatura de la mezcla

La temperatura de la mezcla afecta todas las propiedades del concreto en estado fresco sobretodo el asentamiento y el contenido de aire; de ella dependen las reacciones químicas que se produzcan dentro de las mezclas.

La temperatura del concreto fresco depende de cada uno de sus componentes, que influyen en la misma con su propio calor específico, masa, temperatura, “además del calor liberado por la hidratación del cemento, la energía añadida durante el mezclado” y la temperatura ambiente. (Sánchez, 2001).

Según Sánchez, la temperatura media de una mezcla de concreto fresca está entre 10° y 29° en climas cálidos y la máxima es de 32°.

b. Trabajabilidad y consistencia

La trabajabilidad es la facilidad con la que el concreto puede ser manejado desde la mezcladora hasta su posición final debidamente compactado. Esto incluye la facilidad con la cual puede ser cargado y descargado del equipo de transporte, la facilidad con la que puede ser colocado en el encofrado y la cantidad (o intensidad) de vibración necesaria para su completa compactación. (Akroyd, 1962).

La consistencia de la mezcla es medida con el ensayo de asentamiento (slump test) y se hace según sea necesario para conocer la capacidad de trabajabilidad

requerida para las condiciones y método de colocación específicos. Una mezcla muy rígida podría tener poco asentamiento y podría dificultar la colocación en secciones muy cargadas con refuerzos. (Love, 2001).

Afectan la trabajabilidad y la consistencia de la pasta factores como la relación agua cemento, la distribución granulométrica de los agregados y el enlace que forman la pasta y los agregados. Dichos factores se desarrollan a lo largo del documento.

c. Plasticidad

Se denomina “plasticidad” a una consistencia del concreto tal que pueda ser fácilmente moldeado, pero permita al concreto fresco cambiar de forma lentamente si se saca del molde. Por tal razón, no pueden considerarse como mezclas de consistencia plástica ni las muy secas ni las muy fluidas. (Sánchez, 2001.)

d. Peso unitario

El peso unitario del concreto se define como la cantidad de masa por unidad de volumen y generalmente se expresa en kg/m^3 (Sánchez 2001). El peso unitario del concreto es la suma de los pesos de todos los elementos que componen un metro cúbico de mezcla; agregado fino, agregado grueso, cemento y agua. Puede variar desde $2,240 \text{ kg/m}^3$ a $2,400 \text{ kg/m}^3$. Para el diseño de estructuras de concreto reforzado se considera $2,400 \text{ kg/m}^3$.

e. Resistencia

Es la capacidad que tiene un material para resistir una deformación o rotura inducida por cualquier esfuerzo. El concreto presenta una alta resistencia a la compresión, para un concreto de resistencia normal se obtienen resultados de hasta 42 MPa y un concreto de resistencia alta puede llegar a superar los 100 MPa . Sin embargo, el concreto no se comporta igual ante los esfuerzos de tracción y tensión.

Sánchez (2001) al igual que Kumar y Monteiro (2013) atribuyen esta propiedad del concreto principalmente a su compleja estructura y va a depender directamente de la relación agua/cemento (a/c), siendo inversamente proporcional a ésta, y del contenido de cemento en la mezcla. Niño (2010) agrega que además intervienen otros elementos como el tipo y calidad de cemento, las características del agregado, la cantidad y tipo de aditivos, el fraguado de la mezcla y la edad y el contenido de aire.

f. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento (a/c) o relación agua/material cementante es simplemente la masa de agua dividida entre la masa del material cementante (cemento portland, cemento mezclado, ceniza volante, escoria, humo de sílice o puzolana natural). (Komatska, Kerkhoff y Panarese, 2002)

La relación a/c es muy importante pues de ella dependen factores como la resistencia, durabilidad e impermeabilidad del concreto. Además, a partir de esta relación y el contenido de agua se determina el contenido de cemento a utilizar, o viceversa. Y Love (2001) recalca que “es importante recordar que un cambio en la relación a/c cambia las características del concreto endurecido”, como también del concreto fresco, pues afecta la trabajabilidad y el asentamiento de la mezcla.

“La relación agua-material cementante (relación agua/cemento) seleccionada para el diseño de una mezcla debe ser el menor valor necesario para cumplir con las condiciones de exposición anticipadas” o para alcanzar la resistencia necesaria. (Komatska, Kerkhoff y Panarese, 2002)

Para escoger una relación a/c al diseñar para una resistencia definida, se debe trabajar con “datos de campo adecuados o mezclas de prueba con los materiales de trabajo para determinar la (mejor) relación entre a/c y la resistencia.” (Komatska, Kerkhoff y Panarese, 2002)

La Tabla 1, tomada también del texto de Komatska, Kerkhoff y Panarese (2002),

demuestra el vínculo existente entre la relación a/c y la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa	Relación a/c en masa	
	Concreto sin aire inc.	Concreto con aire inc.
45	0.38	0.30
40	0.42	0.34
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

La resistencia es basada en cilindros de 28 días curados en húmedo según ASTM C 31. La relación asume tamaño máximo nominal de agregado de aprox. 19 a 25 mm. Adaptada de ACI 211.1 Y ACI 211.3

Se observa que entre mayor es la relación a/c es menor la resistencia a la compresión alcanzada por el cilindro de concreto. Esto demuestra que una mejor calidad de pasta (menos acuosa) logra un mejor enlace pasta-agregado, poniendo a prueba la fortaleza de los agregados que conforman la mezcla. Mientras que “si se utiliza mucha agua, resultando una alta relación agua-cemento, la pasta es delgada y será porosa y débil al endurecerse”. (Spence y Kultermann, 2016)

La reducción en la resistencia del concreto que ocurre con relaciones agua/cemento bajas se debe a la presencia de aire incluido en la mezcla, en cambio, con relaciones agua/cemento altas, se debe a la presencia de poros capilares que se rellenaron con agua en exceso. (Gani, 1987)

Lo anterior lo complementa Love (1973) afirmando que “para concretos con una relación a/c alta, las fallas son controladas por las propiedades de la pasta; en la medida que la cualidad de la pasta mejore, la fortaleza del enlace pasta-agregado controla la resistencia del concreto; con suficientes mejoras en la fortaleza del enlace pasta-agregados, la resistencia del agregado se convierte en el factor que controla.”

g. Enlace pasta-agregado

La resistencia del concreto depende de la fortaleza de la pasta, la resistencia del agregado grueso y la fortaleza de la interfaz pasta-agregado, que es la región más débil del concreto (Bartos, Cleland y Marrs, 2004)

Sánchez, dice que es “la relación que hay entre la cantidad de pasta y el área superficial de los agregados que ésta debe cubrir y lubricar”.

Afecta de tal manera a la mezcla que si esta relación tiene un valor alto, permite que los agregados se muevan y fluyan libremente dentro de la masa total de concreto; de lo contrario, si es baja, la mezcla es granulosa y rígida.

El enlace entre la pasta cementante y las partículas de agregado incrustadas se debe a efectos mecánicos y físicos, y aparentemente, pero a menor grado, a reacciones químicas, que se dan entre el cemento y el agregado. En la práctica, sin embargo, los factores principales involucrados son la relación agua-cemento y las características de la superficie de las partículas de agregado.

Soroka (2003) afirma que “la experiencia, así como los datos, han demostrado que la resistencia del concreto hecho con agregado triturado es más fuerte que la del mismo concreto hecho con grava.” Esto debido a las características superficiales irregulares de los agregados de concreto reciclado.

Según Dhir y McCarthy (1999) se ha hecho estudios en concreto de resistencia normal que “han demostrado generalmente que, al incrementar la fortaleza del enlace pasta-agregado, la resistencia del concreto también aumenta, ya sea a tensión, compresión o flexión.”

1.5.4. Pruebas de control de calidad realizadas al concreto

Para asegurar la calidad del concreto que se diseña se requiere someter la mezcla a diferentes pruebas de control de calidad, que pueden ser en campo o en laboratorio y bien, en estado fresco o estado endurecido de la mezcla. Estas

pruebas se realizan utilizando especímenes que pueden tener diferente forma, dependiendo del ensayo y el tipo de estructura; en general se utilizan cubos, cilindros y vigas en el caso de losas.

Entre los ensayos más significativos de control de calidad del concreto están el revenimiento, peso unitario y el ensayo de resistencia a la compresión, el cual determina si el material aportará la resistencia física necesaria para que la estructura soporte los esfuerzos para la cual es diseñada.

1.5.4.1. Pruebas al concreto en estado fresco

a. Temperatura de la mezcla

A través de este ensayo se conoce la temperatura de una mezcla de concreto fresco y está detallado en la designación ASTM-C1064. Es necesario mantener el control de la temperatura de la mezcla, ya que de esta dependen otras propiedades como el tiempo de fraguado, la trabajabilidad y la resistencia.

Se utiliza un termómetro, que se pueda sumergir dentro de la mezcla al menos 75 mm (3"). Es preciso un recipiente de material no absorbente y que permita contener suficiente mezcla para proporcionar al menos 75 mm de la misma en todas direcciones alrededor del termómetro. Y la prueba toma varios minutos, según el tamaño de los agregados.

b. Revenimiento

El ensayo se realiza al concreto fresco para determinar la consistencia del concreto ya sea en campo o en laboratorio, siguiendo la designación ASTM-C143. De esta prueba depende la aceptación de la mezcla.

Imagen 3: Ensayo de revenimiento en laboratorio



Fuente: Imcyc

Este ensayo se limita a mezclas cuyos valores de asentamiento estén entre 1" y 7", y el tamaño de partículas de agregado grueso no sean mayor al 2". Una mezcla con revenimiento entre 0 y 25 mm tiene un grado bajo de trabajabilidad y con hasta 175mm, un alto grado de trabajabilidad, que no es recomendable para vibraciones. Para fundaciones, zapatas y otras subestructuras, un revenimiento de 26-50 mm es permisible (sin vibrar) y con vibración, entre 40 y 115 mm es permisible.

c. Peso unitario

El ensayo para determinar el peso unitario del concreto está detallado en la norma ASTM C-138, que además de brindar el peso del concreto, permite determinar el rendimiento, el contenido de cemento por unidad de volumen de concreto y el porcentaje de vacíos.

El peso unitario del concreto se determina midiendo el peso del concreto requerido en estado fresco para llenar un molde de volumen conocido (Sánchez, 2001).

1.5.4.2. Pruebas al concreto en estado endurecido

a. Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para verificar que la mezcla de concreto cumpla con los requerimientos de diseño. Esta prueba está definida en la norma ASTM-C39. Los resultados de las pruebas sirven para fines de control de calidad, para estimar la resistencia del concreto en estructuras, programar las operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura.

Imagen 4: Prueba de resistencia a la compresión de cilindros de concreto



Fuente: Imcyc

1.5.5. Concreto reciclado

1.5.5.1. Definición

Se llama concreto reciclado al material procedente de desechos de construcciones y demoliciones, o sobrante de material de las concreteras, que es acopiado y tratado de diversas formas para utilizarlo nuevamente en la construcción.

Según el Handbook of Recycled Concrete and demolition Waste, editado por varios autores, el desecho de demolición producto de la desmantelación en la etapa de demolición o de la restauración y reparación de edificios e instalaciones. Es usualmente de naturaleza pétreo y más homogéneo que el desecho de construcción, debido a la ausencia de suelo y desechos de embalaje y tiene mayor volumen y peso.

El producto obtenido del proceso de reciclaje de concreto se le denomina, según la literatura técnica como, Agregados Reciclados de Concreto (ARC). Estos agregados pueden ser finos o gruesos, y usualmente son llamados simplemente como agregados reciclados.

El término “Concreto con Agregados Reciclados”, se refiere al concreto producido utilizando ARC o una combinación de agregados naturales y ARC. (RILEM,1992)

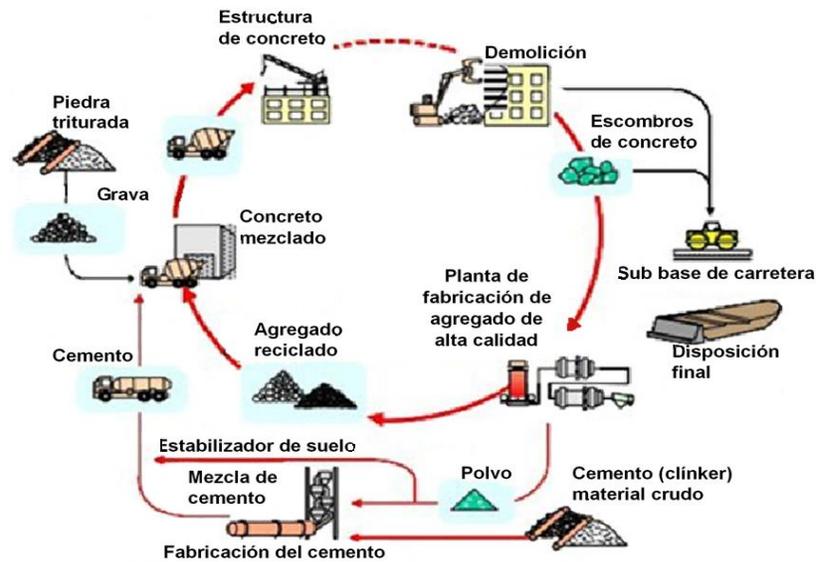
1.5.5.2. Proceso de reciclaje del concreto

En el artículo “Recycled Aggregates” publicado en el sitio web de la Portland Cement Association, dice que “el reciclaje del concreto es un proceso relativamente simple. Implica quebrar, remover y triturar el concreto existente volviéndolo un material con tamaño y cualidades específicas.”

El concreto en estructuras a ser demolidas puede tener diversos tipos de terminaciones y materiales adheridos, por lo que “es una ventaja si dicho concreto, que será utilizado para la producción de agregados reciclados, es liberado de materiales externos antes de la demolición. (Hansen, 1992).

El método básico de reciclaje es el de trituración de los escombros para producir un material granular de partículas de tamaño especificado. El grado de reprocesamiento llevado a cabo después de esto, es determinado por el nivel de

Imagen 5: Proceso de reciclaje del concreto



Fuente: theconstructor.org

contaminación de los escombros iniciales y la aplicación para la que será utilizado el material reciclado, como: relleno general a granel, base o relleno para proyectos de drenaje, sub-base o material de rodamiento en construcción de carreteras o manufactura de concreto nuevo. (Hansen, 1992).

El tamaño de los agregados, la calidad (con mortero o sin mortero adherido) y otras características dependen del uso esperado, y de igual manera el proceso por el que vayan a pasar; es decir, que según el uso que vaya a dársele a los agregados, necesitan seguir un proceso con más o menos etapas.

1.5.5.3. Propiedades físico-mecánicas de los agregados de concreto reciclado

a. Granulometría

Según el trabajo de grado presentado por el Ing. Libardo Arriaga T., de la Escuela Colombiana de Ingeniería, menciona que “la granulometría de los agregados de concreto reciclado varía según el proceso de trituración que se realice” y que puede ser modificado según la trituradora utilizada. Además, agrega que “El porcentaje de agregado grueso que se obtiene (en la trituración) puede variar entre

70% y 90% del agregado total producido” y “este porcentaje depende además del tamaño máximo del agregado grueso de concreto reciclado producido y de la composición del concreto original.”

RILEM recomienda que en la etapa final de trituración y procesamiento del concreto reciclado, los agregados obtenidos (ARC) sean debidamente tamizados por la malla No. 4 (según las normas ASTM), y el material retenido sea comparado con la norma ASTM C-33, según los requerimientos de un tamaño máximo de 1 pulgada. Por lo general, es posible obtener una graduación que cumpla con las normativas establecidas durante el proceso de trituración y procesamiento inicial, de no ser el caso se permite realizar ajustes de graduación siguiendo los mismos procesos utilizados para los agregados naturales triturados.

b. Forma y Textura superficial

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del concreto original provoca que la textura de los agregados de concreto reciclado sea más rugosa y porosa que la de los agregados naturales como consecuencia del proceso de trituración. De la misma manera se ve afectada la forma, dependiendo de la calidad de la pasta o mortero adherido, las partículas del agregado reciclado se presentan más planas y angulosas. (Arriaga, 2013)

c. Densidad

Los agregados reciclados de concreto son más ligeros que los agregados naturales, esto se atribuye al mortero adherido a las partículas de agregado natural incluidas en los ARC, lo cual hace que estos últimos sean agregados más porosos.

Las especificaciones holandesas y alemanas establecen una densidad no menor a 2100 kg/m^3 para los ARC, mientras que la normativa japonesa no permite valores menores a 2000 kg/cm^3 . En Dinamarca la normativa no permite materiales reciclados se requiere una densidad de al menos 2200 kg/m^3 (RILEM,1992).

Los agregados reciclados de concreto presentan una menor densidad en

comparación a los agregados naturales cuyas densidades oscilan entre 2500 y 2610 kg/cm³ (RILEM, 1992). Resultados de diferentes estudios sobre las propiedades mecánicas de los agregados reciclados de concreto presentan densidades de 1% a 6% menores a los agregados naturales a comparar.

d. Absorción

La absorción de los agregados reciclados de concreto es mucho mayor a la absorción de los agregados originales. Esto se debe a la mayor absorción del mortero adherido a las partículas de agregados. (RILEM, 1992).

Diferentes estudios experimentales han obtenido absorciones de entre 3% a 12% para los agregados reciclados de concreto; menores a 7% u 8% para partículas gruesas y mayores de 8% para la parte fina dependiendo de la procedencia del concreto original.

La norma japonesa establece un límite de 7% de porcentaje de absorción para poder utilizar agregado grueso reciclado y un máximo de 13% para el agregado fino reciclado.

e. Desgaste

El valor esperable del coeficiente de los ángeles del agregado de concreto reciclado puede situarse en un rango muy amplio de 25-42%, dependiendo entre otros factores del tamaño de las partículas y de la calidad del concreto original, así como del propio coeficiente de los ángeles del agregado natural que contenga. (Arriaga, 2013)

1.5.5.4. Comportamiento de los concretos con agregados reciclados

El código de concreto holandés permite que hasta un 20% de la cantidad total de agregado en un concreto nuevo sea sustituido en agregados reciclados de concreto (ARC) sin que se tomen medidas especiales. Los japoneses sugieren que

hasta el 30% del agregado total en mezclas de concreto puede ser sustituidos por ARC sin tener efectos negativos. Según estudios realizados se ha encontrado que un porcentaje de sustitución menor al 30% del peso del agregado grueso, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, fluencia ni la resistencia al deshielo sufren cambios significativos comparados con concretos convencionales.

Sin embargo, por aspectos técnicos y económicos se recomienda que el agregado grueso reciclado a incorporar en las mezclas no contenga partículas menores a 2 mm, y como agregado fino se utilice arena natural, ya que utilizar partículas finas menores a 2 mm tiene un efecto perjudicial en las propiedades técnicas y económicas del concreto a producir. (RILEM, 1992)

a. Densidad/ peso unitario

Los concretos fabricados con agregados reciclados son más ligeros que los concretos convencionales, según Hansen y Narud los concretos con agregados reciclados cumplen con el 85% al 95% del peso unitario de los concretos convencionales. Esto se debe al contenido de aire, el cual es mayor que en los convencionales por 0.6% debido a la forma y tamaño de las partículas del ARC. Por ende, la densidad de estos concretos también es menor que las muestras de control entre 5% y 15%. (Comité ACI 555, 2001).

b. Contenido de cemento

En principio, los tipos de cemento utilizados serán los mismos que se emplearían en un concreto convencional para las mismas prestaciones. Debido a la menor calidad del agregado de concreto reciclado, para mantener la misma resistencia y consistencia, el concreto con agregado grueso de concreto reciclado necesitará un mayor contenido de cemento en su dosificación. (Arriaga, 2013)

Asumiendo que en algunos casos se requiere alrededor del 5% más de agua para alcanzar un mismo revenimiento, RILEM concluye que los concretos producidos con agregados grueso reciclado también requieren un 5% extra de cemento para

obtener iguales resultados de resistencia que los concretos convencionales. Cuando se utiliza agregado fino reciclado esta demanda de cemento puede aumentar a 15 % o más.

c. Relación agua-cemento

Para una misma resistencia, y sustitución total, la relación agua-cemento (a/c) necesaria en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado es menor que la del concreto convencional. (Arriaga, 2013)

El ACI en su comité 555 Remoción y Reutilización de Concretos Endurecidos, en el capítulo 5, considera que en la etapa de diseño la relación a/c para una resistencia a compresión requerida se utilizará la misma tanto para los concretos con agregados reciclados como para los concretos convencionales, cuando se utilizan agregados gruesos reciclados y arena natural. Sin embargo, si las muestras de prueba muestran que la compresión es menor que la asumida, se tiene que hacer un ajuste para disminuir la relación a/c inicial.

d. Consistencia

La incorporación total de agregado grueso de concreto reciclado seco en el concreto produce en general un aumento de la consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento. Debido a la elevada absorción que presenta el agregado de concreto reciclado, durante el proceso de mezclado una cierta cantidad de agua será retenida por los agregados, generando un aumento de consistencia en ocasiones importante y una reducción de la relación agua/cemento efectiva. Así, el aumento de la demanda de agua se debe principalmente a la mayor absorción y al cambio de granulometría del agregado, fundamentalmente por generación de finos durante el mezclado, aunque también pueden influir otros factores como su forma angular y su textura rugosa. Además, la pérdida de manejabilidad es más rápida, ya que después del mezclado el agregado continúa absorbiendo agua. (Arriaga, 2013)

e. Resistencia a la compresión

Por lo general, los concretos con agregados reciclados presentan una disminución en su resistencia a compresión en comparación con los concretos convencionales, para una misma relación agua/cemento (a/c). Usualmente la literatura apunta de un 20% a 30% cuando se sustituye el 100% de los agregados gruesos naturales. Así mismo, cuando la sustitución es menor al 50 % las pérdidas de resistencia pueden ser de 2% al 15%. Mientras que en concretos con sustituciones de agregado grueso reciclado del 30% o menor, las pérdidas de resistencia son inferiores al 5%. Las causas que provocan esta disminución de resistencia son debido a la menor resistencia mecánica del agregado reciclado, a la mayor absorción y porosidad, y al aumento de zonas débiles en el concreto. (Vidaud, 2015)

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados en este estudio son cemento, arena y grava. En este capítulo se describe el proceso de obtención de estos materiales y se analiza sus propiedades, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM.

Los agregados gruesos utilizados en las mezclas de este estudio son de dos tipos, naturales de origen pétreo y reciclados provenientes de trituración de concretos endurecidos. Una vez estudiados individualmente, se realiza un análisis comparativo de sus propiedades y características para ambos tipos de agregado grueso para un mismo tamaño (19 mm), con el fin de contrastar el comportamiento del material reciclado respecto al natural.

2.1. Obtención de los materiales

2.1.1. Cemento

El cemento hidráulico utilizado es Cemento Canal tipo GU (usos generales). Es un cemento de origen nacional, fabricado y comercializado por CEMEX Nicaragua.

2.1.2. Agregado fino

La arena utilizada es arena natural del cerro Motastepe. Fue donada por la empresa Concretos y Más, y fue adquirida en la planta de PROINCO.

2.1.3. Agregado grueso

2.1.3.1. Natural

Los agregados naturales, de tamaño de 12.7 mm y de 19 mm, son de origen pétreo y triturados. Fueron donados por la empresa Concretos y Más, y adquiridos previamente en la planta de trituración de PROINCO.

2.1.3.2. Reciclado

El agregado de 19 mm reciclado fue obtenido de la trituración de cilindros de

concreto desechados en la empresa Concretos y Más. Esta empresa donó para el estudio alrededor de 75 cilindros de concreto (de diferentes edades y tamaños).

a. Elaboración del material reciclado

Se trituró alrededor de 75 cilindros de concreto (de 15 x 30 cm y de 10 x 20 cm) de pruebas de control de calidad en la empresa Concretos y Más. Los cilindros fueron elaborados de distintos diseños y para resistencias diversas. Es posible que la mayoría de ellos tuvieran aditivos, especialmente reductores de agua, no obstante, estos ya cumplieron su función, por tanto se puede afirmar que no tienen influencia en los nuevos concretos

Imagen 6. Cilindros antes y después de triturarse



Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de trituración se utilizó una cuchara trituradora de mandíbulas pequeña (modelo MB-L120), que se acopla a un minicargador de 2 toneladas. Esta trituradora tiene una capacidad máxima de 0.20 m³ y un rendimiento máximo de 14m³/h.

Imágenes 7. Trituradora modelo MS- L120 (Equipo)



Fuente: Elaboración propia

Imágenes 8. Trituradora modelo MS- L120 (Mandíbula)



Fuente: Elaboración propia

El material obtenido de la trituración fue cribado primeramente por una malla de abertura de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") para eliminar las partículas más gruesas, ya que se encontraron partículas hasta de 80 mm (4"). El material pasante por la malla 19 mm fue cribado por una malla de abertura de 4.76 mm, para eliminar en la medida de lo posible toda partícula fina obtenida durante el proceso, ya que estas no son más que mortero y/o pasta adherida. En total se obtuvo un poco más de 1 m³ de material reciclado.

Imagen 9. Material triturado, retenidos y pasantes por la malla de 19 mm



Fuente: Elaboración propia

Imagen 10. Material pasante por la malla con abertura de 4.76 mm



Fuente: Elaboración propia

2.2. Muestreo y reducción de muestras

El proceso de muestreo para todos agregados utilizados en estas mezclas, se realizó tomando en cuenta el procedimiento en la norma ASTM D-75 para el caso de obtención de muestras desde pilas de acopio o medios de transporte.

Una vez acopiado el material, se tomó las cantidades suficientes de cada tipo de agregado para realizar todos los ensayos para su caracterización. Las muestras se redujeron por el método de cuarteo manual descrito en la norma ASTM C-702.

2.3. Propiedades de los materiales

2.3.1. Cemento

Las propiedades físicas del cemento que se tomaron en cuenta en este estudio,

fueron gravedad específica, consistencia normal y tiempo de fraguado las cuales se determinaron a través de ensayos de laboratorio y posteriormente se compararon con los datos técnicos del fabricante (ver Anexo 2) para fines de control de los resultados, como se muestra en la Tabla 4.

a. Densidad

Para determinar densidad del cemento utilizado en las mezclas, se tomó dos muestras y siguiendo la norma ASTM C-188, se calculó dividiendo una masa conocida de concreto entre el volumen desplazado del disolvente, en este caso gasolina, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Ec.2 \text{ Densidad} = \frac{\text{masa de concreto}}{\text{volumen desplazado}}$$

$$Ec.3 \text{ Volumen desplazado} = \text{Lectura inicial} - \text{Lectura final}$$

La Tabla 2 brinda los resultados de las muestras:

Tabla 2. Resultados del ensayo de Densidad del cemento		
	Muestra 1	Muestra 2
Masa de cemento	64 g	64 g
Volumen desplazado		
Lectura Inicial	0.5 cm ³	0.4 cm ³
Lectura Final	22.7 cm ³	22.1 cm ³
Densidad	2.88 g/cm ³	2.95 g/cm ³
Promedio densidad	2.9 g/cm ³	

Fuente: Elaboración propia

b. Consistencia Normal

Para determinar la consistencia normal del cemento con el procedimiento establecido en la norma ASTM C-187, se tomó dos muestras de 650 g de cemento, a cada una se le agregó un porcentaje de agua (en ml) respecto a la masa de cemento; 28% y 29%. Utilizando un Aparato de Vicat, se determinó el porcentaje

de agua con el cual penetra $10 \text{ mm} \pm 1$, resultado así la consistencia normal del cemento, que posteriormente se utilizará para elaborar la muestra para el ensayo del tiempo de fraguado.

Tabla 3. Datos del ensayo de consistencia normal		
Contenido de agua		Penetración del aguja
28%	182 ml	5 mm
29%	188.5 ml	9.5 mm

Fuente: Elaboración propia

c. Tiempo de fraguado

Una vez determinada la consistencia requerida para el cemento, se elabora la muestra para determinar el tiempo de fraguado, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C-191. En el ensayo se utiliza una aguja de Vicat, el tiempo de fraguado inicial es igual al tiempo transcurrido desde el inicio de la elaboración de muestra hasta que la aguja de Vicat penetra 25 mm y el tiempo de fraguado final es igual al tiempo transcurrido hasta que la aguja penetra 0 mm. En tiempo de fraguado inicial resultó en 111 minutos y el final resultó en 406 minutos.

Los resultados obtenidos en el laboratorio se compararon con los datos certificados del fabricante del cemento, para comprobar que el comportamiento del material. En la Tabla 5 se muestra ambos datos, los del fabricante y los resultados de laboratorio.

Tabla 4. Propiedades del cemento		
Propiedades	Datos del fabricante	Resultados de ensayos
Densidad	2.85 g/cm^3	2.95 g/cm^3
Consistencia normal	-	29%
Tiempo de fraguado inicial	200 min.	111 min .
Tiempo de fraguado final	295 min.	406 min.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla, la diferencia entre las densidades no es significativamente grande; se observa un incremento en la densidad, debido al posible deficiente almacenamiento del material, la edad del cemento y por la temperatura y humedad del ambiente durante el ensayo. El tiempo de fraguado también se ve afectado por no tener las condiciones ideales para elaborar el ensayo. Con los resultados de los ensayos se puede comprar que el cemento utilizado cumple con las especificaciones que establece la norma ASTM C-1157 a pesar de las afectaciones mencionadas anteriormente.

2.3.2. Agregado fino

Las propiedades estudiadas para los agregados finos fueron el peso volumétrico, gravedad específica, absorción, granulometría y módulo de finura.

a. Peso volumétrico y contenido de vacíos

El peso volumétrico seco suelto (PVSS), peso volumétrico seco compacto (PVSC) y el contenido de vacíos de la arena se midieron de acuerdo a la norma ASTM C-29 y se calcularon utilizando las ecuaciones 9 y 10 para el PVSS y PVSC y la ecuación 11 para el contenido de vacíos. Para este ensayo se tomó tres diferentes muestras, y de estas se obtuvo un promedio. Los resultados para las tres pruebas se muestran en la Tabla 6.

$$Ec. 4 \quad PVSS = \frac{(W \text{ mat. suelto en recip.}) - W \text{ del recip.}}{Vol. \text{ del recip.}}$$

$$Ec. 5 \quad PVSC = \frac{(W \text{ mat. compacto en recip.}) - W \text{ del recip.}}{Vol. \text{ del recip.}}$$

$$Ec. 6 \quad \% \text{ vacíos} = 100 \times \frac{[(GE \times \text{Densidad agua}) - PV]}{(GE \times \text{Densidad agua})}$$

Tabla 5. Peso volumétrico del agregado fino			
Muestra	1	2	3
Peso PVSS (kg/m ³)	1536	1566	1561
Promedio PVSS (kg/m ³)	1554		
Contenido de Vacíos (%)	35%		
Peso PVSC (kg/m ³)	1581	1584	1584
Promedio PVSC (kg/m ³)	1583		
Contenido de Vacíos (%)	33%		

Fuente: Elaboración propia

Los agregados de peso normal poseen una masa unitaria entre 1200 y 1760 kg/m³ (ACI Boletín E1-99). Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango típico para agregados para concreto y son representativos de agregados de peso normal. De igual manera el contenido de vacíos de la arena estudiada, se encuentra debajo del rango típico definido en el manual de la PCA, que es entre 40-50%, lo que indica un buen acomodamiento de sus partículas.

b. Gravedad específica y absorción

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C-128, se determinó la gravedad específica (GE), gravedad específica aparente (GEap), gravedad específica saturada superficialmente seca (GE_{ss}) y el porcentaje de absorción de los agregados finos. Se tomaron tres muestras de 500 g aproximadamente para el ensaye y el cálculo se realizó siguiendo las Ecuaciones del 4 al 8. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para todas las muestras.

Imagen 11. Arena en condición de saturado superficialmente



Fuente: Elaboración propia

$$\text{Ec. 7 } W = d - (B + C)$$

$$\text{Ec. 8 } GE = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Ec. 9 } GE_{ap} = \frac{A}{(V - W) - (B - A)}$$

$$\text{Ec. 10 } GE_{sss} = \frac{B}{V - W}$$

$$\text{Ec. 11 } \%Abs. = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

(W)=Peso del agua

(A)=Peso de la muestra seca

(B)= Peso de la muestra SSS

(d)= Peso del frasco lleno

(C)= Peso del frasco vacío

(V)= Volumen del frasco

Tabla 6. Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino

Muestra	1	2	3
Gravedad específica	2.379	2.376	2.379
GE promedio	2.378		
gravedad específica (sss)	2.536	2.536	2.537
GE (sss) promedio	2.536		
Gravedad específica aparente	2.823	2.828	2.825
GE Ap. Promedio	2.825		
% de absorción	6.62%	6.73%	6.62%
% de abs. Prom	6.66%		

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos de densidad y porcentaje de absorción se encuentran dentro de los rangos típicos para agregados en general, entre 2.3 a 2.9 y 0 - 8%, respectivamente¹.

c. Granulometría

La granulometría del agregado fino utilizado, incluyendo el módulo de finura, se calcularon siguiendo el método descrito en la especificación ASTM C-136. Para este ensayo se tomaron dos muestras de 500 g aproximadamente, las cuales presentaron un comportamiento similar. En el ensayo de granulometría se obtiene

¹ Boletín Educativo ACI E1-99 "Agregados para Concreto"

los pesos retenidos por cada tamiz, y los porcentajes retenidos y pasantes se calculan con las ecuaciones 12 a la 14. Los porcentajes pasantes se grafican junto a los límites granulométricos establecidos por la norma ASTM 33 (ver Tabla A1(a) en Anexo 1), para realizar el análisis correspondiente.

$$Ec. 12 \quad \%retenido\ parcial = \frac{Peso\ retenido\ parcial\ por\ el\ tamiz}{Peso\ seco\ total\ de\ la\ muestra} \times 100$$

$$Ec. 13 \quad \%retenido\ acumulado = \%retenido\ parcial_n + \%retenido\ parcial_{n+1}$$

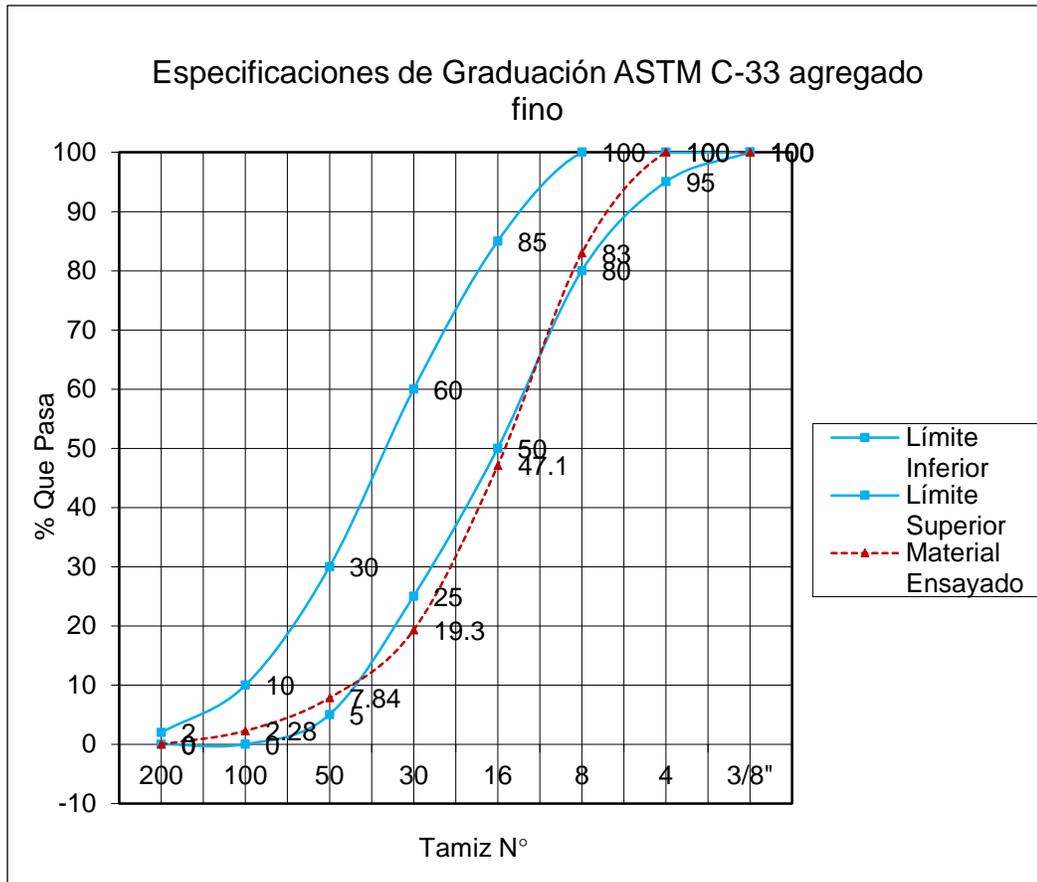
$$Ec. 14 \quad \%que\ pasa = 100 - \%retenido\ acumulado$$

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos del ensayo granulométrico de la arena para la muestra 1; los resultados de la granulometría de la arena para la muestra 2 se presentan en el Anexo 3. En la tabla se presentan los pesos retenidos, porcentajes retenidos y pasantes del ensayo y los límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C-33. Los porcentajes pasantes por cada tamiz se grafican para obtener la curva granulométrica de la muestra, junto con estos datos se gráfica también los porcentajes pasantes mínimo y máximo ASTM-33, los que se sirven como límites para comparar el comportamiento del material ensayado (ver Gráfico 1).

Tabla 7. Granulometría Arena Motastepe						
Tamiz (in,mm)		Peso retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	% que pasa	Límites ASTM C-33
3/8"	9.5	0.0	0%	0%	100%	100
No.4	4.75	0.0	0%	0%	100%	95 a 100
No.8	2.36	82.4	17%	17%	83%	80 a 100
No.16	1.18	175.2	36%	53%	47%	50 a 85
No.30	0.6	135.4	28%	81%	19%	25 a 60
No.50	0.3	55.9	11%	92%	8%	5 a 30
No.100	0.15	27.1	6%	98%	2%	0 a 10
No.200	0.075	11.1	2%	100%	0%	
SUMA		487.1	100%			
MF		3.4				

Fuente: Elaboración propia

Grafico 1. Curva Granulométrica Arena Motastepe



Según se observa en el Gráfico 1, la curva granulométrica está por debajo del límite inferior entre los tamices N°16 y N°50, lo que indica que la arena estudiada es una arena más gruesa de lo indicado en los límites establecidos por la ASTM C-33. Consecuentemente, el módulo de finura obtenido de 3.4 muestra que la arena es gruesa. Estas características pueden afectar la segregación de la mezcla de concreto.

Los valores aunque se muestren fuera de los rangos establecidos, según ACI, pueden ser utilizados si se ha comprobado por experiencias a través de los años su buen desempeño en las mezclas de concreto.

d. Contenido de impurezas

El ensayo de contenido de impurezas para la arena se elaboró de acuerdo a la

norma ASTM C-40. Se realizó con el objetivo de comprobar que el agregado no contuviera materias impurezas en cantidades que pudieran incidir de manera perjudicial en las mezclas de concreto. Como se muestra en la Imagen 12. Se realizaron 3 pruebas, las cuales tuvieron el mismo comportamiento, dando como resultado un color rojo amarillento correspondiente al N°3. Este resultado se encuentra dentro de los límites aceptables para contenido de impurezas.

Imagen 12. Índice de contenido de impurezas



Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Agregado grueso

a. Peso volumétrico

Para obtener el peso volumétrico del agregado grueso se siguió el mismo procedimiento indicado para cada método según ASTM C-29. Se tomó tres muestras por cada agregado grueso (12.7 mm, de 19 mm natural y de concreto reciclado), para el cálculo de los pesos volumétricos seco suelto (PVSS) y seco compacto (PVSC) se utilizaron las mismas ecuaciones que en el agregado fino. (Ver ecuaciones 4 - 6, sección 2.4.2., inciso a.) Las tablas muestran los resultados obtenidos para

Imagen 13. Pesaje de material en molde para PVSS.



Fuente: Elaboración propia

cada tipo de agregado grueso.

- Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS)

Tabla 8. PVSS de grava natural de 19 mm				
Material	Datos	1	2	3
Grava de 19 mm Natural	PVSS (kg/m ³)	1442	1441	1440
	PVSS promedio (kg/m ³)	1441		
	% de vacíos	47.63	47.68	47.69
	% de vacíos promedio	47.66		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. PVSS de grava natural de 12.7 mm				
Material	Datos	1	2	3
Grava de 12.7 mm Natural	PVSS (kg/m ³)	1458	1447	1455
	PVSS promedio (kg/m ³)	1453		
	% de vacíos	46.75	47.18	46.86
	% de vacíos promedio	46.93		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. PVSS de grava reciclada de 19 mm				
Material	Datos	1	2	3
Grava de 19 mm Reciclada	PVSS (kg/m ³)	1195	1221	1224
	PVSS promedio (kg/m ³)	1214		
	% de vacíos	48.74	47.64	47.50
	% de vacíos promedio	47.96		

Fuente: Elaboración propia

- Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC)

Tabla 11. PVSC de grava natural de 19 mm				
Material	Datos	1	2	3
Grava de 19 mm Natural	PVSC (kg/m ³)	1548	1560	1543
	PVSC promedio (kg/m ³)	1551		
	% de vacíos	43.75	43.31	43.94
	% de vacíos promedio	43.67		

Fuente: Elaboración propia

Material	Datos	1	2	3
Grava de 12.7 mm natural	PVSC (kg/m ³)	1566	1563	1561
	PVSC promedio (kg/m ³)	1563		
	% de vacíos	42.83	42.91	42.99
	% de vacíos promedio	42.90		

Fuente: Elaboración propia

Material	Datos	1	2	3
Grava de 19 mm Reciclada	PVSC (kg/m ³)	1312	1318	1340
	PVSC promedio (kg/m ³)	1324		
	% de vacíos	43.73	43.48	42.52
	% de vacíos promedio	43.25		

Fuente: Elaboración propia

El Boletín Educativo E1-99 del ACI sobre “Agregados para concreto” especifica que el peso volumétrico del agregado grueso para concreto normal debe estar entre 1280 y 1920 kg/m³.

Los pesos volumétricos secos sueltos y compactos de los agregados de 12.7 mm y 19 mm ensayados son un poco bajos con respecto a lo establecido por el ACI Como se muestra en las tablas 8 y 9 y 11 y 12, respectivamente. Sin embargo, se mantienen dentro del rango típico, lo que refleja que son agregados porosos, y porque no son agregados redondeados, el acomodamiento dentro del recipiente para ensayo no es el mejor. En consecuencia de lo anterior su peso volumétrico se ve afectado y resultan bajos dentro del rango permisible.

Para agregados gruesos naturales, el Manual de la Asociación de Cemento Portland, dice que los porcentajes de vacíos deben oscilar entre 30 y 45%. En las mismas se puede observar que los porcentajes de vacíos de los agregados ensayados calculados con respecto al PVSC se encuentran dentro del rango, pero los calculados con el PVSS son entre 1.5-2% mayores. Esto se debe a la forma y granulometría de las partículas, que no tienen un acomodamiento óptimo.

Como se muestra en la Tabla 10, el PVSS de los agregados reciclados está por debajo del rango establecido por el ACI para agregado grueso, en cambio el PVSC presentado en la Tabla 13, resulta aceptable pues el promedio para las tres muestras es de 1324 kg/m³. Comparando estos pesos obtenidos (PVSS y PVSC) con los calculados para el agregado de 19 mm natural, la diferencia es del 15% para el suelto y 14.6% para el compacto. El peso del agregado de concreto reciclado es menor porque contiene mortero adherido, que le adiciona muchos vacíos, y por la forma de sus partículas, porque como resultado de la trituración son muy irregulares y esto afecta el acomodamiento de las mismas, dejando por lo mismo más vacíos. Lo anterior lo demuestra el porcentaje de vacíos, que es de 48% en el método suelto y de 43.25% para el compacto. El porcentaje de vacíos en comparación con el agregado natural en el PVSS es mayor, pero en el PVSC, es casi igual, lo que puede ser porque al compactar el agregado de concreto reciclado las partículas se quebraban en tamaños menores, y estas se acomodaban entre las partículas grandes, ocupando los vacíos.

Comparando con una tesis de la Universidad Javeriana de Colombia, los pesos volumétricos (unitarios) secos y compactos del agregado 100% reciclado de este estudio resultan menores. Esto se puede deber a la naturaleza de los agregados de concreto colombiano, donde aplican otras normas para la construcción y otros áridos locales.

Tabla 14. Comparación de pesos volumétricos de agregado reciclado

Propiedad del agregado grueso reciclado	Lugar y fecha del estudio	
	Colombia, 2008	Nicaragua, 2017
Peso unitario seco suelto (PVSS)	1152.08 kg/m ³	1213.58 kg/m ³
Peso unitario seco compacto (PVSC)	1278.13 kg/m ³	1323.59 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

b. Gravedad específica y porcentaje de absorción

Para el ensayo se tomaron tres muestras de cada material y en la misma condición, saturada superficialmente seca (SSS), y se siguió el procedimiento establecido por la norma ASTM C-127, como se muestra en las Imágenes 15 y 16.



Imagen 14 (izq.) Pesaje de la muestra en condición saturada superficialmente seca (SSS)

Imagen 15 (der.) Pesaje de la muestra sumergida en la cesta.



Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Conforme esta normativa, se calculó la gravedad específica y el porcentaje de absorción con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ec. 15} \quad GE = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Ec. 16} \quad GE_{ap} = \frac{B}{A - C}$$

$$\text{Ec. 17} \quad GE_{sss} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Ec. 18} \quad \%Abs. = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde

A: peso seco

B: peso material SSS

C: peso del material sumergido

E: peso cesta vacía sumergida

En las siguientes tablas se muestran los resultados para los tres tipos de agregados utilizados, (19 mm natural y reciclado y 12.7 mm natural). En las tablas se presentan los datos obtenidos para las tres muestras de cada material y el promedio de los resultados.

Tabla 15. Gravedad específica y absorción agregado natural 19 mm

Material	Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Grava de 19 mm Natural	Peso del material SSS (g)	1252.2	1183.7	1251.8
	Peso del material secado en horno (g)	1228	1161.2	1227
	Gravedad específica (sss)	2.804	2.810	2.807
	% de absorción	1.971	1.938	2.021
	Gravedad específica promedio	2.807		
	% de absorción promedio	1.977		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Gravedad específica y absorción agregado natural 12.7 mm

Material	Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Grava de 12.7 mm natural	Peso del material SSS (g)	1039.7	1009.1	991.3
	Peso del material secado en horno (g)	1017.1	987.2	968.3
	Gravedad específica (sss)	2.791	2.795	2.792
	% de absorción	2.222	2.218	2.375
	Gravedad específica promedio	2.792		
	% de absorción promedio	2.272		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Gravedad específica y absorción agregado 19 mm rec.

Material	Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Grava de 19 mm Rec.	Peso del material SSS (g)	1089.4	1354.7	1306.6
	Peso del material secado en horno (g)	1014.2	1259.2	1215.3
	Gravedad específica (sss)	2.333	2.327	2.337
	% de absorción	7.415	7.584	7.513
	Gravedad específica promedio	2.332		
	% de absorción promedio	7.504		

Fuente: Elaboración propia

La gravedad específica calculada es la que se utilizó en el diseño del concreto para encontrar el volumen que ocupa el material en la mezcla y también para el cálculo de contenido de vacíos de los agregados. En el caso de agregados naturales, el ACI (Boletín E1-99) da un rango general para agregados gruesos y finos, entre 2.3 a 2.9 de gravedad específica. Sin referirse al método utilizado.

Las gravedades específicas de los materiales ensayados entran dentro del rango establecido. En relación con los agregados naturales, la gravedad específica del

agregado reciclado es menor, apenas pasa el límite inferior. Esto como consecuencia de ser un árido con más poros que el natural.

Los valores de absorción para agregados en general, según el ACI están entre 0 y 8%; y específicamente para el agregado grueso entre 0.2 y 4 % (ACI 221R-96). Los porcentajes de absorción de los agregados gruesos naturales ensayados están dentro de los rangos, pero el agregado reciclado sobrepasa más de un 3% el límite superior. Ese aumento se debe a que además de los áridos naturales del concreto original, contienen mortero adherido, que es poroso y por tanto absorbe más que un agregado nuevo. La absorción de los agregados reciclados según la Asociación de Cemento Portland, oscila entre 3 y 10%, dependiendo del concreto a ser reciclado. Por lo que el agregado reciclado obtenido se encuentra dentro de los rangos para agregados de su tipo.

c. Granulometría

Para el ensayo granulométrico de los agregados gruesos se siguió la norma ASTM-136, de cada material (19 mm natural y reciclado y el de 12.7 mm) se tomó una muestra. El proceso de cálculo es igual que para el agregado fino, se calcula a partir de los resultados del ensayo, los porcentajes retenidos y pasantes, como se muestra en las ecuaciones 12 -14, en la sección 2.4.2, inciso c).

En la designación ASTM C-33 se presenta una tabla que determina los límites de porcentajes pasantes para el agregado grueso para concreto. Clasifica los agregados en números de tamaño², que van del #1 al #8. (ver Tabla A1(b), en Anexo 1). Los porcentajes pasantes de la muestra se grafican junto con los límites pasantes de cada tamaño de agregado establecido en la norma ASTM-33, para obtener la curva granulométrica de la muestra y realizar el análisis correspondiente.

A continuación se presenta los resultados del análisis granulométrico de cada tipo

² El número de tamaño es una clasificación especificada en la designación ASTM C-33 que divide los agregados gruesos según los tamaños de partículas que los conforma.

de agregado grueso utilizado en este estudio:

Agregado de 19 mm natural

La Tabla 18, muestra los porcentajes retenidos y pasantes del agregado 19 mm natural, y fue utilizada para elaborar el Gráfico 2, que representa la curva granulométrica de la muestra junto con los límites requeridos.

Tabla 18. Granulometría grava de 19 mm natural						ASTM C-33 Para tamaño # 6
Tamiz #	mm	Peso ret.(kg)	% retenido Parcial	% retenido acumulado	% que pasa	% que pasa
¾"	19	2.11	6.89	6.89	93.11	90-100
½"	12.7	23.59	76.89	83.78	16.22	20-55
⅜"	9.5	3.39	11.04	94.82	5.18	0-15
N°4	4.75	0.98	3.20	98.02	1.98	0-5
N°8	2.36	0.15	0.48	98.50	1.50	-
Pasa n°8		0.46	1.50	100	0	-
Suma		30.675	100			
TMN		19 mm				

Fuente: Elaboración propia

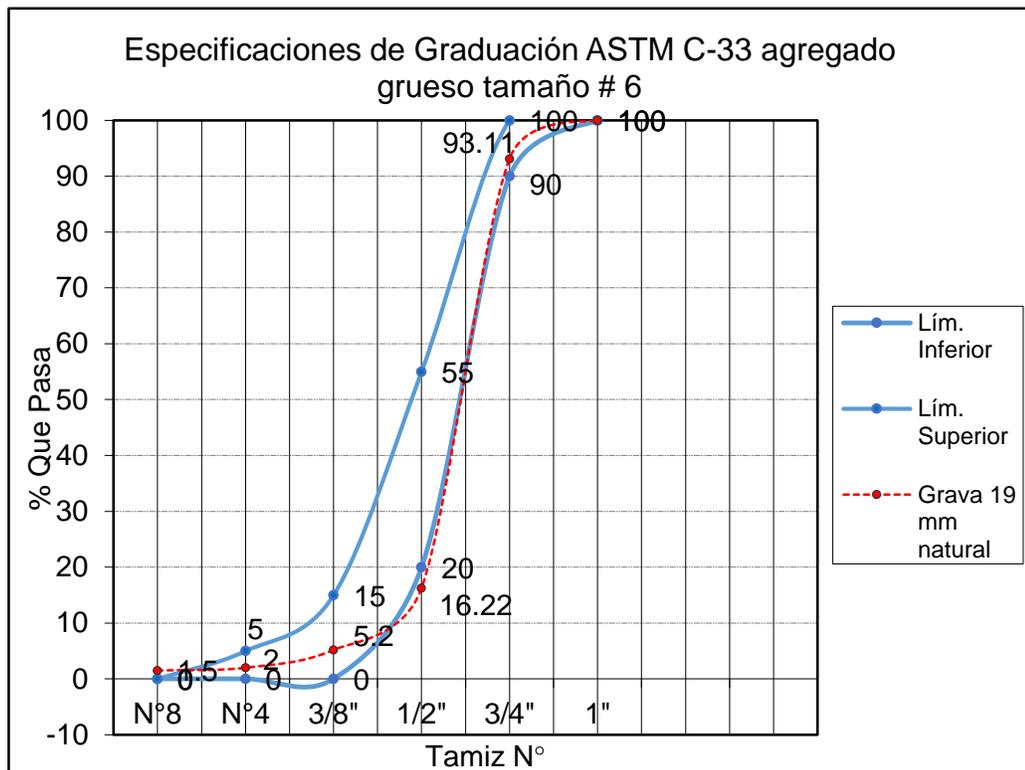
Comparando los resultados del ensayo con los requisitos granulométricos ASTM 33, resulta que el agregado natural 19 mm ensayado tiene un tamaño #6, por lo tanto, en la gráfica se toma en cuenta los límites establecidos para este tamaño.

Imagen 16. Agregado de tamaño máximo nominal 19 mm retenido en el tamiz de 12.7 mm



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2. Granulometría de agregado grueso de 19 mm



El gráfico muestra que la grava de 19 mm natural tiene deficiencia en el tamaño intermedio (12.7 mm), pues la mayoría de las partículas quedan retenidas en el tamiz de ese tamaño, y pasa menos de lo permisible. En los tamices menores igualmente queda retenido más material del que debería pasar. Esto demuestra que es una grava gruesa, y su tamaño máximo nominal es de 19 mm.

Agregado de 19 mm reciclado

El agregado de 19 mm reciclado, se analizó siguiendo los resultados del de 19 mm natural. Del ensayo se obtuvo los resultados mostrados en la Tabla 19, que se analizaron con los límites granulométricos ASTM C-33 establecidos para este tamaño de agregado.

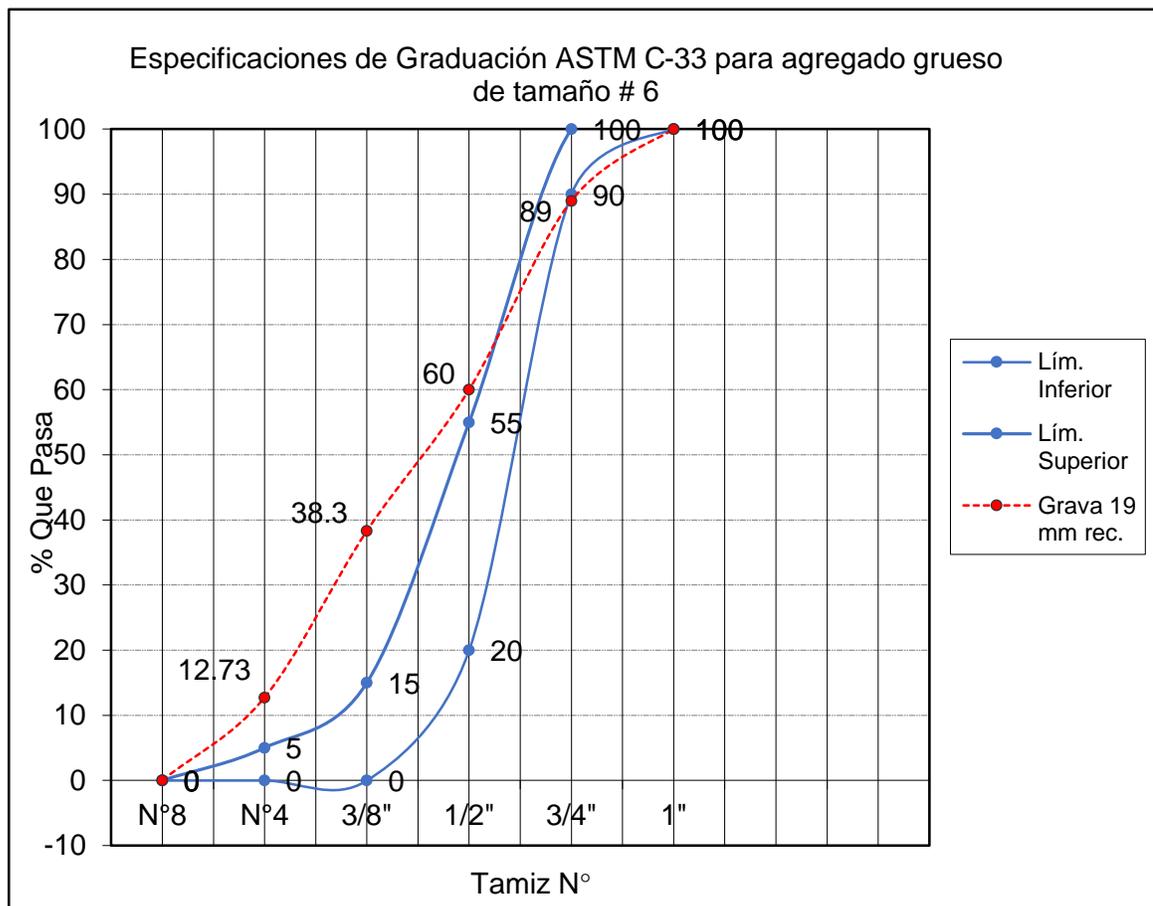
Como se muestra en la tabla anterior, existen dos tamaños para el agregado 19 mm, # 6 y # 67. El Gráfico 3 muestra la curva granulométrica del material junto con

los límites granulométricos de un tamaño #6.

Tabla 19. Granulometría grava 19 mm reciclada						ASTM C-33 Para tamaño #6	ASTM C-33 Para tamaño #67
Tamiz #	mm	Peso ret.(kg)	% ret. Parcial	% ret. Acum.	% que pasa	% pasa	% pasa
3/4"	19	2.71	10.94	10.94	89.06	90-100	90-100
1/2"	12.7	7.20	29.08	40.01	60.00	20-55	55-78
3/8"	9.5	5.37	21.68	61.70	38.30	0-15	20-55
N°4	4.75	6.33	25.57	87.27	12.73	0-5	0-10
N°8	2.36	3.15	12.73	100.00	0.000	-	0-5
Pasa n°8		0	0			-	-
Total		24.773	100				
TMN		19 mm					

Fuente: Elaboración propia

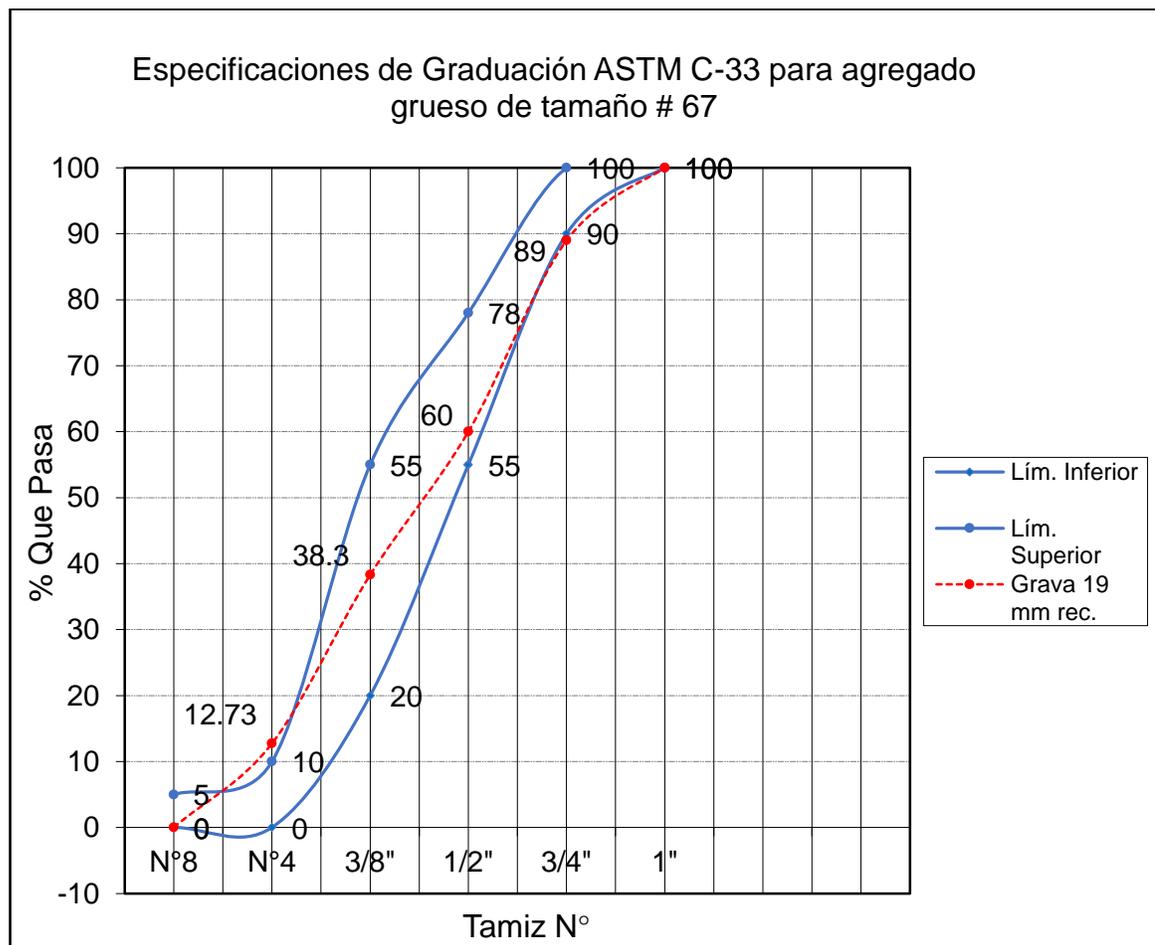
Gráfico 3. Granulometría de agregado 19 mm reciclado en tamaño #6



El Gráfico 3 demuestra que el material reciclado no puede ser definido como de tamaño # 6, como la grava natural de 19 mm, pues no se mantiene dentro de los límites especificados, por lo que se graficó para un tamaño #67, que es una combinación entre tamaño # 6 y # 7. (Ver Tabla A1(b), en Anexo 1)

En el Gráfico 4, se observa como la curva encaja mejor dentro de los límites de un árido grueso tamaño # 67. En esa curva, el material tiene un mejor comportamiento, manteniendo el mismo tamaño máximo nominal de 19 mm. Se observa que el material tiene apenas más partículas gruesas, pero en las fracciones más finas tiene menos. Para ser un material reciclado con partículas bastante irregulares en forma, tiene un comportamiento aceptable y no sobrepasa en gran medida los límites de graduación establecidos.

Gráfico 4. Granulometría de agregado de 19 mm reciclado en tamaño #67



En comparación con el agregado de 19 mm natural, el reciclado presenta mayor cantidad de finos. El agregado reciclado tiene buen porcentaje de partículas de tamaño intermedio al contrario que el agregado natural, pero ambos coinciden en exceder lo permisible en los tamaños de partículas mayores que 19 mm.

Imagen 17. Material de 19 mm reciclado retenido en tamiz de 12.7mm.



Fuente: Elaboración propia

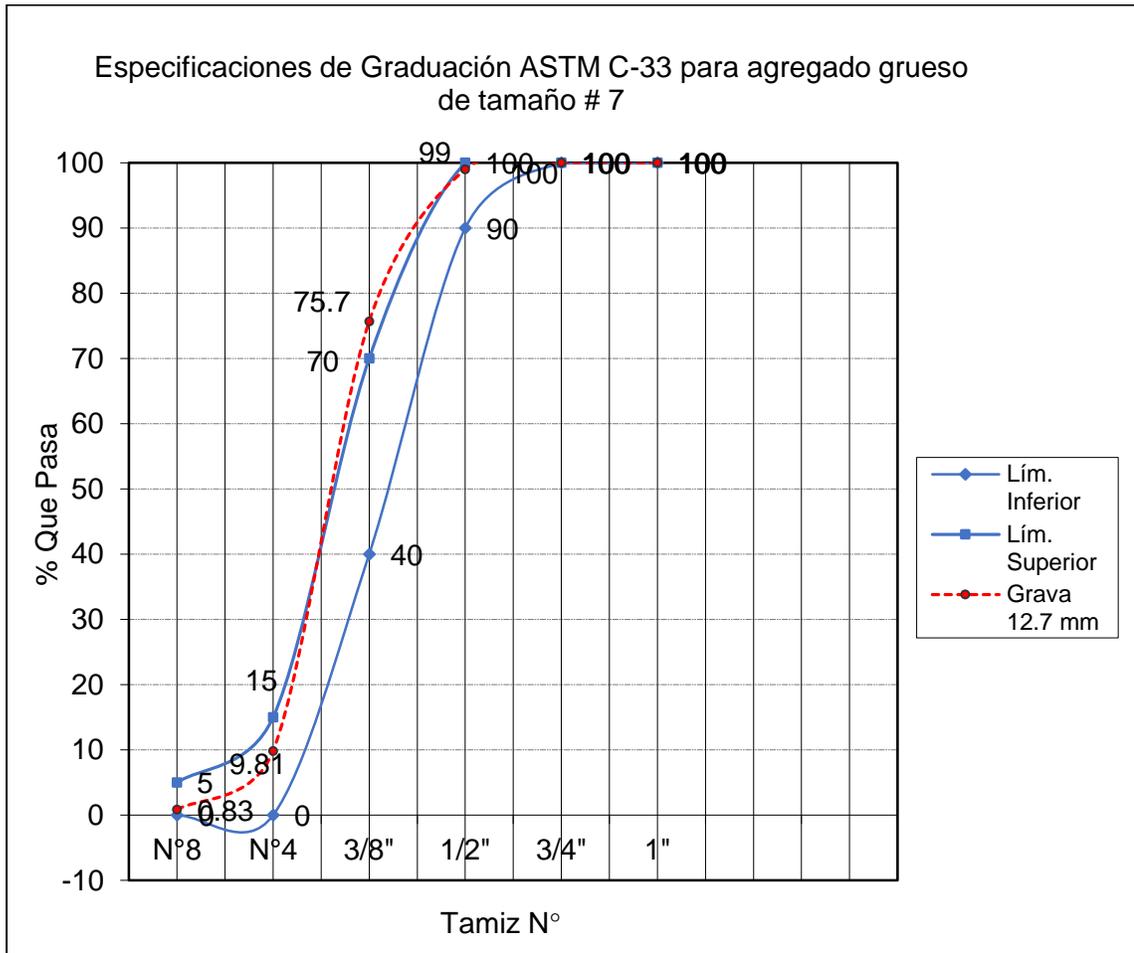
Agregado de 12.7 mm natural

El análisis granulométrico del agregado grueso de 12.7 mm se muestra en la tabla 20. Como se muestra en la columna derecha, la curva de la muestra se graficó con los límites ASTM C-33 para un tamaño #7 (Ver Gráfico 5)

Tabla 20. Granulometría grava natural de 12.7 mm					ASTM C-33 Para tamaño # 7	
Tamiz (#, mm)	Peso retenido	% retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa	% que pasa	
¾"	19	0	0.00	0.00	100.00	100
½"	12.7	0.023	0.93	0.93	99.07	90-100
⅜"	9.5	0.57	23.37	24.30	75.70	40-70
N°4	4.75	1.62	65.88	90.18	9.81	0-15
N°8	2.36	0.22	8.98	99.17	0.83	0-5
Pasa n°8		0.020	0.83	100.00	0.000	-
Total		2.4605	100.000			
TMN		12.7 mm				

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5. Granulometría de grava de 12.7 mm en tamaño # 7



Como se observa en este gráfico, la curva sale del límite superior en los tamices 9.5mm ($\frac{3}{8}$ ") y 12.7 mm, lo que indica que el material tiene un ligero exceso de partículas en su fracción más gruesa. Sin embargo, se considera que el material tiene un comportamiento aceptable para su tamaño máximo nominal, que es 12.7 mm.

• Granulometrías continuas

La granulometría es una de las propiedades de los agregados que tiene mayor influencia en las mezclas de concreto y como se muestra en los análisis granulométricos de los agregados estos presentan ciertas deficiencias; la arena resultó tener un módulo de finura alto, que la catalogó como arena gruesa y el

agregado de 19 mm mostró cierta deficiencia de material de tamaño intermedio, que fue reflejado en su peso volumétrico, que teniendo una mejor granulometría pudo haber tenido un mejor acomodamiento.

Sumado a los resultados de la caracterización de los materiales, se tomó en cuenta que para el diseño de mezclas se estaría trabajando con más de dos tipos de agregados, siendo uno de ellos el agregado grueso reciclado, para el cual se cuenta con valores de sustitución establecidos y se debe analizar cuidadosamente su intervención en cada mezcla.

Tomando en cuenta lo anterior se decidió aplicar el método de granulometría combinados donde se analizan los áridos como un solo conjunto y de esta manera mejorar las deficiencias que estos pudieran presentar según su granulometría, y al mismo tiempo, mantener el porcentaje de participación de cada material, evitando una variación entre el diseño y la elaboración de mezclas.

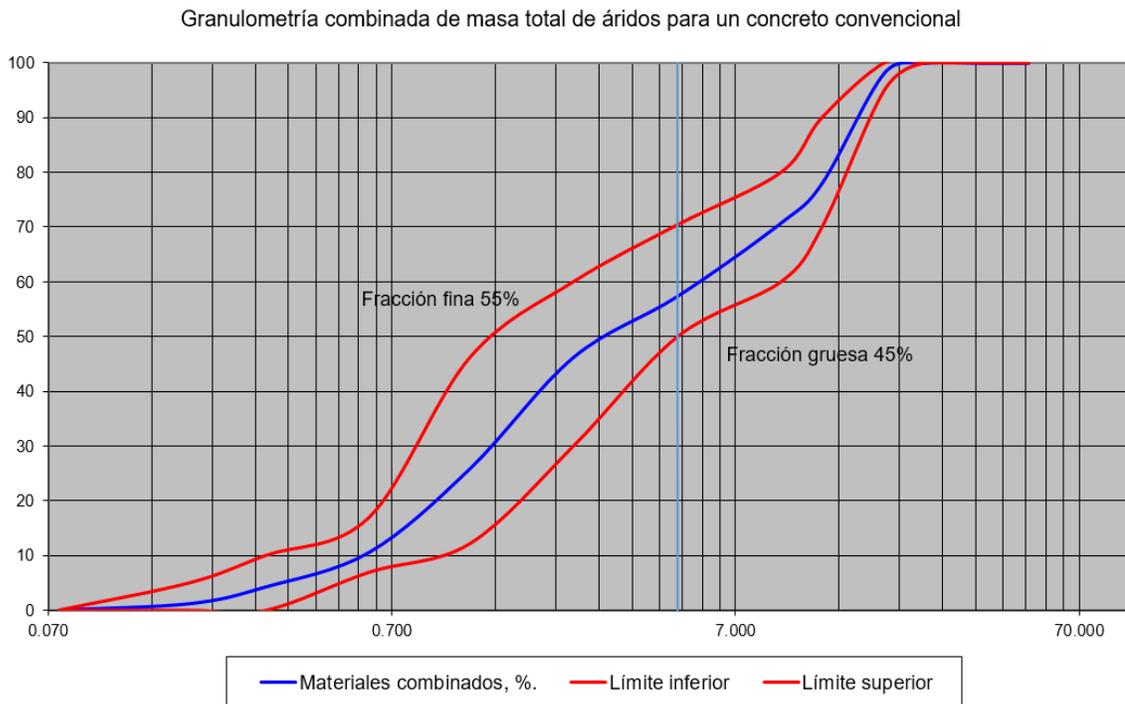
· **Combinación de agregados**

Para conocer la intervención (en porcentaje) de cada agregado en las mezclas a diseñarse, se combinó de manera gráfica la granulometría individual de cada árido en diferentes porcentajes de participación hasta encontrar una curva que presentara un buen comportamiento. La combinación en porcentaje que produjo una curva de comportamiento más suave y que fuese funcional también para el agregado reciclado, fue 45% de agregado grueso (dividido en 58% de 19 mm y 42% de 12.7 mm) y 55% de agregado fino. Esta distribución combinada se muestra en la Tabla 21 y el Gráfico 6, a continuación:

Tabla 21. Granulometría de agregados combinados										
Granulometrías de los agregados					Combinación			Materiales combinados, %.	Límites basados en ASTM C-33	
					19mm	12.7mm	Arena			
Tamiz #, mm	Pasantes, %.				45%		55%			
	19mm	12.7mm	Arena	26%	19%	55%				
2"	50.0	100	100	100	26	19	55	100	100	100
1 1/2"	37.5	100	100	100	26	19	55	100	100	100
1"	25.0	100	100	100	26	19	55	100	100	100
3/4"	19.0	93	100	100	24	19	55	98	95	100
1/2"	12.7	16.2	99	100	4	19	55	78	70	90
3/8"	9.5	5.2	76	100	1	14	55	71	60	80
4	4.75	2.0	10	100	1	2	55	57	50	70
8	2.36	1.5	1	83	0	0	46	46	30	60
16	1.18	0.0	0	47	0	0	26	26	12	46
30	0.60	0.0	0	19	0	0	11	11	7	17
50	0.30	0.0	0	8	0	0	4	4	0	10
100	0.18	0.0	0	2	0	0	1	1	0	5
200	0.075	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6. Curva de granulometría combinada



En la gráfica hay dos curvas más, que son el límite inferior y límite superior. No se encontró una serie de límites que comprendiera todos los tamaños de tamices por los que pasan ambas fracciones de agregados (gruesa y fina); pero, utilizando de referencia los determinados por la ASTM C-33 para los tres agregados separados, se fue delimitando un huso³ que contendría la curva de agregados totales.

Hacer la granulometría combinada definiendo límites a conveniencia es un método que se sustenta con lo que Pino et al, afirman que “no es posible ni necesario obtener en la práctica una granulometría que exactamente se corresponda con la “ideal”. Lo más apropiado es establecer curvas límites que formen un huso granulométrico, dentro del que pueden considerarse adecuadas”, con esto confirmando que éste método no se considera erróneo.

En Anexo 4 se muestran los gráficos de granulometría combinada para la masa total de agregados con sustituciones de agregado grueso y su comparación con la curva ideal de Fuller-Thompson, tanto para la masa total de agregados naturales como para las combinaciones con agregado reciclado, todas para TMN de 19 mm.

· **Comprobación por Fuller- Thompson**

Se sabe que en la práctica no existe la graduación ideal, pero se procura asemejarse a la curva idea (en este caso, la curva de Fuller-Thompson), por lo que comparó de manera gráfica la granulometría del agregado de 19 mm (natural y reciclado) combinadas con la grava de 12.7 mm ,obtenidas según el método anterior con la curva ideal de Fuller-Thompson hasta encontrar una curva que presentara un buen comportamiento; la curva de Fuller-Thompson se graficó siguiendo la Ec.1 mostrada en el Capítulo 1, en la página 18.

Después de varias iteraciones, se escogió utilizar una proporción de 58% de agregado de 19 mm y 42% de agregado de 12.7 mm para procurar un comportamiento de los agregados gruesos combinados similar a la ideal, como se

³ Se denomina huso como referencia a una zona delimitada, como los husos horarios.

muestra en los siguientes gráficos.

Gráfico 7. Grava natural de 19mm y de 12.7 mm (combinadas) vs. Curva ideal de Fuller-Thompson para tamaño nominal de 19 mm.

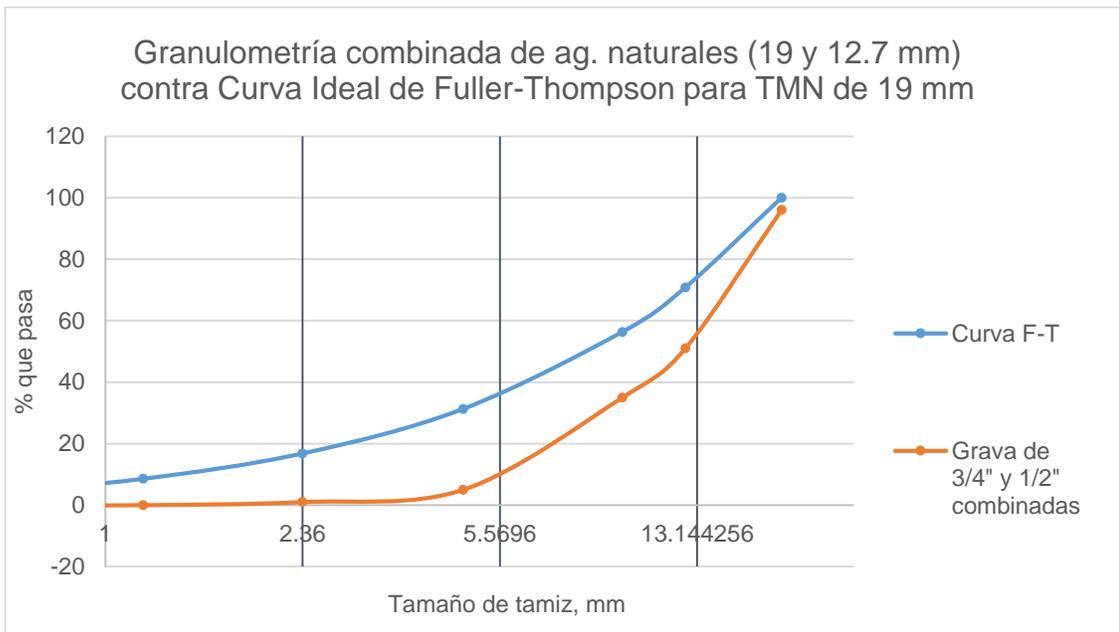
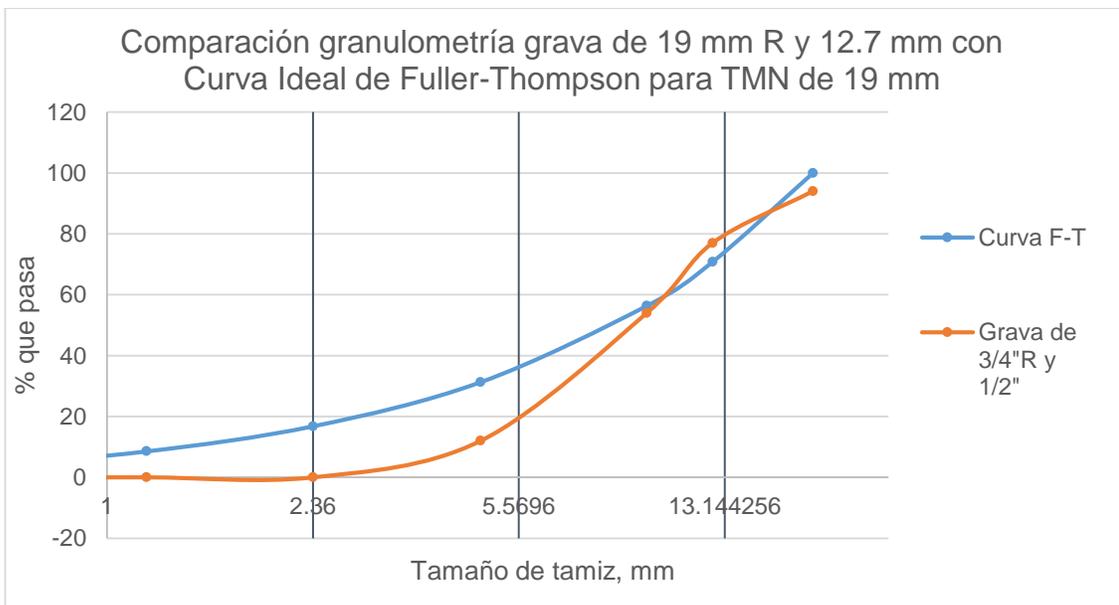


Gráfico 8. Grava de 19 mm reciclada (R) y de 12.7 mm natural (combinadas) vs. Curva ideal de Fuller-Thompson para tamaño máximo nominal de 19 mm.



Los gráficos 7 y 8 muestran el comportamiento de las combinaciones de los dos tamaños de agregados 19 mm y 12.7 mm naturales y 19 mm reciclada y 12.7 mm natural, en comparación con la curva ideal para el TMN de 19 mm. Se percibe que al combinar los dos tamaños de agregado se obtiene una mejor granulometría, lo más cercana (que se logró teóricamente) a la ideal. Se llegó a este porcentaje (42% y 58%) por prueba y error, siendo esta proporción la que funcionaba mejor para la combinación de naturales y la de natural con reciclado; aunque con este último, el comportamiento de la curva es más irregular con respecto a la ideal.

d. Desgaste

Los agregados de 19 mm, natural y reciclado se sometieron al ensayo de la Máquina de los Ángeles para conocer su resistencia al desgaste, según el ensayo ASTM C-131. Con este ensayo se conoce la calidad de material y se puede predecir la durabilidad del material ante agentes externos como la abrasión. El porcentaje de desgaste se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 19} \quad \% \text{ de pérdida} = \left[\frac{(C - Y)}{C} \right] \times 100$$

Donde:

C: masa de la muestra original

Y: masa final de la muestra

En la siguiente tabla se muestra los resultados del ensayo realizado a la grava natural y la grava reciclada

Tabla 22. Resistencia al desgaste de muestras de agregados de 19 mm				
Grava 19 mm	Grado muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Desgaste
Natural	B	5,009	3,332	33%
Reciclada	B	5,008	3,082	38%

Fuente: Elaboración propia

La norma ASTM C-33 menciona que para agregado grueso el porcentaje máximo de desgaste permitido es del 50%. Ambos agregados se encuentran dentro de rango, siendo mayor el desgaste del agregado reciclado.

La diferencia entre ambos resultados de desgaste fue de 5% mayor en el reciclado, esto se atribuye a que la abrasión tuvo más incidencia sobre el mortero adherido a las partículas de agregado reciclado, que sobre el árido en sí contenido dentro de las partículas; en cambio, el agregado natural si sufrió abrasión directa.

Hansen, en el reporte de RILEM (1992), dice que “agregados de concreto reciclado de incluso la peor calidad de concreto puede anticiparse que pasen los requerimientos de la ASTM y BS (British Standards) de porcentaje de pérdidas por abrasión de Los Ángeles”, lo que se confirmó para el agregado reciclado ensayado.

Imagen 18. Pesaje de material después de ensayo de desgaste sin lavar.



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS

3.1. Diseño de mezclas

Para la elaboración de los diseños se utilizó los pasos del manual del ACI 211.1 para el método basado en peso. Primero, se diseñó para el concreto convencional y posteriormente se ajustó los diseños hasta encontrar uno que tuviera buenos resultados durante la elaboración. Para conocer el volumen de agregados a utilizar se combinó el método propuesto por ACI 211, con el método de granulometría combinada, con el propósito de mejorar las granulometrías de los concretos y facilitar el proceso de cálculo cuando se utiliza más de un tamaño de agregado.

Ambos diseños (convencional y con agregados reciclados) se elaboraron bajo la premisa de cumplir con la resistencia de un concreto simple de 210 kg/cm^2 (3000 PSI) y poder ser utilizados en la práctica. El concreto convencional es utilizado como parámetro comparativo para el análisis del desempeño de los concretos reciclados.

Se elaboró cuatro mezclas, una para el diseño de concreto convencional y tres mezclas para los diseños de concreto con agregados reciclados. En las mezclas de concreto reciclado se sustituyó un porcentaje de la masa de agregado grueso natural por agregado reciclado, en proporciones del 30%, 50% y 75%.

3.1.1. Supuestos de diseño

Se propone:

- Un concreto para utilizar en columnas, vigas y muros reforzados.
- Una resistencia de diseño de 210 kg/cm^2 (3000 PSI) sin aire incluido.
- Utilizar un agregado de tamaño máximo 19 mm. (Para fabricar elementos estructurales propuestos debe tomarse en cuenta lo estipulado en la sección 6.3.2 del ACI 211.1 sobre tamaño máximo de agregado).

3.1.2. Proceso de diseño inicial

3.1.1.1 Selección del revenimiento

El revenimiento correspondiente a los supuestos de diseño especificados anteriormente es máximo de 100 mm y mínimo de 25 mm, según la Tabla A1.6.3.1 del ACI 211.1 (Ver Anexo 5)

3.1.1.2 Determinación del contenido de agua y aire

El contenido de agua aproximada de mezcla y contenido de aire se determinan según el tamaño máximo nominal propuesto (19 mm) y el revenimiento seleccionado (100-25 mm), utilizando la Tabla A1.6.3.3 del ACI 211.1 (Ver Anexo 5) Para este diseño corresponden 205 kg/m³ de agua y 2% de aire (por ser un concreto sin aire incluido).

3.1.1.3 Determinación de la relación agua/cemento (a/c)

Para determinar esta relación se debe conocer la resistencia a la compresión requerida a los 28 días (f'_{cr}), que es la resistencia de diseño f'_c (supuesta de 210 kg/cm²) ajustada con un factor de seguridad establecido en la Tabla 5.3.2.2 del ACI 318 (Ver Anexo 5), ya que no se cuenta con muestras disponibles para establecer una desviación estándar. Con la Ecuación 20 se calculó esta resistencia:

$$Ec. 20 \quad f'_{cr} = f'_c + 85 = 210 \frac{kg}{cm^2} + 85 \frac{kg}{cm^2} = 295 \frac{kg}{cm^2}$$

Obtenida la resistencia requerida, se calcula la relación a/c según la Tabla A1.6.3.4 (a), adaptada al Sistema Métrico por el INCYC⁴ como Tabla 9-3 (Ver Anexo 5). Se debe calcular por interpolación lineal, obteniendo un valor de 0.557 \approx 0.56.

⁴ Instituto Nicaragüense del Cemento y del Concreto

3.1.1.4 Cálculo del contenido de cemento

Partiendo de una relación a/c de 0.56 y un peso de agua de 205 kg/m³, se determina el contenido de cemento a utilizar para 1 m³ despejando de la Ecuación 21:

$$Ec. 21 \quad R_{a/c} = \frac{a}{c} \quad c = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.56} = 366.07 \approx 366 \text{ kg de cemento} = 8.61 \text{ bolsas}$$

3.1.1.5 Primera estimación del peso del concreto en estado fresco ⁵

De la tabla A1.6.3.7.1 se obtiene una primera estimación del peso de la mezcla de concreto de 2345 kg/m³, esto para un tamaño máximo nominal de 19 mm (propuesto). Partiendo de este peso se calculan los pesos de los materiales y su volumen para 1 m³.

3.1.1.6 Estimación de las masas de los materiales a través del método de Granulometrías Combinadas

Conociendo que la masa estimada de este concreto corresponde a 1 m³ de mezcla, se ajusta el volumen de los agregados dentro de la mezcla a su porcentaje de participación, determinado a través del método de granulometría combinada.

Se hizo uso del método de granulometría combinada, en primer lugar, porque se trabajó con tres agregados para la mezcla y en segundo lugar, porque se necesitaba porcentajes de participación de cada tamaño de agregado tales que al añadir los áridos reciclados no se afectara significativamente la granulometría total de la mezcla.

Los porcentajes de participación seleccionados convenientemente en este estudio para la mezcla convencional y en las recicladas, fueron 55% de arena, y 45% de

⁵ Se determina primero el peso del concreto, pues los pesos de los agregados se calcularon a través del método de Granulometría Combinada

agregado grueso, dividido entre 19% de grava de 12.7 mm y 26% de grava de 19 mm. (El análisis por granulometría combinada se describe en el Capítulo 2)

El volumen correspondiente a los áridos dentro de la mezcla es de 0.65 m³ que se distribuye entre los porcentajes de participación de cada árido, obteniendo como resultado el volumen de cada uno.

Con el volumen de cada agregado calculado según el porcentaje de participación, ya que se conoce su gravedad específica, se obtiene el peso de cada uno para 1 m³.

Agregado	Part. según GC	Base 1000 kg de ag.	Absorción	1+ Abs.	Peso sss	Vol. Para 1000 kg de ag.	Vol. real para 1m ³	Peso ag. Sin corregir
19 mm	26	260	1.98%	1.02	265.15	0.09	0.16	435.66
12.5 mm	19	190	2.09%	1.02	193.97	0.07	0.11	318.71
Arena	55	550	6.66%	1.07	586.62	0.23	0.38	963.89
TOTAL	100	1000				0.40	0.65	

Fuente: Elaboración propia

Utilizando una base de cálculo de un peso conocido de 1000 kg de agregados totales, se conoce el peso de cada agregado según los porcentajes de participación. Estos pesos se corrigen por la absorción, para obtener el peso de los agregados en condición SSS para 1000 kg. De los pesos para 1000 kg se obtiene el volumen para cada uno, que en total producen 0.40 m³ (Ver Ecuación 22), es decir que 1000 kg de estos agregados ocupan ese volumen. El volumen de 1000 kg de agregados se relaciona con el volumen real de los agregados totales del diseño que se obtiene restando a 1 m³ el volumen de pasta (Ver Ecuación 23 y 24). Con lo anterior resultan los pesos de los agregados en condición SSS para 1 m³, que deben ser corregidos por la humedad real y la absorción. Los pesos de los materiales según diseño y la dosificación se presentan en la Tabla 24 y 24(a).

$$Ec. 22 \quad Vol. de cada agregado = \frac{W_{SSS}}{GE_{SSS}}$$

$$Ec. 23 \text{ Vol. pasta} = \text{Vol. cemento} + \text{Vol. de agua} + \text{Vol. aire}$$

$$Ec. 24 \text{ Vol. total de ag.} = 1 \text{ m}^3 - \text{vol. pasta}$$

Tabla 24. Diseño Inicial de Mezclas			
Participantes	DATOS		
	G.E (kg/m ³)	Peso en 1m ³	Vol. Abs. (m ³)
Cemento	3150	366.00	0.13
Ag. 19 mm	2807	435.66	0.16
Ag. 12.5 mm	2792	318.71	0.11
Arena	2536	963.89	0.38
Agua	1000	205.00	0.21
Aire %			0.02
Peso volumétrico teórico (kg/m ³)		2289.27	1.00 m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24(a). Dosificación		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	366/366	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	753/366	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	963/366	3
Dosificación= 1:2:3		

Fuente: Elaboración propia

Los diseños adaptados para los concretos con sustitución por agregado reciclado, junto con sus dosificaciones, se obtuvieron a través del mismo procedimiento detallado anteriormente. Cada diseño para concreto con agregado reciclado se varió según la proporción de agregado reciclado a añadir en función del porcentaje de participación total calculado para el agregado grueso. Estos diseños se encuentran en el Anexo 6: Diseños iniciales para mezclas con concreto reciclado.

3.2. Elaboración de mezclas

3.2.1. Corrección por humedad

Antes de iniciar a elaborar cada una de las mezclas se obtuvo las humedades de los agregados para ajustar la cantidad requerida de agua.

Imagen 19. Determinación de la humedad de los agregados



Fuente: Elaboración propia

Como los materiales no se encontraban en la condición SSS, se determinó el contenido de humedad presente en los materiales para obtener los pesos en su condición real. Con la corrección por humedad, se modifica los pesos de los agregados y se ajusta la cantidad de agua de mezcla (agua para la pasta y para los agregados), mediante el siguiente procedimiento.

Se determina el contenido de agua de los agregados con la Ecuación 25:

$$Ec. 25 \quad Agua_{cont.} = \frac{\% \text{ de humedad} - \% \text{ de absorción}}{100} \times P_{SSS}$$

Como la humedad de los materiales resultó menor que la absorción, estos precisaban de agua para llegar a la condición SSS. Para no absorber del agua de diseño, se debió añadirle a ésta el agua requerida por cada material, obteniendo con ambas el agua de mezclado, como se muestra en la Ecuación 26:

$$Ec. 26 \quad Agua_{mez.} = Agua_{dis.} \pm \sum Agua_{cont.}$$

Al corregir el agua de mezclado, para mantener la proporción de 1 m^3 , se ajustó los pesos de cada uno de los materiales en relación con el nuevo peso del agua, que se hizo mediante la Ecuación 27:

$$Ec. 27 \quad W_{corr.} = W_{SSS} \pm Agua_{cont.}$$

En la siguiente tabla se muestran los pesos corregidos por humedad y el ajuste al agua de mezclado para esta bachada convencional:

Tabla 25. Corrección de pesos por humedad para mezcla convencional			
Material	Contenido de humedad	Agua (L)	Peso agregados (kg)
Ag. 19 mm	0.10%	-8.19	427.47
Ag. 12.7 mm	0.12%	-6.28	312.44
Arena	1.43%	-50.41	913.48
Agua contenida		64.88	
Agua de mezclado		269.88	

Fuente: Elaboración propia

De la misma manera, se obtuvo el agua de mezclado corregida de las bachadas con concreto reciclado. Estas correcciones se encuentran en el Anexo 7.

3.2.2. Proceso general de mezclado

Las mezclas se elaboraron siguiendo las especificaciones normadas en el ASTM C-192 para elaboración de mezclas en trompo, utilizando una mezcladora pequeña con capacidad para una bolsa de cemento, teniendo mucho cuidado en conservar la calidad de cada una.

Se pesó los materiales conforme al diseño inicial corregido por humedad. Primero se vertió el agregado grueso añadiendo una pequeña parte del agua de mezclado, posteriormente, después de unas cuantas rotaciones, se añadió el agregado fino y el cemento. Después de mezclado lo contenido en el trompo, se fue incorporando poco a poco el resto del agua de mezcla.

Teniendo los materiales en el trompo se fue agregando el agua poco a poco, ajustando el cemento y el agua según lo que precisara cada mezcla, para conseguir el revenimiento deseado y conservar la relación a/c. En las mezclas se observó un comportamiento similar, mostrando segregación y rigidez, por lo que se fue agregando poco a poco más de pasta (los ajustes realizados al diseño durante el mezclado se muestran en la sección siguiente).

Una vez obtenido el revenimiento, se midió el peso volumétrico suelto y compacto del concreto real del producido. Se procuró que el tiempo transcurrido desde el mezclado no fuera mayor a 20 minutos y que la temperatura del concreto se mantuviera por los 32 °C.

Cumpliendo con las características deseadas de la mezcla de concreto en estado fresco, se colaron los especímenes de prueba para conocer las características de cada mezcla en estado endurecido.

De cada mezcla se colaron 11 cilindros de 15.5 x 30.5 cm, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C-192. Los especímenes se desencofraron a las 24 horas y fueron sumergidos en la pila de curado hasta la edad de prueba.



Imagen 20. (Izq.)
Elaboración de
especímenes de prueba



Imagen 21. (Der.)
Curado de especímenes
de prueba

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Ajustes de diseño

a. Concreto convencional

Se observó segregación y rigidez en la mezcla, por lo que se fue agregando poco a poco agua y en consecuencia el cemento necesario para conservar la relación a/c supuesta.

En la siguiente tabla se muestran los materiales originales, lo adicional y los materiales finales en el trompo para el lote de 0.061 m³.

Tabla 26. Ajuste de materiales para mezcla convencional				
Material	u/m	Materiales iniciales	Ajuste durante mezclado	Materiales resultantes
Cemento	Kg	22.33	+1.01	23.34
Ag. 19 mm	Kg	26.08		26.08
Ag. 12.5 mm	Kg	19.06		19.06
Arena	Kg	55.72		55.72
Agua	Lt	16.46	+0.50	16.96
Peso total de mat.	Kg	139.65		141.16
			Vol. Real producido:	0.06 m ³

Fuente: Elaboración propia

b. Mezcla con agregado de 19 mm 30%R-70%N

Esta mezcla requirió más agua y más cemento, como la anterior. Como la participación del agregado reciclado en esta mezcla no era en gran proporción, se previó un comportamiento similar al del concreto convencional, por tanto lo añadido (agua y cemento) fue aproximadamente lo mismo, procurando que se conservase la relación a/c de 0.56. A continuación en la Tabla 27 se presentan los pesos iniciales para el lote de 0.061 m³, lo añadido y los pesos resultantes.

Tabla 27. Ajuste de materiales para mezcla con agregado de 19 mm 30%R-70%N				
Material	u/m	Materiales iniciales	Ajuste durante mezclado	Materiales resultantes
Cemento	Kg	22.33	+1.00	23.33
Ag. 19 mm	Kg	17.91		17.90
Ag. 19 mm Rec.	Kg	7.86		7.86
Ag. 12.5 mm	Kg	18.69		18.68
Arena	Kg	54.53		54.52
Agua	Lt	16.79	+0.55	17.35
Peso total de mat.	Kg	138.10		139.64
			Vol. Real producido:	0.06 m ³

Fuente: Elaboración propia

c. Mezcla con agregado de 19 mm 50%R-50%N

Esta mezcla al igual que la primera con agregados reciclados, requirió agua y cemento. Como el agregado reciclado se incrementó solo en 20% con respecto a la anterior, se previó un ajuste similar, de igual manera conservando la relación a/c de 0.56. Los pesos iniciales y los pesos resultantes para un volumen de 0.061 m³ se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 28. Ajuste de materiales para mezcla con agregado de 19 mm 50%R-50%N				
Material	u/m	Materiales iniciales	Ajuste durante mezclado	Materiales resultantes
Cemento	Kg	22.33	+1.02	23.35
Ag. 19 mm	Kg	12.62		12.62
Ag. 19 mm Rec.	Kg	13.06		13.06
Ag. 12.5 mm	Kg	18.47		18.47
Arena	Kg	54.07		54.07
Agua	Lt	16.53	+0.58	17.11
Peso total de mat.	Kg.	137.08		138.68
			Vol. Real producido:	0.06 m ³

Fuente: Elaboración propia

d. Mezcla con agregado de 19 mm 75%R – 25%N

Se procedió como con las mezclas anteriores y de igual manera se precisó hacer ajustes al agua y al cemento, respetando la condición de la relación a/c. Este ajuste resultó similar al realizado en las mezclas con menos participación del agregado reciclado. A continuación se presentan estos ajustes para los materiales:

Material	u/m	Materiales iniciales	Ajuste durante mezclado	Materiales resultantes
Cemento	Kg	22.33	+1.03	23.36
Ag. 19 mm	Kg	6.22		6.22
Ag. 19 mm Rec.	Kg	19.28		19.28
Ag. 12.5 mm	Kg	18.19		18.19
Arena	Kg	53.24		53.24
Agua	Lt	16.60	+0.58	17.18
Peso total de mat.	Kg	135.86		137.47
			Vol. Real producido:	0.06 m ³

Fuente: Elaboración propia

3.3. Diseños finales ajustados

El ajuste de diseño se hizo respecto al peso de los materiales para el peso volumétrico real obtenido de cada mezcla. De la elaboración de las mezclas se obtuvo un incremento del contenido de cemento que resultó en 9 bolsas para los diseños. Conocido el peso de la pasta para 9 bolsas y relación a/c 0.56, se calculó la masa de cada agregado conservando su porcentaje de participación inicial. Para realizar estos ajustes se utilizó las siguientes ecuaciones:

$$Ec. 28 \quad W_{total\ ag.} = W_{vol.} - (W_{agua} + W_{cem.})$$

El peso volumétrico es el varillado determinado en ensayo durante la elaboración de mezcla.

$$Ec. 29 \quad W_{c/ag} = W_{total\ ag.} \times \% \text{ de participación}$$

Los diseños finales ajustados se presentan a continuación:

a. Concreto convencional

Tabla 30. Diseño ajustado para concreto convencional		
Participantes	DATOS	
	% participación de agregados	Peso en kg
Cemento		383
Ag. 19 mm	26%	451
Ag. 12.5 mm	19%	330
Arena	55%	955
Agua		213
Peso Volumétrico (kg/m ³)		2,332

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30(a). Dosificación de diseño ajustado		
$\frac{W_{cemento}}{W_{cemento}}$	$\frac{383}{383}$	1
$\frac{W_{grava}}{W_{cemento}}$	$\frac{781}{383}$	2
$\frac{W_{arena}}{W_{cemento}}$	$\frac{955}{383}$	2.5
Dosificación = 1:2:2.5		

Fuente: Elaboración propia

b. Concreto con agregado de 19 mm 30%R – 70%N

Tabla 31. Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 30%R-70%N		
Participantes	DATOS	
	% participación de agregados	Peso en kg
Cemento		382
Ag. 19 mm Natural	18.2%	316
Ag. 19 mm Rec.	7.8%	135
Agregado 9.5 mm	19%	330
Arena	55%	955
Agua		214
Peso Volumétrico (kg/m ³)		2,332

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31(a). Dosificación de diseño ajustado		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{382}{382}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{781}{382}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{955}{382}$	2.5
Dosificación = 1:2:2.5		

Fuente: Elaboración propia

c. Concreto con agregado de 19 mm 50%R – 50%N

Tabla 32. Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 50%R-50%N		
Participantes	DATOS	
	% participación de agregados	Peso en kg
Cemento		383
Ag. 19 mm Natural	13%	222
Ag. 19 mm Rec.	13%	222
Agregado 9.5 mm	19%	324
Arena	55%	938
Agua		214
Peso Volumétrico (kg/m ³)		2302

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32(a). Dosificación de diseño ajustado		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{383}{383}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{768}{383}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{938}{383}$	2.5
Dosificación = 1:2:2.5		

Fuente: Elaboración propia

d. Concreto con agregado de 19 mm 75%R – 25%N

Tabla 33. Diseño final para concreto con agregado de 19 mm 75%R-25%N		
Participantes	DATOS	
	% participación de agregados	Peso en kg
Cemento		383
Ag. 19 mm Natural	6.5%	110
Ag. 19 mm Rec.	19.5%	331
Agregado 12.7 mm	19%	322
Arena	55%	932
Agua		214
Peso Volumétrico (kg/m ³)		2292

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33(a). Dosificación de diseño ajustado		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{383}{383}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{768}{383}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{938}{383}$	2.5
Dosificación = 1:2:2.5		

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4. CONTROL DE CALIDAD AL CONCRETO

4.1. Pruebas de control de calidad al concreto en estado fresco

a. Temperatura

De acuerdo con el ACI 305, la temperatura máxima del concreto permisible para colocación en climas cálidos, es 35°C (95°F). Durante la elaboración de cada mezcla, se mantuvo control de la temperatura del concreto. La temperatura de cada mezcla se tomó simultáneamente con las pruebas de revenimiento, controlando que la temperatura de la mezcla no se elevara en gran medida. Como se muestra en la Tabla 34, en las cuatro mezclas fabricadas, las temperaturas se mantuvieron por debajo de los 35° C (91.5°F). La mayor temperatura registrada fue de 33.4°C.

Tabla 34. Temperaturas registradas	
Tipo de concreto	Temperatura
Convencional	33.4 ° C
30%R-70%N	31.4 ° C
50%R-50%N	33 ° C
75%R-25%N	33 ° C

Fuente: Elaboración propia

Las mezclas se realizaron entre diciembre y febrero, meses en que predomina un clima caluroso durante el día con bajas temperaturas por la noche, con pocas precipitaciones, en forma de brisa ligera. En la tabla anterior se observa como se ve afectada la temperatura de la mezcla según la temperatura ambiente, casi todas las mezclas fueron elaboradas por la tarde exceptuando la mezcla de 30% Reciclado-70% Natural; las mezclas elaboradas por la tarde presentaron temperaturas similares de 33°C mientras la mezcla de 30%R-70%N colada por la mañana, presentó un temperatura menor (31.4°C). Esto se puede atribuir a la temperatura de los agregados, que aunque se procuró mantener fuera del sol, se vieron afectados por el aumento de la temperatura ambiente.

b. Revenimiento

Los revenimientos obtenidos a través del ensayo fueron entre 75mm y 125mm. Según estos resultados, se obtuvo una mezcla media, útil para losas, muros vigas y columnas.

El ensayo de revenimiento se realizó siguiendo el procedimiento especificado en la norma ASTM C-143. Se controló la cantidad de agua a añadir a la mezcla

para una consistencia trabajable con revenimiento de $100 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$. En la Tala 35 se muestra los resultados de cada mezcla,, como se observa en la tabla, se trató de mantener la consistencia de las mezclas, y se consiguió procurando obtener un revenimiento igual o similar entre las cuatro mezclas, sin alterar los tiempo de mezclado.

Imagen 22. Ensayo de revenimiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Datos de revenimiento		
Tipo de concreto	Rev. (Pulg.) / (mm)	
Convencional	3.25	82.5
30%R-70%N	4.25	108
50%R-50%N	3.5	89
75%R-25%N	3.5	89

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 36 se presenta la cantidad de pasta por mezcla, obtenida de la suma de la cantidad de agua más el peso del cemento para 1 m^3 (ver ajuste de diseño en el Capítulo 3, sección 3.2.3).

Como se observa en la tabla, el concreto reciclado requirió 1 kg más de pasta en comparación al concreto convencional, entre las mezclas recicladas el consume de pasta aumentó proporcionalmente a la cantidad de reciclado presente en la mezcla, sin embargo no difiere en más de 500 g entre cada una.

Tabla 36. Cantidad de Pasta en Mezclas			
Tipo de concreto	Cantidad de cemento (kg)	Cantidad de agua (kg)	Cantidad de pasta (kg)
Convencional	382.56	213	595.56
30%R-70%N	382.39	214	596.39
50%R-50%N	382.56	214	596.6
75%R-25%N	382.89	214	596.9

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior se debe a que el agregado reciclado necesita una película de pasta más densa para cubrirse; principalmente porque posee una superficie específica mayor por la cantidad de finos y también que el agregado reciclado posee una forma irregular, lo que no confiere buena fluencia de los agregados dentro de la mezcla.

Otro factor que influye en la trabajabilidad de las mezclas con agregados reciclados es el mortero adherido a sus partículas, el cual inmediatamente al entrar en contacto con el agua de mezclado se empieza a desprender en forma de lechada, aportando fluidez a la mezcla. A esto se atribuye que para conseguir un mismo revenimiento entre mezclas con reciclado y la mezcla convencional no se necesita aumentar drásticamente la cantidad de pasta en las mezclas con reciclados.

c. Peso volumétrico del concreto

Para cada diseño de mezcla se obtuvo pesos unitarios teóricos, los cuales sirven de parámetro para controlar los resultados del ensayo donde se determina el peso unitario del concreto fresco. Este ensayo se realizó siguiendo la especificación ASTM C-138. Durante el ensayo se toma una muestra de la mezcla elaborada la cual es pesada en un molde cilíndrico.

A continuación se muestran los resultados de los pesos unitarios obtenidos por el método volumétrico:

Tabla 37. Pesos Volumétricos			
Tipo de concreto	Peso Volumétrico Teórico (kg/m ³)	Peso Volumétrico Suelto (kg/m ³)	Peso Volumétrico Compacto (kg/m ³)
Convencional	2,289	2,169	2,332
30%R-70%N	2,263	2,236	2,332
50%R-50%N	2,247	2,222	2,302
75%R-25%N	2,227	2,174	2,292

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 37 se obtuvieron pesos volumétricos similares entre las cuatro mezclas con una diferencia no mayor a 100 g entre ellas. Todos los resultados se encuentran entre el rango típico de concretos de peso normal. El peso unitario de las mezclas es inversamente proporcional al porcentaje de sustitución de los agregados reciclados, es decir, a medida que el porcentaje de agregado reciclado aumenta, el peso unitario del concreto disminuye. Esto se debe a las características del material reciclado que es aproximadamente 15% más liviano que el agregado natural.

Imagen 23. Ensayo de Peso Volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Respecto al peso teórico, los pesos reales presentan una ligera variación, los pesos volumétricos compactos superan los valores de los pesos volumétricos teóricos, lo que indica que los concretos elaborados tienen buena densidad y no hay exceso de agua.

- **Rendimiento**

El rendimiento o volumen producido por mezcla, se obtuvo de la división de los pesos de los materiales utilizados para producir 1 m³ de concreto entre el peso

unitario real obtenido a través del ensayo de peso volumétrico mostrado en la Tabla 38. En ella se observa un rendimiento entre el 98% y 99% de las mezclas en relación con 1 m³.

Tabla 38. Rendimiento de la mezcla			
Tipo de concreto	Peso de los materiales (kg)	Peso Unitario (kg/m ³)	Vol. De concreto producido (m ³)
Convencional	2,314	2,332	0.99
30%R-70%N	2,289	2,332	0.98
50%R-50%N	2,185	2,302	0.99
75%R-25%N	2,169	2,292	0.98

Fuente: Elaboración propia

- **Contenido de cemento**

Tabla 39. Contenido de cemento			
Tipo de concreto	Masa de cemento (kg)	Vol. De concreto producido (m ³)	Masa de cemento para 1 m ³ (kg)
Convencional	382.56	0.99	387
30%R-70%N	382.39	0.98	390
50%R-50%N	382.56	0.99	387
75%R-25%N	382.89	0.98	391

Fuente: Elaboración propia

Las mezclas elaboradas rindieron casi el 100%, por lo que el consumo de cemento de la mezcla varía alrededor de 4 kg por m³. Se puede observar en la Tabla 39 que la mezcla con 50% de reciclado presentó mejor rendimiento entre las tres mezclas recicladas y un comportamiento similar a la mezcla convencional.

4.2. Pruebas de control de calidad al concreto en estado endurecido

a. Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión del concreto se realizó de acuerdo con la norma ASTM C-39. Los especímenes de prueba se ensayaron a 3 diferentes edades: 7, 14 y 28 días. Por cada edad se ensayó 3 cilindros de 15 x 30 cm (6" x 12"). Para hacer el ensayo se tomó las muestras de la edad correspondiente de la pila de curado aproximadamente una hora antes para dejarlos secar, una vez secos, se tomó los datos de su masa y dimensiones para posteriormente romperlos.

Imagen 24. Ensayo Resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

De la ruptura de los cilindros se obtiene la carga a la que el cilindro falló, la cual dividida entre el área de contacto es igual a la carga máxima a la cual falló el concreto, como se ve en la siguiente ecuación:

$$Ec.30 \quad \text{Resistencia a la compresión} = \frac{\text{carga máxima}}{\text{Área de contacto}}$$

En la Tabla 40 se muestra las resistencias a la compresión de todos los cilindros ensayos por cada edad. Para obtener los resultados promedios se descartó los resultados no representativos, que corresponden a datos menores de resistencia que difieran en 10% del cumplimiento y/o 15 kg/cm² en relación a los demás resultados de ensayo de la misma edad. Luego en la Tabla 41 se resume los promedios obtenidos de los datos de ensayo, excluyendo algunos resultados no representativos.

Tabla 40. Resistencias a la compresión de cilindros de concreto					
Concreto	Id. Muestra	f'c Kg/cm ²	Cumplimiento %	f'c Kg/cm ² (prom.)	Cumplimiento % (prom)
Convencional	7d-1	214.0	101.9	212.4	101.1
	7d-2	206.2	98.2		
	7d-3	217.0	103.3		
	14d-1	277.8	132.3	302.2	143.9
	14d-2	295.9	140.9		
	14d-3	308.5	146.9		
	28d-1	367.9	175.2	366.0	174.3
	28d-2	364.1	173.4		
	28d-3	365.9	174.2		
30%R-70%N	7d-1	165.6	78.8	161.2	76.8
	7d-2	161.6	76.9		
	7d-3	156.4	74.5		
	14d-1	240.4	114.5	234.7	111.8
	14d-2	232.5	110.7		
	14d-3	231.3	110.2		
	28d-1	288.2	137.2	288.8	137.5
	28d-2	290.5	138.3		
	28d-3	287.7	137.0		
50%R-50%N	7d-1	173.1	82.4	171.9	81.9
	7d-2	170.8	81.3		
	14d-1	233.7	111.3		
	14d-2	226.7	107.9	230.0	109.5
	14d-3	229.6	109.3		
	28d-1	292.5	139.3		
	28d-2	289.2	137.7	294.5	141.2
	28d-3	301.7	143.7		
	75%R-25%N	7d-1	165.5	78.8	160.8	76.6
7d-2		161.9	77.1		
7d-3		155.0	73.8		
14d-1		220.0	104.8	226.8	108.0
14d-2		234.4	111.6		
14d-3		225.9	107.5		
28d-1		259.9	123.8	273.9	130.4
28d-2		277.5	132.2		
28d-3		270.4	128.7		

Nota 1: El cilindro 7d-3 de la mezcla 50%R-50%N se dañó al momento de desencofrar

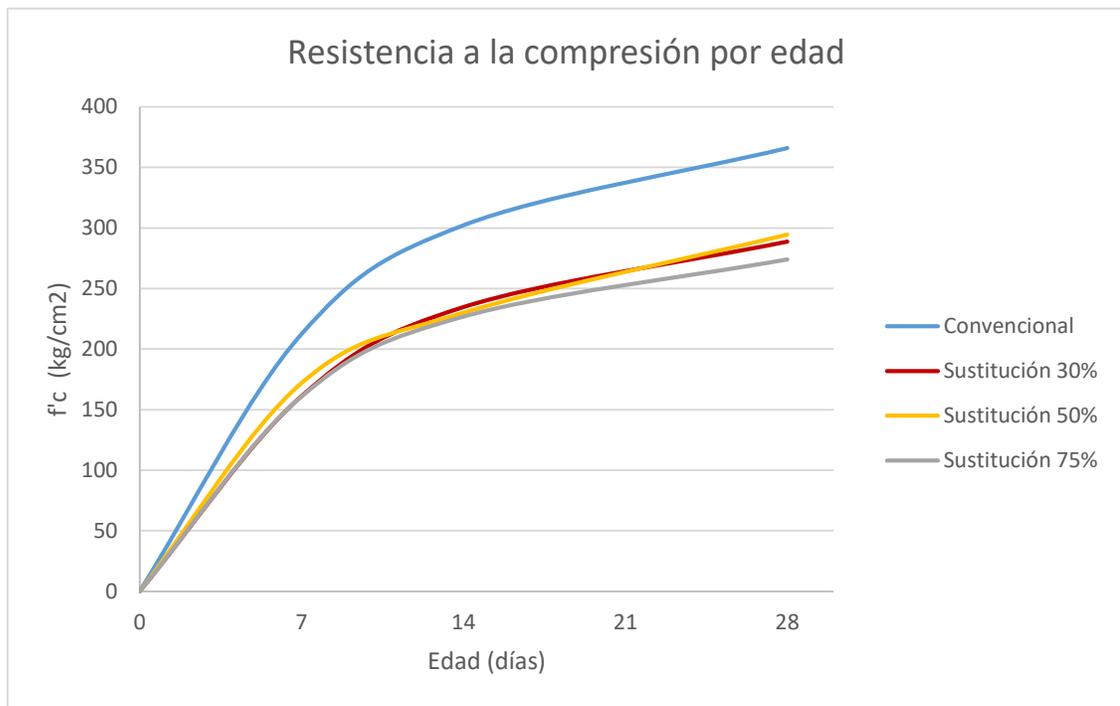
Nota 2: Las cifras tachadas son valores de ensayo descartados por ser no representativo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Promedio de la resistencia a la compresión (Kg/cm ²)			
Tipo de concreto	7 días	14 días	28 días
Convencional	212	302	366
30%R-70%N	161	235	289
50%R-50%N	172	230	295
75%R-25%N	161	227	274

Fuente: Elaboración propia

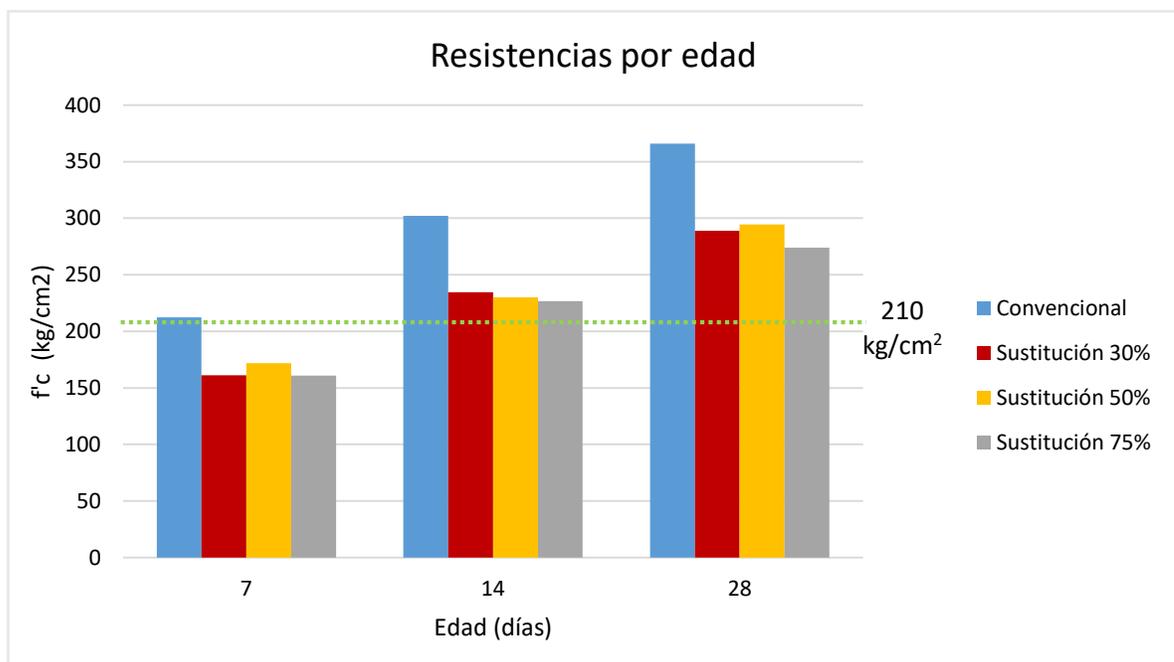
Gráfico 9. Resistencia a la compresión por edad de cada mezcla de concreto



Se trabajó con un resistencia a la compresión de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ más un factor de seguridad de 85 kg/cm^2 , para una resistencia requerida de $f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$. Las cuatro mezclas de concreto cumplieron con la resistencia de diseño 210 kg/cm^2 . El concreto convencional superó por mucho el diseño establecido, lo cual es de esperarse ya que la proporción se hizo buscando un diseño que pudiera ser funcional para cualquiera de los tres porcentajes de sustitución. Los concretos elaborados con agregados reciclados todos cumplieron con la resistencia de diseño hasta en un 130% de esta.

Si se compara los resultados de las mezclas con reciclados con la mezcla convencional, la mezcla de 30% disminuye en 21% la resistencia, la de 50% disminuye 19% y la mezcla de 75% disminuye 25%. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento no esperado ya que, como se muestra en el gráfico, para este diseño, de las mezclas recicladas, el concreto con 50% de agregado reciclado presentó mejor comportamiento en comparación con las otras dos mezclas

Gráfico 10. Comparación de mezclas por resistencias alcanzadas



En este gráfico se observa como mezcla convencional alcanza resistencias mucho más altas que las mezclas con agregado reciclado. La mezcla con 50% de sustitución presenta valores mayores a las mezclas de 30% y 75% de sustitución, a las edades de 7 y 28 días. A los 14 días las tres mezclas presentan un comportamiento similar siendo la mezcla de 30% de sustitución la que presenta ligeramente un mejor resultado. La mezcla del 75% presenta los menores resultados durante las tres edades de ensayo. Aunque los datos son menores, se puede observar que esta mezcla se mantiene competente ya que los resultados no son excesivamente bajos.

4.3. Resumen de resultados de las propiedades de los concretos

Tabla 42. Cuadro comparativo de las propiedades de las mezclas de concreto					
Tipo de concreto	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Revenimiento (mm)	Cantidad de pasta (kg)	Resistencia a la compresión 28 días (kg/cm ²)	% Cumplimiento o f'c = 210 kg/cm ²
Convencional	2,332	82.5	595.56	366	174 %
30%R-70%N	2,332	108	596.39	289	137%
50%R-50%N	2,302	89	596.6	295	142%
75%R-25%N	2,292	89	596.9	274	131%

Como se observa en la Tabla 42, los concretos con agregado reciclado presentan menor masa unitaria al sustituir el 50% y 75% del agregado grueso mientras que con el 30% se mantiene su peso unitario. El revenimiento se trató de mantener similar durante la elaboración de mezclas, las cuatro mezclas cumplen con el revenimiento establecido del 100 mm \pm 25 mm, para cumplir con este parámetro, se obtuvo como resultado un incremento de pasta de 1 kg en los concretos elaborados con agregados reciclados.

En relación a la resistencia a la compresión a los 28 días, las cuatro mezclas de concreto cumplen con los requerimientos mínimos de resistencia de 210 kg/cm². Siendo el concreto de mezcla convencional el que presenta mayores resultados; cumpliendo con el 74% mayor a la resistencia de diseño.

Las mezclas de concreto con agregado reciclado presentaron resultados no esperados ya que la mezcla con resultados de resistencia más altos fue la mezcla con 50% de agregado reciclado, por lo que se considera que cuando existe una distribución equitativa entre agregado natural y reciclado hay un mejor acomodamiento de las partículas dentro de la mezcla.

La mezcla con 30% de agregado reciclado cumple con el 137% de la resistencia de diseño y la mezcla de 75% agregado reciclado, presenta resultados 10% menores a la mezcla de 50% agregado reciclado sin embargo cumple con el 131% de la resistencia de diseño. Por tanto, aun presentando menos resultados de resistencia, cumplen con los parámetros para los cuales fueron diseñados lo que indica que estos concretos son funcionales y su calidad satisfactoria.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las propiedades físicas de los áridos naturales utilizados presentan un comportamiento normal en relación con las especificaciones de agregados para concretos, presentando ligeras deficiencias en su graduación; especialmente la arena, cuyo módulo de finura resultó más alto que el estándar permitido por la norma ASTM C-33. Sin embargo, tuvieron un buen desempeño en las mezclas de este estudio, lo que se logró comprobar con los resultados obtenidos.
- El agregado grueso de concreto reciclado para un tamaño nominal de 19 mm presenta un buen comportamiento y cumple con las condiciones estipuladas en la norma ASTM C-33, y otras especificaciones de agregados para concreto (Boletín E1-99 del ACI, ACI 221R-96 y Manual de la Asociación de Cemento Portland), por lo tanto sí se puede utilizar en mezclas de concreto.
- El agregado grueso de concreto reciclado de 19 mm al ser comparado con agregado natural del mismo tamaño, presenta mayor porcentaje de partículas finas y de absorción, menores valores de densidad y masa unitaria. Estos resultados se atribuyen al mortero adherido en sus partículas.
- El método de Granulometrías Continuas o Granulometrías Combinadas es una herramienta válida que se utilizó para distribuir la participación de los agregados dentro de la mezcla de concreto, ya que estos no contaron con la granulometría óptima. Dando como resultado la combinación de 45% agregado grueso, 55% agregado fino. Sin embargo no se puede afirmar que haya tenido mayor influencia en este estudio.
- Para obtener un concreto con una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², tamaño máximo de agregado de 19 mm y un revenimiento de 100 mm, utilizando porcentajes de sustitución de los agregado naturales por reciclados de 0%, 30%, 50% y 75%, la dosificación adecuada es 1:2:2.5.

- El concreto diseñado, tanto con agregado natural como reciclado, puede ser utilizado en vigas, columnas y paredes, así como en obras menores, como de equipamiento urbano, ya que cumple con las resistencias mínimas requeridas para las que fue diseñado.
- Las mezclas de concreto elaboradas con agregados reciclados en comparación a la mezcla de concreto convencional, presentan menor masa unitaria a medida que aumenta la participación de agregado reciclado, mayor requerimiento de pasta para mantener la trabajabilidad definida y la relación agua/cemento, así como menores resultados de resistencia a la compresión.
- Todas las mezclas de concreto elaboradas en este estudio cumplieron con los parámetros de diseño establecidos, por lo tanto se pueden elaborar mezclas con agregado reciclado sustituyendo hasta en 75% el agregado natural. En estudio la mezcla de concreto con agregado reciclado seleccionada como la que presenta el comportamiento óptimo es la mezcla con sustitución del 50% de agregado reciclado ya que presenta los mayores resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.

5.2.Recomendaciones

- Si se desea reproducir los diseños de concretos de este estudio (tanto el convencional como los que contienen agregados reciclados) es aconsejable que se utilicen las mismas fuentes de agregados, ya que con estos se obtuvo buenos resultados.
- Prestar atención al comportamiento actual de la arena del banco Motastepe y/o buscar otras fuentes para obtener arenas más finas, como explotación de otros bancos o producción de arenas industriales, pues los valores encontrados de sus propiedades ya no aportan a la calidad de las mezclas de concreto.
- Estudiar otras fuentes de agregados reciclados como concretos de demoliciones, de adoquines desechados u otras carpetas de rodamiento, etc. Y antes de emplearlos en mezclas de concreto, analizar sus propiedades, pues sus características pueden variar según el concreto de origen.
- Analizar las propiedades del concreto reciclado como sustituto del agregado fino y su comportamiento en mezclas de concreto.
- Considerar las propiedades químicas de los agregados reciclados para prever su comportamiento en mezclas de concreto expuestas a condiciones especiales.
- Demostrar de forma más específica que el uso del método de granulometrías continuas o granulometrías combinadas, mejora la graduación de los agregados locales para su utilización en mezclas de concreto. Para ello, se recomienda realizar el ensayo de contenido de vacíos en mezclas de concreto (ASTM C-173) como demostración física.
- Se sugiere se observe con atención el comportamiento de las mezclas con agregados reciclados durante su elaboración pues no se asegura que se mantenga el mismo comportamiento al variar la procedencia del material reciclado.

- Estudiar la incidencia del uso de aditivos en mezclas con agregados reciclados.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y PUBLICACIONES FÍSICAS CONSULTADAS O CITADAS:

- Akroyd, T. N. W. (1962). *Concrete: Properties and manufacture*. London. Oxford.
- Alexander, M. and Mindess, S. (2005) *Aggregates in Concrete*. USA and Canada. Taylor and Francis.
- Bartos, P. J. M., Cleland, D. J. and Marrs, D. L., (2004). *Production Methods and Workability of Concrete. Proceedings of the International RILEM Conference*. E & FN Spon, Chapman & Hall.
- Bojacá, N. (2013). *Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos con Agregado Reciclado* (tesis de grado). Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito".
- Buck, A. D. (1977). *Recycled Concrete as a Source of Aggregate*. Journal Proceedings. American Concrete Institute. Vol.74 , pp. 212-219.
- Cassinello P., F. (1996). *Construcción: Hormigonería*. Edición 2. Madrid, España. Editorial Rueda e Instituto Juan de Herrera.
- Couto R., C., da Silva P., Joana y Starling, Tadeu. (2003). *Materiais de Construção Civil*. 2º Edição. Belo Horizonte, Brasil. Editora UFMG e Escola de Engenharia da UFMG.
- Delatte, N. J., (2014). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*, 2nd Ed. Florida, USA. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Dhir, R. K. and McCarthy, M. J., (1999) *Concrete Durability and Repair Technology*. Thomas Telford Publishing.
- Domínguez Lepe, J. A.; Martínez L., Emilio (2007). *Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas*. Revista Académica Ingeniería. Vol. 11, n°3. Pp43-54. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Gani, M.S.J., (1997). *Cement and Concrete*. Great Britain. Chapman & Hall.
- Gambhir, M. L. (2013). *Concrete Technology: Theory and Practice*. 5th Ed. New Delhi, India. McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Gluzhge, P., (1946) *The Work of Scientific Research Institutes*. Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo, No. 4, pp 27-28, USSR.

- Hansen, T. C. y Narud, H. (1983). *Strength of Recycled Concrete Made From Crushed Concrete Coarse Aggregate*. Concrete International. American Concrete Institute. Vol. 5, n° 1, pp 79-83.
- Harmsen, T. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Cuarta Edición. Lima, Perú. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Komatska, S. H., Kerkhoff, B. and Panarese, W. C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th Ed. Illinois, USA. Portland Cement Association (PCA).
- Lamond, J. F. and Pielert, J. H. (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*. Issue 169. Part 4. USA. ASTM International.
- Love, T. W. (2001). *Construction Manual: Concrete & Formwork*. Craftsman Book Company.
- Martinelli, E., Lima, C., Pepe, M. and Faella, C. (2017) "Concrete with Recycled Aggregates: Experimental Investigations", in Recent Advances on Green Concrete for Structural Purposes: The Contribution of the EU-FP7 Project Encore. Springer
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2013). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. Fourth Edition. McGraw-Hill
- Mindess, S., Young, J. F. and Darwin, D. (2003). *Concrete*, 2nd Ed. Pearson
- Ministerio de Transporte e Infraestructura (2007). *Reglamento Nacional de Construcción*. Managua, Nicaragua. MTI.
- Nawy, E. G. (2008). *Concrete Construction Engineering Handbook*. 2nd Ed. Florida, USA. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Neville, A. M. and Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. Second Edition. Prentice Hall.
- Neville, A. M. (2006). *Concrete: Neville's Insights and Issues*. First Edition. London, United Kingdom. Thomas Telford Publishing.
- Niño H., J. R. (ed.) (2010). *Tecnología del Concreto Tomo I: Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas*. Tercera Edición. Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Olorusongo, F.T. (1999). *Early Age Properties of Recycled Aggregate Concrete*. Proceeding of the International Seminar on Exploiting Wastes in Concrete held at the Mixed Concrete Association.

Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha J.A., Ding, Y. and de Brito, J. (Ed.) (2013) *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Civil and Structural Engineering, n°47. United Kingdom. Woodhead Publishing. Pp 31-33.

Portland Cement Association (1988). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Engineering Bulletin. PCA.

RILEM, 1992. *Recycling of demolished concrete and masonry*. Report #6. Editor T.C. Hansen. Taylor and Francis.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana.

Soroka, I. (2003). *Concrete in hot environments*. Taylor and Francis e-Library.

Spence, W. P., Kultermann, E. (2016). *Construction Materials, Methods, and Techniques. Building for a Sustainable Future*. 4th Ed. Boston, USA. Cengage Learning.

Vidaud Quintana E., Vidaud Quintana I., (2015) “*Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados*”. Revista Construcción y Tecnología de Concreto.

Walker, D. D., (1991). *Innovations and Uses for Lime (Issue 1135)*. ASTM International.

PUBLICACIONES ELECTRÓNICAS (NO IMPRESAS O DE LA WEB) CONSULTADAS O CITADAS:

ACI Committee 211 (1991). *211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Consultado en <https://es.scribd.com/doc/62275484/2-Norma-ACI-211-1>

ACI Committee 318 (2011) 318S-11: *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.

ACI Committee 555 (2002) R-01: *Removal and Reuse of Hardened Concrete*.

ALGIROS (2011). Parque fluvial del Turia (imagen). Tomada de <http://www.skyscrapercity.com>

Aragón A. Juan, Vargas C. Armando (2016) *Propuesta de utilización del concreto reciclado como material estructural en edificaciones de baja altura en la ciudad de Managua, Nicaragua* (tesis de grado). Universidad Centroamericana, Managua Nicaragua

Arriaga T., L. (2014) *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (tesis de grado). Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito". Consultado durante Febrero 2017 de <http://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/118>

ASTM Standards (2013). Consultados en <https://www.astm.org/Standards/C566.htm>

Bedoya, C., Dzul, L. (2015). *El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana*. En: Revista Ingeniería de Construcción 30 (2). Recuperado de http://www.scielo.cl/pdf/ric/v30n2/en_art02.pdf

Blanco R., M. y Matus L., I. (s.f.). Guías de laboratorio Materiales de Construcción. Consultado en <http://www.ftc.uni.edu.ni>

Cement and Concrete Association of New Zealand (Ed.) (2011). *TR 14 Best Practice Guide for the use of Recycled Aggregates in New Concrete*. CCANZ. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/218861258/Recycled-Aggregates-in-New-Concrete>

Ensayes de concreto en estado fresco. (Imagen). Tomada de <http://www.imcyc.com/laboratorio/index.php/laboratorio-de-concreto>

Guía española de áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Proyecto GEAR 2008-2011.

Lara, R. (2014). Cercan escombros de la vieja Managua. (Fotografía). Tomado de <http://www.elnuevodiario.com.ni/managua/321388-cercan-escombros-vieja-managua/>

NTON 05 014-02. *Norma Técnica Ambiental para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de los Desechos Sólidos No-Peligrosos*. Diario Oficial La Gaceta, n° 96. Managua, Nicaragua. 24 de Mayo del 2002. Consultado en <http://legislacion.asamblea.gob.ni>

NTON 12 006-11. *Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense sobre Fabricación, uso y manejo del Cemento*. Diario Oficial La Gaceta, n° 126. Managua, Nic. 05 de Julio del 2012. Consultado en <http://legislacion.asamblea.gob.ni>

Process of Waste Concrete Recycling. (Figura). Tomada de <https://theconstructor.org/concrete/concrete-recycling/755/>

Rotura por compresión de cilindro de mortero (Fotografía). Tomada de <http://www.aconstructoras.com/images/compresioncilindromortero.jpg>

Shilstone, J. (1990). *Concrete Mixture Optimization*. Concrete International. Consultado en <http://www.shilstone.com/library>.

Wikipedia (ed.) (2017). Concrete from a building being sent to a portable crusher. This is the first step to recycling concrete. (Fotografía). Tomado de https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_recycling

(Sin autor, sin fecha). *Recycled aggregates*. Portland Cement Association. Consultado el 28 de enero 2017 de <http://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-design-production/recycled-aggregates>

(Sin autor, sin fecha). Presentación de PP. "Proporcionamiento y dosificación de mezclas de concreto" basado en ACI 211.1. Instituto Nicaragüense del Cemento y el Concreto.

ANEXOS

ANEXO 1. Requisitos granulométricos ASTM C 33

Tabla A1(a). Requisitos granulométricos del agregado fino

Tamiz estándar	% en peso (del material) que pasa el tamiz
3/8"	100
#4	95 a 100
#8	80 a 100
#16	50 a 85
#30	25 a 60
#50	5 a 30
#100	0 a 10

Fuente: Tomado de la designación ASTM C 33

Tabla A1(b). Requisitos granulométricos del agregado grueso

Tamaño no.	Tamaño Nominal	Cantidades más finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), Porcentaje en peso												
		4" (100mm)	3 ½" (90mm)	3" (75mm)	2 ½" (63mm)	2" (50mm)	1 ½" (37.5mm)	1" (25.0mm)	¾" (19.0mm)	½" (12.5mm)	⅜" (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36mm)	No. 16 (1.18mm)
1	3 ½" a 1 ½" (90 a 37.5 mm)	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	2 ½" a 1 ½" (63 a 37.5 mm)	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	2" a 1" (50 a 25.0 mm)	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
357	2" a No.4 (50 a 4.75 mm)	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...
4	1 ½" a ¾" (37.5 a 19 mm)	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
467	1 ½" a No. 4 (37.5 a 4.75 mm)	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...
5	1" a ½" (25.0 a 12.5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	1" a ⅜" (25.0 a 9.5 mm)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	1" a No.4 (25.0 a 4.75 mm)	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...
6	¾" a ⅜" (19.0 a 9.5 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	¾" a No.4 (19.0 a 4.75 mm)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...
7	½" a No. 4 (12.5 a 4.75 mm)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...
8	⅜" a No. 8 (9.5 a 2.36 mm)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Fuente: Tomada de la designación ASTM C 33

ANEXO 2. Datos Técnicos del Cemento Canal

Tabla A2(a). Certificado de Calidad del Cemento Canal






CERTIFICADO DE CONFORMIDAD

Fecha de Emisión: 09 de Marzo de 2018

Producto: CANAL
 Clasificación: GU
 Norma de producción: NTON 12 006-11
 Norma bajo la cual se realizan los ensayos de Resistencia de la Compresión: ASTM C-109
 Norma bajo la cual se realizan los análisis químicos: ASTM C114
 Método mediante el cual se realizan los análisis químicos: XRF
 Fecha de producción: Mes de Febrero 2018

Ensayos Físicos			
Finezas	Fraguados		
Tamiz 325(%Ret.)	11.30	Vicat Inicial (min.)	200.0
Blaine(cm ² /g)	4,290.0	Vicat Final (min.)	295.0
			NTON 12 006-11 min, 45 max, 420
Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa) NTON 12 006-11	Ensayos varios	
3 Días	12.0	Exp. Autoclave(%)	0.04
7 Días	18.0	Flujo de Agua(%)	109
28 Días	28.5		NTON 12 006-11 0.8 -----

Este informe fue firmado por:

lic. Juan Antonio Cordoba
Control de la Calidad
CEMEX NICARAGUA

Fuente: Cemex Nicaragua

Tabla A2(b). Propiedades Físico-Químicas del cemento

Sección 9 – Propiedades Físico-Químicas

Estado físico	Sólido	Taza de evaporacion	NA
Apariencia	Blanco o Grisáceo	pH	12-13
Olor	Ninguno	Punto de ebullicion	>1000°C
Presión de vapor	NA	Punto de congelacion	Ninguno
Densidad de vapor	NA	Viscocidad	Ninguno
Gravedad específica	2.85 g/cm ³	Solubilidad en agua	Insignificante

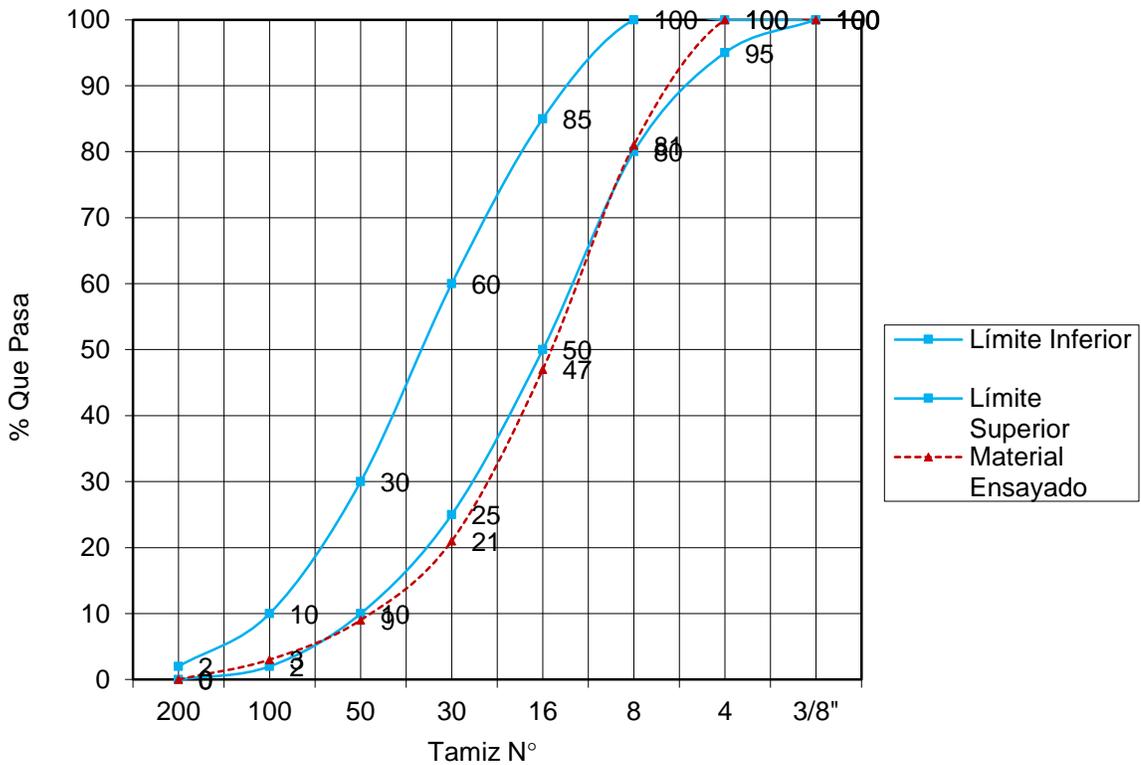
Fuente: Hoja de Datos de Seguridad de Materiales. Cemento Hidráulico Tipo GU

ANEXO 3. Análisis granulométrico de la segunda muestra de arena Motastepe.

Tabla A3. Granulometría Arena Motastepe (Muestra 2)						
Tamiz (in,mm)	Peso retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	% que pasa	Límites ASTM C 33	
3/8"	9.5	0.0	0%	100%	100	
No.4	4.75	0.0	0%	100%	95 a 100	
No.8	2.36	97.2	19%	81%	80 a 100	
No.16	1.18	178.1	34%	53%	50 a 85	
No.30	0.6	137.3	26%	79%	25 a 60	
No.50	0.3	62.3	12%	91%	5 a 30	
No.100	0.15	31.3	6%	97%	0 a 10	
No.200	0.075	14.3	3%	100%		
SUMA	520.5	100%				
MF	3.4					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico A3. Curva Granulométrica Arena Motastepe (Muestra 2)



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. Granulometrías combinadas y curvas de Fuller-Thompson.

Gráfico A4(a). Granulometría combinada de agregado grueso de 19 mm 30%R-70%N, agregado de 12.7 mm y arena.

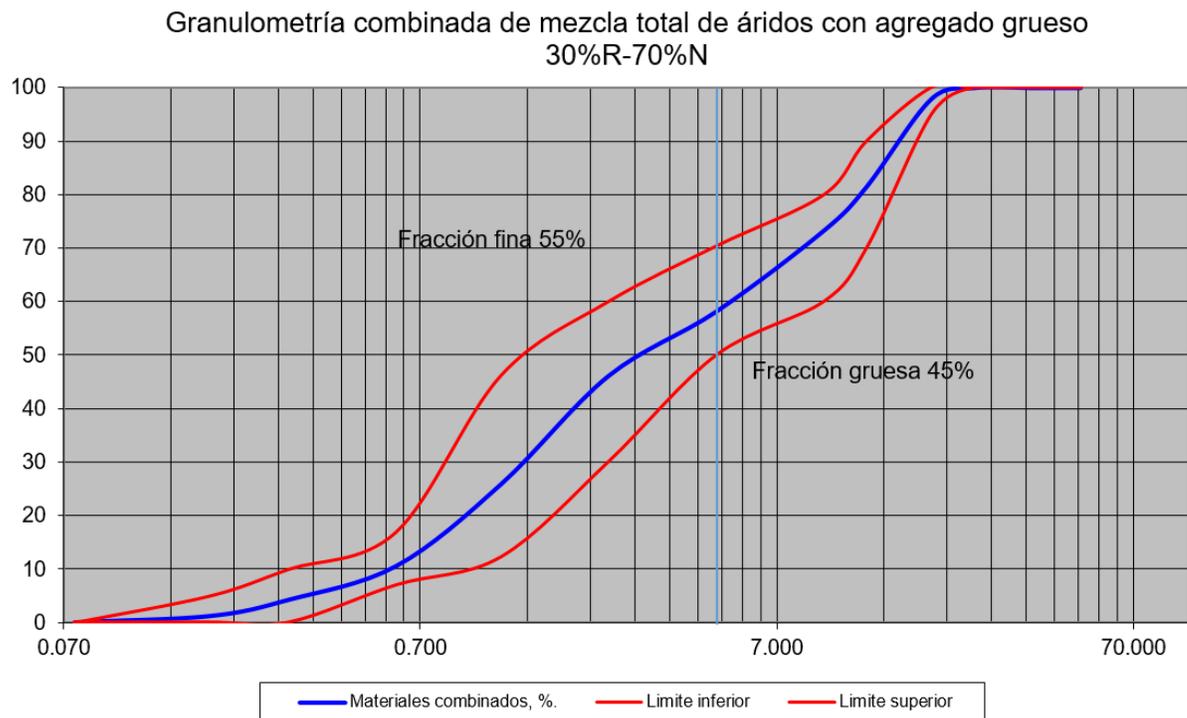


Gráfico A4(b). Granulometría combinada de ag. grueso de 19 mm 30%R-70%N, ag. de 12.7 mm y arena, en comparación con curva de Fuller-Thompson.

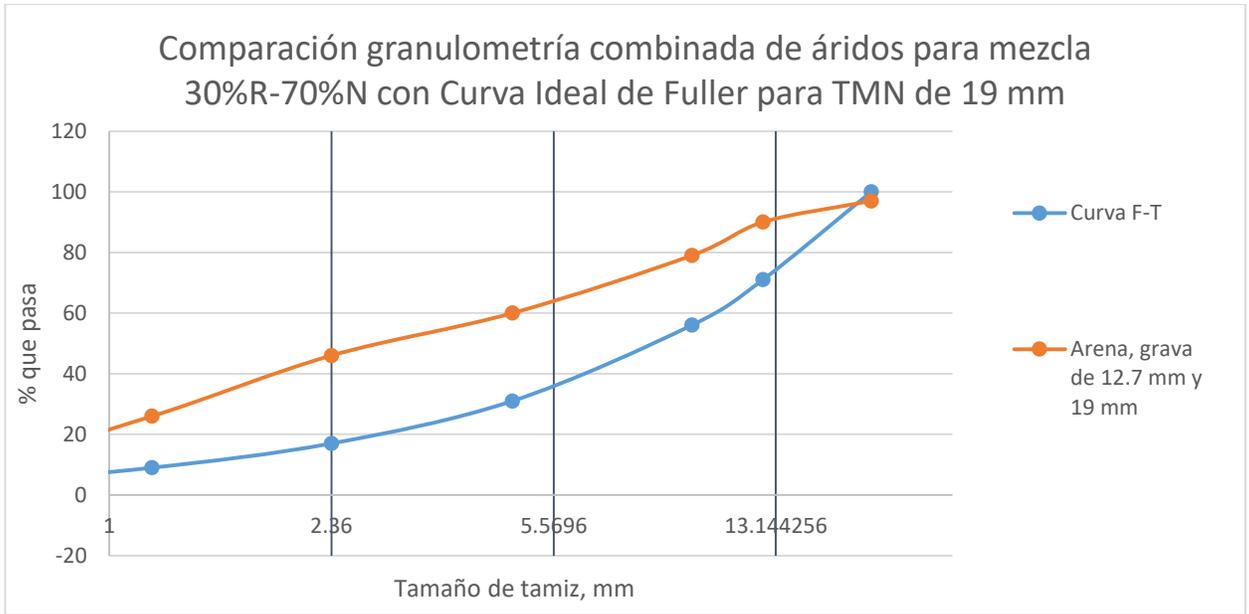


Gráfico A4 (c). Granulometría combinada de agregado grueso de 19 mm 50%R-50%N, agregado de 12.7 mm y arena.

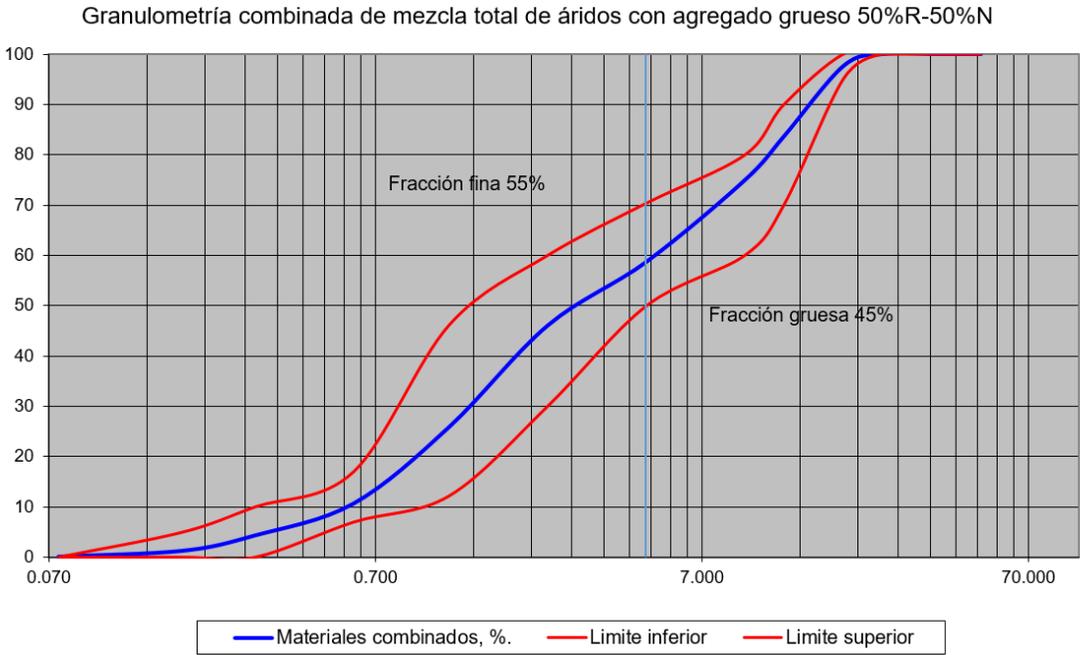


Gráfico A4(d). Granulometría combinada de ag. grueso de 19 mm 50%R-50%N, agregado de 12.7 mm y arena, en comparación con curva de Fuller-Thompson.

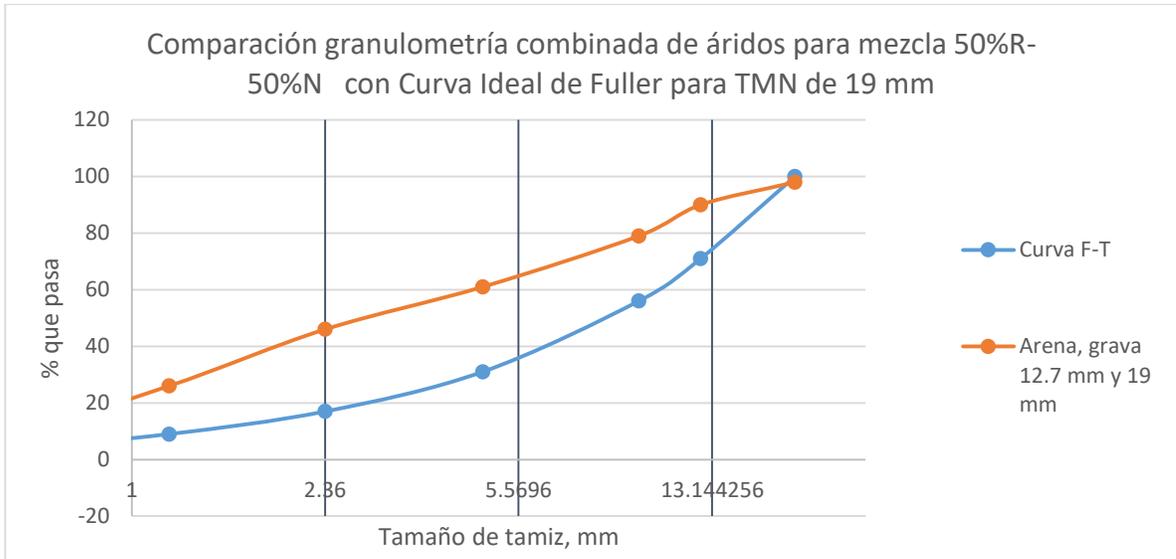


Gráfico A4(e). Granulometría combinada de agregado grueso de 19 mm 75%R-25%N, agregado de 12.7 mm y arena.

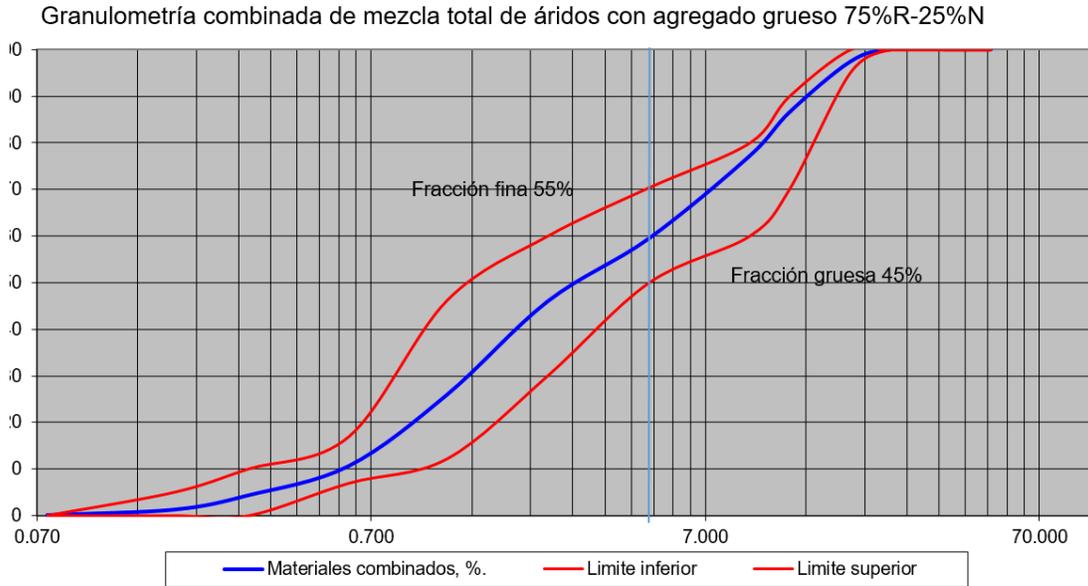
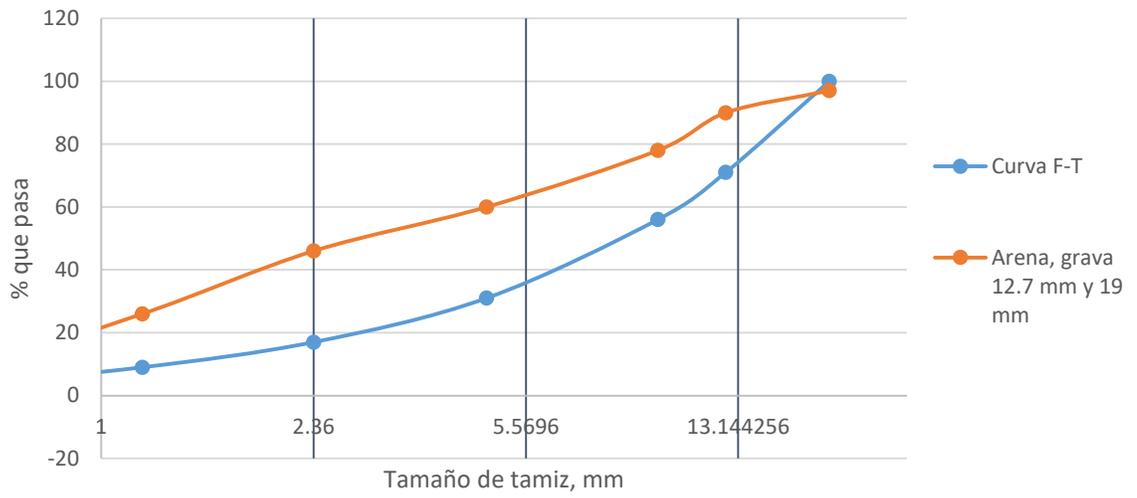


Gráfico A4(f). Granulometría combinada de ag. grueso de 19 mm 75%R-25%N, ag. de 12.7 mm y arena, en comparación con curva de Fuller-Thompson.

Comparación granulometría combinada de áridos para mezcla 75%R-25%N con Curva Ideal de Fuller para TMN de 3/4"



ANEXO 5. Tablas de diseño ACI

Tabla A1.6.3.1. Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción

Resistencia a Compresión a los 28 días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200(20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo durante 28 días, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.

Fuente: Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3

Tabla A1.6.3.3 Requerimientos Contenido Agua de mezclado y de aire aproximados para diferentes revenimientos y tamaño máximo nominal de agregados

Tipo de concreto	Revenimiento (cm)	Agua en kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño nominal máximo (mm) indicado							
		Tamaño máximo de la grava (mm)							
		9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Sin aire incluido	2.5-5	207	199	190	179	166	154	130	113
	7.5-10	228	216	205	193	181	169	145	124
	15-17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
	Aire atrap. aprox. (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Con aire incluido	2.5-5	181	175	168	160	150	142	122	107
	7.5-10	202	193	184	175	165	157	133	119
	15-17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado de aire a incluir según el tipo de exposición (%)									
Exposición ligera		4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada		6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa		7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: ACI 211.1

Tabla 5.3.2.2 Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra

Resistencia especificada a la compresión (f'_c), MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión (f'_{cr}) MPa
$f'_c < 21$	$f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$1.10 f'_c + 5.0$

Fuente: ACI 318

Tabla 5.3.2.2 f'_c requerida cuando no hay datos disponibles para la desviación estándar*

Resistencia a compresión especificada (f'_c) kg/cm ²	Resistencia promedio requerida (f'_{cr}) kg/cm ²
$f'_c < 210$	$f'_{cr} = f'_c + 70$
$210 \leq f'_c \leq 350$	$f'_{cr} = f'_c + 85$
$f'_c > 350$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 50$

*Nota: Valores adaptados para kg/cm²

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

Tabla A1.6.3.4(a) Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto

*Resistencia a Compresión a los 28 días, MPa	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

Fuente: ACI 211.1

Tabla 9-3 (Métrica) Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto

*Resistencia a Compresión a los 28 días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200(20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo durante 28 días, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.

Fuente: INCYC. Adaptada del ACI 211.1 y del ACI 211.3 para kg/cm²

Tabla A1.6.3.7.1- Primera estimación de la masa del concreto fresco (SI)

Tamaño Máximo Nominal del agregado, mm	Primera estimación de la masa unitaria del concreto, kg/m ³	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37.5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

Fuente: ACI 211

ANEXO 6. Diseños Iniciales de Mezclas de Concreto Reciclado

Tabla A6(a). Diseño Inicial para Mezcla 30% Reciclado – 70% Natural

Cantidad de materiales			
Participantes	DATOS		
	G.E (kg/m ³)	Peso en 1m ³	Volumen (m ³)
Cemento	2915	366	0.126
Ag. 19 mm Nat.	2807	299	0.107
Ag. 19 mm Rec.	2332	135	0.058
Ag. 12.5 mm	2792	313	0.112
Arena	2536	946	0.373
Agua	1000	205	0.205
Aire %			0.020
Peso volumétrico teórico	2264 kg/m ³		1.00 m ³

Fuente: Elaboración propia

Dosificación		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{366}{366}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{747}{366}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{946}{366}$	3
Dosificación = 1:2:3		

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6(b). Diseño Inicial para Mezcla 50% Reciclado – 50% Natural

Cantidad de materiales			
Participantes	DATOS		
	G.E (kg/m ³)	Peso en 1m ³	Volumen (m ³)
Cemento	2915	366	0.126
Ag. 19 mm Nat.	2807	211	0.075
Ag. 19 mm Rec.	2332	222	0.095
Ag. 12.5 mm	2792	309	0.111
Arena	2536	934	0.368
Agua	1000	205	0.205
Aire %			0.02
Peso volumétrico teórico		2247 kg/m ³	1.00 m ³

Fuente: Elaboración propia

Dosificación		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{366}{366}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{742}{366}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{934}{366}$	3
Dosificación = 1:2:3		

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6(c). Diseño Inicial para Mezcla 75% Reciclado – 25% Natural

Cantidad de materiales			
Participantes	DATOS		
	G.E (kg/m ³)	Peso en 1m ³	Volumen (m ³)
Cemento	2915	366	0.126
Ag. 19 mm Nat.	2807	104	0.037
Ag. 19 mm Rec.	2332	329	0.141
Ag. 12.5 mm	2792	304	0.109
Arena	2536	920	0.363
Agua	1000	205	0.205
Aire %			0.02
Peso volumétrico teórico	2227 kg/m ³		1.00 m ³

Fuente: Elaboración propia

Dosificación		
$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{366}{366}$	1
$\frac{W_{\text{grava}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{737}{366}$	2
$\frac{W_{\text{arena}}}{W_{\text{cemento}}}$	$\frac{920}{366}$	3
Dosificación = 1:2:3		

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7. Correcciones por humedad para mezclas con agregados reciclados.

Tabla A7(a). Corrección por humedad para mezcla con agregado de 19 mm 30%R – 70%N.

Material	Contenido de humedad	Agua (L)	Peso agregados (kg)
Ag. 19 mm	0.07%	-5.70	293.50
Ag. 19 mm Rec.	2.79%	-6.37	128.80
Ag. 12.5 mm	0.05%	-6.38	306.31
Arena	1.17%	-51.95	893.72
Agua contenida		70.39	
Agua de mezclado		275.39	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A7(b). Corrección por humedad para mezcla con agregado de 19 mm 50%R – 50%N

Material	Contenido de humedad	Agua (L)	Peso agregados (kg)
Ag. 19 mm	0.04%	-4.09	206.96
Ag. 19 mm Rec.	3.71%	-8.43	214.04
Ag. 12.5 mm	0.16%	-5.96	302.83
Arena	1.57%	-47.54	886.36
Agua contenida		-66.02	
Agua de mezclado		271.02	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A7(c). Corrección por humedad para mezcla con agregado de 19 mm 75%R
– 25%N

Material	Contenido de humedad	Agua (L)	Peso agregados (kg)
Ag. 19 mm	0.04%	-2.02	101.89
Ag. 19 mm Rec.	3.71%	-12.45	316.15
Ag. 12.5 mm	0.16%	-5.87	298.19
Arena	1.57%	-46.81	872.77
Agua contenida		-67.14	
Agua de mezclado		272.14	

Fuente: Elaboración propia