



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS
EN COLOMBIA PROVENIENTES DE RCD, BASADO EN
NORMATIVA INTERNACIONAL Y EN EL DESARROLLO DE
INVESTIGACIONES DE UNIVERSIDADES COLOMBIANAS**

DAVID MAURICIO ROSERO ALVAREZ

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia
2019

**PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS EN
COLOMBIA PROVENIENTES DE RCD, BASADO EN NORMATIVA
INTERNACIONAL Y EN EL DESARROLLO DE INVESTIGACIONES DE
UNIVERSIDADES COLOMBIANAS**

DAVID MAURICIO ROSERO ALVAREZ

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título
de:
Magister en ingeniería – Estructuras

Director
Ing. CAMILO RÍOS FRESNEDA

Línea de Investigación:
Materiales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C, Colombia
2019

Dedicatoria

A Dios,

Por darme salud y suerte para enfrentar todas las circunstancias de mi vida.

A mis padres, Olga Álvarez y Harold Rosero

Por infundir valores durante toda mi crianza, siempre con amor, paciencia y dedicación. Con sus esfuerzos me han enseñado a amar la vida y a disfrutarla con sabiduría.

A mi esposa, Paola Castellanos

Por acompañarme en todos los proyectos de vida. Por creer siempre en mí y en mis habilidades. Por inspirarme a ser mejor todos los días. Agradezco a Dios poder recorrer junto a ti el camino de la vida.

A mis abuelos, Mercedes Polo y Orlando Rosero, y a mi tía Araceli Álvarez por brindarme tanta ayuda durante mis momentos económicos más difíciles.

A mi hijo Pablo, familiares y a mis perros que con su presencia me inspiraron a culminar esta maestría.



AGRADECIMIENTOS

A mi director del trabajo final de maestría, ingeniero Camilo Ríos Fresneda MSc, un especial agradecimiento por su apoyo y dedicación absoluta, por brindarme el tiempo y los documentos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Al ingeniero José Gabriel Gómez Cortes MSc, quien me brindó su apoyo y guía en los primeros avances de este trabajo.

A todos los profesores de la Maestría en ingeniería civil con énfasis en estructuras de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, por su entrega y dedicación en el arte de la enseñanza.

Al ingeniero Miguel Efraín Rosero Polo, un especial agradecimiento por sus enseñanzas y conocimientos brindados durante todo mi desarrollo profesional.



SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo	Definición
-	Datos que no aplican o no se presentan en el documento de referencia
%A	Humedad de absorción en porcentaje
%P	Porcentaje de poros
*	Muestra sumergida en sulfato
A	Residuos de concreto asfáltico o material bituminoso
A/C	Relación agua – cemento
A°	Curado en bolsas plásticas
AFN	Agregado fino de origen natural
AFR	Agregado fino de origen reciclado
AGN	Agregado grueso de origen natural
AGR	Agregado grueso de origen reciclado
AN	Agregado de origen natural
AR	Agregado de origen reciclado
ASF	Residuos aprovechables de concreto asfáltico o material bituminoso
AUS	Abreviatura de Australia según ISO 3166-1 código alpha-3
B°	Curado en humedad y temperatura ambiente
BEL	Abreviatura de Bélgica según ISO 3166-1 código alpha-3
BRA	Abreviatura de Brasil según ISO 3166-1 código alpha-3
C	Contaminantes de materia orgánica, yeso y/o sales
C (%)	Contenido en porcentaje
CHE	Abreviatura de Suiza según ISO 3166-1 código alpha-3
COL	Categoría de agregados gruesos reciclados compuesta por residuos de concreto
COL LOW	Categoría de agregados gruesos reciclados mixtos compuesta por residuos de concreto y mampostería en un bajo porcentaje
COL MIX	Categoría de agregados gruesos reciclados mixtos compuesta por residuos de concreto y mampostería en un porcentaje significativo
CON	Residuos aprovechables de concreto, agregados ligados o no, mortero y/o piedras
d	Días transcurridos hasta la ejecución del ensayo
DEU	Abreviatura de Alemania según ISO 3166-1 código alpha-3
Ec	Módulo de elasticidad del concreto
EEUU	Abreviatura de Estados Unidos según ISO 3166-1 código alpha-3
ESP	Abreviatura de España según ISO 3166-1 código alpha-3
F	Material de tamaño fino menor al tamiz No.4 – 4.76mm



Símbolo	Definición
f_c	Resistencia del concreto a la compresión
f_{CAN}	Resistencia a la compresión del concreto con agregados naturales
f_{CAR}	Resistencia a la compresión del concreto con agregados reciclados
Fr	Módulo de rotura del concreto
H	Residuos de concreto, agregados ligados o no, mortero y/o piedras
HKG	Abreviatura de Hong Kong según ISO 3166-1 código alpha-3
I	Sortividad inicial
ID	Identificación numérica de la categoría del material reciclado
ITA	Abreviatura de Italia según ISO 3166-1 código alpha-3
JPN	Abreviatura de Japón según ISO 3166-1 código alpha-3
Ka	Coefficiente de carbonatación en el ambiente
Kc	Coefficiente de carbonatación obtenido en la cámara
LIV	Residuos de construcción liviana
M	Residuos de mampostería, cerámica, ladrillos de arcilla
M.A.	Material adicional en la mezcla
M.U.C.	Masa unitaria compacta
M.U.S.	Masa unitaria suelta
MAR	Residuos aprovechables de mampostería, cerámica y/o ladrillos de arcilla
MAT	Coefficiente
MET	Residuos de metales magnéticos y no magnéticos
MF	Material flotante de baja densidad como la madera, plásticos, papel o similares
MQC	Material químicamente contaminado o expuesto a ambientes agresivos
NLD	Abreviatura de Holanda según ISO 3166-1 código alpha-3
No.	Número asignado según el tipo de coloración del agregado fino
NOM.	Nomenclatura de la mezcla
ORG	Residuos de materia orgánica
PORT	Abreviatura de Portugal según ISO 3166-1 código alpha-3
PVC	Tuberías PVC, plásticos, derivados del polipropileno y/o residuos de fibras
RCD	Residuos de construcción y demolición
REF	Número de la tesis de referencia
S	Sortividad final
S.A.	Curado sumergido en agua
S.S.	Curado sumergido en sulfatos
T.C.	Tipo de curado
T.M.	Tamaño máximo de la partícula
T.M.N.	Tamaño máximo nominal de la partícula



Símbolo	Definición
UK	Abreviatura de Reino Unido según ISO 3166-1 código alpha-3
ρ_C	Densidad del cemento
ρ_N	Densidad nominal
ρ_S	Densidad aparente seca
$\rho_{S.S.S.}$	Densidad aparente saturada superficialmente seca



**PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS EN COLOMBIA
PROVENIENTES DE RCD, BASADO EN NORMATIVA INTERNACIONAL Y EN EL DESARROLLO
DE INVESTIGACIONES DE UNIVERSIDADES COLOMBIANAS.**

RESUMEN: Debido a la importancia del tema del reciclaje en Colombia en temas económicos y ambientales, se han realizado varias investigaciones sobre las características y propiedades del concreto con agregados reciclados. Este trabajo propone una guía de uso y aprovechamiento de los RCD como agregados reciclados en la fabricación de concreto hidráulico de uso estructural y no estructural para Colombia. Para esto, se realizó un estudio de la normativa internacional de países que comienzan a normativizar el uso de residuos de construcción y demolición como Brasil, Perú, Estados Unidos, entre otros. Además, se realizó un estado del arte sobre los actuales proveedores y productos de agregados reciclados que lideran el mercado nacional y han sido objeto de estudio para investigaciones en universidades colombianas. Finalmente, se proponen temas de investigación que en el futuro pueden optimizar el uso de RCD en la producción de agregados reciclados para la fabricación de concreto hidráulico.

PALABRAS CLAVES: Concreto reciclado, agregado reciclado, residuos de construcción, sostenibilidad, reciclaje.

**PROPOSAL OF A GUIDE FOR THE USE OF RECYCLED AGGREGATES IN COLOMBIA FROM
RCD, BASED ON INTERNATIONAL REGULATIONS AND THE DEVELOPMENT OF RESEARCH
BY COLOMBIAN UNIVERSITIES.**

ABSTRACT: The importance of recycling is related to economic and environmental concerns, and in Colombia there have been studies about the features and properties of concrete made with recycled aggregates. This work proposes a guide for the use of RCD as recycled aggregates in the manufacturing of structural and non-structural hydraulic concrete in Colombia. Because of this, a study was conducted to explore on the international norms and the standardized use of construction residues and demolition such as Brazil, Peru, and the US, among others. Furthermore, various Colombian universities are engaged in research on the current suppliers and products of recycled aggregates that lead the Colombian market. Finally, some research topics were proposed, which could optimize the use of RCDs in the production of recycled aggregates for the manufacturing of hydraulic concrete.

KEY-WORDS: Recycled concrete, recycled aggregate, construction waste, sustainability, recycling.



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GENERAL:	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	20
3	GENERALIDADES Y USOS DEL RCD EN EL CONCRETO	21
3.1	MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO	21
3.1.1	Materiales cementantes	21
3.1.2	Agregados gruesos	23
3.1.3	Agregados finos	26
3.1.4	Agua empleada en la mezcla	26
3.2	AGREGADOS RECICLADOS	28
3.3	PROPIEDADES FÍSICAS DEL LOS AGREGADOS RECICLADOS	29
3.3.1	Absorción y densidad	29
3.3.2	Desgaste en la máquina de los ángeles	30
3.3.3	Granulometría	31
3.4	MANEJABILIDAD DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS	34
3.5	RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS	34
3.5.1	Resistencia a la compresión	35
3.5.2	Resistencia al corte	36
3.5.3	Resistencia a la flexión	37
3.5.4	Módulo de elasticidad	38
3.6	DURABILIDAD DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS	39
3.6.1	Influencia del agregado reciclado en la expansión por sulfatos	40
3.6.2	Corrosión del concreto con agregados reciclados	42
3.6.3	Ataque por cloruros en el concreto con agregados reciclados	44
3.6.4	Permeabilidad del concreto con agregados reciclados	45
3.6.5	Reacción álcali-agregado	47



4 NORMATIVA Y CLASIFICACIÓN DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS

49

4.1	Referencias para la clasificación de los RCD en Colombia (COL)	49
4.2	NORMATIVA Y CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL DE LOS RCD	52
4.2.1	Clasificación en España (ESP)	52
4.2.2	Clasificación en Reino Unido (UK)	53
4.2.3	Clasificación en Portugal (PORT)	54
4.2.4	Clasificación en Brasil (BRA)	57
4.2.5	Clasificación en Alemania (DEU)	58
4.2.6	Clasificación en Holanda (NLD)	59
4.2.7	Clasificación en Bélgica (BEL)	61
4.2.8	Clasificación en Australia (AUS).....	62
4.2.9	Clasificación en Estados Unidos (EE. UU.)	64
4.2.10	Clasificación en Perú (PER)	64
4.2.11	Otras clasificaciones internacionales	65

5 RESUMEN DE REQUISITOS PARA LOS AGREGADOS RECICLADOS QUE PROVIENEN DEL RCD SEGÚN LA NORMATIVA INTERNACIONAL.....66

5.1	RESUMEN GENERAL DE LOS REQUISITOS INTERNACIONALES DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS.....	66
5.2	RESUMEN GENERAL DE USOS Y RESTRICCIONES DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS	67
5.3	RESUMEN GENERAL DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS.....	70

6 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS PARA COLOMBIA78

6.1	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS PARA LAS CATEGORÍAS DE AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS PROPUESTAS	78
6.1.1	Usos estructurales (Composición fundamentalmente de concretos CON)	79
6.1.2	Usos estructurales (Composición mixta de concretos CON y mampostería MAR)...	81
6.1.3	Usos no estructurales (Composición de concretos CON).....	82



6.1.4	Elementos no estructurales (Composición mixta de concretos CON y mampostería MAR)	84
6.1.5	Asfalto ASF máximo en materiales de uso estructural	86
6.1.6	Asfalto ASF máximo en materiales de uso no estructural	87
6.1.7	Resumen de porcentajes máximos de agentes contaminantes en materiales internacionales de uso estructural y no estructural	88
6.2	SELECCIÓN DE REQUISITOS MÍNIMOS SEGÚN ENSAYOS PARA LAS CATEGORÍAS DE AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS PROPUESTAS	89
7	ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA	92
7.1	ESTADO DEL ARTE DE LAS TESIS COLOMBIANAS MÁS DESTACADAS.....	95
7.1.1	Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	95
7.1.2	Estudio de Durabilidad al Ataque de Sulfatos del Concreto con Agregado Reciclado – Universidad Nacional de Colombia	97
7.1.3	Agregado Reciclado Para Morteros – Universidad Nacional de Colombia y EAFIT... 99	
7.1.4	Estudio de la Fisuración por Contracción Plástica en Losas de Concreto con Agregados Reciclados y Uso de Microfibras – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	101
7.1.5	Propiedades Mecánicas, Eléctricas y de Durabilidad de Concretos con Agregados Reciclados – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.....	102
7.1.6	Estudio Experimental de las Propiedades Mecánicas del Concreto Reciclado para su Uso en Edificaciones Convencionales – Pontificia Universidad Javeriana	104
7.1.7	Utilización de Agregado Grueso de Concreto Reciclado en Elementos Estructurales – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	106
7.1.8	Influencia del Material Reciclado de Mampostería en el Comportamiento del Concreto Reciclado – Pontificia Universidad Javeriana	107
7.1.9	Aprovechamiento de Escombros como Agregados No Convencionales en Mezclas de Concreto – Universidad Pontificia Bolivariana	108
7.1.10	Concreto Reciclado como una Opción Técnica, Económica y Ambiental para la Construcción en Colombia – IV Seminario Internacional de la Sostenibilidad	109
7.1.11	Determinación de Propiedades Físico - Químicas de los Materiales Agregados en Muestra de Escombros en la Ciudad de Bogotá – Universidad de Medellín	110
7.1.12	Evaluación de la Influencia de Agregados Reciclados de Concreto Tratados con Lechadas Pobres de Cemento en las Propiedades Mecánicas de Concretos – Pontificia Universidad Javeriana	111
7.2	RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN COLOMBIA	113



7.2.1	Caracterización de los materiales	113
7.2.2	Clasificación de los agregados reciclados.....	114
7.2.3	Planteamiento de los diseños de mezcla	114
7.2.4	Resultados de laboratorios	114
7.2.5	Nomenclatura y definiciones	114
7.3	PANORAMA ACTUAL DE PROVEEDORES Y PRODUCTOS A BASE DE RCD EN COLOMBIA	142
8	PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS PARA COLOMBIA	145
8.1	MODO DE USO DE LA GUÍA	146
8.2	DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES RECICLABLES Y NO RECICLABLES DEL RCD.....	151
8.3	PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL RCD	153
8.4	REQUISITOS DE CONTENIDOS SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR	158
8.5	REQUISITOS SEGÚN ENSAYOS PARA LOS AGR	159
8.5.1	Granulometría	159
8.5.2	Densidad aparente o bulk	160
8.5.3	Absorción.....	160
8.5.4	Masa unitaria.....	161
8.5.5	Resistencia al desgaste por abrasión e impacto (máquina de los ángeles)	161
8.5.6	Contenido de sulfatos	161
8.5.7	Contenido de cloruros.....	161
8.5.8	Reactividad álcali – agregado	161
8.5.9	Resumen de los requisitos para los AGR.....	162
8.5.10	Frecuencia de ensayos para el control de calidad en la producción de AGR.....	163
8.6	REQUISITOS INVIAS Y NTC APLICADOS A LA COMBINACIÓN DE AGN CON AGR	164
8.6.1	Granulometría NTC 174 e INVIAS artículo 500.2.1.4.....	164
8.6.2	Requisitos de la norma NTC 174	165
8.6.3	Requisitos del INVIAS artículo 500.2.1.4	165
8.6.4	Reactividad álcali-agregado	168
8.7	USOS Y RESTRICCIONES SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR	168
8.7.1	Usos permitidos, porcentajes de sustitución y resistencias (F'c) máximas	169
8.7.2	Requisitos de durabilidad y clases de exposición permitidas	169



8.7.3	Requisitos de almacenaje.....	173
8.7.4	Recomendaciones adicionales	173
9	HORIZONTE DE INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA CUANDO SE USA RCD PARA ELABORAR CONCRETO HIDRÁULICO	175
10	CONCLUSIONES.....	177
11	BIBLIOGRAFÍA	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Agregado grueso proveniente de rocas ígneas.....	24
Figura 2.	Agregado grueso proveniente de rocas sedimentarias.....	25
Figura 3.	Agregado grueso proveniente de roca metamórfica.....	25
Figura 4.	Agua y cemento que forman pasta de cemento.	27
Figura 5.	Agua para el curado del concreto.....	27
Figura 6.	Escombros de concreto para procesos de trituración.....	28
Figura 7.	Degradación del concreto por expansión y fisuración ocasionada por el ataque de los sulfatos.....	41
Figura 8.	Ensayo de carbonatación utilizando fenolftaleína.....	42
Figura 9.	Oxidación del acero de refuerzo causada por el desprendimiento y carbonatación del concreto.....	43
Figura 10.	Estructura cercana al mar bajo la acción de los iones de cloruro.....	44
Figura 11.	Sección de concreto vista con microscopio petrográfico en la que se evidencia aumento de volumen y agrietamiento del concreto por el gel de sílice.....	47
Figura 12.	Composición típica del concreto hidráulico.....	145
Figura 13.	Esquema general de uso de la guía para Colombia.....	150
Figura 14.	Esquema general del proceso de clasificación de los RCD según la propuesta de guía de uso para Colombia.....	157

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.	Listado de normas y guías internacionales sobre el RCD	189
-----------------	---	------------



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Designación de tamices según las normas NTC y ASTM.</i>	32
Tabla 2. <i>Clasificación de los residuos de construcción y demolición (RCD) según la SDA.</i>	50
Tabla 3. <i>Clasificación de los residuos de construcción y demolición (RCD) según IDU ET- publicada en el año 2018.</i>	51
Tabla 4. <i>Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la guía GEAR, España.</i>	52
Tabla 5. <i>Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la norma BS 8500, Reino Unido.</i>	54
Tabla 6. <i>Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la guía E471-2009, Portugal.</i>	55
Tabla 7. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según las guías E472, E473 y E474 de 2009, Portugal.</i>	56
Tabla 8. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma ABNT NBR 15116, Brasil.</i>	57
Tabla 9. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma DIN 4226-102, Alemania.</i>	58
Tabla 10. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD según la norma NEN5905:2010, Holanda.</i>	59
Tabla 11. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la guía BRL 2506-1, Holanda</i>	60
Tabla 12. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma NBN EN 206, Bélgica.</i>	61
Tabla 13. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD según la guía HB155-2002, Australia.</i>	62
Tabla 14. <i>Clasificación de los agregados que provienen de RCD según especificaciones IPWEA, Australia.</i>	63
Tabla 15. <i>Clasificación de los agregados gruesos que provienen del concreto triturado según ACI, EE. UU.</i>	64
Tabla 16. <i>Clasificación de los agregados gruesos que provienen del concreto triturado según NTP400.053 y norma E.060, Perú.</i>	65
Tabla 17. <i>Ensayos de aceptación para los agregados reciclados según normativa internacional.</i>	67
Tabla 18. <i>Usos típicos de los materiales reciclados según normativa internacional.</i>	68



Tabla 19. <i>Requisitos internacionales mínimos según ensayos para los agregados reciclados</i>	70
Tabla 20. <i>Contenidos mínimos y máximos de los materiales internacionales reciclados–Parte 1</i>	171
Tabla 21. <i>Contenidos mínimos y máximos de los materiales internacionales reciclados–Parte 2</i>	272
Tabla 22. <i>Requisitos internacionales de los agregados reciclados según ensayos – Parte 1</i>	73
Tabla 23. <i>Requisitos internacionales de los agregados reciclados según ensayos – Parte 2</i>	74
Tabla 24. <i>Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 1</i>	75
Tabla 25. <i>Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 2</i>	76
Tabla 26. <i>Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 3</i>	77
Tabla 27. <i>Resumen de materiales internacionales de uso estructural compuestos fundamentalmente de residuos de concretos</i>	79
Tabla 28. <i>Resumen de resistencias máximas $F'c$ en mezclas de uso estructural pertenecientes a las investigaciones realizadas en Colombia</i>	80
Tabla 29. <i>Resumen de materiales internacionales de uso estructural compuestos de residuos mixtos de concretos y mampostería</i>	81
Tabla 30. <i>Resumen de materiales internacionales de uso NO estructural compuestos fundamentalmente de residuos de concretos</i>	82
Tabla 31. <i>Resumen de resistencias máximas $F'c$ en mezclas de uso no estructural pertenecientes a las investigaciones realizadas en Colombia</i>	83
Tabla 32. <i>Resumen de materiales internacionales de uso NO estructural compuestos de residuos mixtos de concretos y mampostería</i>	84
Tabla 33. <i>Contenidos máximos permitidos en materiales reciclados internacionales de uso estructural</i>	86
Tabla 34. <i>Contenidos máximos permitidos en materiales reciclados internacionales de uso NO estructural</i>	87
Tabla 35. <i>Resumen de porcentajes máximos de agentes contaminantes en materiales internacionales de uso estructural y no estructural</i>	88
Tabla 36. <i>Resumen requisitos internacionales para los AGR de uso estructural y no estructural</i>	89
Tabla 37. <i>Nomenclaturas y definiciones de las tesis colombianas</i>	115
Tabla 38. <i>Referencias bibliográficas de ensayos realizados en las universidades de Colombia</i>	116
Tabla 39. <i>Clasificación de los agregados reciclados y sus equivalencias</i>	118
Tabla 40. <i>Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 1</i>	119



Tabla 41. <i>Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 2.</i>	120
Tabla 42. <i>Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 3.</i>	121
Tabla 43. <i>Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 1.</i>	122
Tabla 44. <i>Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 2.</i>	123
Tabla 45. <i>Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 3.</i>	124
Tabla 46. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 1.</i>	125
Tabla 47. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 2.</i>	126
Tabla 48. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 3.</i>	127
Tabla 49. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 4.</i>	128
Tabla 50. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 5.</i>	129
Tabla 51. <i>Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 6.</i>	130
Tabla 52. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.</i>	131
Tabla 53. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.</i>	132
Tabla 54. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 3.</i>	133
Tabla 55. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 4.</i>	134
Tabla 56. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 5.</i>	135
Tabla 57. <i>Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 6.</i>	136
Tabla 58. <i>Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.</i>	137
Tabla 59. <i>Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.</i>	138



Tabla 60. <i>Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 3.</i>	139
Tabla 61. <i>Resumen de las propiedades de adicionales según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.</i>	140
Tabla 62. <i>Resumen de las propiedades de adicionales según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.</i>	141
Tabla 63. <i>Resumen de productos que ofrece la empresa GRECO S.A.S.</i>	142
Tabla 64. <i>Resumen de productos que ofrece la empresa CICLOMAT S.A.</i>	143
Tabla 65. <i>Resumen de productos que ofrece la empresa RECICLADOS INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.</i>	144
Tabla 66. <i>Lista de materiales RECICLABLES según la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia.</i>	151
Tabla 67. <i>Lista de materiales NO RECICLABLES según la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia.</i>	151
Tabla 68. <i>Dispositivos de clasificación y limpieza de los RCD según la guía GEAR.</i>	155
Tabla 69. <i>Contenidos mínimos y máximos de las categorías de agregados gruesos reciclados según sus componentes – Guía de uso de los RCD para Colombia.</i>	158
Tabla 70. <i>Requisitos de gradación para el agregado grueso reciclado.</i>	160
Tabla 71. <i>Resumen de requisitos según ensayos para los agregados reciclados de acuerdo con su categoría.</i>	162
Tabla 72. <i>Frecuencia de ensayos para el control de calidad en la producción de AGR.</i>	163
Tabla 73. <i>Requisitos de gradación NTC 174 e INVIAS para los agregados gruesos.</i>	166
Tabla 74. <i>Requisitos de los agregados gruesos según NTC 174 e INVIAS para la combinación de agregado grueso natural y reciclado.</i>	167
Tabla 75. <i>Usos y porcentaje de sustitución de los AGN por AGR según categoría.</i>	169
Tabla 76. <i>Resumen clases de exposición del reglamento NSR-10 y la norma NTC 5551.</i>	170
Tabla 77. <i>Clases de exposición permitidas según NSR-10 y NTC 5551 para AGR de uso estructural.</i>	171
Tabla 78. <i>Clases de exposición permitidas según el reglamento NSR-10 y la norma NTC 5551 para AGR de uso no estructural.</i>	172
Tabla 79. <i>Resumen de la caracterización de los agregados gruesos reciclados de las investigaciones colombianas.</i>	178



1 INTRODUCCIÓN

En Colombia se han realizado múltiples investigaciones sobre las características y propiedades del concreto con agregados reciclados. Esto debido a la importancia que está tomando el tema del reciclaje en el país y como resultado de las necesidades económicas y ambientales a las que se ven sometidos los proyectos de ingeniería.

En consecuencia, es razonable pensar en opciones como el uso del concreto reciclado como material alternativo estructural y no estructural; utilizar agregados reciclados que generen ventajas tanto económicas como ambientales y así disminuir el costo de disposición final de escombros, montajes de plantas de agregados in situ o transporte de los agregados desde la fuente natural hasta la zona del proyecto. Sin embargo, vale la pena preguntarse ¿El concreto elaborado con agregados reciclados puede alcanzar la calidad obtenida con los agregados naturales?

Como respuesta a esa pregunta surgen numerosas investigaciones elaboradas en Colombia, principalmente en la ciudad de Bogotá, acerca de las características y propiedades del concreto fabricado con agregados reciclados. En ellas se exponen temas como tipos de ensayos, dosificaciones, condiciones específicas de los ensayos y normas técnicas aplicadas según el caso. Además, con los resultados obtenidos se obtiene una caracterización técnica de los materiales y se muestra la incidencia de algunas variables como el tipo y la cantidad de agregados reciclados, la relación agua-cemento y la durabilidad comprobada mediante la permeabilidad, absorción, resistencia a sulfatos, cloruros, sortividad y carbonatación. También se evidencia el desempeño de los nuevos concretos con agregados reciclados en comparación con los concretos convencionales hechos con agregados naturales.

Del mismo modo, la presente investigación elabora un estado del arte sobre la normativa de uso de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel internacional,



donde se especifican tipos de materiales a reciclar, contenidos específicos de los materiales reciclados, usos y restricciones de los (RCD) y especificaciones técnicas de los agregados reciclados en países como Brasil, Perú, Estados Unidos, Australia, China – (Hong Kong), Japón, Suiza, Dinamarca, Noruega, Reino Unido, Portugal, Alemania, Holanda, Bélgica, Italia y España.

*Para efectos de esta investigación se tomará a Hong Kong como un gobierno con legislación independiente, aunque es pertinente aclarar que este territorio es una Región Administrativa Especial de la República Popular China.

Ahora bien, con el análisis de las normativas internacionales sobre el uso de los (RCD) como agregados reciclados y con los resultados de laboratorios de las diferentes investigaciones realizadas en Colombia, se presenta una propuesta de guía de uso de los (RCD) como agregados reciclados para Colombia.



2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

Proponer una guía de aprovechamiento de los agregados reciclados que provienen de los residuos de construcción y demolición para Colombia, tomando como línea base la normativa internacional relevante del uso de los RCD y algunas investigaciones de las universidades colombianas sobre las propiedades del concreto elaborado con agregados reciclados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Describir la normativa internacional relevante acerca del uso de agregados reciclados que provienen de los residuos de construcción y demolición.
- Identificar el estado de desarrollo alcanzado en las algunas investigaciones elaboradas en Colombia con respecto a las características del concreto elaborado con agregados reciclados.
- Proponer una guía de uso de los agregados reciclados que provienen de los residuos de construcción y demolición para Colombia.
- Proponer un horizonte de investigación en Colombia cuando se usan residuos de construcción y demolición para la elaboración de concreto hidráulico.



3 GENERALIDADES Y USOS DEL RCD EN EL CONCRETO

El concreto es un material de uso estructural, aprobado por el Reglamento Colombiano de construcción sísmo resistente (NSR-10, 2010), compuesto por una mezcla de cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, que puede contener aditivos y/o adiciones. El concreto debe cumplir con los requisitos mínimos de resistencia, funcionalidad y durabilidad establecidos en el “Titulo C – CONCRETO ESTRUCTURAL” , además, todos los materiales utilizados en la fabricación del concreto deben cumplir con los requisitos dados en el “Capítulo C.3 – MATERIALES” .

Conforme a lo expuesto anteriormente, este capítulo presenta algunos conceptos generales acerca de las características del concreto y sus componentes. También se exponen algunos hallazgos de las investigaciones colombianas sobre los efectos de los agregados reciclados en las propiedades de resistencia, manejabilidad y durabilidad del concreto.

3.1 MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO

3.1.1 Materiales cementantes

El cemento hidráulico tipo portland está compuesto por una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos que generalmente contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, los cuales son procesados a altas temperaturas y posteriormente mezclados con yeso.

Este material tiene la propiedad química de fraguar y endurecerse con la combinación del agua, generando un proceso llamado hidratación, del cual surge una pasta cementante que funciona como medio de conexión entre los agregados finos y gruesos con la mezcla de agua y cemento.



Adicionalmente, según el reglamento (NSR-10, 2010) “título C, sección C.3.2 – Materiales Cementantes” , el material cementante debe cumplir con todas las características descritas en las normas (NTC 121, 2014), (NTC 321)¹, (ASTM C1157/C1157-17) y (ASTM C595/C595M-18). Dichas normas rigen la calidad y desempeño del cemento hidráulico en Colombia para las aplicaciones generales y especiales, involucrando parámetros de durabilidad.

La producción del cemento hidráulico se realiza a través de un proceso de molienda conjunta o separada, que posteriormente se une en un proceso de mezclado llamado Blending. Como resultado de estos procesos se obtienen seis (6) tipos de cemento hidráulico que, según las necesidades específicas, se dividen en:

- Tipo UG, cemento hidráulico utilizado para la construcción en general.
- Tipo ART, cemento hidráulico de alta resistencia temprana, utilizado generalmente en estructuras que requieren soportar grandes solicitaciones o que requieren ser puestas en servicios rápidamente.
- Tipo MRS, cemento hidráulico de moderada resistencia a los sulfatos, utilizado habitualmente en estructuras de cimentación, muros de contención, rellenos u obras expuestas a la contaminación moderada del ambiente.
- Tipo ARS, cemento hidráulico de alta resistencia a los sulfatos, utilizado en ambientes agresivos como el agua del mar, suelos contaminados, alcantarillados o plantas de tratamiento.
- Tipo MCH, cemento hidráulico de moderado calor de hidratación, utilizado generalmente en la construcción de puentes, viaductos o tuberías de concreto.
- Tipo BCH, cemento hidráulico de bajo calor de hidratación, utilizado habitualmente en obras donde no se permitan dilataciones por la retracción del fraguado tales como presas, diques o elementos impermeables.

¹ La NTC 321 fue reemplazada en el año 2014 por la NTC 121, según el Consejo Directivo del ICONTEC internacional.



Los seis (6) tipos de cemento deben cumplir con una serie de pruebas físicas y químicas tales como finura (superficie específica), estabilidad (expansión en autoclave), tiempos de fraguado, resistencia a la compresión, calor de hidratación, falso fraguado y expansión a la acción de los sulfatos.

3.1.2 Agregados gruesos

El agregado grueso es la materia prima más importante en la elaboración de concreto estructural, ya que generalmente este material ocupa un volumen que está entre el 70% y el 80% del total del volumen de la mezcla. En consecuencia, el agregado grueso define las características de manejabilidad y resistencia del concreto estructural en estado fresco y endurecido, respectivamente.

Del mismo modo, los agregados gruesos de origen natural poseen una densidad aparente que va desde los 2.3 gr/cm³ hasta los 2.9 gr/cm³; cuanto mayor es su densidad, mejor es su calidad y absorción, la cual oscila entre el 1% y 5% (Garzón, 2013).

Igualmente, las partículas que tienen diámetros superiores a 4,76 mm se les denominan grava, las cuales generalmente poseen una dureza medida como resistencia al desgaste. Según ensayos realizados en la máquina de los ángeles, el desgaste en los agregados gruesos naturales va desde el 35% hasta un 40% (Guzmán, 1993).

Ahora bien, los agregados usados que resultan convenientes en la mezcla de concreto estructural son de forma redondeada, esférica o cúbica, ya que poseen una mayor resistencia y debido a que las partículas gruesas se acomodan con mayor facilidad en cada unidad de volumen, el consumo de pasta de cemento es menor.

Por otra parte, el reglamento colombiano de construcción sísmo resistente (NSR-10, 2010) en el "título C – Concreto estructural, apartado C.3.3.2" especifica que el tamaño máximo nominal que debe tener una partícula de agregado grueso no debe



exceder $1/5$ de la menor separación entre los lados de un encofrado, ni sobrepasar $1/3$ de la altura de la losa y no debe superar los $3/4$ del espaciamiento mínimo libre entre barras.

Así mismo, los agregados gruesos provienen de tres (3) fuentes principales, las cuales se originan de fuentes naturales como las rocas ígneas (Figura 1), sedimentarias (Figura 2) o metamórficas (Figura 3).



Figura 1. Agregado grueso proveniente de rocas ígneas.
Fuente: Fotografía tomada de (Medina, 2015).



Figura 2. Agregado grueso proveniente de rocas sedimentarias.

Fuente: Fotografía tomada de (Theus, 2005).



Figura 3. Agregado grueso proveniente de roca metamórfica.

Fuente: Fotografía tomada de (Bugallo, 2005).

En muchas ocasiones el agregado grueso está compuesto de grava, roca o grava triturada, escoria de alto horno enfriada al aire, concreto triturado fabricado con cemento hidráulico o una combinación de ellos, conforme a los requisitos de la norma (NTC 174, 2000). En particular se debe tener especial precaución con el concreto triturado, por ser susceptible a sufrir grandes deformaciones debido al efecto álcali-agregado.



3.1.3 Agregados finos

Por su parte, el agregado fino, compuesto de arena natural, arena triturada o su combinación, generalmente ocupa entre el 10% y el 30% del total de la mezcla, lo que afecta la trabajabilidad, textura superficial y exudación del concreto.

El módulo de finura del agregado fino natural, utilizado en la elaboración de mezclas de concreto, está generalmente entre 2,3 y 3,1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina; cuando la arena es muy gruesa se obtienen mezclas ásperas (Collazos, 2014).

A su vez, las partículas que tienen diámetros inferiores a 4,76 mm, pero no menores a 0,0075 mm, se les denomina comúnmente arenas, las cuales actúan como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos; esto les da manejabilidad en el estado fresco y rellena los posibles vacíos en el estado endurecido (Guzmán, 1993).

La arena natural está compuesta de material rocoso fino y partículas minerales, su composición varía dependiendo de la fuente; por su parte, la arena triturada proviene de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas que pasan por un proceso de trituración hasta alcanzar el tamaño adecuado.

3.1.4 Agua empleada en la mezcla

El agua empleada en la obtención de concreto estructural cumple dos funciones principales: el proceso de curado y el de mezclado. Estos procesos determinan las condiciones de manejabilidad, durabilidad y resistencia de la mezcla en estado fresco y endurecido.

Al entrar en contacto con el cemento, el agua de mezclado lo hace reaccionar y le proporciona propiedades de fraguado, manejabilidad y endurecimiento de la pasta de cemento.



Figura 4. Agua y cemento que forman pasta de cemento.

Fuente: Fotografía tomada de (Dreamstime, 2016).

Por otra parte, el agua de curado es el agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido. Es necesaria debido a la constante pérdida de agua que sufre la mezcla ya sea por exposición a altas temperaturas, condiciones de encofrado, aumento en la velocidad del viento que incrementa el ritmo de evaporación del agua, retracción del concreto y todas las condiciones que conllevan a la pérdida superficial de agua.



Figura 5. Agua para el curado del concreto.

Fuente: Fotografía tomada de (Yepes, 2017).

Es pertinente mencionar que, para lograr concretos de peso normal, con resistencias aceptables mayores a 21 MPa, generalmente debe utilizarse una relación agua cemento menor o igual a 0.45 (Arriaga, 2013).

Simultáneamente, el reglamento (NSR-10, 2010) “título C – Concreto Estructural, comentario CR.3.4” y la (NTC 3459, 2001) exigen que el agua empleada en la mezcla sea potable, libre de impurezas, sin presencia de organismos, sin aceites, arcillas,



sedimentos, cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos que puedan afectar la resistencia o durabilidad del concreto.

3.2 AGREGADOS RECICLADOS

Los agregados reciclados provienen de los procesos de trituración, clasificación y limpieza de los residuos de construcción y demolición; generalmente se derivan del tratamiento de residuos de concreto o mampostería.



Figura 6. Escombros de concreto para procesos de trituración.
Fuente: Fotografía tomada de (Paetanom, 2005).

Estos agregados tienen la misma clasificación en cuanto a tamaños finos o gruesos de los agregados naturales y en muchas ocasiones se utilizan para la fabricación de concreto en combinación con los agregados de origen natural.

En Colombia, las empresas dedicadas al tratamiento y aprovechamiento de los RCD ofrecen productos de agregados reciclados que provienen tanto de residuos de concretos limpios o contaminados como de materiales mixtos o no clasificados. En el capítulo 7.3 se muestran las empresas más reconocidas en Colombia y los productos que ofrecen las mismas.

Adicionalmente, cuando se utilizan productos de agregados reciclados en la elaboración de nuevos concretos, se modifica sustancialmente la manejabilidad de las mezclas en estado fresco, en consecuencia, la resistencia mecánica y la durabilidad de



los concretos en estado endurecido cambian. Dichas modificaciones, que fueron investigadas en las tesis colombianas, se presentan de manera general en los capítulos 3.4, 3.5, 3.6 y se detallan en el capítulo 7.1.

3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL LOS AGREGADOS RECICLADOS

La mayoría de los autores de las tesis colombianas evaluaron las propiedades físicas de los agregados reciclados como la absorción, densidad aparente, densidad nominal, densidad aparente saturada superficialmente seca, el desgaste en la máquina de los ángeles, la granulometría, la masa unitaria suelta y la masa unitaria compacta, con el fin de caracterizar los materiales antes de ser empleados en la mezcla para la obtención de concreto hidráulico. A continuación, se muestran algunos hallazgos de las tesis colombianas sobre las propiedades físicas de los agregados.

3.3.1 Absorción y densidad

En la (NTC 176) y la (NTC 237, 2001) se estipulan los métodos para determinar la densidad y absorción tanto del agregado grueso como del agregado fino. Las mismas normas definen la absorción como el incremento de masa en el agregado debido a la introducción del agua en las partículas porosas del material, sin incluir el agua adherida en la superficie exterior de las partículas, expresada como porcentaje de la masa seca.

Por otra parte, la (NTC 176) define la densidad como la relación entre la masa en el aire y el volumen del material. Se caracterizan tres tipos de densidades: la densidad nominal, que incluye los poros no saturables, la densidad aparente saturada y superficialmente seca, que incluye la masa de agua dentro de los poros saturables y la densidad aparente, que incluye los poros saturables y no saturables.

Generalmente la densidad aparente es la propiedad que se utiliza en los diseños de mezcla, por lo que tiene gran importancia. Se ha encontrado que la densidad aparente de los agregados gruesos reciclados, provenientes de la trituración de residuos de concreto, es inferior a la de los agregados gruesos naturales. Esto se debe a que la pasta



de cemento adherida en los granos reciclados genera una mayor porosidad del agregado, por lo que disminuye su densidad y aumenta su absorción (Arriaga, 2013).

Según investigaciones nacionales, la densidad aparente de algunos concretos fabricados con agregados gruesos reciclados de concretos triturados tiene valores que oscilan entre los 2070 kg/cm² y los 2130 kg/cm², con una absorción promedio entre el 10% y 12% (Bojacá, 2013).

3.3.2 Desgaste en la máquina de los ángeles

El desgaste en la máquina de los ángeles es un ensayo que permite identificar el porcentaje de abrasión o degradación porcentual del agregado grueso al ser impactado o al tener constante fricción con su entorno. Este ensayo se realiza para determinar las características de los agregados gruesos, que serán utilizados en superficies que generan excesiva fricción o impactos, tales como placas o vías.

Este desgaste porcentual depende de las características de la roca madre, ya que cuando los concretos están sometidos a una fricción continua, requieren de agregados gruesos de alta dureza para no perder las características de resistencia de diseño.

Ahora bien, para determinar numéricamente el desgaste, las normas (NTC 98) y (NTC 93) proponen ensayos según el tamaño del agregado. Ambos métodos consisten en generar, por medio de un tambor, impactos en las partículas del agregado, con el fin de que este pierda masa; esta pérdida se representa en forma de porcentaje comparando la masa inicial con la masa final del agregado.

Es por esto que el concreto con agregados reciclados de concretos triturados presenta rangos de desgaste promedio en la máquina de los ángeles entre el 25% y el 45% de abrasión, debido a que el mortero adherido superficialmente a las partículas del



agregado reciclado se elimina rápidamente con cada impacto, además de la pérdida de masa natural de agregado propio (Arriaga, 2013).

En consecuencia, el ensayo aplicado a concretos con agregados reciclados tiene valores de pérdidas de peso y marcas de ahuellamiento difíciles de establecer, debido a que no poseen un comportamiento estandarizado o definido, es decir, que su sensibilidad es muy grande, lo que le permite tener valores con gran dispersión (Mora, 2016).

3.3.3 Granulometría

Otra característica del agregado reciclado es la granulometría, la cual hace referencia a la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Esta propiedad 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 (Bojacá, 2013).

Del mismo modo, la granulometría de los agregados está sujeta a los procedimientos, materiales y parámetros dados en las normas (NTC 32), (NTC 77) y (NTC 174, 2000). Existen dos tipos de nomenclaturas para los tamices que se usan en los ensayos descritos en la Tabla 1.



Tabla 1.

Designación de tamices según las normas NTC y ASTM.

NTC 174	A.S.T.M
--	6"
--	5"
--	4 ½"
101,6 mm	4"
90,5 mm	3 ½"
76,1 mm	3"
64,0 mm	2 ½"
50,8 mm	2"
38,1 mm	1 ½"
25,4 mm	1"
19,0 mm	¾"
12,7 mm	½"
9,51 mm	3/8"
4,76 mm	No.4 (límite agregados gruesos - finos)
2,38 mm	No.8
1,19 mm	No.16
595 µm	No.30
297 µm	No.50
149 µm	No.100
74 µm	No.200

Fuente: (NTC 174, 2000). Elaboración propia.

A partir de los análisis de granulometría se generan las curvas granulométricas, comparadas con los límites establecidos por la NTC 174, tanto para el agregado grueso como para el fino. Posteriormente se encuentra el tamaño máximo, definido como la



menor abertura del tamiz, que permite el paso total del agregado; luego, el tamaño máximo nominal hace referencia al mayor tamaño del tamiz sobre el cual se permite la retención del material.

En general las granulometrías de los agregados reciclados se encuentran dentro de los límites establecidos para los agregados naturales, sin embargo, existen pequeñas variaciones por el proceso de trituración al cual son sometidos los agregados reciclados; estas variaciones se pueden observar tanto en las fracciones gruesas como en las finas, lo que afecta la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados e incrementa el porcentaje de arena, debido a la disgregación que sufre el agregado grueso (Arriaga, 2013).



3.4 MANEJABILIDAD DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS

“La manejabilidad del concreto en estado fresco se refiere a la facilidad con que este puede ser mezclado, manejado, transportado, colado, compactado y terminado sin que este pierda su homogeneidad” (Gerardo & Rivera, 2016, pág. 83).

La manejabilidad del concreto en estado fresco se mide a través del ensayo de asentamiento dado en la (NTC 396), que determina la consistencia y fluidez de la mezcla.

Del mismo modo, la gradación del agregado fino y grueso, la forma y textura superficial de los agregados, la cantidad relativa de la pasta de cemento, el contenido de aire y agua, el uso de aditivos y el tipo de mezclado son los factores que más influyen en la manejabilidad de la mezcla de concreto en estado fresco.

En definitiva, la trabajabilidad de las mezclas fabricadas con agregados reciclados requiere un ajuste en la cantidad de cemento para compensar el agua adicional, demandada por la textura y el mortero adherido del agregado reciclado (Laverde, 2014).

3.5 RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS

La resistencia mecánica del concreto en estado endurecido depende de numerosas y complejas variables como la composición química del cemento, su finura, la relación agua/cemento, la calidad intrínseca de los agregados tanto finos como gruesos, las condiciones de temperatura y humedad del ambiente y la eficiencia del curado.

Por su naturaleza, el concreto es un material discontinuo y heterogéneo que arroja resultados variables en cuanto a su calidad y resistencia, debido a la compleja interacción de sus fases constituyentes como la resistencia de la pasta hidratada



(generalmente llamada matriz), la resistencia individual de las partículas del agregado y la relación existente entre la interfaz matriz–agregado.

En consecuencia, a partir de la teoría encontrada en las diferentes investigaciones consultadas, se definen las propiedades mecánicas del concreto reciclado en estado endurecido.

3.5.1 Resistencia a la compresión

Según el reglamento NSR-10 (2010), “título C – Concreto Estructural” , la resistencia especificada a la compresión del concreto (f'_c) indica la capacidad para soportar una carga axial por unidad de área y se expresa en términos de esfuerzo (MPa, PSI o kg/cm^2). La resistencia a la compresión se puede definir como la resistencia máxima soportada de un concreto sometido a carga axial (Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008).

Por otro lado, en la norma NTC 673, “Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto” , se presentan todos los parámetros exigidos para determinar la resistencia a la compresión del concreto, sin embargo, las propiedades físicas y químicas de los agregados y sus proporciones en la mezcla de concreto, proporcionan la resistencia a la compresión del concreto (Gutiérrez, 2008).

Según Gutiérrez, los concretos elaborados con el 100% de agregados gruesos reciclados de concretos triturados, generan resistencia de entre el 10 y 20% menores a las adquiridas con agregados naturales; además resalta que el uso de agregados provenientes de residuos mixtos de cerámica y concreto triturado disminuyen notablemente la resistencia del concreto y, únicamente bajo condiciones ideales, se han alcanzado resistencias máximas a la compresión de 30 MPa.



Al reemplazar el 100% del agregado grueso natural, por agregado reciclado, proveniente de concreto titurado, la resistencia final del concreto suele disminuir en un 20% y hasta un 30%. Sin embargo, cuando la sustitución se realiza a un 50% de agregados gruesos reciclados, las resistencias a la compresión disminuyen a valores ubicados entre el 2% y el 15% (Arriaga, 2013).

Otras investigaciones muestran un notable incremento en la resistencia a la compresión de los concretos con agregado grueso reciclado de concretos triturados, cuando se utilizan entre el 20% y el 30% de reemplazo reciclado en la mezcla.

Según Bojacá (2013), los concretos con el 20% de agregado grueso reciclado ensayados a 28 días, tienen resistencias a la compresión superiores a las del concreto convencional del orden del 6%.

3.5.2 Resistencia al corte

Según el reglamento NSR-10 (2010), “título C – Concreto Estructural, capítulo C.11 – Cortante y Torsión” , el concreto utilizado para fines estructurales brinda una porción de la resistencia final a cortante en una sección de concreto. Sin embargo, el mismo capítulo C.11 enfatiza que el acero de refuerzo transversal, en cualquier sección de concreto, es el encargado de absorber los esfuerzos por cortante cuando no se considere la resistencia a cortante del concreto.

Simultáneamente el reglamento NSR-10 en sus secciones C.11.2 y C.11.3 brinda las ecuaciones para calcular la resistencia a cortante del concreto pre esforzado y no pre esforzado, no obstante, advierte que la resistencia al cortante del concreto debe tomarse como cero para elementos sometidos a tracción axial significativa.

Sin embargo, los concretos con agregados naturales y con agregados reciclados poseen una baja resistencia al corte, debido al agrietamiento generado por la



contracción inducida del fraguado y por los cambios de temperatura durante y después de su fabricación.

Algunos autores y normas, como el reglamento NSR-10, tienen en cuenta la capacidad al corte que proporciona el concreto. Se ha observado que al sustituir las fracciones gruesas naturales por agregados gruesos reciclados, provenientes de la trituración de concreto, se generan pérdidas de hasta el 26% de la resistencia al corte del concreto. Dicho valor aumenta hasta un máximo del 40% cuando se reemplazan tanto los agregados gruesos como los finos (Arriaga, 2013).

3.5.3 Resistencia a la flexión

Según el reglamento NSR-10 (2010), “título C – Concreto Estructural” , el módulo de ruptura (f_r) define la capacidad del concreto simple de resistir los esfuerzos generados por la flexión, este parámetro se mide a partir de lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 2871. El método consiste en medir la resistencia a la flexión mediante el uso de una viga simple con carga en los tercios.

La resistencia a la tracción, también llamada módulo de ruptura, suele establecerse como un porcentaje de la resistencia a la compresión del concreto sometido a la flexión. Cuando se utilizan agregados naturales se obtienen resistencias a la flexión de alrededor de un 10% al 15% de resistencia a la compresión en condiciones normales, mientras que al utilizar agregados gruesos reciclados provenientes de la trituración de concreto, se obtienen variaciones de entre el 10% y el 30% (Arriaga, 2013).

Del mismo modo, cuando se utiliza un 20% de agregados gruesos reciclados de concretos triturados, en sustitución del agregado grueso natural, se obtienen incrementos aproximados de un 6% de la resistencia a la flexión del concreto simple,



mientras que utilizando un 40% de material de reemplazo se obtienen resistencias menores al 13% (Bojacá, 2013).

Cabe aclarar que según el reglamento NSR-10, comentario CR10.2.5, la resistencia a la flexión del concreto simple es una propiedad importante al momento de calcular y brindar buenas condiciones de agrietamiento y deflexiones a nivel de cargas de servicio. Sin embargo, en caso de un sismo esta propiedad pierde su valor ya que numéricamente considera que toda sección de concreto sometida a la tracción no aporta resistencia a la flexión durante el evento sísmico.

3.5.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad en el reglamento NSR-10, 2010, "capítulo C – Concreto Estructural" , se define como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria, correspondiente para valores menores al límite de proporcionalidad del material. Este valor de elasticidad del concreto se puede calcular a partir del ensayo planteado en la norma NTC 4025 o utilizando las ecuaciones dadas en la NSR-10, comentario CR8.5.

Según investigaciones realizadas por la Universidad Javeriana y la Universidad de Los Andes de Bogotá, el módulo de elasticidad depende del origen del agregado grueso, ya sea ígneo, metamórfico o sedimentario, y de la masa unitaria propia del agregado. Los agregados de origen ígneo brindan un mayor módulo de elasticidad al concreto, seguido de los agregados metamórficos y por último, los agregados de origen sedimentario. Sin embargo, la norma NSR-10 (2010) no especifica el uso de ecuaciones para agregados provenientes de materiales reciclados.

De otro modo, Arriaga (2013) argumenta que el concreto es elástico antes de alcanzar un esfuerzo mayor al 45% de su resistencia a la compresión; una vez se supera ese esfuerzo, el concreto entra en la etapa de microfisuración y se convierte en un material



que ha sufrido deformaciones plásticas. Todo ese proceso se ubica en la interfase agregado – pasta y esta a su vez determina el comportamiento del material hasta llegar a la falla.

En consecuencia, cuando se utilizan sustituciones del 20% de agregados gruesos reciclados, provenientes de residuos de concreto triturado, se obtienen módulos de elasticidad de alrededor de un 6%, inferiores a los obtenidos con agregados naturales, y utilizando 40% de material de sustitución este porcentaje aumenta hasta un 9%, (Bojacá, 2013).

De igual manera, al sustituir el 50% del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado de concretos triturados, se obtienen pérdidas de alrededor de un 10% al 20% del valor del módulo de elasticidad convencional; y al sustituir un 100% del agregado grueso, se obtienen pérdidas de hasta 50% del valor del módulo de elasticidad (Arriaga, 2013).

3.6 DURABILIDAD DEL CONCRETO CON AGREGADOS RECICLADOS

En la misma línea de análisis, la durabilidad del concreto se mide como la capacidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión y cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras que produzcan deterioro del concreto.

En los siguientes apartados se describen los procesos químicos que más afectan la durabilidad del concreto: la expansión por sulfatos, la corrosión del concreto, el ataque por cloruros, la reacción álcali-agregado y se explica la influencia que tienen los agregados reciclados en la fabricación de concreto reciclado para cada uno de los procesos químicos nombrados.



3.6.1 Influencia del agregado reciclado en la expansión por sulfatos

Los sulfatos son compuestos químicos presentes en el ambiente en una gran variedad de concentraciones como en el suelo, aguas subterráneas, superficiales y de mar. La propiedad más agresiva del sulfato se presenta en forma de sales llamadas sulfato de amonio (NH_4SO_4), sulfato de calcio (CaSO_4), sulfato de magnesio (MgSO_4) y sulfato de sodio (NaSO_4).

Dichos sulfatos pueden estar presentes en los efluentes y desechos industriales como en los de las industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería. El agua empleada en las torres de enfriamiento también puede contener sulfatos debido a su acumulación gradual, proveniente de la evaporación (Garzón, 2013).

Por otra parte, en los concretos reciclados se presenta una mayor vulnerabilidad ante los ataques del sulfato, debido a la adherencia de la pasta de cemento en los agregados reciclados que aumenta la porosidad final del concreto.

En consecuencia, cuando existen concentraciones relativamente altas de sulfatos y entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta de cemento, se genera una reacción química reflejada en el aumento de volumen de la pasta de cemento, la cual crea una presión interna capaz de debilitar, romper y desintegrar el concreto.



Figura 7. Degradación del concreto por expansión y fisuración ocasionada por el ataque de los sulfatos.

Fuente: Fotografía tomada del autor corporativo (Syda Productions, 2016).

Cabe aclarar que existen dos tipos de mecanismos de ataque de los sulfatos en el concreto, los cuales son:

- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, que forma sulfatos de calcio deshidratado ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$), también llamado yeso.
- ETRINGITA – Uno de los compuestos que más daño genera es el sulfato de calcio. Este, al reaccionar con el agua, el yeso y el aluminato tricálcico, presente en el cemento tipo portland, genera un sulfoaluminato cálcico llamado ETRINGITA ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4$) el cual es poco soluble y crea fuertes presiones que aumentan hasta 2.3 veces el volumen original del concreto.

Estas dos reacciones incrementan el volumen del concreto, la pérdida de resistencia y la adherencia de la pasta de cemento con los agregados. El ataque químico depende del tipo de sulfato, su concentración, el tipo de ataque, la presión del elemento de concreto, la temperatura, que al incrementarse aumenta la velocidad de la reacción y la presencia de otros iones en la solución del sulfato (Garzón, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia un comportamiento similar entre el concreto reciclado y el convencional, especialmente cuando el porcentaje de sustitución de agregado grueso no supera el 30%. No obstante, la penetración de



sustancias con alto contenido de sulfatos susceptibles de atacar al concreto pueden afectar más fácilmente al concreto reciclado, elaborado con agregados gruesos de concretos triturados, que al concreto convencional (Bojacá, 2013).

3.6.2 Corrosión del concreto con agregados reciclados

La corrosión del concreto (también llamada carbonatación) es otro de los aspectos que afecta la durabilidad. Se presenta por la acción del dióxido de carbono en el concreto, cuya reacción química le genera porosidad y afecta la protección del acero de refuerzo, lo que inicia procesos de corrosión en el acero de refuerzo al estar expuesto a los agentes del medio ambiente.

Por otra parte, el paso del tiempo provoca la pérdida de las características de resistencia del concreto carbonatado, ya que presenta una degradación química del concreto y se debilita su estructura.

Para medir la presencia de concreto carbonatado existen ensayos acelerados, sin embargo, el ensayo más común empleado en campo es la aplicación de fenolftaleína al concreto. Este reactivo líquido sirve para medir el PH del concreto: toma un color púrpura en concretos sanos y en concretos carbonatados tiene una reacción incolora.



Figura 8. Ensayo de carbonatación utilizando fenolftaleína.

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de la carbonatación del concreto, el gas carbónico se disuelve en algunos de los poros y reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto,



lo que produce ácido carbónico que se convierte en hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, carbonato de calcio (CaCO_3) y agua. Como consecuencia, se produce un descenso significativo del pH en la capa superficial del concreto: de su valor usual de 13, baja hasta valores del orden de 9. Al perder su basicidad, el PH deja de ser un elemento protector del refuerzo ante el fenómeno de la corrosión (Laverde, 2014).

La velocidad con que el frente de carbonatación avanza depende de aspectos como la edad de la estructura, nivel de CO_2 en el ambiente (normalmente es el 0.035%), humedad relativa del medio ambiente y variación de la humedad en la estructura, temperatura, calidad de la pasta del concreto, calidad del concreto (porosidad) que dependen de la relación agua/cemento, grado de compactación del concreto, curado y el cuidado durante el proceso de fraguado (Bojacá, 2013).



Figura 9. Oxidación del acero de refuerzo causada por el desprendimiento y carbonatación del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

En contraste, se evidencia que la profundidad de carbonatación disminuye al incrementar el contenido de agregados gruesos reciclados en el concreto que proviene de concretos triturados. Esta situación probablemente se debe al aumento de alcalinidad en el concreto gracias al incremento del contenido de cemento usado y el mortero adherido superficialmente en las partículas del agregado reciclado (Laverde, 2014).



3.6.3 Ataque por cloruros en el concreto con agregados reciclados

Para definir el ataque por cloruros vale la pena mencionar que el agua de mar contiene iones de cloruro y sulfatos que atacan al concreto mediante la acción química. La cristalización de las sales en los poros de la pasta de cemento es capaz de destruirlo debido a la presión ejercida por los cristales de las sales. Este tipo de ataque ocurre únicamente en estructuras que están ubicadas al nivel del mar o que están expuestas a ciclos alternos de humedecimiento y secado.

En este proceso, los iones de cloruro penetran la estructura de concreto a través de la difusión, la migración, la succión capilar y la adsorción, logran llegar hasta el acero de refuerzo e inician la corrosión en el mismo. Las lesiones generadas por el ion de cloruro se evidencian en el concreto como manchas marrones, producto de la corrosión del acero de refuerzo, la fisuración excesiva de las secciones y su desprendimiento.



Figura 10. Estructura cercana al mar bajo la acción de los iones de cloruro.

Fuente: Fotografía tomada de (Moreno, 2013).

Como se demuestra, la penetración del ion cloruro se presenta en la interfaz conformada por la pasta de cemento nueva y la pasta de cemento endurecida adherida al agregado grueso reciclado. Sin embargo, es evidente que al disminuir la permeabilidad de la pasta de cemento vieja, aumenta la facilidad de penetración de los cloruros (Arriaga, 2013).



3.6.4 Permeabilidad del concreto con agregados reciclados

Otra de las propiedades que determina la durabilidad del concreto es la permeabilidad, definida como la capacidad para absorber o dejar pasar sustancias. La permeabilidad se evalúa por medio de los ensayos de sortividad y tasa de absorción superficial inicial del concreto, como se explica a continuación.

3.6.4.1 *Sortividad*

La sortividad es la propiedad que mide la capacidad de un medio para absorber líquido por capilaridad, en este caso nos referimos al concreto y al agua. También, la sortividad es un índice de transporte de humedad a un espécimen no saturado que permite evaluar su durabilidad, ya que refleja la forma en que el concreto es penetrado por el agua y otros agentes agresivos, y proporciona información sobre la calidad de la superficie del concreto (Jované, 2009).

La norma ASTM C1585-13 describe un ensayo en donde se mide la sortividad o velocidad de absorción. Este consiste en poner en contacto una de las superficies de la probeta de concreto y medir la tasa de absorción del espécimen, como el resultado del cambio de la masa en comparación a su estado inicial, respecto a la absorción del agua a diferentes intervalos de tiempo (Mora, 2016).

Así mismo, la sortividad permite considerar la presencia, distribución y mecanismos de transporte de los poros de la pasta de cemento en el concreto: dos mezclas con igual porosidad, pero distinta conectividad, tendrán un comportamiento diferente, es decir, los concretos con mayor cantidad de poros interconectados tendrán una mayor sortividad.

De manera semejante, los capilares influyen en los mecanismos de transporte de sustancias al concreto, por lo que el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido es la absorción capilar. De tal manera que, determinar la capacidad de absorción



capilar es una herramienta confiable para caracterizar el concreto en forma comparativa (Benavides, 2014).

Igualmente, en la elaboración de nuevos concretos se puede notar que, al aumentar el porcentaje de sustitución de agregados reciclados, la resistencia del concreto a la penetración de un fluido, por el efecto capilar de los poros presentes en su matriz, se ve afectada significativamente (Cruz & Gómez, 2013).

3.6.4.2 Tasa de absorción superficial inicial (ISAT)

Por su parte, la Tasa de absorción superficial (ISAT), regida bajo la norma británica BS 1881 Part 208, permite determinar la dirección y el rango de tiempo que tarda en desplazarse una lámina de agua dentro de un capilar del espécimen de concreto saturado. Este valor equivale a la tasa de flujo de agua dentro del concreto por unidad de área.

Este ensayo se encuentra directamente relacionado con la permeabilidad del concreto y linealmente relacionado con la cantidad de agregado reciclado, usado como reemplazo de agregado natural.

Los valores de tasa de absorción inicial presentan una disminución en la permeabilidad de los concretos adicionados con agregado fino reciclado (carbonatado y no carbonatado) en las mezclas adicionadas con 25% y 50% de material de remplazo, en comparación a la mezcla de control. Además, en el estudio se identificaron valores ligeramente menores de tasas de absorción inicial para las muestras que contenían agregados finos reciclados carbonatados. Este comportamiento es atribuido a la formación de productos de carbonatación en los ARC que saturan el sistema de poros de la muestra y disminuyen la permeabilidad del concreto (Muñoz, 2017).



3.6.5 Reacción álcali-agregado

Finalmente, la reacción álcali-agregado es un fenómeno que afecta la durabilidad, se manifiesta en forma de fisuras en la pasta del concreto y con la aparición de un gel verde conocido como gel de sílice o gel de silicato de sodio, el cual está presente en las partículas internas de la pasta. Este gel, aumenta su volumen al absorber agua y genera tensiones internas en el concreto, lo fisura y deteriora su resistencia mecánica.

El gel de sílice se genera a partir de la reacción entre el álcalis (Na_2O) presente en el cemento y el sílice encontrado en los agregados gruesos como las rocas silicosas, calizas, dolomitas silíceas, rocas volcánicas ácidas, riolitas, latitas, dacitas, andesitas, algunas formas de cuarzo criptocristalino, micro cristalino o cristalino intensamente deformado.

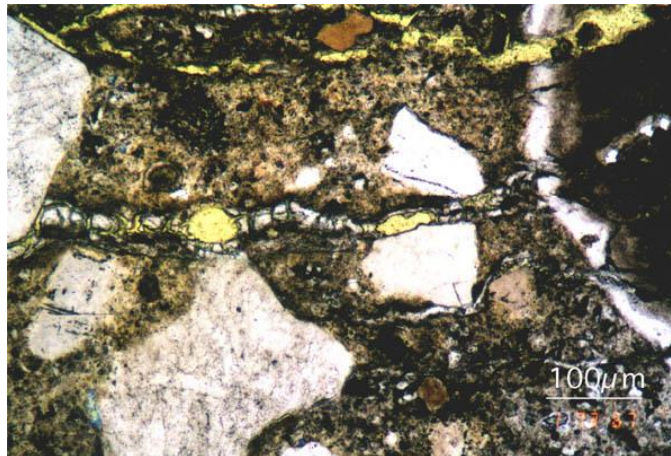


Figura 11. Sección de concreto vista con microscopio petrográfico en la que se evidencia aumento de volumen y agrietamiento del concreto por el gel de sílice.

Fuente: fotografía tomada del autor corporativo (The masterbuilder, 2015).

Las principales fuentes externas de álcalis son las sales presentes en el agua del mar o en la brisa marina. Los álcalis derivados de estas fuentes pueden acumularse en el fluido de los poros del concreto, lo que aumenta su alcalinidad y la posibilidad de reacción con los agregados.



De igual manera, tanto en el agregado natural como en el agregado reciclado pueden presentarse concentraciones de sílice. No obstante, en el mortero adherido a los agregados reciclados se presentan zonas de alta porosidad que permiten el flujo de agua, lo cual aumenta la posibilidad de que exista reacción química entre el sílice y el álcalis (Arriaga, 2013).

Para detectar la presencia de sílice activo la NTC recomienda efectuar ensayos de reactividad potencial por medio del método químico descrito en la norma NTC 175 o a través de un análisis petrográfico más detallado, de acuerdo con la norma ASTM C295-08.



4 NORMATIVA Y CLASIFICACIÓN DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS

Este capítulo describe de manera general el avance normativo, nacional e internacional, sobre el uso de los residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición (RCD) como agregados reciclados en la construcción de obras civiles.

Como primera medida, se exponen los avances normativos en Colombia, específicamente en la ciudad de Bogotá, dando a conocer los usos de los RCD en la generación de agregados reciclados para la construcción de vías, según especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

Por otra parte, se exponen los avances normativos internacionales en países como España, Reino Unido, Portugal, Brasil, Alemania, Holanda, Bélgica, Australia, Estados Unidos, Perú, Italia, Noruega, China – (Hong Kong), Dinamarca, Suiza y Japón.

Para finalizar, se presenta la revisión detalla de las especificaciones técnicas exigidas en el ámbito internacional respecto a los componentes, contenidos, ensayos, usos y restricciones de los RCD utilizados como agregados reciclados para la construcción.

4.1 Referencias para la clasificación de los RCD en Colombia (COL)

Según la “Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra”, elaborada en el año 2015 por la Alcaldía Mayor de Bogotá a través de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), los residuos de construcción y demolición se clasifican en dos grandes categorías: residuos aprovechables y no aprovechables, estos a su vez se dividen en varios grupos y clases como se muestra en la Tabla 2.



Tabla 2.

Clasificación de los residuos de construcción y demolición (RCD) según la SDA.

CATEGORÍA	GRUPO	CLASE	COMPONENTES
RCD APROVECHABLES	I-Residuos mezclados	1 Residuos pétreos	Concreto, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen el tamiz #200
	II-Residuos de material fino	1 Residuos finos no expansivos	Arcillas (caolín), limos y residuos inertes, poco o no plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz #200
		2 Residuos finos expansivos	Arcillas (montmorillonitas) y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz #200
	III-Otros residuos	1 Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios y cauchos
		2 Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc
		3 Residuos de pedones	Residuos de tierra negra
		4 Residuos de cespedones	Residuos vegetales y otras especies bióticas
RCD NO APROVECHABLES	IV-Residuos peligrosos, V-Residuos especiales, VI-Residuos contaminados con otros residuos y VI-Otros residuos		

Fuente: Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014).

En esta clasificación se destaca el *grupo I residuos mezclados de clase pétreos* de la categoría de *RCD aprovechables*, ya que estos se componen de residuos de la construcción, provenientes de materiales como el concreto, cerámica, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, los cuales sirven para la conformación de agregados gruesos reciclados.



Con la clasificación inicial de los RCD que pueden ser aprovechados para la construcción el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), por medio del contrato 791 de 2017, desarrolló las especificaciones técnicas generales "IDU ET- publicada en el año 2018", donde se plantea el uso de agregados reciclados que provienen del RCD para bases y subbases granulares para vías vehiculares y para subbases de vías peatonales y ciclorrutas. La clasificación planteada está descrita en la Tabla 3.

Tabla 3.

Clasificación de los residuos de construcción y demolición (RCD) según IDU ET- publicada en el año 2018.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
AR_BG	Áridos reciclados mixtos con preferencia de hormigón	65% mínimo de hormigón o piedra natural 35% máximo de mampostería 5% máximo de material bituminoso 1% máximo de vidrio 1% máximo de materiales adicionales 1 cm ³ /kg máximo de material flotante	<p>Bases y Subbases granulares</p> <p>AR_BG se permite para bases de tránsito T1</p> <p>AR_SBG se permite para sub-bases de tránsito T1, T2 y T3</p> <p>AR_SBG_PEA se permite en sub-bases para vías peatonales, ciclorutas y andenes</p>
AR_SBG	Áridos reciclados mixtos	50% mínimo de hormigón o piedra natural 50% máximo de mampostería 5% máximo de material bituminoso 1% máximo de vidrio 1% máximo de materiales adicionales 2 cm ³ /kg máximo de material flotante	
AR_SBG_PEA	Áridos reciclados mixtos con material bituminoso	35% mínimo de hormigón o piedra natural 65% máximo de mampostería 30% máximo de material bituminoso 1% máximo de vidrio 1% máximo de materiales adicionales 2 cm ³ /kg máximo de material flotante	

Fuente: IDU - Pontificia Universidad Javeriana - Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2018.

Elaboración propia.

Esta clasificación dada por el IDU es el primer avance normativo en el uso de los RCD como agregados reciclados para la construcción en Colombia, sin embargo, su alcance no va más allá del planteamiento para usos en vías vehiculares.



4.2 NORMATIVA Y CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL DE LOS RCD

4.2.1 Clasificación en España (ESP)

De acuerdo a la "Guía Española de Áridos Reciclados (GEAR) procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), elaborada en el periodo 2008-2011, bajo el marco de proyectos de desarrollo experimental del plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, como iniciativa de la asociación Española GERD (Gestores de Residuos de Construcción y Demolición), los agregados reciclados provenientes de los RCD se clasifican en cinco categorías, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la guía GEAR, España.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS (Clases 1, 2 y 3)
ARH	Áridos reciclados de hormigón	90% mínimo de hormigón o piedra natural (sin mortero adherido) 10% máximo de material cerámico 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales	<p>Las clases 1, 2 y 3 incluyen solamente agregados tipo ARH, ARMh y ARMc</p> <p>Elementos Estructurales</p> <p>Reemplazo de hasta un 20% para la clase 1 con un f'c máximo de 30MPa</p> <p>Elementos No Estructurales</p> <p>Reemplazo de hasta 100% para las clases 1 y 2 con un f'c máximo de 20MPa</p> <p>Reemplazo de hasta 100% para clase 3 hormigón de limpieza</p> <p>No tiene restricción por clase de exposición</p>
ARMh	Áridos reciclados mixtos de hormigón	70% mínimo de hormigón o piedra natural (sin alcanzar el 90%) 30% máximo de material cerámico 5% máximo de asfalto	
ARMc	Áridos reciclados mixtos cerámicos	70% máximo de hormigón o piedra natural 30% mínimo de material cerámico (sin alcanzar el 70%) 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales	
ARC	Áridos reciclados cerámicos	70% mínimo de material cerámico 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales	
ARMa	Áridos reciclados mixtos con asfalto	30% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales	

Fuente: guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (GERD, AIDICO, AITEMIN, & INTROMAC, 2011). Elaboración propia.



4.2.2 Clasificación en Reino Unido (UK)

Según la norma británica "BS 8500 Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206" partes 1 y 2 ("BS 8500-1:2015+A2:2019" y "BS 8500-2:2015+A2:2019") y la guía "PD 6682-1 Aggregates – Part 1: Aggregates for concrete – Guidance on the use of BS EN 12620", los agregados reciclados provenientes de los RCD se clasifican en dos categorías:

- Coarse Crushed concrete Aggregate (**CCA**), también conocido como Recycled Concrete Aggregate (**RCA**) proviene principalmente del hormigón triturado y puede utilizarse en un máximo de contenido del 20%, para generar concretos estructurales siempre y cuando cumpla con las condiciones dadas por la norma británica.
- Coarse recycled Aggregate (**RA**) son una clase de agregados menos exigentes, compuestos por hormigón o mampostería. Suelen utilizarse para elementos no estructurales que requieran de bajas resistencias a la compresión.

Por otra parte, según las normas británicas "BS EN 13043:2013 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas", "BS EN 13242:2013 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction" y sus respectivas guías de uso "PD 6682-2:2009+A1:2013" y "PD 6682-6:2009+A1:2013", los agregados reciclados provenientes de los RCD para usos en pavimentos y subbases granulares se clasifican en cuatro grupos como se evidencia en la Tabla 5.



Tabla 5.

Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la norma BS 8500, Reino Unido.

CATEGORÍA	SUB CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
CCA	RC ₉₀	Reciclados de hormigón, mortero, unidades de albañilería de hormigón	90% mínimo de hormigón 10% máximo de mampostería 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales 2% máximo de material flotante 4% máximo de finos 0.8% máximo sulfato soluble en ácido	Elementos Estructurales CCA reemplazo de hasta un 20% con f'c de 20MPa hasta un máximo de 40MPa Elementos No Estructurales CCA reemplazo de hasta un 100% con f'c menor a 20MPa RA reemplazo de hasta un 100% con f'c menor a 16MPa
	RCu ₉₀	Reciclados de unidades de mampostería de hormigón, áridos hidráulicamente unidos o no, piedra natural		
	Rb ₁₀	Unidades de mampostería de arcilla (ladrillos o baldosas), unidades de silicato de calcio y concreto aireado no flotante		
RA	RC _{NR}	Reciclados de hormigón, mortero, unidades de albañilería de hormigón	No indica % de Hormigón	En todos los casos CCA y RA Solo en exposiciones tipo X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, DC-1 Clases de exposiciones según BS 8500-1:2015+A2:2019
	RCu _{NR}	Reciclados de unidades de mampostería de hormigón, áridos hidráulicamente unidos o no, piedra natural	No indica % de mampostería 10% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales	
	Rb _{NR}	Unidades de mampostería de arcilla (ladrillos o baldosas), unidades de silicato de calcio y concreto aireado no flotante	2% máximo de material flotante 4% máximo de finos	
A	A1	Asfalto recuperado	Declarar % de hormigón	Pavimentos Solo tipo A1, no especifica % de reemplazo Subbases A1, A2, A3, A4 no especifica % de reemplazo
	A2	Hormigón triturado	Declarar % de mampostería Declarar % de bituminosos	
	A3	Ladrillo triturado de mampostería	Declarar % de materiales adicionales	
	A4	Combinación de A1, A2 y A3	Declarar % de material flotante Declarar % de vidrio	

Fuente: Normativa británica (BS 8500-1:2015+A2:2019, 2019) y (BS 8500-2:2015+A2:2019, 2019). Elaboración propia.

4.2.3 Clasificación en Portugal (PORT)

Según la guía para la utilización de agregados gruesos reciclados en ligantes hidráulicos "E 471 -2009" de Portugal, basada en los requisitos dados por la norma europea "UNE EN12620 Áridos para hormigón", los agregados reciclados provenientes de RCD se clasifican en tres categorías como se muestra en la Tabla 6.



Tabla 6.

Clasificación de los agregados que provienen de (RCD) según la guía E471-2009, Portugal.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
ARB1	Áridos reciclados de hormigón, agregado ligado o no o piedra natural	90% mínimo de hormigón o mortero 90% mínimo de agregados ligados o no o piedra natural 10% máximo de albañilería arcillosa, silicato de calcio u hormigón celular no flotante 5% máximo de asfalto 0,5% máximo de materiales adicionales 2% máximo de material flotante	<p>Elementos Estructurales</p> <p>ARB1 reemplazo de hasta un 25% con $f'c$ máximo de 40MPa ARB2 reemplazo de hasta un 20% con $f'c$ máximo de 35MPa</p> <p>Elementos No Estructurales</p> <p>ARC reemplazo de hasta 100% en hormigones de llenado o de regularización</p> <p>En todos los casos ARB1, ARB2 y ARC Solo en exposiciones tipo X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1</p> <p>Clases de exposiciones según NP EN 206-1</p>
ARB2	Igual a ARB1 pero con mayor contenido de mampostería	70% mínimo de hormigón o mortero (sin alcanzar el 90%) 70% mínimo de agregados ligados o no o piedra natural (sin alcanzar el 90%) 30% máximo de albañilería arcillosa, silicato de calcio u hormigón celular no flotante 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales adicionales 2% máximo de material flotante	
ARC	Materiales mixtos sin aparente separación entre sus constituyentes	90% mínimo de la combinación entre: - hormigón o mortero - agregados ligados o no o piedra natural - albañilería arcillosa, silicato de calcio u hormigón celular no flotante 10% máximo de asfalto 2% máximo de materiales adicionales 2% máximo de material flotante	

Fuente: Guía para la utilización de agregados reciclados gruesos en hormigones de ligantes hidráulicos (E-471, 2009). Elaboración propia.

Por otra parte, las normas "E 472", "E 473" y "E 474" presentan la guía para la utilización de agregados reciclados provenientes de RCD para el uso en pavimentos, bases, subbases, terraplenes y capas, tal como se indica en la Tabla 7.



Tabla 7.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según las guías E472, E473 y E474 de 2009, Portugal.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
MBR1	Mezclas bituminosas recuperadas	No se especifica la cantidad del material bituminoso-asfáltico	<p>Pavimentos</p> <p>MBR1 reemplazo de hasta 10% en capas de desgaste</p> <p>MBR2 reemplazo de hasta 50% en capas de regularización y bases</p> <p>MBR2 reemplazo de hasta 25% en capas de regularización y bases</p> <p>MBR3 reemplazo de hasta 10% en capas de desgaste</p>
MBR2			
MBR3			
AGER1	Reciclados de capas no ligadas de pavimentos	50% mínimo de hormigón o mortero, agregados ligados o no o piedra natural	<p>Bases y subbases (reemplazo del 100%)</p> <p>AGER1 y AGER2 para bases de hasta 150 TMDp</p> <p>AGER3 para bases de hasta 300 TMDp</p> <p>AGER1 para subbases de hasta 150 TMDp</p> <p>AGER2 y AGER3 para subbases de hasta 300 TMDp</p>
AGER2		10% máximo de albañilería arcillosa, silicato de calcio u hormigón celular no flotante	
AGER3		30% máximo de asfalto	
B	Áridos reciclados de hormigón, agregado ligado o no o piedra natural	1% máximo de materiales adicionales	<p>Terraplenes y capas de lecho</p> <p>MAT1 que incluye B, MB, C se usa para terraplenes</p> <p>MAT2 que incluye B, MB, C se usa para capas de lecho y terraplenes</p> <p>MAT1 con tamaño máximo de partículas de 150mm</p> <p>MAT2 con tamaño máximo de partículas de 80mm</p> <p>MAT1 calidad de finos <2</p> <p>MAT2 calidad de finos <1</p>
MB	Contenido mixto de hormigón y mampostería	5% máximo de material flotante	
C	Materiasles mixtos mayoritariamente asfalto	90% mínimo de hormigón o mortero, agregados ligados o no o piedra natural	
		10% máximo de albañilería arcillosa, silicato de calcio u hormigón celular no flotante	
		5% máximo de asfalto	
		1% máximo de materiales adicionales	
		5% máximo de material flotante	

Fuente: Guías portuguesas E-472, E-473 y E-474. Elaboración propia.



4.2.4 Clasificación en Brasil (BRA)

Según la norma brasilera "ABNT NBR 15116 Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción - Utilización en pavimentación y preparación de concreto sin función estructural", los agregados reciclados provenientes de los RCD se clasifican en cuatro clases: A, B, C y D.

La clase A comprende los materiales que provienen de la demolición y construcción de obras civiles como pavimento, cerámica, concreto y demás constituyentes de las construcciones y se dividen en tres categorías, como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma ABNT NBR 15116, Brasil.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
ARC	Fragmentos a base de cemento portland o rocas	90% mínimo de hormigón o rocas 7% máximo de absorción 1% máximo de cloruros 1% máximo de sulfatos 2% máximo de materiales no minerales 2% máximo de terrones de arcilla 3% máximo de contaminantes 10% máximo de material fino	Elementos No Estructurales ARC o ARM reemplazo de hasta 100% en hormigones para rellenos, contrapiso, calzadas y fabricación de artefactos no estructurales, como bloques de sellado, alambre, guías, canales, muros y placas de muro
ARM	Fragmentos a base de cemento portland o rocas	90% máximo de hormigón o rocas 12% máximo de absorción 1% máximo de cloruros 1% máximo de sulfatos 2% máximo de materiales no minerales 2% máximo de terrones de arcilla 3% máximo de contaminantes 10% máximo de material fino	En todos los casos $f'c$ mínimo de 10MPa y máximo de 15MPa
Clase A	Residuos de pavimento y suelos procedentes de la tierra	2% máximo de sulfatos 2% máximo de materiales no minerales similares 3% máximo de materiales no minerales no similares	Pavimentos Capas de refuerzo del subsuelo, subbase y base de pavimentación o revestimiento primario de vías no pavimentadas

Fuente: Norma brasilera ABNT NBR 15116, 2004. Elaboración propia.



4.2.5 Clasificación en Alemania (DEU)

Según la norma "DIN 4226-102:2017-08 Agregados reciclados para concreto de acuerdo con DIN EN 12620 - Parte 102: Ensayos de tipo y control de producción en fábrica", los agregados reciclados que provienen de RCD se clasifican en cuatro categorías como se enseña en la Tabla 9.

Tabla 9.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma DIN 4226-102, Alemania.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS
T1	Residuos de concreto	90% mínimo de concreto 10% máximo de mampostería 2% máximo de materiales adicionales 1% máximo de asfalto 1% máximo de materiales contaminantes 4% máximo de material fino 0,8% máximo de sulfatos 0,04% máximo de cloruros	Elementos Estructurales (Prohibido en ligero o preesforzado) T1 y T2 reemplazo de hasta un 25% con f'c máximo de 30MPa
T2	Residuos de concreto con mampostería	70% mínimo de concreto (sin exceder el 90%) 30% máximo de mampostería 3% máximo de materiales adicionales 1% máximo de asfalto 1% máximo de materiales contaminantes 4% máximo de material fino 0,8% máximo de sulfatos 0,04% máximo de cloruros	T1 y T2 reemplazo de hasta un 35% con f'c máximo de 25MPa Elementos No Estructurales Todos los tipos reemplazo de hasta 100% en hormigones sin uso estructural pero que cumplan con exposición
T3	Residuos de mampostería	20% máximo de concreto 80% mínimo de mampostería 5% máximo de materiales adicionales 1% máximo de asfalto 1% máximo de materiales contaminantes 4% máximo de material fino 0,8% máximo de sulfatos 0,04% máximo de cloruros	Clases de exposiciones según "GERMAN COMMITTEE FOR REINFORCED CONCRETE (DAffStb) - CODE: CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES" X0, XC1, XC2, XC3, XC4 (Carbonatación) reemplazo T1 máximo de 45%, T2 máximo de 35%
T4	Residuos mixtos	80% mínimo de la mezcla concreto-mampostería 20% máximo de materiales adicionales 20% máximo de asfalto 1% máximo de materiales contaminantes 4% máximo de material fino Sin límite de sulfatos 0,15% máximo de cloruros	XF1, XF3 (ciclos hielo-deshielo) reemplazo T1 máximo de 35%, T2 máximo de 25% XA1 (ataque químico) reemplazo T1 y T2 máximo de 25%



Fuente: Norma alemana DIN 4226-102:2017-08, 2017. Elaboración propia.

4.2.6 Clasificación en Holanda (NLD)

Según la CUR (Commissie voor Uitvoering van Research) en su norma "NEN 5905:2010 Suplemento holandés a los agregados para hormigón", los agregados reciclados que provienen de RCD se clasifican en dos categorías como se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD según la norma NEN5905:2010, Holanda.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
T1	Residuos de concreto	95% mínimo de concreto 5% máximo de mampostería 1,5% máximo de materiales adicionales 0,1% máximo de cloruros 1% máximo de sulfatos 3% máximo de pérdida de peso congelación-descongelación	<p>Elementos Estructurales (incluye preesforzado)</p> <p>T1 reemplazo de hasta un 20% con f'c máximo de 53MPa T2 reemplazo de hasta un 10% con f'c máximo de 53MPa T1 y T2 pueden aumentar el % de reemplazo si se aplican factores mecánicos de corrección dados en la NEN 5905</p>
T2	Residuos de concreto y mampostería	55% máximo de concreto 65% mínimo de mampostería 2% máximo de materiales adicionales 4% máximo de material fino 0,1% máximo de cloruros 1% máximo de sulfatos 3% máximo de pérdida de peso congelación-descongelación	<p>Elementos No Estructurales</p> <p>T1 y T2 reemplazo de hasta 50% en hormigones sin uso estructural y sin restricción de exposición</p>

Fuente: Norma para la utilización de agregados reciclados gruesos en hormigones de ligantes hidráulicos (E-471, 2009). Elaboración propia.

Por otra parte, la guía de evaluación para el reciclaje de granulados "BRL 2506-1" propone el uso de agregados reciclados que provienen de RCD para la creación de pavimentos, como se muestra en la Tabla 11.



Tabla 11.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la guía BRL 2506-1, Holanda

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
BG	Residuos de concreto	80% mínimo de concreto 10% máximo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto	<p style="text-align: center;">Pavimentos (100% de reemplazo)</p> <p>Capas de pavimento sin consolidar y unidas hidráulicamente Camas de arena para drenajes y capas de lastre Materiales para cimientos unidos Cimentaciones consolidadas en la construcción de carreteras Mezclas asfálticas</p>
MG	Residuos de concreto y mampostería	45% máximo de concreto 50% mínimo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto	
MWG	Residuos de mampostería	85% mínimo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 10% máximo de asfalto	
HGB	Residuos de mezclas hidráulicas de concreto	80% mínimo de concreto 10% máximo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto	
HGM	Residuos de mezclas hidráulicas de concreto y mampostería	45% máximo de concreto 50% mínimo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto	
AG	Residuos de asfalto	5% máximo de concreto 10% máximo de mampostería 1% máximo de materiales adicionales 80% mínimo de asfalto	

Fuente: Guía holandesa (BRL 2506-1, 2017). Elaboración propia.



4.2.7 Clasificación en Bélgica (BEL)

Según las regulaciones de la norma "PTV 406 Technical Prescription: "Recycled aggregates from construction and demolition waste" y la norma "NBN EN 206:2013+A1:2016 Concrete - Specification, performance, production and conformity", los agregados reciclados que provienen de RCD se clasifican en tres categorías como indica la Tabla 12.

Tabla 12.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD, según la norma NBN EN 206, Bélgica.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS
T1	Residuos de concreto	95% mínimo de concreto 10% máximo de mampostería 5% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto 0,5% máximo de materiales no minerales 0,5% máximo de materiales orgánicos	<p>Elementos Estructurales</p> <p>T1 y T2 reemplazo con las siguientes características:</p> <p>20% con f'c máximo de 25MPa (A la intemperie) 25% con f'c máximo de 30MPa (Al interior) 35% con f'c máximo de 20MPa (Al interior)</p> <p>Elementos No Estructurales</p> <p>T1, T2 y T3 reemplazo de hasta 100% con f'c máximo de 15MPa</p>
T2	Residuos de concreto y mampostería	40% mínimo de concreto (sin exceder el 90%) 10% mínimo de mampostería 10% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales no minerales 0,5% máximo de materiales orgánicos	
T3	Residuos de mampostería	40% máximo de concreto 60% mínimo de mampostería 10% máximo de materiales adicionales 5% máximo de asfalto 1% máximo de materiales no minerales 0,5% máximo de materiales orgánicos	

Fuente: Norma belga (NBN EN206:2013+A1:2016, 2016). Elaboración propia.



4.2.8 Clasificación en Australia (AUS)

Según la guía australiana “ HB 155—2002 Guide to the use of recycled concrete and masonry materials”, los agregados que provienen de RCD se clasifican en dos categorías como se señala en la Tabla 13.

Tabla 13.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD según la guía HB155-2002, Australia.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
1A (RCA)	Grava, piedra triturada, concreto de cemento hidráulico o una combinación de los mismos	95% mínimo de concreto 1% máximo de material petreo 9% máximo de pérdida de solidez 1% máximo de pérdida en el lavado 30% máximo de valor de aplastamiento 1% máximo de materiales contaminantes	Elementos Estructurales 1A reemplazo de hasta 30% con f_c máximo de 40MPa
1B (RCM)	Residuos de concreto y mampostería	70% mínimo de concreto 5% máximo de material petreo 30% máximo de mampostería 1% máximo de pérdida en el lavado 30% máximo de valor de aplastamiento 1% máximo de materiales contaminantes	Elementos No Estructurales 1A y 1B reemplazo de hasta 100% con f_c máximo de 25MPa

Fuente: Guía australiana (CSIRO HB-155, 2002). Elaboración propia.

Por otra parte, el Instituto de Ingeniería de Obras Públicas de Australia (IPWEA), a través de su manual de especificaciones “Specification for Supply of Recycled Material for Pavements, Earthworks and Drainage”, propone el uso de RCD en la elaboración de pavimentos y rellenos tal como lo muestra la Tabla 14.



Tabla 14.

Clasificación de los agregados que provienen de RCD según especificaciones IPWEA, Australia.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS	USOS PERMITIDOS
R1	Residuos de concreto, asfalto recuperado y mampostería	100% de concreto 40% máximo de asfalto 20% máximo de mampostería 10% máximo de ceniza volante 10% máximo de vidrio triturado 3% máximo de materiales contaminantes	<p>Pavimentos (reemplazo de hasta 100%)</p> <p>R1 adecuado para uso en carretera con carga de tráfico mayor a 1×10^6 ESA como base o subbase</p> <p>R2 adecuado para uso en carretera con carga de tráfico menor a 1×10^6 ESA como base o subbase</p> <p>S mejoramiento de la subrasante o material de relleno en terraplenes</p> <p>B soporte para bloques de áreas peatonales, parqueaderos, senderos, camas para tuberías, carriles para bicicletas o vías con poco tráfico</p> <p>D material de relleno para tuberías, alcantarillas o líneas subterráneas de drenaje</p>
R2		100% de concreto 40% máximo de asfalto 30% máximo de mampostería 10% máximo de ceniza volante 10% máximo de vidrio triturado 5% máximo de materiales contaminantes	
S		100% de concreto 50% máximo de asfalto 100% máximo de mampostería 5% máximo de ceniza volante 10% máximo de vidrio triturado 5% máximo de materiales contaminantes	
B		100% de concreto 20% máximo de asfalto 100% máximo de mampostería 5% máximo de ceniza volante 50% máximo de vidrio triturado 5% máximo de materiales contaminantes	
D		100% de concreto 5% máximo de asfalto 100% máximo de mampostería 5% máximo de ceniza volante 50% máximo de vidrio triturado 5% máximo de materiales contaminantes	

Fuente: Norma australiana IPWEA (NSW) Roads & Transport Directorate, 2010. Elaboración propia.



4.2.9 Clasificación en Estados Unidos (EE. UU.)

Con base en los reportes "ACI 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete", "ACI 221R-98 reapproved 2001 Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete" y el "ACI Education Bulletin E1-16 Aggregates for Concrete", los agregados gruesos que provienen de la demolición de elementos o estructuras de concreto se clasifican según la resistencia a la compresión original en niveles denominados, tal como se describe en la Tabla 15.

Tabla 15.

Clasificación de los agregados gruesos que provienen del concreto triturado según ACI, EE. UU.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ORIGINAL	CONDICIONES DE USO (con respecto a los agregados naturales)
T1 - High	Concreto triturado (libre de impurezas, materiales adicionales, materiales contaminantes, mampostería)	Mayor a 5000 PSI (34 MPa)	<p>Estructural y No Estructural</p> <p>Desviación estándar mayor a 4.83MPa Usar una menor relación A/C Usar 5% más de agua libre Determinar la gravedad específica, el peso unitario y la absorción antes del diseño de mezcla Las mezclas de prueba son obligatorias</p>
T2 - Medium		Entre 5000 PSI (34 MPa) y 4000 PSI (27 MPa)	
T3 - Low		Menor a 4000 PSI (27 MPa) pero no menor de 1800 PSI (12,4 MPa)	

Fuente: Guías del American Concrete Institute ACI 221R-96 (2001), ACI 555R-01 (2002) y ACI E1-16 (2016). Elaboración propia.

4.2.10 Clasificación en Perú (PER)

Según la norma técnica peruana "NTP 400.053 Manejo de residuos de la actividad de la construcción. Reciclaje de concreto de demolición" y el reglamento nacional de edificaciones peruano "Norma E.060 Concreto armado", los agregados gruesos que provienen de la demolición de elementos o estructuras de concreto se pueden utilizar únicamente con fines no estructurales, siempre y cuando cumplan las condiciones dadas en la Tabla 16.



Tabla 16.

Clasificación de los agregados gruesos que provienen del concreto triturado según NTP400.053 y norma E.060, Perú.

CATEGORÍA	TIPO DE AGREGADO	CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO TRITURADO	USOS PERMITIDOS
T1	Concreto triturado	Contenido mínimo de cemento en concretos con AGR=255kg/cm ³ Libre de polvo, terrones, partículas blandas o escamosas Libre de sales, álcalis, materia orgánica Solo para elaborar concretos con f'c menores a 10 MPa	Elementos No Estructurales tales como ciclovías, cimientos, concreto simple masivo y rellenos no portantes.

Fuente: Norma peruana NTP 400.053 (2014). Elaboración propia.

4.2.11 Otras clasificaciones internacionales

Algunos países tales como Italia, Noruega, China - (Hong Kong), Dinamarca, Suiza y Japón, también clasifican y reutilizan los residuos de construcción y demolición RCD basados en las siguientes normas:

- Italian Ministry of Infrastructure and Transport. NTC 2008 – Italian Building Code (Italia).
- RESIBA – Recycled Aggregates for Construction and Building 1999-2002 (Noruega).
- Recycled coarse aggregate for concrete GB/T 25177 y Recycled fine aggregate for concrete and mortar GB/T 25176 (China).
- Aggregates for Concrete, Construction Standard CS3:2013 (Hong Kong).
- Dansk Standard, DS-EN 12620 + a1: Aggregates for concrete, 2008 (Dinamarca).
- Objectif technique 70085 Instruction technique y la Norma SIA 162/4 Béton de recyclage (Suiza).
- Japanese Industrial Standard JIS A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023 (Japón).

En los apartados 5.3, 5.1 y 5.2 se muestran los requisitos de contenidos, ensayos, usos y restricciones de cada uno de los materiales reciclados de las clasificaciones de cada país.



5 RESUMEN DE REQUISITOS PARA LOS AGREGADOS RECICLADOS QUE PROVIENEN DEL RCD SEGÚN LA NORMATIVA INTERNACIONAL

Este capítulo hace un resumen de los requisitos generales exigidos para los agregados reciclados que provienen del RCD según la normativa internacional mostrada en el capítulo 4. Los requisitos generales se dividieron en tres aspectos: requisitos de los agregados según ensayos, usos y restricciones de los materiales reciclados y especificaciones de los contenidos mínimos y máximos de los materiales reciclados según sus componentes.

5.1 RESUMEN GENERAL DE LOS REQUISITOS INTERNACIONALES DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS

En términos generales, la normativa internacional exige la ejecución de ensayos a los agregados reciclados provenientes de los RCD, de tal manera que se garantice su calidad y capacidad ante los diferentes requisitos de uso de los materiales.

En las Tabla 22 y Tabla 23 se muestra el consolidado de los requisitos mínimos que deben cumplir los agregados, según ensayos de laboratorio, para cada una de las clasificaciones de los países estudiados, analizando las propiedades de los agregados reciclados presentadas en la Tabla 17.



Tabla 17.

Ensayos de aceptación para los agregados reciclados según normativa internacional.

Descripción del requisito	Unidad
Densidad	kg/cm ³
Tamaño de las partículas	mm
Índice de aplastamiento y alargamiento	%
Porcentaje de partículas que pasan el tamiz de 4mm	%
Absorción	%
Coefficiente de desgaste en máquina de los ángeles	%
Pérdida de peso con sulfatos	%
Contenido de sulfatos	%
Contenido de cloruros	%

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

5.2 RESUMEN GENERAL DE USOS Y RESTRICCIONES DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS

En la normativa internacional, los materiales reciclados tienen diferentes tipos de usos permitidos como la fabricación de concreto hidráulico de uso estructural, regularmente restringido a un límite de resistencia a la compresión ($F'c$) y a unos requisitos de exposición al ambiente. Por otra parte, los materiales reciclados también pueden ser utilizados para la elaboración de concreto hidráulico de uso no estructural que incluyen la fabricación de bloques prefabricados, placas, muros, andenes, contrapisos, cimientos simples y demás elementos que requieren de pocas exigencias a nivel de resistencia y que en algunas ocasiones solo son elementos decorativos de carácter arquitectónico.

Los materiales reciclados también son usados en la conformación de vías de pavimentos rígidos, para bases y subbases granulares, para la elaboración de capas de refuerzos del subsuelo, como revestimiento primario de vías no pavimentadas, para la fabricación de camas de drenaje, camas para tuberías y, en algunos países, son utilizados en la construcción de áreas peatonales, parqueaderos, senderos, carriles para bicicletas, rellenos portantes y no portantes y terraplenes.



Con base en lo anterior, se identificaron cuatro tipos de usos recurrentes de los materiales reciclados y se construyó una nomenclatura de colores (ver Tabla 18) para identificar ágilmente los usos de las diferentes categorías de materiales reciclados de cada país.

Tabla 18.

Usos típicos de los materiales reciclados según normativa internacional.

Tipo de material ⁽¹⁾	Descripción de uso del material reciclado
CARRETERAS (Identificado con el color VERDE)	Pavimentos rígidos Bases y subbases granulares Rellenos Terraplenes
ESTRUCTURAL (Identificado con el color AZUL)	Concreto hidráulico de uso estructural y no estructural
NO ESTRUCTURAL (Identificado con el color CAFÉ)	Concreto hidráulico exclusivamente de uso no estructural
MIXTOS (Identificado con el color ROJO)	Pueden ser utilizados para cualquiera de los usos anteriores

(1) Nomenclatura creada por el autor para clasificar los diferentes materiales internacionales en cuatro tipos de usos típicos.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

*En el caso de algunos materiales internacionales reciclados, no fue posible encontrar su uso, en esos casos se identificó el material en color BLANCO.



Ejemplos de la identificación de los usos de materiales utilizando colores:

- El material **BG** de la normativa holandesa, identificado con el número **7.3**, tiene el color **VERDE**, es decir que es un material de uso exclusivo para la conformación de carreteras, como se puede verificar en la Tabla 26.
- El material **T1** de la normativa alemana, identificado con el número **6.1**, tiene el color **AZUL**, por lo tanto, es de uso exclusivo para la fabricación de concreto estructural o no estructural, como se puede verificar en la Tabla 25.
- El material **RA** de la normativa de Reino Unido, identificado con el número **3.2**, tiene el color **CAFÉ**, lo que significa que es de uso exclusivo para la fabricación de concreto no estructural, como se puede verificar en la Tabla 24.
- El material **ARH** de la normativa española, identificado con el número **2.1**, tiene el color **ROJO**, de modo que es un material de uso mixto, como se puede verificar en la Tabla 24.
- El material **GP1** de la normativa de Dinamarca, identificado con el número **16.1**, tiene el color **BLANCO**, por consiguiente no fue posible identificar el uso específico de ese agregado reciclado.



5.3 RESUMEN GENERAL DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS

Las diferentes normativas internacionales exigen que los materiales reciclados provenientes de los RCD sean clasificados en obra o en una planta de reciclaje según sus componentes, y que estos a su vez cumplan con determinados contenidos mínimos y máximos de impurezas y de materia prima pura. Con el fin de consolidar toda la información internacional consultada referente a la clasificación mencionada, se presentan las Tabla 20 y Tabla 21 en donde se muestran los contenidos mínimos y máximos de los constituyentes que conforman cada uno de los materiales reciclados de los diferentes países, utilizando la nomenclatura dada en la Tabla 19.

Tabla 19.

Requisitos internacionales mínimos según ensayos para los agregados reciclados.

Nomenclatura ⁽¹⁾	Descripción del residuo
ID	Identificación numérica de la categoría del material reciclado
H	Residuos de concreto, agregados ligados o no, mortero o piedras
M	Residuos de mampostería, cerámica, ladrillos de arcilla
A	Residuos de concreto asfáltico o material bituminoso
MAT	Residuos de materiales adicionales como terrones de arcilla, materiales no minerales, ceniza volante, vidrio triturado
C	Contaminantes tales como materia orgánica, yeso o sales
F	Material de tamaño fino
MF	Material flotante como la madera, plásticos, papel, cartón o similares

(1) Nomenclatura creada por el autor de este documento para tipificar la clasificación de los diferentes componentes del material reciclado de las normativas internacionales.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 20.

Contenidos mínimos y máximos de los materiales internacionales reciclados–Parte 1

REQUISITOS CONTENIDOS DE MATERIALES									
PAÍS	MATERIAL	ID	PORCENTAJE DE MATERIAL						
			H	M	A	MAT	C	F	MF
COLOMBIA	AR_BG	1.1	>65	<35	<5	<1	<1	-	<1
	AR_SBG	1.2	>50	<50	<5	<1	<1	-	<2
	AR_SBG_PA	1.3	>35	<65	<30	<1	<1	-	<2
ESPAÑA	ARH	2.1	>90	<10	<5	<1	<0.6	-	<2
	ARMh	2.2	>70	<30	<5	<1	<0.6	-	<2
	ARMc	2.3	<70	>30	<5	<1	<0.6	-	<2
	ARC	2.4	0	>70	<5	<1	-	-	-
	ARMa	2.5	0	0	<30	<1	-	-	-
REINO UNIDO	CCA	3.1	>90	<10	<5	<1	-	<4	<2
	RA	3.2	≤100	≤100	<10	<1	-	<4	<2
	A1	3.3	No especifica contenidos (residuos mayoritariamente de asfalto)						
	A2	3.4	No especifica contenidos (residuos mayoritariamente de concreto)						
	A3	3.5	No especifica contenidos (residuos mayoritariamente de mampostería)						
	A4	3.6	No especifica contenidos (residuos mixtos de A1, A2 y A3)						
PORTUGAL	ARB1	4.1	>90	<10	<5	<0.5	-	<3	<2
	ARB2	4.2	>70	<30	<5	<1	-	<3	<2
	ARC	4.3	>90	>90	<10	<2	-	<2	<2
	MBR1	4.4	0	0	100	0	-	-	-
	MBR2	4.5	0	0	100	0	-	-	-
	MBR3	4.6	0	0	100	0	-	-	-
	AGER1	4.7	>50	<10	<30	<1	-	-	<5
	AGER2	4.8	>50	<10	<30	<1	-	-	<5
	AGER3	4.9	>90	<10	<5	<1	-	-	<5
	B	4.10	>90	<10	<5	<1	-	-	<5
	MB	4.11	<70	<70	>30	<1	-	-	<5
	C	4.12	≤100	≤100	<30	<1	-	-	<5
BRASIL	ARC	5.1	≥90	0	0	<2	<3	<10	-
	ARM	5.2	<90	0	0	<2	<3	<10	-
	A	5.3	0	0	≤100	<3	-	-	-
ALEMANIA	T1	6.1	>90	<10	<1	<2	<1	<4	-
	T2	6.2	>70	<30	<1	<3	<1	<4	-
	T3	6.3	<20	>80	<1	<5	<1	<4	-
	T4	6.4	>80	>80	<20	<20	<1	<4	-

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 21.

Contenidos mínimos y máximos de los materiales internacionales reciclados–Parte 2

REQUISITOS CONTENIDOS DE MATERIALES									
PAÍS	MATERIAL	ID	PORCENTAJE DE MATERIAL						
			H	M	A	MAT	C	F	MF
HOLANDA	T1	7.1	>95	<5	0	<1.5	-	-	-
	T2	7.2	<55	>65	0	<2	-	<4	-
	BG	7.3	>80	<10	<5	<1	0	<7	<10
	MG	7.4	<45	>50	<5	<1	0	<7	<10
	MWG	7.5	0	>85	<10	<1	0	<9	<10
	HGB	7.6	>80	<10	<5	<1	0	-	<10
	HGM	7.7	<45	>50	<5	<1	0	-	<10
	AG	7.8	<5	<10	>80	<1	0	-	<10
BÉLGICA	T1	8.1	>95	<10	<5	<5	<1	<5	-
	T2	8.2	>40	>10	<5	<10	<1	<3	-
	T3	8.3	<40	>60	<5	<10	<1	-	-
AUSTRALIA	1A (RCA)	9.1	>95	0	<1	-	<1	-	-
	1B (RCM)	9.2	>70	<30	<5	-	<1	-	-
	R1	9.3	≤100	<20	<40	<10	<3	-	-
	R2	9.4	≤100	<30	<40	<10	<5	-	-
	S	9.5	≤100	≤100	<50	<10	<5	-	-
	B	9.6	≤100	≤100	<20	<50	<5	-	-
	D	9.7	≤100	≤100	<5	<50	<5	-	-
ESTADOS UNIDOS	T1-High	10.1	100	0	0	0	-	-	-
	T2-Med	10.2	100	0	0	0	-	-	-
	T3-Low	10.3	100	0	0	0	-	-	-
PERÚ	T1	11.1	100	0	0	0	-	-	-
ITALIA	T1	12.1	100	0	0	0	-	-	-
NORUEGA	T1	13.1	>94	<5	<1	<1	<1	-	-
	T2	13.2	>90	>90	0	<2.5	<1	-	-
CHINA	T1	14.1	>95	<5	-	<0.5	<1	-	-
	T2	14.2	<90	>10	-	-	-	-	-
HONG-KONG	T1	15.1	≤100	0	0	-	<1	<4	-
DINAMARCA	GP1	16.1	>95	<5	0	-	-	-	-
	GP2	16.2	>95	>95	0	-	-	-	-
SUIZA	T1	17.1	≤100	<3	0	-	<1	-	-
	T2	17.2	≤100	≤100	<7	≤100	<2	-	-
JAPÓN	H	18.1	≤100	-	-	-	<3	<7	-
	M	18.2	100	-	-	-	-	-	-
	L	18.3	100	-	-	-	-	-	-

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 22.

Requisitos internacionales de los agregados reciclados según ensayos – Parte 1.

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS											
PAÍS	MATERIAL	ID	Densidad (g/cm ³)	Tamaño min. O max. mm	Índice aplan. Alar. %	% Partículas que pasan el tamiz 4mm	Absorción %	Coef. Ángeles	% Pérdida de peso con sulfato	Sulfatos %	Cloruros %
COLOMBIA	AR_BG	1.1			≤20			≤50		<0.5	
	AR_SBG	1.2			≤20			≤45		<0.5	
	AR_SBG_PA	1.3						≤50		<0.5	
ESPAÑA	ARH	2.1		>4	<35	≤5	≤9 Clas1 ≤12 Clas 2,3	≤50	≤18	<0.8	<0.05
	ARMh	2.2		>4	<35	≤5	≤9 Clas1 ≤12 Clas 2,3	≤50	≤18	<0.8	<0.05
	ARMc	2.3		>4	<35	≤5	≤9 Clas1 ≤12 Clas 2,3	≤50	≤18	<0.8	<0.05
	ARC	2.4									
	ARMa	2.5									
REINO UNIDO	CCA	3.1						≤40	≤25	<0.8	
	RA	3.2									
	A1	3.3	>1.5	<63				≤45			
	A2	3.4	>1.5							<1.3	
	A3	3.5	>1.5							<1.3	
	A4	3.6	>1.5							<1.3	
PORTUGAL	ARB1	4.1	≥2.2		≤35		≤7	≤50		<0.8	
	ARB2	4.2	≥2.2		≤50		≤7			<0.8	
	ARC	4.3	≥2.0				≤7			<0.8	
	MBR1	4.4		<32			≤5				
	MBR2	4.5		<32			≤5				
	MBR3	4.6		<32			≤5				
	AGER1	4.7						≤45			
	AGER2	4.8						≤40			
	AGER3	4.9						≤40			
	B	4.10		<150		<10		≤45			
	MB	4.11		<150		<10					
	C	4.12		<150		<10		≤45			
BRASIL	ARC	5.1				<10	≤7			<1	<1
	ARM	5.2				<10	≤12			<1	<1
	A	5.3		≤63	≤3					<2	
ALEMANIA	T1	6.1	≥2.0				≤10			<0.8	<0.04
	T2	6.2	≥2.0				≤15			<0.8	<0.04
	T3	6.3	≥1.8				≤20			<0.8	<0.04
	T4	6.4	≥1.5							Sin Lim.	<0.15

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 23.

Requisitos internacionales de los agregados reciclados según ensayos – Parte 2.

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS											
PAÍS	MATERIAL	ID	Densidad (g/cm ³)	Tamaño min. O max. mm	Índice aplan. Alar. %	% Partículas que pasan el tamiz 4mm	Absorción %	Coef. Ángeles	% Pérdida de peso con sulfato	Sulfatos %	Cloruros %
HOLANDA	T1	7.1	≥2.1		≤30					<1	<0.1
	T2	7.2	≥2.0		≤30					<1	<0.1
	BG	7.3	Sin lim.		≤20			≤60			
	MG	7.4	Sin lim.		≤20			≤60			
	MWG	7.5	Sin lim.		≤20			≤60			
	HGB	7.6	Sin lim.		≤20			≤60			
	HGM	7.7	Sin lim.		≤20			≤60			
	AG	7.8	Sin lim.								
BÉLGICA	T1	8.1	≥2.1				≤9			<1	<0.06
	T2	8.2	≥1.6				≤18			<1	<0.06
	T3	8.3								<1	<0.06
AUSTRALIA	1A (RCA)	9.1	≥2.1	>4			≤6	≤30	≤9		
	1B (RCM)	9.2	≥1.8	>4			≤8	≤30			
	R1	9.3									
	R2	9.4									
	S	9.5									
	B	9.6									
	D	9.7									
ESTADOS UNIDOS	T1-High	10.1	≥2.0	>4			≤12	≤50			
	T2-Med	10.2	≥2.0	>4			≤12	≤50			
	T3-Low	10.3	≥2.0	>4			≤12	≤50			
PERÚ	T1	11.1									
ITALIA	T1	12.1									
NORUEGA	T1	13.1	≥2.0				≤10				
	T2	13.2	≥1.5				≤20				
CHINA	T1	14.1					≤10			<1	<0.25
	T2	14.2									
HONG-KONG	T1	15.1	≥2.0			≤5	≤10			<1	<0.05
DINAMARCA	GP1	16.1	≥2.2								
	GP2	16.2	≥1.8								
SUIZA	T1	17.1								<1	<0.12
	T2	17.2								<1	
JAPÓN	H	18.1	≥2.5				≤3				<0.04
	M	18.2	≥2.3				≤5				
	L	18.3	Sin lim.				≤7				

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 24.

Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 1.

PAÍS	USOS Y RESTRICCIONES												
	MATERIAL	ID	ELEMENTOS ESTRUCTURALES			ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES			PAVIMENTOS		BASES/SUBBASES/RELLENOS/TERRAPLENES		
			F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	Uso	Restricción	Uso	Restricción	
COLOMBIA	AR_BG	1.1										Bases tránsito T1	
	AR_SBG	1.2										Subbases tránsito T1, T2 y T3	
	AR_SBG_PA	1.3										Subbases vías peatonales, ciclorutas y andenes	
ESPAÑA	ARH	2.1	≤30	≤20	Deben cumplir con requisitos para clase 1	≤20	≤100	Deben cumplir con requisitos para clases 2 o 3	Vías tráfico T00 a T2 Vías tráfico T3 a T4	Debe cumplir clase 1 Debe cumplir clase 2		Bases y subbases tráfico T0 a T4 Terraplenes y rellenos	Clases 1 a 4 Clases 1 a 5
	ARMh	2.2	≤30	≤20		≤20	≤100				Bases y subbases tráfico T1 a T4 Terraplenes y rellenos	Clases 2 a 4 Clases 1 a 5	
	ARMc	2.3	≤30	≤20		≤20	≤100				Bases y subbases tráfico T1 a T4 Terraplenes y rellenos	Clases 2 a 4 Clases 1 a 5	
	ARC	2.4									Bases y subbases tráfico T3 o T4 Terraplenes y rellenos	Clases 3 o 4 Clases 1 a 4	
	ARMa	2.5											
REINO UNIDO	CCA	3.1	>20 ≤40	≤20	Solo en exposiciones X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, DC-1	≤20	≤100	Solo en exposiciones X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, DC-1					
	RA	3.2	-	-	Según BS 8500-1:2015+A2:2019	≤16	≤100	Según BS 8500-1:2015+A2:2019					
	A1	3.3							Mezclas bituminosas y tratamiento de caminos	Debe cumplir ensayos para agregados naturales		Materiales A1, A2, A3 y A4 se usan para subbases granulares	Exige ensayos de contenido de sulfatos en agua y solidez
	A2	3.4											
	A3	3.5											
	A4	3.6											
PORTUGAL	ARB1	4.1	≤40	≤25	Solo exposiciones X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1....Según NP EN 206-1	≤40	≤100	Solo exposiciones X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1....Según NP EN 206-1					
	ARB2	4.2	≤35	≤20		≤35	≤100						
	ARC	4.3	-	-		-	≤100						
	MBR1	4.4										10% para capas de desgaste 50% bases y regularización	
	MBR2	4.5										25% bases y regularización	
	MBR3	4.6										10% para capas de desgaste	
	AGER1	4.7										Bases hasta 150 TMDp Subbases hasta 150 TMDp	
	AGER2	4.8										Bases hasta 150 TMDp Subbases hasta 300 TMDp	
	AGER3	4.9										Bases hasta 300 TMDp Subbases hasta 300 TMDp	
	B	4.10										Terraplenes y capas de lecho	
	MB	4.11										Terraplenes y capas de lecho	
	C	4.12										Terraplenes y capas de lecho	

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 25.

Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 2.

PAÍS	USOS Y RESTRICCIONES											
	MATERIAL	ID	ELEMENTOS ESTRUCTURALES			ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES			PAVIMENTOS		BASES/SUBBASES/RELLENOS/TERRAPLENES	
			F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	Uso	Restricción	Uso	Restricción
BRASIL	ARC	5.1	-	-	-	-	≤100	-				
	ARM	5.2	-	-	-	-	≤100	-				
	A	5.3	-	-	-	-	-	-	Revestimiento de vías no pavimentadas		Capas de refuerzo del subsuelo, subbase y base	
ALEMANIA	T1	6.1	≤25 ≤30	≤35 ≤25	Solo exposición X0, XC1, XC2, XC3, XC4 (Carbonatación) XF1, XF3 (ciclos hielo-deshielo) XA1 (ataque químico)	-	≤100	Solo exposición X0, XC1, XC2, XC3, XC4 (Carbonatación) XF1, XF3 (ciclos hielo-deshielo) XA1 (ataque químico)				
	T2	6.2	≤25 ≤30	≤35 ≤25		-	≤100					
	T3	6.3	-	-		-	≤100					
	T4	6.4	-	-		-	≤100					
HOLANDA	T1	7.1	≤53	≤20	-	-	≤50	-				
	T2	7.2	≤53	≤10	-	-	≤50	-				
	BG	7.3							Capas de pavimento sin consolidar y unidas hidráulicamente, Mezclas asfálticas		Camas de arena para drenajes y capas de lastre Materiales para cimientos unidos Cimentaciones consolidadas en la construcción de carreteras	
	MG	7.4										
	MWG	7.5										
	HGB	7.6										
	HGM	7.7										
AG	7.8											
BÉLGICA	T1	8.1	≤25 ≤30 ≤20	≤20 ≤25 ≤35	25% y 35% sin exposición 20% expuesto a la intemperie	≤15	≤100	-				
	T2	8.2	≤25 ≤30 ≤20	≤20 ≤25 ≤35		≤15	≤100	-				
	T3	8.3	-	-		-	≤15	≤100	-			
AUSTRALIA	1A (RCA)	9.1	≤40	≤30	-	≤25	≤100	-				
	1B (RCM)	9.2	-	-	-	≤25	≤100	-				
	R1	9.3									Base y subbase tráfico mayor 1x10 ⁶ ESA	
	R2	9.4									Base y subbase tráfico menor 1x10 ⁶ ESA	
	S	9.5									Mejoramiento de la subrasante y relleno en terraplenes	
	B	9.6									Cama de tuberías, bases vías de bicicletas, senderos	
	D	9.7									Relleno para tuberías, alcantarillas y drenaje	

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Tabla 26.

Usos y restricciones de los materiales internacionales reciclados – Parte 3.

PAÍS	USOS Y RESTRICCIONES											
	MATERIAL	ID	ELEMENTOS ESTRUCTURALES			ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES			PAVIMENTOS		BASES/SUBBASES/RELLENOS/TERRAPLENES	
			F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	F'c (MPa)	%Reemplazo	Restricción	Uso	Restricción	Uso	Restricción
ESTADOS UNIDOS	T1-High	10.1	≥34 (±4.83)	≤100	25% y 35% sin exposición 20% expuesto a la intemperie	≥34 (±4.83)	≤100	-				
	T2-Med	10.2	≥27 y <34 (±4.83)	≤100		≥27 y <34 (±4.83)	≤100	-				
	T3-Low	10.3	≥12 y <27 (±4.83)	≤100		-	≥12 y <27 (±4.83)	≤100	-			
PERÚ	T1	11.1	-	-	-	<10	≤100	-			Bases de ciclovías, cimientos, rellenos no portantes	
ITALIA	T1	12.1	≤30 ≤20 ≤45	≤30 ≤60 ≤15	-	≤8	≤100	-				
NORUEGA	T1	13.1										
	T2	13.2										
CHINA	T1	14.1										
	T2	14.2										
HONG-KONG	T1	15.1	≤35	≤20	-	≤20	≤100	-				
DINAMARCA	GP1	16.1										
	GP2	16.2										
SUIZA	T1	17.1	≤25 ≤30 ≤20	≤20	Elementos exteriores Elementos interiores Elementos interiores	≤15	≤100					
	T2	17.2				≤15	≤100					
JAPÓN	H	18.1	≤45									
	M	18.2										
	L	18.3										

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



6 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS PARA COLOMBIA

Luego de resumir todas las especificaciones dadas en las normativas internacionales, se procede a analizar y comparar los materiales reciclados de los diferentes países, con el fin de establecer criterios de selección en cuanto a cantidad y especificaciones técnicas de los materiales reciclados que se utilizarán en la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia.

En los capítulos 6.1 y 6.2 se presenta la justificación técnica de la selección de las especificaciones de contenidos, usos y ensayos que deben cumplir los materiales que serán utilizados para la generación de agregados gruesos reciclados en la propuesta de guía de uso de los RCD para Colombia mostrada en el capítulo 8.

6.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS PARA LAS CATEGORÍAS DE AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS PROPUESTAS

Con base en el RESUMEN GENERAL DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS, presentado en el capítulo 5.3, se realizó un análisis de los materiales reciclados de los diferentes países, en función de su composición pura o mixta, su porcentaje de sustitución en la obtención de concreto estructural y no estructural, y sus máximas resistencias a la compresión del concreto $F'c$, así:

- Usos estructurales (Composición fundamentalmente de concretos **CON**).
- Usos estructurales (Composición mixta de concretos **CON** y mampostería **MAR**).
- Usos no estructurales (Composición de concretos **CON**).
- Elementos no estructurales (Composición mixta de concretos **CON** y mampostería **MAR**).
- Asfalto **ASF** máximo en materiales de uso estructural.
- Asfalto **ASF** máximo en materiales de uso no estructural.
- Resumen de porcentajes máximos de agentes contaminantes en materiales internacionales de uso estructural y no estructural.



Con el análisis efectuado en cada uno de los resúmenes se evidenciaron tres (3) tipos de composiciones de materiales reciclados, muy marcadas en todo el contexto internacional.

6.1.1 Usos estructurales (Composición fundamentalmente de concretos CON)

Tabla 27.

Resumen de materiales internacionales de uso estructural compuestos fundamentalmente de residuos de concretos.

% de CON en el material internacional ⁽¹⁾	ID Material Internacional ⁽²⁾		Máximo F'c (MPa)	Máximo % de sustitución ⁽³⁾
100	ITA	12.1	45	15
≤100	CHE	17.1	30	20
≤100	HKG	15.1	35	20
100	EEUU	10.1	34	100
>95	NLD	7.1	53	20
>95	BEL	8.1	30	25
>90	UK	3.1	40	20
>90	PORT	4.1	40	25
>90	DEU	6.1	30	25
>90	ESP	2.1	30	20

(1) Porcentaje de residuos de concreto en el material internacional.

(2) ID, identificación numérica del material internacional según capítulo 5.3.

(3) Máximo porcentaje de sustitución de agregado reciclado por agregado natural en la mezcla de concreto.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con los valores dados en la Tabla 27 se puede establecer que: en Italia, Suiza, Hong Kong y Estados Unidos, exigen que los materiales usados para fines estructurales estén constituidos en un 100% por residuos de concreto libres de impurezas y contaminantes. Estos materiales (AGR) pueden llegar a sustituir el AGN en un 15% o 20% con unas resistencias F'c máximas que están entre los 30MPa y 40 MPa, con unos requisitos muy exigentes para el caso de Estados Unidos en donde se puede llegar a reemplazar el 100% del AGN por AGR.

Por otra parte, países como Reino Unido, Portugal, Alemania y España exigen que los materiales usados para fines estructurales estén constituidos en mínimo un 90% de residuos de concreto



con algunas impurezas y contaminantes. Estos materiales (AGR) pueden llegar a sustituir el AGN en un 20% o 25% con unas resistencias $F'c$ máximas que están entre los 30MPa y 40 MPa.

CONCLUSIÓN: Teniendo en cuenta que en Colombia es difícil obtener materiales limpios provenientes de RCD y constituidos únicamente por residuos de concreto (**CON**), se opta por seleccionar lo siguiente:

- Porcentaje de constitución **CON** \geq 90% con presencia limitada de contaminantes.
- Resistencia $F'c$ máxima de 35 MPa.
- Porcentaje de sustitución del AGN por AGR igual a 25%.

Del mismo modo, en investigaciones realizadas en Colombia se tienen ensayos de concretos elaborados con AGR con mayores porcentajes de sustitución que alcanzan resistencias similares y superiores a las dadas por las normas internacionales, como se muestra en la Tabla 28.

Se recomienda ver el capítulo 7.2 para entender la nomenclatura y el origen de los valores de la tabla mostrada a continuación.

Tabla 28.

Resumen de resistencias máximas $F'c$ en mezclas de uso estructural pertenecientes a las investigaciones realizadas en Colombia.

NOM. ⁽¹⁾	% de sustitución de AGN por AGR ⁽²⁾	Máximo $F'c$ (MPa)	Relación A/C ⁽³⁾
1-M3	40	24,5	0,50
4-M2	50	33,8	0,50
5-ACR3	50	22,1	0,50
6-M2	50	28,9	0,55
8-M3	50	38,5	0,38
12-3A	50	17,4	0,55
17-T0-2	30	31,0	0,59
18-T4	50	28,7	0,35
23-M3	40	25,0	0,50
25-CST	50	19,0	0,60
26-M2A	50	30,0	0,50

(1) NOM. Es la nomenclatura utilizada en el capítulo 7 para identificar la tesis y la mezcla reciclada.

(2) Es el porcentaje de sustitución de agregados gruesos naturales por agregados gruesos reciclados.

(3) Relación agua / cemento utilizada en la mezcla mencionada.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Sin embargo, estos resultados son insuficientes para lograr establecer una relación directa entre un mayor porcentaje de sustitución del AGN por AGR en el concreto, sin que el mismo tenga efectos adversos sobre la resistencia y durabilidad. Por lo tanto, las magnitudes de $F'c$ máximo y porcentaje de sustitución máxima se basan en las experiencias de las normas internacionales.

6.1.2 Usos estructurales (Composición mixta de concretos CON y mampostería MAR)

Tabla 29.

Resumen de materiales internacionales de uso estructural compuestos de residuos mixtos de concretos y mampostería.

% de CON ⁽¹⁾	% de MAR ⁽²⁾	ID Material Internacional ⁽³⁾		Máximo $F'c$ (MPa)	Máximo % de sustitución ⁽⁴⁾
>70	<30	ESP	2.2	30	20
>70	<30	PORT	4.2	35	20
>70	<30	DEU	6.2	30	25
>40	>10	BEL	8.2	30	25

(1) Porcentaje de residuos de concreto en el material internacional.

(2) Porcentaje de residuos de mampostería en el material internacional.

(3) ID, identificación numérica del material internacional según capítulo 5.3.

(4) Máximo porcentaje de sustitución de agregado reciclado por agregado natural en la mezcla de concreto.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con los valores dados en la Tabla 29 se puede establecer que países como España, Portugal y Alemania exigen que materiales mixtos usados para fines estructurales (compuestos de residuos de concreto >70% y en menor porcentaje de residuos de mampostería <30%), posean una pequeña cantidad de impurezas y contaminantes. Estos materiales AGR pueden llegar a sustituir el AGN en un 20% o 25% con unas resistencias $F'c$ máximas que están entre los 30MPa y 35 MPa.



CONCLUSIÓN: Teniendo en cuenta que en Colombia es común obtener materiales mixtos provenientes de RCD y en algunos casos constituidos mayoritariamente por residuos de concreto (CON), se opta por seleccionar lo siguiente:

- Porcentaje de constitución CON \geq 70% con presencia limitada de contaminantes.
- Porcentaje de constitución MAR \leq 30% con presencia limitada de contaminantes.
- Resistencia F'c máxima de 30 MPa.
- Porcentaje de sustitución del AGN por AGR igual a 25%.

6.1.3 Usos no estructurales (Composición de concretos CON)

Tabla 30.

Resumen de materiales internacionales de uso NO estructural compuestos fundamentalmente de residuos de concretos.

% de CON en el material internacional (1)	ID Material Internacional (2)		Máximo F'c (MPa)	Máximo % de sustitución (3)
100	ITA	12.1	8	100
100	PER	11.1	10	100
\leq 100	CHE	17.1	15	100
\leq 100	HKG	15.1	20	100
100	EEUU	10.1	34	100
>95	NLD	7.1	-	50
>95	BEL	8.1	15	100
>95	AUS	9.1	25	100
\geq 90	BRA	5.1	-	100
>90	DEU	6.1	-	100
>90	ESP	2.1	20	100
>90	UK	3.1	20	100
>90	PORT	4.1	40	100

(1) Porcentaje de residuos de concreto en el material internacional.

(2) ID, identificación numérica del material internacional según capítulo 5.3.

(3) Máximo porcentaje de sustitución de agregado reciclado por agregado natural en la mezcla de concreto.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con los valores dados en la Tabla 30, se puede establecer que, en Italia, Perú, Suiza, Hong Kong y Estados Unidos exigen que los materiales usados para fines NO estructurales estén constituidos



en un 100% por residuos de concreto libres de impurezas y contaminantes. Estos materiales AGR pueden sustituir el AGN en un 100% con unas resistencias $F'c$ máximas que están entre los 8MPa y 34MPa.

Por otra parte, en países como Bélgica, Australia, Brasil, Alemania, España, Reino Unido y Portugal exigen que los materiales usados para fines estructurales estén constituidos en mínimo un 90% o 95% de residuos de concreto con algunas impurezas y contaminantes. Estos materiales AGR pueden llegar a sustituir al AGN en un 100% con unas resistencias $F'c$ máximas que están entre los 15MPa y 40MPa.

CONCLUSIÓN: Teniendo en cuenta que en Colombia es difícil obtener materiales limpios provenientes de RCD y constituidos únicamente por residuos de concreto (**CON**), se opta por seleccionar lo siguiente:

- Porcentaje de constitución **CON** \geq 90% con presencia limitada de contaminantes.
- Porcentaje de sustitución del AGN por AGR igual a 100%.
- Resistencia $F'c$ máxima de 25 MPa.

El valor de resistencia $F'c$ máxima concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos de las investigaciones realizadas en Colombia, como se muestra a continuación:

Tabla 31.

Resumen de resistencias máximas $F'c$ en mezclas de uso no estructural pertenecientes a las investigaciones realizadas en Colombia.

⁽¹⁾ NOM.	⁽²⁾ % de sustitución del AGN por AGR	Máximo $F'c$ (MPa)	⁽³⁾ Relación A/C
2-M25	100	25,6	0,58
4-M3	100	33,2	0,50
5-ACR4	100	19,4	0,50
6-M3	100	27,3	0,55
12-4A	100	24,8	0,55
17-T0-1	100	27,0	0,59
18-T2	100	36,0	0,35

(1) NOM. Es la nomenclatura utilizada en el capítulo 7 para identificar la tesis y la mezcla reciclada.

(2) Es el porcentaje de reemplazo de agregados gruesos naturales por agregados gruesos reciclados.

(3) Relación agua / cemento utilizada en la mezcla mencionada.



Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con base en los valores de $F'c$ máximo, se puede establecer que para concretos de uso no estructural con 100% de sustitución del AGN por AGR, se pueden obtener resistencias a la compresión con valores que van desde los 19MPa hasta los 36MPa. Sin embargo, si se promedian los valores de $F'c$ de las mezclas con una relación agua/cemento mayor a 0,50, entonces se obtiene una resistencia $F'c$ máxima de 26MPa.

6.1.4 Elementos no estructurales (Composición mixta de concretos CON y mampostería MAR)

Tabla 32.

Resumen de materiales internacionales de uso NO estructural compuestos de residuos mixtos de concretos y mampostería.

% de CON ⁽¹⁾	% de MAR ⁽²⁾	ID Material Internacional ⁽³⁾		Máximo $F'c$ (MPa)	Máximo % de sustitución ⁽⁴⁾
≤100	≤100	UK	3.2	16	100
≤100	≤100	CHE	17.2	15	100
>70	<30	DEU	6.2	-	100
>70	<30	ESP	2.2	20	100
>70	<30	AUS	9.2	25	100
>70	<30	PORT	4.2	35	100
<55	>65	NLD	7.2	-	50
<40	>60	BEL	8.3	15	100

(1) Porcentaje de residuos de concreto en el material internacional.

(2) Porcentaje de residuos de mampostería en el material internacional.

(3) ID, identificación numérica del material internacional según capítulo 5.3.

(4) Máximo porcentaje de sustitución de agregado reciclado por agregado natural en la mezcla de concreto.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con base en los valores de $F'c$ máximo de la Tabla 32, se puede establecer que, en los concretos de uso no estructural, es posible sustituir el 100% de los AGN por AGR, obteniendo resistencias a la compresión con valores que van desde los 15MPa hasta los 35MPa. Sin embargo, si se promedian los valores de $F'c$ máximos se obtiene una resistencia de 21MPa.



CONCLUSIÓN: Teniendo en cuenta que en Colombia es común obtener materiales mixtos provenientes de RCD y en algunos casos constituidos mayoritariamente por residuos de concreto (**CON**), se opta por seleccionar lo siguiente:

- Porcentaje de constitución **CON** \geq 70% con presencia limitada de contaminantes.
- Porcentaje de constitución **MAR** $<$ 30% con presencia limitada de contaminantes.
- Resistencia $F'c$ máxima de 20 MPa.
- Porcentaje de sustitución del AGN por AGR igual a 100%.

Del mismo modo, si se analizan los materiales 8.3 de Bélgica y 7.2 de Holanda, se puede considerar una combinación adicional de materiales de constitución, siempre y cuando se reduzca la resistencia a la compresión $F'c$ del concreto. Por consiguiente, se presenta la siguiente propuesta:

- Porcentaje de constitución **CON** $>$ 40% con presencia limitada de contaminantes.
- Porcentaje de constitución **MAR** \leq 50% con presencia limitada de contaminantes.
- Resistencia $F'c$ máxima de 15 MPa.
- Porcentaje de sustitución del AGN por AGR igual a 100%.



6.1.5 Asfalto ASF máximo en materiales de uso estructural

Tabla 33.

Contenidos máximos permitidos en materiales reciclados internacionales de uso estructural.

⁽¹⁾ % de ASF máximo en estructurales	País	Cantidad	Porcentaje de aporte
<5	ESP, UK, PORT, BEL	4	4/11=0,36
<1	DEU, AUS	2	2/11=0,18
0	NLD, EEUU, ITA, HKG, CHE	5	5/11=0,45
TOTAL		11	0,36*5,00=1,80 0,18*1,00=0,18 <u>+0,45*0,10=0,05</u> 2,03

(1) Porcentaje máximo de residuos de concreto asfáltico según el país.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Al utilizar el promedio ponderado de los porcentajes de concreto asfáltico permitido en cada país, se encuentra que el límite máximo de ASF se aproxima al 2% para concretos de uso estructural.



6.1.6 Asfalto ASF máximo en materiales de uso no estructural

Tabla 34.

Contenidos máximos permitidos en materiales reciclados internacionales de uso NO estructural.

% de ASF máximo en estructurales ⁽¹⁾	País	Cantidad	Porcentaje de aporte
<20	DEU	1	1/12=0,08
<10	UK, PORT	2	2/12=0,17
<7	CHE	1	1/12=0,08
<5	ESP, BEL, AUS	3	3/12=0,25
0	BRA, NLD, EEUU, ITA, HKG	5	5/12=0,42
TOTAL		12	0,08*20,0=1,60 0,17*10,0=1,70 0,08*7,00=0,56 0,25*5,00=1,25 <u>+0,42*0,10=0,04</u> 5,15

(1) Porcentaje máximo de residuos de concreto asfáltico según el país.

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Al utilizar el promedio ponderado de los porcentajes de concreto asfáltico permitido en cada país, se encuentra que el límite máximo de ASF se aproxima al 5% para concretos de uso NO estructural.



6.1.7 Resumen de porcentajes máximos de agentes contaminantes en materiales internacionales de uso estructural y no estructural

Tabla 35.

Resumen de porcentajes máximos de agentes contaminantes en materiales internacionales de uso estructural y no estructural.

Agente contaminante	% permitido	País
Terrones de arcilla, materiales no minerales, vidrio triturado	<1	ESP, UK, PORT
	<2	PORT, BRA, DEU, NLD
Materia orgánica, sales, yeso	<1	DEU, BEL, AUS, HKG, CHE
Material fino	<3	PORT, BEL
	<4	UK, DEU, NLD, HKG
Madera, plásticos, papel, cartón	<2	ESP, UK, PORT

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

Con base en la Tabla 35, se seleccionaron los límites de contaminantes para los materiales colombianos de uso estructural y no estructural.

A partir del análisis de cada uno de los porcentajes permitidos, se elaboraron los requisitos de contenidos mínimos y máximos de los materiales reciclados colombianos, según sus componentes como se presentan en el capítulo 8.4, con la siguiente definición:

- COL. (Agregados gruesos reciclados fundamentalmente de concreto).
- COL MIX. (Agregados gruesos reciclados mixtos conformados por concreto y un bajo porcentaje de mampostería).
- COL LOW. (Agregados gruesos reciclados conformados por concreto y un porcentaje significativo de mampostería).



6.2 SELECCIÓN DE REQUISITOS MÍNIMOS SEGÚN ENSAYOS PARA LAS CATEGORÍAS DE AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS PROPUESTAS

Con base en el RESUMEN GENERAL DE LOS REQUISITOS INTERNACIONALES DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS, presentado en el capítulo 5.1, se realizó un análisis de los requisitos mínimos que deben cumplir los agregados reciclados de los diferentes países, así:

- Densidad aparente o bulk "ρS", absorción "%A", resistencia al desgaste por abrasión e impacto en máquina de los ángeles y contenido de sulfatos y cloruros.

Tabla 36.

Resumen requisitos internacionales para los AGR de uso estructural y no estructural.

País	ρS (g/cm ³)	%A	Coef. Ángeles (%)	Sulfatos (%)	Cloruros (%)
ESP	-	≤ 9 Estructural ≤ 12 No estructural	≤ 50	< 0.8	< 0.05
UK	-	-	≤ 40	< 0.8	-
PORT	≥ 2.2 Estructural ≥ 2.0 No Estructural	≤ 7	≤ 50	< 0.8	-
BRA	-	≤ 7 No estructural ≤ 10 No estructural	-	< 1	< 1
DEU	≥ 2.0 Estructural ≥ 1.8 No Estructural	≤ 10 Estructural ≤ 15 Estructural ≤ 20 No estructural	-	< 0.8	< 0.04
NLD	≥ 2.1 ≥ 2.0	-	-	< 1	< 0.10
BEL	≥ 2.1 ≥ 1.6	≤ 9 ≤ 18	-	< 1	< 0.06
AUS	≥ 2.1 Estructural ≥ 1.8 No estructural	≤ 6 Estructural ≤ 8 No estructural	≤ 30	-	-
EEUU	≥ 2.0	≤ 12	≤ 50	-	-
ITA	-	-	-	-	-
HKG	≥ 2.0	≤ 10	-	< 1	< 0.05
CHE	-	-	-	< 1	< 0.12
JPN	≥ 2.5; ≥ 2.3; Sin límite	≤ 3; ≤ 5; ≤ 7	-	-	< 0.04

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.



Los porcentajes máximos de contenido de cloruros y sulfatos para las categorías de agregados gruesos reciclados COL, COL MIX y COL LOW, se seleccionaron de acuerdo con los valores expuestos en la Tabla 36 y se presentan en la Tabla 71.

- El contenido máximo de sulfatos en los AGR para uso estructural y NO estructural es de **1.00%**.
- El contenido máximo de cloruros en los AGR para uso estructural es de **0.05%** y para uso NO estructural es de **1.00%**.

La resistencia al desgaste por abrasión e impacto en países como España, Portugal y Estados Unidos tiene un límite máximo de coeficiente de los ángeles ≤ 50 , además, la norma NTC 174, (2000) establece el límite de abrasión ≤ 50 para los agregados triturados. A partir de lo anterior, se estableció el mismo límite para las categorías de agregados gruesos reciclados COL y COL MIX, que son de uso estructural como se muestra en la Tabla 71.

- El coeficiente de los ángeles máximo para los AGR de uso estructural es del **50%**.
- **No se requiere** determinar el coeficiente de los ángeles para los AGR de uso NO estructural.

Los límites establecidos para los porcentajes máximos de absorción y densidad aparente de los agregados gruesos reciclados, pertenecientes a las categorías COL, COL MIX y COL LOW, se seleccionaron a partir de los límites establecidos en Alemania, Estados Unidos, Hong Kong y Bélgica, ya que estas normativas internacionales permiten mayores porcentajes de absorción del agregado grueso reciclado y menor densidad. De esta manera, se admite un margen más amplio de materiales que pueden llegar a cumplir los límites establecidos, sin afectar adversamente la calidad final del concreto.

- La mínima densidad aparente para la categoría COL es de **2,0g/cm³**.
- La mínima densidad aparente para las categorías COL MIX y COL LOW es de **1,8g/cm³**.
- La máxima absorción permitida en la categoría COL es del **10%**.
- La máxima absorción permitida en la categoría COL MIX es del **12%**.
- La máxima absorción permitida para la categoría COL LOW es del **14%**.



Cabe destacar que los valores de densidad aparente y absorción de los agregados gruesos reciclados, presentados en la caracterización de los materiales reciclados de las investigaciones realizadas en Colombia, cumplen con los límites establecidos en la Tabla 71 con comportamientos mecánicos ($F'c$, E_c , F_r) aceptables, desde el punto de vista de los límites expuestos en el capítulo 8.7 USOS Y RESTRICCIONES SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR, es decir que los materiales colombianos pueden llegar a cumplir los límites establecidos en esta propuesta.

Por otra parte, en la caracterización de los materiales reciclados de las investigaciones colombianas (capítulo 7.2.1) se reportan las masas unitarias sueltas y compactas del material reciclado, por lo que se recomienda reportar dichos valores.



7 ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA

El concreto con agregado reciclado ha sido utilizado e investigado en Colombia desde hace algunos años. Estas investigaciones se realizaron a partir de ensayos de laboratorio, con el fin de determinar las características y propiedades del concreto reciclado; se tenía por objeto demostrar que es posible utilizar dicho material reciclado en las obras civiles, que se construyen actualmente a partir de materiales provenientes de escombreras o de materiales sobrantes debidamente triturados.

Anualmente, en la ciudad de Bogotá se genera un volumen estimado de 12.000.000 m³ de escombros por parte del sector público y privado (COAMBIENTE S.A., 2009), esta cifra aumenta a una tasa aproximada del 4% anualmente. Por este motivo, el distrito capital mediante la resolución 2397 de 25 abril de 2011 así como la resolución 1115 del 26 de Septiembre de 2012 (Laverde, 2014), viene desarrollando una propuesta de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción, con el fin de lograr implementar al menos un 25% el material reciclado en la construcción de obras civiles nuevas. Sin embargo, es de suma importancia evaluar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los concretos elaborados con agregados reciclados, en comparación a al comportamiento que tienen los concretos fabricados con agregados naturales; para así garantizar un adecuado comportamiento de los elementos construidos a partir de materiales reciclados.

Con base en la información anterior, algunas universidades de Colombia han investigado el comportamiento de los concretos fabricados con agregados reciclados. La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha desarrollado diferentes investigaciones sobre las características del concreto con agregados reciclados, como el estudio de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los concretos reciclados (Bojacá, 2013), el estudio de la fisuración por contracción plástica (Collazos, 2014), las propiedades eléctricas y de durabilidad (Laverde, 2014), la utilización de agregados



gruesos reciclados en la elaboración de elementos estructurales (Arriaga, 2013), el uso del material cerámico para curado interno (Aldana, 2014) y el efecto de la carbonatación acelerada de agregados finos reciclados en la mezcla de morteros (Muñoz, 2017).

Por otra parte, la Universidad Nacional de Colombia ha realizado investigaciones como el estudio para determinar la durabilidad de los concretos reciclados ante los ataques de sulfatos (Garzón, 2013), la evaluación del mortero de pega elaborado con agregados finos provenientes de la trituración de cilindros (Hincapié & Aguja, 2003), el estudio de las propiedades de permeabilidad del concreto con agregados reciclados (Mora, 2016), el estudio de las propiedades mecánicas de concreto reciclado (León, 2001) y la comparación de permeabilidad en el concreto mediante ensayos de sortividad y permeabilidad superficial (Jované, 2009).

Otra de las universidades que más investigaciones ha aportado es la Pontificia Universidad Javeriana, sus investigaciones se han enfocado en determinar las propiedades mecánicas del concreto reciclado para uso en edificaciones convencionales (Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008), la influencia de la mampostería reciclada en el comportamiento del concreto reciclado (Cruz & Gómez, 2013), la influencia de los agregados reciclados tratados con lechadas pobres en las propiedades mecánicas del concreto (Perea, 2015), el diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en Bogotá (Escandon, 2011) y el comportamiento mecánico de concretos tratados con lechadas pobres (Beltran, 2014).

Existen también algunos estudios aislados realizados por universidades como: la Universidad EAFIT con la evaluación del uso de agregado fino reciclado en el comportamiento de los morteros (Hincapié & Aguja, 2003), la Universidad de Los Andes con el estado del arte del aprovechamiento del concreto reciclado (Bobadilla,



2012), la Universidad de la Salle con la reutilización de residuos de construcción a partir de un análisis de caso (Sarmiento & Bonilla, 2016), la Universidad de Medellín con la determinación de las propiedades físico-químicas de los agregados de escombros de la ciudad de Bogotá (Chávez, Guarín, & Cortes, 2013), la Universidad Bolivariana con el aprovechamiento de escombros como agregados en mezclas de concreto (Ferreira, 2009), la Universidad Santo Tomás con el estudio de la carbonatación acelerada en agregados reciclados y su desempeño en los concretos para las vías (Monje & Rodríguez, 2016), la Universidad Católica con la viabilidad en la elaboración de prefabricados usando agregados reciclados (Agreda & Moncada, 2015), la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia con el uso de ladrillo triturado como agregado grueso en el concreto reciclado (Pérez, 2012) y la Universidad Francisco de Paula Santander de Ocaña con la investigación de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los concretos reciclados (Sanchez, 2016).

Aunque en el ámbito internacional son innumerables los estudios realizados acerca de las características y propiedades del concreto con agregado reciclado, es importante reconocer y evaluar los resultados de las investigaciones realizadas en Colombia y especialmente en la ciudad de Bogotá, ya que no se tiene ningún estudio que recopile la información existente y por lo tanto, resulta difícil evaluar la veracidad e importancia de los resultados obtenidos por las diferentes universidades.

Cabe resaltar que el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR – 10, establece en el Título C – CONCRETO ESTRUCTURAL, apartado C.3.3 – AGREGADOS, que los agregados usados para generar concreto de peso normal deben cumplir los requisitos expuestos en la norma NTC 174 o la ASTM C33. Adicionalmente, se permite el uso de agregados alternativos siempre y cuando se demuestre por medio de ensayos o experiencias prácticas, que dichos agregados alternativos pueden producir concreto de resistencia y durabilidad adecuadas.



7.1 ESTADO DEL ARTE DE LAS TESIS COLOMBIANAS MÁS DESTACADAS

A continuación, se relacionan algunos documentos de tesis escritas en Colombia acerca del comportamiento del concreto con agregado reciclado, se analiza sus propiedades, aplicaciones, utilización y aprovechamiento en la industria de la construcción.

7.1.1 Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

En el documento de estudio denominado “Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado” se elaboraron tres diferentes mezclas de concreto con AGR con porcentajes de reemplazo del 0% (M1), 20% (M2) y 40% (M3) y una relación agua cemento de 0,5. Mediante pruebas comparativas, en los ensayos se encontró que el comportamiento del agregado reciclado comparado con el agregado natural presenta mayor absorción, menor densidad (aparente y nominal), menor coeficiente de forma y mayor resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles y Micro Deval. La resistencia a la compresión del concreto con el 40% de reemplazo de agregado grueso reciclado, fue menor que la obtenida en el concreto convencional (Bojacá, 2013).

Se establecen los métodos de ensayos realizados para determinar las propiedades físicas y mecánicas del material agregado reciclado AGR. Por un lado, entre las propiedades físicas encontramos la granulometría, peso unitario, densidad y absorción; y entre las propiedades mecánicas del concreto reciclado tenemos ensayo de resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles y Micro Deval, en agregados gruesos. Conociendo esta información es posible establecer la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto (Bojacá, 2013).

En el estudio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito se afirma que para el diseño de la mezcla del concreto en estado fresco se realizaron ensayos de asentamiento, peso unitario de la mezcla, determinación de la temperatura tanto del



ambiente como de la mezcla, humedad relativa del ambiente y el contenido de aire de la mezcla (método de la presión).

Para el concreto en estado endurecido se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-673, ASTM C39, el Módulo de elasticidad, realizado bajo los parámetros contemplados en la Norma Técnica Colombiana NTC 4025, ASTM-C469, el ensayo a la flexión de acuerdo con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 2871, ASTM C78 y la Velocidad de pulso ultrasónico (UPV) que consiste en medir en cuánto tiempo se propaga una onda tomando como referencia la medición del tiempo que esta toma en viajar entre dos puntos. Los pulsos son introducidos al concreto mediante un transductor piezoeléctrico y un transductor similar que actúa como receptor para controlar la vibración de la superficie causada por la llegada del pulso; se realizó bajo los parámetros de la Norma Técnica Colombiana NTC 4325 (Bojacá, 2013).

Por otra parte, Bojacá establece las propiedades de durabilidad de los concretos reciclados mediante ensayos tales como la Prueba Rápida de Permeabilidad a los cloruros. Por medio de este ensayo es posible determinar la mayor o menor facilidad que ofrece el concreto al paso de corriente eléctrica, con un diferencial de potencial de 60 voltios. Para la dicha investigación se utilizó la prueba acelerada de permeabilidad a los cloruros (Rapid Chloride Permeability Test) contemplada en la norma técnica ASTM C1202.

Otro de los parámetros de durabilidad investigada fue la carbonatación, fenómeno en donde el CO₂ de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del cemento hidratado y da lugar a una pérdida de alcalinidad del concreto, lo que produce una disminución del PH, y se da lugar a la aparición de una región neutralizada, llamada frente carbonatado, que al llegar a la armadura la despasiva de forma generalizada (Muñoz, 2017).



Entre los otros ensayos ejecutados en dicha tesis está la Tasa de Absorción Superficial Inicial (ISAT) en la cual se calcula el coeficiente de permeabilidad (K) del concreto endurecido, indicando la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo y superficie. También se determinó la sortividad, definida como el índice de la absorción de agua en el concreto de cemento hidráulico, para esto se coloca una superficie del espécimen de concreto al contacto con una lámina de agua y se mide el aumento de masa del espécimen de concreto indicando la cantidad de agua por superficie en función del tiempo, y así calcular el índice inicial de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$) y la tasa secundaria de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$). Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica ASTM C 1585.

La acción de los sulfatos es otra de las formas de ataque químico al concreto, la cual se manifiesta como una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo (Gonzalez de la Cotera, 1991).

El estudio de González de la Cotera buscó proporcionar evidencias para determinar el comportamiento de algunas propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto hecho con agregado reciclado. Esto genera un aporte importante que impulsa la viabilidad de utilizar agregados reciclados alternativos en la construcción.

7.1.2 Estudio de Durabilidad al Ataque de Sulfatos del Concreto con Agregado Reciclado – Universidad Nacional de Colombia

En el documento denominado “El estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado” , Garzón (2013) buscó proporcionar evidencias para determinar que el ataque químico al concreto es uno de los factores que más afectan su durabilidad. El químico más perjudicial es el sulfato de magnesio, el cual afecta directamente al aluminato tricíclico presente en el cemento, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento. Comienza por



atacar los granos de Clinker hidratados, la pasta de cemento sufre cierta expansión, se torna blanda y por último se agrieta.

Para determinar la expansión causada por el ataque del sulfato de magnesio al concreto con agregados reciclados se usaron diferentes variables de mezcla. De esta manera se buscó comparar el comportamiento de concretos de las mismas características, pero con agregados naturales. Teniendo en cuenta las normas de ensayos de expansión, se realizaron inmersiones de muestras de concreto con agregado reciclado en una solución de sulfato del 5%, teniendo como variables de diseño el porcentaje de reemplazo de agregados naturales por agregado reciclado, la relación agua/material cementante y el reemplazo de cemento por cenizas volantes. Así mismo, se produjeron muestras para determinar las resistencias de cada una de las variables a estudiar (Garzón, 2013).

Para las muestras con reemplazos del 100% del agregado reciclado, se obtuvieron mezclas con menores asentamientos y, por lo tanto, menor trabajabilidad. El porcentaje de reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados afecta la resistencia a la compresión de las muestras. Del mismo modo, para todas las mezclas que se curaron en la solución del 5% de sulfato, se evidenció un incremento en el promedio de la resistencia del 9.5% a los 28 días. En la muestra M25 (100% RAR, agua/cemento 0.58, RCV 0%) se presentó el incremento porcentual más considerable de esta resistencia con un valor de 24.8%. Tomando esto como referencia, se reafirma que los concretos con agregados reciclados con relaciones agua/cemento más altas pueden presentar mejores comportamientos, ante el ataque de la solución de sulfatos, con relaciones agua/cemento que no necesariamente sean bajas. Se evidencia que la relación agua/cemento que se utilice es un factor indispensable en la resistencia obtenida (Garzón, 2013).



Según Garzón (2013), para determinar las propiedades físicas de los agregados se generaron las respectivas granulometrías de los agregados reciclados y naturales, gruesos y finos. Se utilizaron agregados lavados y sin lavar con el fin de conocer, en el estado natural del material, la influencia que pueda tener los finos adheridos al agregado grueso y la posible pérdida de agua que le puedan generar a la mezcla.

Con el fin de conocer las propiedades del agregado fino reciclado se establecieron pruebas para determinar posibles presencias de arcillas o limos del agregado anterior o finos cementicos del agregado reciclado. Por otra parte, se realizaron ensayos de densidad y absorción de los agregados gruesos, los ensayos se realizaron bajo los procedimientos especificados en la NTC 176 (Garzón, 2013).

Otra de las propiedades identificadas fue la Masa Unitaria. Esta prueba se realizó para método compacto y suelto de acuerdo con la norma NTC 92. Para cada mezcla de prueba del concreto se aplicaron los ensayos de resistencia a la compresión, ensayos de expansión del concreto y la inmersión en sulfato (Garzón, 2013).

7.1.3 Agregado Reciclado Para Morteros – Universidad Nacional de Colombia y EAFIT

En el documento de Hincapié & Aguja (2003) denominado "Agregado reciclado para morteros" , se evaluó el comportamiento del mortero de pega elaborado con agregado proveniente de cilindros de hormigón descartado. Los cilindros fueron triturados hasta convertirlos en agregado fino. Se realizó la caracterización del ACR (agregado de concreto reciclado) producido en laboratorio y la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del mortero elaborado con éste. Se sugiere como alternativa para nuevas investigaciones la reutilización y aprovechamiento de los ACR en la producción de morteros para la construcción.



Esta investigación se enfocó en el conocimiento detallado de los efectos de la arena reciclada en las propiedades de los morteros y el hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Los procedimientos adoptados por Hincapié & Aguja (2003) para la evaluación de las propiedades de los morteros se fundamentaron en los análisis físico - mecánicos del cemento y granulométrico y físico del agregado natural y reciclado.

De acuerdo a las propiedades físicas y al análisis morfológico del agregado reciclado y la identificación de características como el tamaño del grano, la redondez y esfericidad, la textura, el color, el brillo y la presencia de impregnaciones o sustancias perjudiciales que influyan en el comportamiento del mortero, se puede determinar si un agregado es adecuado para este uso específico (Hincapié & Aguja, 2003).

El mismo estudio, siguiendo la norma NTC 3329, para la dosificación de las mezclas preparó 3 tipos de mortero: uno con arena natural, uno en estado saturado superficialmente seco y otro con arena reciclada. En el estado endurecido del mortero se evaluaron aspectos como la resistencia a la compresión, resistencia a la adherencia entre el mortero y el bloque cerámico, y además un análisis petrográfico que describe propiedades físicas como permeabilidad, densidad, absorción, porosidad, durabilidad, patrones de fisuras, la distribución de los agregados; además se incluye la composición porcentual tanto de las propiedades físicas como de la matriz cementante, junto con la naturaleza de la adherencia entre pasta y agregados.

Los resultados mostraron que el agregado reciclado para la elaboración de los morteros presentó un margen de disminución en sus propiedades físicas. Se percibió una reducción en la adherencia entre el mortero y la unidad de mampostería, la variación en los resultados oscila entre 4% y 20%. Para el resultado de este tipo de



ensayos influyen la proporción del mortero, las condiciones de elaboración y curado de las probetas, sumado al tipo de unidad.

7.1.4 Estudio de la Fisuración por Contracción Plástica en Losas de Concreto con Agregados Reciclados y Uso de Microfibras – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

En el documento de investigación “Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras” (Collazos, 2014) se determinó la fisuración como factor de afectación estética, funcional y de durabilidad en elementos de concreto con agregados reciclados, causada por la contracción plástica causada por las condiciones ambientales.

En 72 losas de concreto diseñadas con 3 mezclas, se reemplazó el agregado grueso natural por el agregado grueso de concreto reciclado para tres porcentajes 0 %, 50 % y 100 %. Se determinó la influencia de la tasa de evaporación de agua, el grado de fisuración por contracción plástica y el efecto de la inclusión de diferentes cuantías de microfibra (Collazos, 2014).

Para (Collazos, 2014), la variable de remplazo del agregado de concreto reciclado es determinante debido a que la alta absorción del AR promueve una alta área de fisuración. Los porcentajes del 50% y 100% representan condiciones extremas para evaluar el comportamiento del concreto con AR cuando sufre la contracción por secado. Además, la retracción de las estructuras cambia en función de muchas variables entre ellas la composición del concreto, el origen de los agregados, la humedad relativa del ambiente y el volumen del elemento estructural.

En este estudio se clasificaron los agregados reciclados según las propiedades físicas de densidad, absorción, trabajabilidad, abrasión y resistencia a la compresión. El concreto fue sometido a ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.



El módulo de elasticidad del agregado en sí mismo es el principal factor que afecta el módulo de elasticidad de concretos con AR, ya que los agregados de concreto reciclado son más propensos a la deformación que los agregados naturales. Apoyado en diversos estudios e investigaciones, Collazos (2014) manifiesta la influencia en el control de la fisuración por retracción que tienen la cantidad y tipo de agregados, contenido de pasta y relación agua-cemento y el tamaño del agregado.

7.1.5 Propiedades Mecánicas, Eléctricas y de Durabilidad de Concretos con Agregados Reciclados – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

En el documento de investigación “Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados” Laverde (2014) analizó el comportamiento del concreto, que se elaboró reemplazando el agregado grueso natural por agregados de concreto reciclado (AGR) producido a partir de la trituración de probetas de concreto, ensayadas en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería. De las mezclas hechas con este material, se valoraron algunas de las propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad. La prueba se evaluó para 8 mezclas con cuatro contenidos diferentes de agregados reciclado (0%, 25%, 50% y 100%) y dos valores de relación agua/cemento (0,5 y 0,6).

Las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión son más bajos comparados a los concretos con agregado natural, según lo indicaron los resultados. La resistencia a la compresión de un concreto con 100% de AGR tiene una reducción estimada del 20% al 25%, con respecto a un concreto convencional. Paralelamente, las propiedades eléctricas y de durabilidad medidas mediante ensayos de resistividad, impedancia, sortividad y permeabilidad al ion cloruro, se ven afectadas con el aumento del porcentaje de agregado reciclado y la relación agua/cemento (Laverde, 2014).



La forma y gradación de los agregados gruesos reciclados dependen de la fuente de donde son extraídos y las técnicas que se usen para su extracción.

Los agregados producto de demoliciones tienen una mayor variabilidad en sus características y, por tanto, existe una mayor variación en sus propiedades. En el caso de las propiedades químicas de los agregados provenientes de concreto sobrante, estas tienen una menor incertidumbre en el contenido de cloruros, sulfatos y álcalis presentes, ya que sus propiedades son muy similares a las del agregado natural del concreto sobrante (Laverde, 2014).

Según Laverde (2014), la reacción álcali agregado en estos concretos es considerada un problema, aunque algunas investigaciones mostraron que los agregados naturales y los AGR eran muy similares en cuanto a la reacción álcali-agregado.

En este estudio también se identificaron propiedades del concreto con AGR en estado plástico y se encontró que la densidad del concreto en estado fresco es menor que la correspondiente al concreto fabricado con agregados naturales. En cuanto a la resistencia a la compresión, en el concreto con agregado reciclado se presentaron dos zonas de transición de este tipo, una formada entre el mortero adherido y el agregado original y la otra entre el mortero adherido y la nueva pasta de cemento. Adicionalmente, se evaluaron algunas de las propiedades de durabilidad del concreto con agregados de concreto reciclado mediante ensayos de permeabilidad al ion cloruro, sortividad y carbonatación.

Otro de los ensayos para evaluar la durabilidad del concreto es el ensayo de permeabilidad al ion cloruro. Laverde (2014) encontró que la penetrabilidad al ion cloruro aumenta, en la medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de AR en el concreto. La razón de este resultado es que la superficie porosa del AR, por causa del mortero adherido en el agregado, provee una ruta más fácil para el ingreso del ion



cloruro en el concreto, según lo indicado en la guía práctica para el uso de agregados reciclados en concretos nuevos de la Asociación de Cemento y Concreto de Nueva Zelanda.

Investigaciones realizadas sobre la permeabilidad al ion cloruro, han encontrado que la adición de materiales cementicos suplementarios le dan al concreto reciclado un desempeño en ambientes marinos similar al que tiene un concreto con agregado natural.

Para el estudio de las propiedades eléctricas del concreto es vital el conocimiento de la concentración de iones en el agua del concreto, así como el tipo y clase de poros al interior de este material. Las causas que inciden en la reducción de la resistencia a la compresión de concretos con AR son las propiedades del AR, así como su cantidad en la mezcla. Sin embargo, hasta ciertos porcentajes de reemplazo es viable la sustitución de este tipo de agregados en el concreto. Para el autor es importante conocer las propiedades de los AR entre ellos su absorción, densidad, contenido de contaminantes, contenido de mortero adherido y resistencia a la abrasión, ya que estos factores inciden en la resistencia a la compresión del concreto (Laverde, 2014).

7.1.6 Estudio Experimental de las Propiedades Mecánicas del Concreto Reciclado para su Uso en Edificaciones Convencionales – Pontificia Universidad Javeriana

En el documento de investigación “Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para su uso en edificaciones convencionales” , Vanegas Cabrera & Robles Castellanos (2008) elaboraron la investigación experimental sobre la reutilización del concreto endurecido obtenido de cilindros desechados de un laboratorio. Este concreto reciclado, a partir de la trituración de cilindros, se reutilizó para la generación de un nuevo concreto, con propiedades físicas y mecánicas similares a las del concreto convencional.



Se presentaron tres tipos de mezclas con diferentes cantidades de agregado grueso reciclado: 0% de agregado reciclado, 50% de agregado reciclado y 50% de agregado natural; y 100% de agregado reciclado. Se fundieron cilindros y vigas para ser sometidas a ensayos de compresión, flexión, módulo de elasticidad y retracción. Para poner a prueba el efecto del curado en estos diseños se expusieron en ambientes favorables y desfavorables, similares a las que son sometidas las columnas y vigas fundidas en una obra. Se determinó que la manejabilidad se ve afectada por el tipo de agregado y sus características (humedad, absorción). En la medida que aumentó el contenido de agregado reciclado disminuyó la manejabilidad de la mezcla (Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008).

Con respecto al ensayo a compresión, se determinó que las mezclas con agregado reciclado obtuvieron una leve disminución en la resistencia con respecto a la testigo. Una probable explicación es la diferencia de textura en los agregados naturales anteriormente utilizados con los actuales (liso en los previos y liso-rugoso en la actual). Del ensayo a flexión se determinó que la mezcla con mayor porcentaje de agregado reciclado tuvo una mayor resistencia con respecto a la testigo, mientras que la mezcla con cincuenta por ciento logró una resistencia semejante (Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008).

Los autores afirman que la calidad del agregado, sean partículas finas o gruesas, juegan un importante papel en el comportamiento del concreto y son determinadas mediante la evaluación de las características químicas y físicas del agregado.

Las propiedades físicas de un agregado son varias, entre las cuales se encontraron peso unitario, granulometría, forma, textura, peso específico, capacidad de absorción, contenido de finos y sustancias perjudiciales, resistencia, módulo de Elasticidad, Asentamiento y Retracción por secado. Los ensayos aplicados para determinar las propiedades físicas del agregado grueso fueron peso específico y absorción, peso



unitario, material que pasa el tamiz #200 (granulometría) y contenido de materia orgánica por colorimetría. Los ensayos aplicados para determinar las propiedades mecánicas del agregado grueso fueron: asentamiento, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión (consistió en determinar la resistencia a la flexión del concreto por medio del uso de una viga apoyada y cargada en los tercios de su luz), ensayo de retracción o de expansión de un concreto (determinado por el ambiente en que se encuentren los elementos), el agua de la mezcla, algunas propiedades de los agregados y su proceso de elaboración (Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008).

7.1.7 Utilización de Agregado Grueso de Concreto Reciclado en Elementos Estructurales – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

En el documento de investigación “Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado” , Arriaga (2013) elaboró mezclas de concretos convencionales y mezclas de concreto con AGR con un porcentaje de reemplazo del 20% de este agregado, con el fin de evaluar el comportamiento estructural de vigas continuas, placas apoyadas en tres bordes, vigas altas y ménsulas. De manera general, se comprobó que para una sustitución del 20% del agregado grueso natural por agregado de concreto reciclado, se obtienen comportamientos satisfactorios desde el punto de vista de resistencia mecánica y las diferencias entre el concreto convencional y el concreto con ACR no son significativas, lo que permite su utilización en diversos tipos de elementos estructurales sin acarrear consecuencias negativas en contra de la seguridad.

Las fuentes de residuos, producción y obtención de ACR proceden de dos fuentes principales asociadas: de los residuos fruto del propio proceso de construcción y a la demolición de estructuras existentes, respectivamente. Este origen induce distintas características en el agregado fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el agregado procedente del concreto reciclado (Arriaga, 2013).



El autor determinó mediante pruebas de laboratorio las propiedades de cada concreto con agregado reciclado, evaluando las propiedades físicas y químicas del material. Las propiedades físicas del ACR, tenidas en cuenta fueron la granulometría, forma y textura superficial, densidad y absorción, desgaste en máquina de los ángeles en la cual, según investigación nacional, se encontró un desgaste promedio del 45% frente a un 25% de la muestra patrón. Se muestran también las consideraciones en la elaboración de concreto con agregado grueso de concreto reciclado y se establecen aspectos relevantes como la dosificación, teniendo en cuenta el contenido agua, el de cemento, su relación y la dosificación del agregado de concreto reciclado.

Las propiedades físicas del concreto con agregado grueso de concreto reciclado fueron probadas mediante los ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y la retracción por secado. Las propiedades de durabilidad de este concreto se determinan por la porosidad, absorción y permeabilidad, resistencia a la helada, carbonatación, penetración de cloruros, ataque por sulfatos y la reactividad álcali – agregado (Arriaga, 2013).

7.1.8 Influencia del Material Reciclado de Mampostería en el Comportamiento del Concreto Reciclado – Pontificia Universidad Javeriana

En el documento de investigación “Influencia del Material Reciclado de Mampostería en el Comportamiento del Concreto Reciclado” , Cruz & Gómez (2013) realizaron la caracterización física y mecánica de los agregados naturales y reciclados, evaluando y discutiendo los resultados experimentales. En dicha investigación experimental se utilizaron agregados reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición de concreto y mampostería, y materiales naturales usualmente utilizados para la elaboración de concretos. Para la caracterización de los agregados reciclados, fueron comparadas con las especificaciones colombianas para agregados naturales y recomendaciones internacionales.



Se fabricaron los concretos con las diferentes dosificaciones manteniendo la relación agua/cemento y modificando el porcentaje de agregado grueso natural por agregado reciclado AR. Por su parte, el agregado fino no fue sustituido (Cruz & Gómez, 2013).

Los autores realizaron un estudio comparativo entre las propiedades del concreto reciclado en estado fresco y endurecido con presencia de mampostería, frente al concreto convencional y al concreto con agregado reciclado de concreto. Evaluaron la durabilidad o estabilidad del concreto a través del tiempo frente a las acciones físicas y químicas presentes en el ambiente. Determinaron las características de granulometría, forma y textura, densidad y absorción, resistencia a la abrasión, contenido de contaminantes e impurezas, dosificación de los concretos reciclados, contenido de agua, contenido de cemento y contenido de agregado reciclado (Cruz & Gómez, 2013).

7.1.9 Aprovechamiento de Escombros como Agregados No Convencionales en Mezclas de Concreto – Universidad Pontificia Bolivariana

En el documento de estudio “Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto” , Ferreira (2009) utilizó agregados reciclados procedentes de escombros. Dentro de la caracterización se clasificaron en agregado reciclado grueso, fino y la muestra de ladrillo tamiz No.4 tamaños finos y gruesos. Con estos agregados se prepararon 4 tipos de mezclas (A, B, C y D). En el diseño de la mezcla se utilizó la proporción de agregados que en estado seco produjera el menor porcentaje de vacíos, con resultados del concreto ensayados a los 7 días.

Los resultados del concreto en estado fresco mostraron que el peso unitario del concreto tuvo valores correspondientes para mezclas trabajables, mientras que el concreto en estado endurecido se le realizaron pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y flexión. Los factores básicos del diseño de la mezcla fueron la velocidad



del fraguado, la resistencia, la durabilidad y el peso unitario. En la determinación de las propiedades se contó con la elaboración de pruebas mecánicas, físicas y químicas de los agregados: granulometría, masa unitaria, gravedad específica, resistencia química, humedad natural y absorción (Ferreira, 2009).

En la definición de las composiciones óptimas de la mezcla con agregados reciclados el autor tomó el agua como ingrediente fundamental en la elaboración del concreto. La relación de cantidad adecuada agua/ cemento para la trabajabilidad y resistencia del concreto, ayuda a determinar su calidad química y física. Se determinaron las propiedades físicas tales como la granulometría, forma, textura, densidad absorción y porosidad, la cual condiciona el comportamiento de las partículas de los agregados dentro del concreto. Además se determinaron las propiedades mecánicas: adherencia, resistencia a la compresión y flexión, y por último, las propiedades de durabilidad resistencia al congelamiento y deshielo, estabilidad química y resistencia a la abrasión (Ferreira, 2009).

7.1.10 Concreto Reciclado como una Opción Técnica, Económica y Ambiental para la Construcción en Colombia – IV Seminario Internacional de la Sostenibilidad

En el documento “El concreto reciclado como una opción técnica, económica y ambiental para la construcción en Colombia” , Gómez & Bedoya (2008) evalúan la viabilidad técnica en la utilización de agregados de concreto generados a partir de residuos de construcción y demolición en la elaboración de concreto nuevo reciclado, como contribución significativa en la conservación del medio ambiente. Exponen la metodología para la generación de residuos de construcción y demolición.

Inician con la obtención residuos del concreto, luego explican que estos son sometidos a un proceso de trituración según el tamaño requerido, luego se hace la separación de agregados para el tamizaje y se clasifican en agregados gruesos y finos. En la elaboración de la muestra de concreto reciclado 50-50 se sustituye el 50% de los agregados naturales por los agregados reciclados, la resistencia a la compresión



arrojada en falla 7 días 11,30 MPa y 28 días 18,57 MPa cumple con la resistencia esperada, establecida dentro de un rango de 17,50 MPa a 21,00 MPa a la edad de 28 días (Gómez & Bedoya, 2008).

Los autores logran determinar que los agregados reciclados presentan mayor absorción de agua que los agregados naturales, sin embargo, este aspecto se puede controlar durante la confección de la mezcla, lo que permite una trabajabilidad igual a una mezcla convencional en estado fresco.

Lo más importante es que el comportamiento técnico del concreto reciclado es positivo y se enmarca en las normas técnicas y códigos oficiales de Colombia; económicamente su viabilidad es evidente ya que tiene un costo igual o menor a un concreto convencional (Gómez & Bedoya, 2008).

7.1.11 Determinación de Propiedades Físico - Químicas de los Materiales Agregados en Muestra de Escombros en la Ciudad de Bogotá – Universidad de Medellín

En el trabajo “Determinación de propiedades físico-químicas de los agregados en Bogotá” (Chávez, Guarín, & Cortes, 2013), apoyados en ensayos de laboratorio elaboran una muestra local de reciclaje de escombros e identifican algunas propiedades físico-químicas de los agregados encontrados: granulometría, absorción, porosidad, resistencia a la compresión, pH, carbono orgánico total, metales pesados y elementos menores. Logran concluir que los componentes de estos agregados tienen semejanza a los obtenidos de forma natural, ya que poseen alto potencial para ser utilizados en componentes de construcción civil sin función estructural, al obtener principalmente resultados promedio de 8,1 % de absorción y 39,3 kg/cm² de resistencia a la compresión para un tiempo de fraguado de 28 días.



7.1.12 Evaluación de la Influencia de Agregados Reciclados de Concreto Tratados con Lechadas Pobres de Cemento en las Propiedades Mecánicas de Concretos – Pontificia Universidad Javeriana

En el documento “Efecto tratamiento con lechada en agregados de concreto reciclado para nuevo concreto” , Perea (2015) realizó la corrección o compensación de los defectos del AR y el mejoramiento de los efectos que tiene sobre el concreto con agregado reciclable. La dificultad de tratar con AR es la cantidad y calidad de mortero adherido que determina su porosidad. El cálculo para la mezcla de concreto se ve afectada por la alta absorción, la baja densidad y la cantidad de agua libre que impacta las propiedades mecánicas del concreto.

Con el objetivo de, por un lado, reducir la porosidad y la absorción y por el otro, aumentar la densidad, el autor propuso un método para tratar AR con lechadas pobres de manera económica que viabilice y extienda su uso, así como para predecir de forma rápida y aproximada el comportamiento de concretos hechos con estos AR.

De esta manera se determinó la influencia de los agregados reciclados de concreto, tratados con lechadas de cemento, en las propiedades mecánicas de concretos con agregados reciclados. Se evaluaron las características mecánicas de los agregados reciclados disponibles y las características de las lechadas a base de cemento enriquecido de cemento disponibles. Adicionalmente, se evaluó el desempeño de las propiedades mecánicas de los concretos hechos con agregados reciclados tratados con lechadas de cemento.

En esta investigación se seleccionaron los materiales y el método a utilizar, se realizó una descripción de los tratamientos hechos al AR, luego se determinaron las características de los componentes del concreto reciclado, el proceso de fabricación y los procedimientos de ensayos necesarios para caracterizar el concreto reciclado tanto en estado fresco como en estado endurecido (Perea, 2015).



Con la eliminación del mortero adherido al AR, causante de la alta absorción y baja densidad, y al mejorar la superficie de contacto entre la nueva pasta de cemento y el agregado, se han implementado algunos tipos de técnicas de limpieza de los AR, lo que comprueba el efecto favorable sobre los resultados para la resistencia a la compresión. Se utilizaron diferentes tipos de técnicas de limpieza: re-trituración, inmersión en soluciones químicas, agitación mecánica, ultrasonido, choque térmico, electrodinámico o electrohidráulico (Perea, 2015).

La combinación de los procesos de limpieza y recubrimiento fue el método utilizado para tratar los agregados y mejorar el concreto con agregado reciclado. Para la limpieza, el material fue vibrado por 1 minuto sobre una mesa vibratoria a una frecuencia de 60 Hz para retirar los finos adheridos que aumentan la absorción de AR. Con este procedimiento se eliminó hasta el 75% de finos (incluidos los generados por el mismo proceso de limpieza), en comparación a un proceso de lavado posterior, tratando MA (Agregado reciclado compuesto para el estudio) con lechadas a base de cemento enriquecido (Perea, 2015).

Para el recubrimiento de los agregados reciclados, se hizo uno previo y otro dentro de la mezcla de cemento y para mejorar el AR con agregado reciclado.

La Lechada de cemento (mezcla de cementantes - agua, sin agregado fino que forma pasta de cemento) es la sustancia que se aplica al agregado grueso para mejorarlo previo a la mezcla y que ayuda a formar una capa en la superficie para reducir la absorción y rellenar daños tales como microgrietas o huecos (Perea, 2015).

Para la modificación de los AR y posterior producción de concretos, se utilizó cemento portland (CP) estructural tipo HE, según ASTM C-1157-10, y como adiciones minerales cenizas volantes (CV) y humo de sílice (HS).



En los aspectos de elaboración de concretos con agregado reciclado RAC, para el diseño de la mezcla se manejaron valores fijos en los componentes, contenido de cemento, relación agua/cemento, % de agregado grueso, % de agregado fino, aditivo reductor de agua, edad de ensayo, edad de MA tratado, granulometría y volumen, únicamente varió la sustitución del agregado natural por el agregado reciclado grueso. Las sustituciones fueron 70%MA+30%AN y 30%MA+70%AN. Para el concreto se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión: los MA tratados, fueron evaluados dentro de mezclas de concreto a 7 y 210 días y algunos a 28 días con diferentes porcentajes de sustitución.

7.2 RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN COLOMBIA

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados por las universidades consultadas. En la primera parte se presentan las nomenclaturas y definiciones de los términos que se usan durante todo el desarrollo de este capítulo. Posteriormente, se muestra la caracterización y clasificación de los materiales de investigación, en equivalencia a los materiales reciclados internacionales, y los planteamientos de diseños de mezclas de cada una de las investigaciones. Finalmente, se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos, físicos y químicos que miden la resistencia, calidad y durabilidad de los materiales utilizados, tanto reciclados como naturales.

7.2.1 Caracterización de los materiales

Se realizó la caracterización de los materiales de cada uno de los documentos de referencia presentados en la Tabla 38, se presentaron las propiedades del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados en las Tabla 40, Tabla 41 y Tabla 42. Por otra parte, las propiedades de los agregados: finos naturales, finos reciclados y el origen de la fuente de los materiales, se presentó en las Tabla 43, Tabla 44 y Tabla 45.



7.2.2 Clasificación de los agregados reciclados

En la Tabla 39 se muestra la clasificación de los agregados reciclados de las diferentes tesis, según sus equivalencias en relación con los criterios internacionales.

7.2.3 Planteamiento de los diseños de mezcla

Desde la Tabla 46 a la Tabla 51 se presenta el resumen de los planteamientos de los diseños de mezclas de cada una de tesis consultadas, en donde se muestran datos como la relación agua-cemento, la nomenclatura de cada una de las mezclas, los porcentajes de agregados, tanto naturales como reciclados, utilizados en cada tipo de mezcla, el tipo de curado y algunas observaciones generales de cada documento de referencia.

7.2.4 Resultados de laboratorios

Desde la Tabla 52 hasta la Tabla 57 se presentan los resúmenes de las propiedades mecánicas, según los resultados de laboratorios de cada tesis analizada. Por otra parte, desde la Tabla 58 hasta la Tabla 60 se presenta el resumen de las propiedades de durabilidad, según los resultados de laboratorio de cada tesis consultada. Finalmente, en la Tabla 61 y Tabla 62 se presentan algunas propiedades adicionales como asentamientos de la mezcla en estado fresco, peso unitario del concreto reciclado, contenido de aire y vacíos de las muestras en estado endurecido.

7.2.5 Nomenclatura y definiciones

Dadas las variables consideradas en los diferentes estudios y con el fin de consolidar los resultados de las diferentes investigaciones, se presentan las nomenclaturas y definiciones en la Tabla 37.



Tabla 37.

Nomenclaturas y definiciones de las tesis colombianas.

Consolidación de nomenclaturas y definiciones de las tesis colombianas⁽¹⁾	
REF. = Número de la tesis de referencia	A° = Curado en bolsas plásticas
NOM. = Nomenclatura de la mezcla	B° = Curado en humedad y temperatura ambiente
ρC = Densidad del cemento	* = Muestra sumergida en sulfato
A/C = Relación agua - cemento	d = Días transcurridos hasta la ejecución del ensayo
C (%) = Contenido en porcentaje	f'c = Resistencia del concreto a la compresión
ρS = Densidad aparente seca	Ec = Módulo de elasticidad del concreto
ρN = Densidad nominal	Fr = Módulo de rotura del concreto
ρS.S.S. = Densidad aparente saturada superficialmente seca	I = Sortividad inicial
%A = Humedad de absorción en porcentaje	S = Sortividad final
%P = Porcentaje de poros	AN = Agregado natural
T.M.N. = Tamaño máximo nominal	AGN = Agregado grueso natural
T.M = Tamaño máximo	AFN = Agregado fino natural
M.U.S = Masa unitaria suelta	AR = Agregado reciclado
M.U.C = Masa unitaria compacta	AGR = Agregado grueso reciclado
No. = Número asignado según el tipo coloración del agregado fino	AFR = Agregado fino reciclado
- = No aplica o no se presenta el dato en el documento de referencia	f'c_{AN} = Resistencia a la compresión del concreto con agregados naturales
M.A = Material adicional en la mezcla	f'c_{AR} = Resistencia a la compresión del concreto con agregados reciclados
T.C. = Tipo de curado	Ka = Coeficiente de carbonatación en el ambiente
S.A. = Curado sumergido en agua	Kc = Coeficiente de carbonatación obtenido en la cámara
S.S. = Curado sumergido en sulfato	

(1) Nomenclatura creada por el autor de este documento para clasificar las diferentes variables presentadas en las investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos.

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.

Las referencias de a fuente de los datos numéricos obtenidos de ensayos de laboratorios se muestran en la Tabla 38.



Tabla 38.

Referencias bibliográficas de ensayos realizados en las universidades de Colombia.

REF.	Autor(es) según bibliografía	REF.	Autor(es) según bibliografía
1	(Bojacá, 2013)	15*	(Benavides, 2014)
2	(Garzón, 2013)	16	(Aldana, 2014)
3*	(Hincapié & Aguja, 2003)	17	(Perea, 2015)
4	(Collazos, 2014)	18	(Monje & Rodríguez, 2016)
5	(Laverde, 2014)	19*	(Escandon, 2011)
6	(Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008)	20	(Agreda & Moncada, 2015)
7	(Arriaga, 2013)	21	(Pérez, 2012)
8	(Cruz & Gómez, 2013)	22*	(Castaño, 2009)
9	(Ferreira, 2009)	23	(Sanchez, 2016)
10*	(Gómez & Bedoya, 2008)	24	(Muñoz, 2017)
11	(Sarmiento & Bonilla, 2016)	25	(Beltran, 2014)
12	(Mora, 2016)	26	(León, 2001)
13*	(Bobadilla, 2012)	27*	(Palacio-Leon, Chávez, & Velásquez, 2017)
14*	(Chávez, Guarín, & Cortes, 2013)	28	(Jované, 2009)

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.

(*)Los datos obtenidos de estas referencias son insuficientes como para ser comparados con las demás, sin embargo, se tuvieron en cuenta algunas de sus propiedades.



Con el fin de organizar los tipos de mezclas de cada investigación, se utilizó la siguiente nomenclatura:

- El primer número indica la tesis de referencia presentada en la Tabla 38.
- Luego del primer número se coloca un guion (-) y se indica la mezcla tal como la presentan en el documento de referencia. Esto con el fin de que el lector, al consultar este trabajo y comparar los resultados con la tesis de referencia, no confunda los resultados.
- Algunas de las investigaciones no presentan de manera clara o simple la nomenclatura utilizada en los diseños de mezclas, ni la cantidad de mezclas diseñadas; sin embargo, al analizar los diferentes documentos, se logró determinar la cantidad y tipo de mezclas, y fue necesario asignar una nomenclatura a cada tipo de mezcla utilizada. Ejemplo: en la referencia No.16 se presenta la nomenclatura original MC20-0,30, la cual se modificó a 16-MC1.

Se presenta el ejemplo de la nomenclatura así:

16-MC1

El dígito en color ROJO indica que la mezcla analizada hace parte de la investigación No.16 referenciada en Tabla 38. El texto en color AZUL indica la nomenclatura que usó el autor en el documento original (cuando es de fácil entendimiento), o a la nomenclatura creada en este documento (cuando la nomenclatura original no existe o no es clara) para cada tipo de mezcla.



Tabla 39.

Clasificación de los agregados reciclados y sus equivalencias.

CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS RECICLADOS																	
REF.	ESP	UK	PORT	BRA	DEU	NLD	BEL	AUS	EEUU*	PER	ITA	NOR	CHN	HKG	DNK	CHE	JPN
1	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T2-Med	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	M
2	No se especifica el origen del material reciclado																
4	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T1-High	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	H
5	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T3-Low	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	L
6	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T2-Med	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	M
7	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T2-Med	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	M
8	ARMh-ARMc	CCA-Rb ₁₀	ARB2	ARM	T2	T2	T2	1B	-	-	-	T2	T2	-	GP2	T2	-
9	ARC	RA	ARC	-	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	T2	-
11	ARMh-ARMc	RA	ARC	ARM	T2	T2	T2	1B	-	-	-	T2	T2	-	GP2	T2	-
12	ARH-ARC	Rc ₉₀ -Rcu ₉₀	ARB1-ARC	ARC-ARM	T1-T3	T1-T2	T1-T3	1A-1B	T3-Low	T1	-	T2	T2	-	GP2	T2	L
16	ARC	CCA-Rcu ₉₀	ARC	ARM	T3	T2	T3	1B	-	-	-	-	-	-	-	T2	-
17	ARMh-ARMc	RA	ARC	-	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	T2	-
18	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T2-Med	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	M
20	No se especifica el origen del material reciclado																
21	ARC	RA-Rb _{NR}	ARC	ARM	T3	T2	T3	1B	-	-	-	-	-	-	-	T2	-
23	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T2-Med	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	M
24	Se usaron agregados finos reciclados																
25	ARH-ARC	Rc ₉₀ -Rcu ₉₀	ARB1-ARC	ARC-ARM	T1-T3	T2	T1-T3	1A-1B	T2-Med	T1	T1	T2	T2	-	GP2	T2	M
26	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T3-Low	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	L
28	ARH	CCA-Rc ₉₀	ARB1	ARC	T1	T1	T1	1A	T1-High	T1	T1	T1	T1	T1	GP1	T1	H

Fuente: Normas y guías sobre agregados reciclados de cada país. Elaboración propia.

* La clasificación de EEUU y Japón se hizo con base en los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión dados en el capítulo 7.2.4, sin embargo, en ninguna tesis de referencia se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en el concreto original.



Tabla 40.

Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 1.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS																			
REF.	Cemento		AGN (Agregado Grueso Natural)								AGR (Agregado Grueso Reciclado)								
	TC	ρ_C (g/cm ³)	ρ_S (g/cm ³)	ρ_N (g/cm ³)	$\rho_{S.S.S.}$ (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	ρ_S (g/cm ³)	ρ_N (g/cm ³)	$\rho_{S.S.S.}$ (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	
1	Portland T1 SAMPER (CEMEX)	3.08	2.36	2.60	2.45	3.90	1"	1 1/2"	1.318	1.474	2.12	2.54	2.29	7.80	1"	1 1/2"	1.132	1.282	
2	Portland tipo I marca Boyacá	3.08	2.63	2.69	2.59	1.42	1/2"	3/4"	1.370	1.488	2.32	2.56	2.16	7.26	3/4"	1"	1.276	1.361	
4	Portland tipo estructural	3.10	2.34	2.60	-	4.30	3/4"	3/4"	1.036	1.493	2.11	2.64	-	9.50	-	-	1.135	1.295	
5	Portland Cemex tipo estructural	3.10	2.34	2.60	-	4.30	3/4"	3/4"	1.036	1.494	2.11	2.64	-	9.50	-	-	1.135	1.295	
6	Portland tipo I marca Boyacá	-	2.43	2.63	2.51	1.68	3/4"	3/4"	1.438	1.509	1.94	2.29	2.09	7.74	3/4"	3/4"	1.152	1.278	
7	Portland tipo I marca Boyacá	3.08	2.36	2.60	2.45	3.90	1"	1 1/2"	1.318	1.474	2.12	2.54	2.29	7.80	1"	1 1/2"	1.132	1.282	
8	Cemento concretero Diamante	-	-	2.62	2.68	2.64	0.90	1/2"	1/2"	1.407	1.547	2.29	2.58	2.40	4.83	1/2"	1/2"	1.323	1.453
												Residuos de mampostería							
9	Cemento Portland Diamante	-	2.98	2.55	2.62	2.58	1.10	1 1/2"	-	1.400	1.500	Residuos de escombros							
												2.24	2.56	2.36	5.60	1"	-	1.200	1.300
												Ladrillo reciclado							
11	Cemento Portland tipo I	-	-	2.60	-	-	3/4"	3/4"	-	-	2.07	2.26	-	-	-	-	-	-	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 41.

Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 2.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS																		
REF.	Cemento		AGN (Agregado Grueso Natural)								AGR (Agregado Grueso Reciclado)							
	TC	ρC (g/cm ³)	ρ S (g/cm ³)	ρ N (g/cm ³)	ρ S.S.S. (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	ρ S (g/cm ³)	ρ N (g/cm ³)	ρ S.S.S. (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)
12	-	3,05	2,21	2,43	-	4,18	-	-	1,310	1,340	Concreto triturado							
											2,06	2,50	-	8,50	3/4"	1"	1,130	1,240
											Ladrillo triturado							
											1,95	2,54	-	12,02	3/4"	1"	1,070	1,660
16	Cemex tipo estructural	-	2,42	2,64	-	3,40	-	3/4"	1,292	1,492	1,95	-	2,64	13,40	-	3/4"	1,043	1,216
17	Portland tipo HE con adición de cenizas volantes y humo de sílice	3,05	2,60	-	-	4,60	-	-	1,380	1,496	Demoliciones de concreto							
											2,60	-	-	6,40	-	-	1,197	1,448
											Residuos de construcción							
											2,50	-	-	7,90	-	-	1,097	1,226
											Agregado compuesto de concreto y residuos							
											2,50	-	-	8,40	-	-	-	-
18	Cemento tipo 1 ARGOS	2,80	2,31	2,55	2,41	3,97	3/4"	3/4"	-	-	2,13	2,55	2,29	7,76	3/4"	3/4"	-	-
20	-	-	-	-	2,65	1,03	3/4"	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	Cemento portland tipo I de Argos	2,80	2,66	-	-	0,87	3/4"	3/4"	1,400	-	1,95	-	-	9,90	1/2"	3/4"	0,980	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 42.

Resumen caracterización del cemento y de los agregados gruesos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 3.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS																		
REF.	Cemento		AGN (Agregado Grueso Natural)								AGR (Agregado Grueso Reciclado)							
	TC	ρ_C (g/cm ³)	ρ_S (g/cm ³)	ρ_N (g/cm ³)	$\rho_{S.S.S.}$ (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	ρ_S (g/cm ³)	ρ_N (g/cm ³)	$\rho_{S.S.S.}$ (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)
23	Cemento portland tipo I	3,09	2,40	2,70	2,50	4,00	1"	1 1/2"	1,320	1,480	2,20	2,60	2,30	8,00	1"	1 1/2"	1,135	1,285
24	Cemento portland concretero marca Argos	3,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	Cemento portland tipo I	-	2,28	-	-	5,40	3/4"	1"	-	-	Concreto triturado							
											1,98	-	-	9,80	3/4"	1"	-	-
											Escombros mampostería - cerámica							
		2,20	-	-	6,10	3/4"	1"	-	-									
26	Cemento portland tipo I de Samper	2,95	2,50	2,60	-	1,90	3/4"	3/4"	1,458	1,517	2,10	2,60	-	9,60	3/4"	3/4"	1,140	1,234
28	Cemento portland tipo I de Argos	2,95	2,43	-	2,51	3,06	1/2"	1/2"	1,510	1,438	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 43.

Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 1.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS															
REF.	AFN (Agregado Fino Natural)							AFR (Agregado Fino Reciclado)							OBSERVACIONES
	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	
1	2.47	2.63	2.53	2.40	1.581	1.768	4	-	-	-	-	-	-	-	AFN proviene de Tabio, Cundinamarca. AGR proviene de trituración de cilindros almacenados en el laboratorio de la ECI. Se incorporó aditivo superfluidificante Pozollit.
2	-	-	2.44	2.30	1.619	1.726	3	-	-	2.32	7.00	1.300	1.403	3	Reemplazo de cemento con cenizas volantes. No especifica origen de los materiales.
4	2.59	2.70	2.63	1.50	1.568	1.742	1	-	-	-	-	-	-	-	Gravilla 3/4" y arena cumplen con Normas ASTM. Agregado reciclado proviene de concreto triturado sin especificar origen. Se utiliza microfibra NYLON FIBERSTRAND N(TOXEMENT).
5	2.59	2.70	2.63	1.50	1.568	1.742	1	-	-	-	-	-	-	-	Gravilla 3/4" y arena cumplen con Normas ASTM. AGR proviene de trituración de cilindros almacenados en el laboratorio de la ECI.
6	2.08	2.16	2.12	1.03	1.593	1.689	1	-	-	-	-	-	-	-	Gravilla y arena provienen del río Tunjuelo. AGR proviene de trituración de cilindros de laboratorios con resistencias de 14 y 21 MPa. Se utilizó aditivo EUCON N-TX40T019.
7	2.47	2.63	2.53	2.40	1.581	1.768	4	-	-	-	-	-	-	-	Se ensayaron elementos tipo vigas, placas y mensulas. Se recomienda ver la tesis de referencia.
8	2.42	2.53	2.47	1.75	1.613	1.864	-	-	-	-	-	-	-	-	Aditivo hiperplastificante basado en éters policarboxílicos de BASF (Glenium C355). AGN proviene de mina Guayuriba. AFN proviene de mina Apulo. AGR proviene de planta Tunjuelo
9	2.46	2.69	2.56	3.10	1.500	1.600	3	Residuos de escombros							AFN proviene del río Pescadero. AG provienen de Trituradora La Estrella. Escombros y ladrillos fueron triturados manualmente.
								2.12	2.57	2.30	8.10	1.200	1.300	1	
								Ladrillo reciclado							
								2.09	2.61	2.29	9.60	1.200	1.300	0	
11	-	2.10	-	-	-	-	-	1.88	2.95	-	-	-	-	-	Se usó gravilla de 1/2" - 3/4" y arena de río sin especificar origen. Se usó escombro triturado con contenidos no especificados de concreto y mampostería.

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 44.

Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 2.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS															
REF.	AFN (Agregado Fino Natural)							AFR (Agregado Fino Reciclado)							OBSERVACIONES
	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	
12	2,60	-	-	0,75	1,580	1,660	-	-	-	-	-	-	-	-	AGR provienen de concreto y ladrillos triturados de material sobrante de laboratorio. No se especifica el origen de los materiales naturales.
16	2,48	2,61	2,53	2,00	1,499	1,662	-	-	-	-	-	-	-	-	Se usó aditivo reductor de agua EUCON-37 de Toxement. AGR proviene de trituración de ladrillo tolete tipo estructural de los laboratorios de la ECI.
17	2,70	-	-	2,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Se usó aditivo reductor de agua. No se especifica el origen de los materiales. Todos los agregados gruesos fueron tratados con lechadas compuestas de humo de sílice y cenizas volantes.
18	2,20	2,56	2,34	6,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Se usaron 3 tipos de AGN, un tipo de AFN de cantera sin especificar. AGR proviene de trituración y tamizaje de cilindros de concreto de los laboratorios de la ECI. Se usó aditivo súper plastificante sin especificar.
20	2,56	-	-	-	1,473	1,547	1	-	-	-	-	-	-	-	Materiales de origen suministrados por Concescol de Colombia S.A. y por la empresa Reciclados Industriales. No se suministra información del agregado reciclado.
21	2,55	-	-	1,52	1,600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Agregados naturales provenientes de canteras cercanas al municipio de Sogamoso, Boyacá. No se especifica el uso o no de aditivos. El AGR proviene de triturar ladrillos y teja de arcilla cocida.

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 45.

Resumen caracterización de los agregados finos naturales y reciclados de las tesis colombianas – Parte 3.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES NATURALES Y RECICLADOS															
REF.	AFN (Agregado Fino Natural)							AFR (Agregado Fino Reciclado)							OBSERVACIONES
	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)	No.	
23	2.50	2.60	2.50	2.50	1.580	1.760	5	-	-	-	-	-	-	-	El AFN y el AGN provienen del municipio de Ocaña, Norte de Santander. El AGR proviene de cilindros almacenados en el laboratorio de la U.Franzisco de Paula Santander Ocaña. Se uso aditivo superfluidificante marca pozzolith.
24	2.64	2.65	-	2.10	1.580	-	-	Concreto triturado sin carbonatar							El AFN proviene del municipio de Tabio, Cundinamarca. El AFR proviene de cilindros de concreto triturados de los laboratorios de la ECI.
								2.20	2.46	-	8.82	1.346	-	-	
								Concreto triturado carbonatado							
								2.40	2.67	-	7.25	1.346	-	-	
25	2.50	-	-	3.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Se utilizaron 6 tipos de tratamientos de mejoramiento del AGR combinando cemento y humo de sílice. AGR provienen de trituración en planta de la empresa Reciclados Industriales.
26	2.50	2.60	-	1.01	1.458	1.517	2	-	-	-	-	-	-	-	El AFN proviene de arena lavada del río Tunjuelito al igual que el AGN con tamaños máximos de agregados de 3/4". El AGR proviene de la trituración de cilindros de prueba de 3/4".
28	2.58	-	-	1.83	1.593	1.689	2	-	-	-	-	-	-	-	Tanto el AFN como el AGN provienen del río Tunjuelito. No se utilizó AGR, sin embargo, se realizaron ensayos sobre núcleos extraídos directamente de una placa de concreto hecha con los materiales naturales.

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 46.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 1.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
1	1-M1	0,50	100	0	100	0	-	S.A	Las probetas se desencofraron veinticuatro (24) horas después de fundidas y posteriormente se sumergieron en agua hasta el día del ensayo.
	1-M2	0,50	80	20	100	0	-	S.A	
	1-M3	0,50	60	40	100	0	-	S.A	
2	2-M1	0,48	100	0	100	0	0	S.A-S.S	El material adicional es ceniza volante en reemplazo del cemento. Dos muestras por cada mezcla, una con curado sumergido en agua y otra sumergida en sulfato.
	2-M3	0,48	100	0	100	0	40	S.A-S.S	
	2-M4	0,53	100	0	100	0	0	S.A-S.S	
	2-M5	0,53	100	0	100	0	40	S.A-S.S	
	2-M7	0,58	100	0	100	0	0	S.A-S.S	
	2-M10	0,48	50	50	50	50	0	S.A-S.S	
	2-M12	0,48	50	50	50	50	40	S.A-S.S	
	2-M13	0,48	0	100	0	100	0	S.A-S.S	
	2-M15	0,48	0	100	0	100	40	S.A-S.S	
	2-M19	0,53	0	100	0	100	0	S.A-S.S	
	2-M21	0,53	0	100	0	100	40	S.A-S.S	
	2-M22	0,58	50	50	50	50	0	S.A-S.S	
	2-M24	0,58	50	50	50	50	40	S.A-S.S	
2-M25	0,58	0	100	0	100	0	S.A-S.S		
2-M27	0,58	0	100	0	100	40	S.A-S.S		
4	4-M1	0,50	100	0	100	-	0	-	2 muestras por mezcla. Cada par de muestras fueron sometidas a 3 velocidades distintas: 8km/h, 18 km/h y 30 km/h, con restricción y sin restricción, con fibra y sin fibra. (2 Muestras x 3 Agregados x 3 Velocidad x 2 Restricción x 2 Fibra = 72)
	4-M2	0,50	50	50	100	-	0	-	
	4-M3	0,50	0	100	100	-	0	-	
	4-M4	0,50	100	0	100	-	0,15	-	
	4-M5	0,50	50	50	100	-	0,2	-	
	4-M6	0,50	0	100	100	-	0,25	-	
5	5-AN1	0,50	100	0	100	-	-	S.A	Las probetas se desencofraron y posteriormente se sumergieron en agua hasta el día del ensayo.
	5-ACR2	0,50	75	25	100	-	-	S.A	
	5-ACR3	0,50	50	50	100	-	-	S.A	
	5-ACR4	0,50	0	100	100	-	-	S.A	
	5-AN5	0,60	100	0	100	-	-	S.A	
	5-ACR6	0,60	75	25	100	-	-	S.A	
	5-ACR7	0,60	50	50	100	-	-	S.A	
	5-ACR8	0,60	0	100	100	-	-	S.A	
6	6-M1	0,55	100	0	100	-	-	-	Curado en húmedo y temperatura ambiente. Curado al aire y temperatura ambiente. 38 muestras por cada mezcla.
	6-M2	0,55	50	50	100	-	-	-	
	6-M3	0,55	0	100	100	-	-	-	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 47.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 2.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
7	7-VTN1	0,50	100	0	100	-	-	S.A	En la totalidad de elementos estructurales se utilizaron el mismo tipo de agregados de concreto reciclado empleados en la investigación de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito titulada “Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado” desarrollada por el Ing. Néstor Raúl Bojacá Castañeda.
	7-VTN2	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-VTN3	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-VTR1	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-VTR2	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-VTR3	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-PN1	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-PN2	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-PR1	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-PR2	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-VN1	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-VN2	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-VR1	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-VR2	0,50	80	20	100	-	-	S.A	
	7-MN1	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
	7-MN2	0,50	100	0	100	-	-	S.A	
7-MR1	0,50	80	20	100	-	-	S.A		
7-MR2	0,50	80	20	100	-	-	S.A		
8	8-CTRL	0,43	100	0	100	-	0	S.A	El material adicional es residuos de mampostería en reemplazo del AGN. Los AGR provienen de demoliciones al igual que la mampostería.
	8-M2	0,43	70	30	100	-	0	S.A	
	8-M3	0,38	50	50	100	-	0	S.A	
	8-M4	0,38	70	27	100	-	3	S.A	
	8-M5	0,44	70	24	100	-	6	S.A	
	8-M6	0,38	50	45	100	-	5	S.A	
	8-M7	0,45	50	40	100	-	10	S.A	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 48.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 3.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
9	9-A3	0,45	85,7	14,3	100	0	-	-	En las mezclas tipo A se utilizó AGR proveniente de la trituración de escombros. En la tipo B se usó AFR proveniente de la trituración de escombros. En la tipo C se utilizó AFR proveniente de la trituración de ladrillo. En la tipo D se utilizó AGR proveniente de la trituración de ladrillo. En las tipo E se utilizaron materiales naturales como muestra de control. No se especifica el tipo de curado.
	9-A4	0,45	83,3	16,7	100	0	-	-	
	9-A5	0,45	80	20	100	0	-	-	
	9-A6	0,45	75	25	100	0	-	-	
	9-B6	0,45	100	0	75	25	-	-	
	9-B7	0,45	100	0	66,7	33,3	-	-	
	9-B8	0,45	100	0	50	50	-	-	
	9-C5	0,45	100	0	80	20	-	-	
	9-C6	0,45	100	0	75	25	-	-	
	9-C7	0,45	100	0	66,7	33,3	-	-	
	9-D3	0,45	85,7	14,3	100	0	-	-	
	9-D4	0,45	83,3	16,7	100	0	-	-	
	9-D5	0,45	80	20	100	0	-	-	
	9-E3	0,45	100	0	100	0	-	-	
	9-E4	0,45	100	0	100	0	-	-	
9-E5	0,45	100	0	100	0	-	-		
11	11-t1	0,50	100	0	100	0	-	S.A	Poca información sobre los materiales de origen y sobre los especímenes ensayados.
	11-t2	0,50	100	0	100	0	-	S.A	
	11-t3	0,50	100	0	100	0	-	S.A	
	11-t4	0,50	100	0	100	0	-	S.A	
	11-t5	0,50	100	0	100	0	-	S.A	
	11-e1	0,50	54,6	45,4	46,6	53,4	-	S.A	
	11-e2	0,50	54,6	45,4	46,6	53,4	-	S.A	
	11-e3	0,50	54,6	45,4	46,6	53,4	-	S.A	
	11-e4	0,50	54,6	45,4	46,6	53,4	-	S.A	
	11-e5	0,50	54,6	45,4	46,6	53,4	-	S.A	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 49.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 4.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
12	12-1A	0,55	100	0	100	-	-	A°	La mezcla 12-1 tiene solo materiales naturales que sirven para las muestras de control. Las mezclas 12-2, 12-3 y 12-4 tienen AGR proveniente de concreto triturado. Las mezclas 12-5, 12-6 y 12-7 tienen AGR proveniente de ladrillo triturado. El curado tipo A se realizó con bolsas plásticas. El curado tipo B se realizó a temperatura y humedad ambiente.
	12-1B	0,55	100	0	100	-	-	B°	
	12-2A	0,55	75	25	100	-	-	A°	
	12-2B	0,55	75	25	100	-	-	B°	
	12-3A	0,55	50	50	100	-	-	A°	
	12-3B	0,55	50	50	100	-	-	B°	
	12-4A	0,55	0	100	100	-	-	A°	
	12-4B	0,55	0	100	100	-	-	B°	
	12-5A	0,55	75	25	100	-	-	A°	
	12-5B	0,55	75	25	100	-	-	B°	
	12-6A	0,55	50	50	100	-	-	A°	
	12-6B	0,55	50	50	100	-	-	B°	
12-7A	0,55	0	100	100	-	-	A°		
12-7B	0,55	0	100	100	-	-	B°		
16	16-MP1	0,30	100	0	100	-	-	B°	Todas las mezclas tienen dos tipos de curado. Sumergidas en agua durante los primeros 7 días, para luego llevarlas a la cámara de humedad y temperatura controlada. Sin curado llevadas a la cámara.
	16-MP2	0,50	100	0	100	-	-	B°	
	16-MC1	0,30	80	20	100	-	-	B°	
	16-MC2	0,50	80	20	100	-	-	B°	
	16-MC3	0,30	60	40	100	-	-	B°	
	16-MC4	0,50	60	40	100	-	-	B°	
17	17-AN	0,59	100	0	100	-	-	B°	El curado tipo B se realizó a temperatura y humedad ambiente. Todas las mezclas a excepción de la 17-AN fueron tratadas con humo de sílice y cenizas volantes.
	17-T0-1	0,59	0	100	100	-	-	B°	
	17-T0-2	0,59	70,4	29,6	100	-	-	B°	
	17-T1-1	0,59	67,9	32,1	100	-	T1	B°	
	17-T1-2	0,59	27,9	72,1	100	-	T1	B°	
	17-T2-1	0,59	70,3	29,7	100	-	T2	B°	
	17-T2-2	0,59	30,2	69,8	100	-	T2	B°	
	17-T3-1	0,59	69,6	30,4	100	-	T3	B°	
	17-T3-2	0,59	29,6	70,4	100	-	T3	B°	
17-T4	0,59	72,2	27,8	100	-	T4	B°		

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 50.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 5.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
18	18-T1	0,35	100	0	100	-	0	S.A	El material de la columna "MATERIAL ADICIONAL" es agregado grueso triturado carbonatado.
	18-T2	0,35	0	100	100	-	0	S.A	
	18-T3	0,35	75	25	100	-	0	S.A	
	18-T4	0,35	50	50	100	-	0	S.A	
	18-T5	0,35	0	0	100	-	100	S.A	
	18-T6	0,35	75	0	100	-	25	S.A	
	18-T7	0,35	50	0	100	-	50	S.A	
20	20-M0	0,44	100	0	100	-	-	-	No se especifica el tipo de curado y existen inconsistencias en la presentación de la relación agua/cemento.
	20-M1	0,44	30	70	100	-	-	-	
	20-M2	0,44	50	50	100	-	-	-	
	20-M3	0,44	75	25	100	-	-	-	
21	21-M0	0,50	100	0	100	-	-	-	No se especifica el tipo de curado.
	21-M1	0,50	90	10	100	-	-	-	
	21-M2	0,50	80	20	100	-	-	-	
	21-M3	0,50	70	30	100	-	-	-	
23	23-M1	0,50	100	0	100	-	-	S.A-S.S	Existen coincidencias en cuanto a la presentación y datos de esta referencia con la referencia No.1
	23-M2	0,50	80	20	100	-	-	S.A-S.S	
	23-M3	0,50	60	40	100	-	-	S.A-S.S	
24	24-A	0,55	-	-	100	0	0	S.A	El material de la columna "MATERIAL ADICIONAL" es agregado fino triturado carbonatado. El curado se realizó luego de desenfocar las muestras pasadas las 24 horas, se agregó cal para evitar crecimiento de microorganismos.
	24-B	0,65	-	-	100	0	0	S.A	
	24-AN1	0,55	-	-	75	25	0	S.A	
	24-BN1	0,65	-	-	75	25	0	S.A	
	24-AS1	0,55	-	-	75	0	25	S.A	
	24-BS1	0,65	-	-	75	0	25	S.A	
	24-AN2	0,55	-	-	50	50	0	S.A	
	24-BN2	0,65	-	-	50	50	0	S.A	
	24-AS2	0,55	-	-	50	0	50	S.A	
24-BS2	0,65	-	-	50	0	50	S.A		

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 51.

Resumen planteamientos diseños de mezclas de cada tesis consultada – Parte 6.

PLANTEAMIENTO DISEÑOS DE MEZCLAS									
REF.	NOM.	A/C	AGN C (%)	AGR C (%)	AFN C (%)	AFR C (%)	M.A C (%)	T.C.	OBSERVACIONES
25	25-CN	0,54	100	0	100	-	-	S.A	El material de la columna "MATERIAL ADICIONAL" hace referencia al tipo de tratamiento con lechada de mejoramiento. Ejemplo: HS.75 significa que se usó humo de sílice con una relación a/c=0.75; CP1.8 significa que se usó cemento portland con a/c=1.8
	25-CST	0,60	50	50	100	-	-	S.A	
	25-CT1	0,60	50	50	100	-	HS.75	S.A	
	25-CT2	0,59	50	50	100	-	HS1.0	S.A	
	25-CT3	0,59	50	50	100	-	CP1.2	S.A	
	25-CT4	0,59	50	50	100	-	CP1.8	S.A	
	25-CT5	0,59	50	50	100	-	HS1.2	S.A	
26	26-M1A	0,40	0	52	48	-	R2.0	A°	Los cilindros fueron curados en dos condiciones: sumergidos en agua (A) y expuestos al aire (B). El material adicional es aditivo RINA TIPO F en proporción del 2%.
	26-M1B	0,40	0	52	48	-	R2.0	B°	
	26-M2A	0,50	0	52	48	-	-	A°	
	26-M2B	0,50	0	52	48	-	-	B°	
	26-M3A	0,60	0	52	48	-	-	A°	
	26-M3B	0,60	0	52	48	-	-	B°	
	26-M4A	0,40	52	0	48	-	R2.0	A°	
	26-M4B	0,40	52	0	48	-	R2.0	B°	
	26-M5A	0,50	52	0	48	-	-	A°	
	26-M5B	0,50	52	0	48	-	-	B°	
	26-M6A	0,60	52	0	48	-	-	A°	
26-M6B	0,60	52	0	48	-	-	B°		
28	28-M1	0,45	-	-	-	-	I	B°	Los cilindros y placa fueron curados al aire (B). Se utilizó aditivo impermeabilizante en las mezclas (I) tipo Zycosil. No se presenta el diseño de mezcla. Los datos no contienen AR sin embargo, sirven para comparar resultados con los AN.
	28-M2	0,45	-	-	-	-	N.I.	B°	
	28-M3	0,55	-	-	-	-	I	B°	
	28-M4	0,55	-	-	-	-	N.I.	B°	
	28-M5	0,65	-	-	-	-	I	B°	
	28-M6	0,65	-	-	-	-	N.I.	B°	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 52.

Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.

REF.	NOM.	f'c - Resistencia a la compresión (MPa)												Ec - Módulo de elasticidad (MPa)										Fr - Resistencia a la flexión (MPa)						
		3d	3d*	7d	7d*	14d	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	3d	3d*	7d	7d*	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	7d	7d*	28d	28d*	90d	
1	1-M1	17,3	-	-	-	-	26,0	-	27,0	-	-	29,0	36,5	15858	-	-	-	-	18961	-	17582	-	-	19650	24304	-	-	3,85	-	-
	1-M2	17,3	-	-	-	-	27,5	-	30,5	-	-	34,0	38,0	15054	-	-	-	-	17754	-	19650	-	-	22063	22408	-	-	3,97	-	-
	1-M3	14,7	-	-	-	-	24,5	-	27,5	-	-	29,5	34,5	13445	-	-	-	-	17237	-	19305	-	-	20857	21029	-	-	3,35	-	-
2	2-M1	-	-	-	-	-	34,0	38,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M3	-	-	-	-	-	18,4	20,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M4	-	-	-	-	-	29,7	30,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M5	-	-	-	-	-	24,0	24,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M7	-	-	-	-	-	24,2	25,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M10	-	-	-	-	-	29,0	28,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M12	-	-	-	-	-	16,8	18,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M13	-	-	-	-	-	21,4	23,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M15	-	-	-	-	-	17,7	19,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M19	-	-	-	-	-	21,5	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M21	-	-	-	-	-	16,7	17,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M22	-	-	-	-	-	22,6	25,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-M24	-	-	-	-	-	16,5	19,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-M25	-	-	-	-	-	25,6	31,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2-M27	-	-	-	-	-	16,2	19,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	4-M1	-	-	-	-	-	35,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22493	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4-M2	-	-	-	-	-	33,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4-M3	-	-	-	-	-	33,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4-M4	-	-	-	-	-	36,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22881	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4-M5	-	-	-	-	-	35,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21767	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4-M6	-	-	-	-	-	35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21722	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	5-AN1	11,6	-	16,3	-	-	25,3	-	-	29,5	-	-	13289	-	14542	-	20089	-	-	23211	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR2	11,9	-	17,6	-	-	22,8	-	-	29,1	-	-	12240	-	16420	-	17456	-	-	21271	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR3	12,0	-	15,3	-	-	22,1	-	-	25,4	-	-	12735	-	15321	-	19374	-	-	20060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR4	11,9	-	17,9	-	-	19,4	-	-	22,3	-	-	10689	-	14525	-	16287	-	-	17232	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-AN5	13,5	-	15,9	-	-	19,7	-	-	24,8	-	-	13810	-	14779	-	18390	-	-	20235	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR6	8,1	-	12,0	-	-	16,3	-	-	22,5	-	-	13076	-	13309	-	17201	-	-	19188	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR7	7,9	-	11,9	-	-	14,5	-	-	21,9	-	-	10593	-	15262	-	17452	-	-	19364	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5-ACR8	7,5	-	10,3	-	-	14,1	-	-	19,2	-	-	6382	-	12105	-	14982	-	-	18804	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 53.

Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.

REF.	NOM.	f'c - Resistencia a la compresión (MPa)												Ec - Módulo de elasticidad (MPa)										Fr - Resistencia a la flexión (MPa)						
		3d	3d*	7d	7d*	14d	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	3d	3d*	7d	7d*	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	7d	7d*	28d	28d*	90d	
6	6-M1	-	-	18,5	16,9	-	29,9	27,3	-	-	-	-	-	-	-	16800	17100	21700	15600	-	-	-	-	-	-	2,89	2,50	4,47	3,84	-
	6-M2	-	-	18,3	17,8	-	28,9	27,2	-	-	-	-	-	-	-	15700	13600	15800	20000	-	-	-	-	-	-	3,08	2,97	4,42	3,54	-
	6-M3	-	-	17,3	14,9	-	27,3	25,9	-	-	-	-	-	-	-	13900	15200	20200	18700	-	-	-	-	-	-	2,99	2,51	4,55	3,81	-
7	7-VTN1	-	-	-	-	-	32,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21505	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VTN2	-	-	-	-	-	33,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20436	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VTN3	-	-	-	-	-	34,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20321	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VTR1	-	-	-	-	-	24,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19667	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VTR2	-	-	-	-	-	24,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VTR3	-	-	-	-	-	22,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22156	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-PN1	-	-	-	-	-	18,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13877	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-PN2	-	-	-	-	-	18,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13042	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-PR1	-	-	-	-	-	24,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15392	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-PR2	-	-	-	-	-	16,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VN1	-	-	-	-	-	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17719	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VN2	-	-	-	-	-	28,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17824	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VR1	-	-	-	-	-	24,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-VR2	-	-	-	-	-	27,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17584	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7-MN1	-	-	-	-	-	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17719	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7-MN2	-	-	-	-	-	28,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17824	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
7-MR1	-	-	-	-	-	24,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
7-MR2	-	-	-	-	-	27,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17584	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
8	8-CTRL	-	-	35,8	-	-	40,0	-	-	52,0	-	-	-	-	-	27147	-	27566	-	-	35319	-	-	-	-	4,44	-	5,48	-	7,28
	8-M2	-	-	33,2	-	-	40,0	-	-	50,0	-	-	-	-	-	23884	-	25689	-	-	36486	-	-	-	-	3,78	-	5,52	-	7,15
	8-M3	-	-	27,0	-	-	38,5	-	-	45,6	-	-	-	-	-	23518	-	25942	-	-	33650	-	-	-	-	3,68	-	5,46	-	6,55
	8-M4	-	-	34,0	-	-	44,1	-	-	55,5	-	-	-	-	-	25035	-	29694	-	-	33411	-	-	-	-	4,65	-	5,69	-	7,48
	8-M5	-	-	30,7	-	-	41,6	-	-	50,6	-	-	-	-	-	23424	-	27466	-	-	30930	-	-	-	-	4,23	-	5,43	-	6,82
	8-M6	-	-	28,7	-	-	39,2	-	-	49,4	-	-	-	-	-	21583	-	26270	-	-	31179	-	-	-	-	4,06	-	5,40	-	6,78
	8-M7	-	-	27,9	-	-	35,3	-	-	46,5	-	-	-	-	-	21916	-	25019	-	-	28487	-	-	-	-	4,12	-	5,27	-	6,75

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 55.

Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 4.

REF.	NOM.	f'c - Resistencia a la compresión (MPa)												Ec - Módulo de elasticidad (MPa)										Fr - Resistencia a la flexión (MPa)						
		3d	3d*	7d	7d*	14d	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	3d	3d*	7d	7d*	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	7d	7d*	28d	28d*	90d	
12	12-1A	-	-	21,7	-	-	26,6	-	20,5	-	-	-	-	-	16420	-	18865	-	14896	-	-	-	-	-	2,95	-	4,01	-	3,34	
	12-1B	-	-	20,5	-	-	16,4	-	17,3	-	-	-	-	-	14593	-	10957	-	15944	-	-	-	-	-	2,77	-	3,57	-	3,17	
	12-2A	-	-	16,4	-	-	17,4	-	19,0	-	-	-	-	-	10583	-	11726	-	11246	-	-	-	-	-	-	-	3,07	-	2,87	
	12-2B	-	-	18,0	-	-	13,8	-	14,5	-	-	-	-	-	7788	-	10989	-	13397	-	-	-	-	-	-	-	2,21	-	2,73	
	12-3A	-	-	16,6	-	-	17,4	-	21,1	-	-	-	-	-	10066	-	15283	-	16027	-	-	-	-	-	-	2,54	-	2,60	-	2,58
	12-3B	-	-	15,8	-	-	18,1	-	14,2	-	-	-	-	-	11214	-	12973	-	8586	-	-	-	-	-	-	3,17	-	3,10	-	2,50
	12-4A	-	-	21,1	-	-	24,8	-	32,2	-	-	-	-	-	12522	-	12983	-	17130	-	-	-	-	-	-	3,22	-	3,17	-	3,21
	12-4B	-	-	19,3	-	-	19,7	-	24,9	-	-	-	-	-	8060	-	12796	-	13439	-	-	-	-	-	-	2,56	-	3,43	-	3,50
	12-5A	-	-	18,0	-	-	21,7	-	23,7	-	-	-	-	-	14345	-	16924	-	13385	-	-	-	-	-	-	2,67	-	2,66	-	2,72
	12-5B	-	-	19,4	-	-	23,7	-	22,8	-	-	-	-	-	10637	-	13763	-	13407	-	-	-	-	-	-	2,67	-	2,62	-	2,43
	12-6A	-	-	23,2	-	-	28,8	-	24,7	-	-	-	-	-	13591	-	15250	-	15876	-	-	-	-	-	-	3,04	-	3,74	-	3,79
	12-6B	-	-	21,6	-	-	25,6	-	19,0	-	-	-	-	-	14030	-	15099	-	14511	-	-	-	-	-	-	2,65	-	4,17	-	3,45
	12-7A	-	-	16,9	-	-	21,9	-	15,1	-	-	-	-	-	10359	-	9381	-	13511	-	-	-	-	-	-	2,59	-	3,34	-	3,16
12-7B	-	-	19,2	-	-	21,1	-	13,3	-	-	-	-	-	9564	-	10343	-	7014	-	-	-	-	-	-	2,56	-	3,26	-	3,01	
16	16-MP1	32,4	30,8	-	-	48,2	39,4	-	51,7	36,4	-	-	19020	17582	-	-	22893	18521	-	21678	18158	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16-MP2	22,1	21,0	-	-	45,5	28,4	-	44,1	24,3	-	-	17772	14344	-	-	22218	17178	-	23237	18508	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16-MC1	31,1	32,0	-	-	47,5	40,6	-	53,4	38,5	-	-	17159	15807	-	-	20632	18161	-	21001	16362	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16-MC2	17,9	17,5	-	-	35,8	23,0	-	39,7	18,9	-	-	11708	9822	-	-	17431	13500	-	17815	12569	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16-MC3	34,9	33,3	-	-	53,2	44,1	-	55,0	45,0	-	-	17072	16272	-	-	19207	17985	-	20669	18916	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16-MC4	25,3	23,1	-	-	38,1	27,3	-	42,1	26,8	-	-	15163	12992	-	-	18394	13733	-	19093	14144	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	17-AN	-	-	23,9	-	-	28,0	-	-	-	-	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,85	-	3,95	
	17-T0-1	-	-	20,3	-	-	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,12	-	3,95	
	17-T0-2	-	-	22,3	-	-	31,0	-	-	-	-	35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,19	-	3,81	
	17-T1-1	-	-	21,8	-	-	-	-	-	-	-	33,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,57	-	5,15	
	17-T1-2	-	-	21,6	-	-	-	-	-	-	-	34,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,29	-	3,83	
	17-T2-1	-	-	26,7	-	-	-	-	-	-	-	38,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,88	-	4,58	
	17-T2-2	-	-	26,2	-	-	-	-	-	-	-	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,65	-	4,35	
	17-T3-1	-	-	26,6	-	-	-	-	-	-	-	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,36	-	3,70	
	17-T3-2	-	-	24,9	-	-	-	-	-	-	-	35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,37	-	3,76	
	17-T4	-	-	-	-	-	31,0	-	-	-	-	34,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,47	-	-	

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 57.

Resumen de las propiedades mecánicas según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 6.

REF.	NOM.	f'c - Resistencia a la compresión (MPa)												Ec - Módulo de elasticidad (MPa)												Fr - Resistencia a la flexión (MPa)					
		3d	3d*	7d	7d*	14d	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	3d	3d*	7d	7d*	28d	28d*	56d	90d	90d*	100d	100d*	7d	7d*	28d	28d*	90d		
25	25-CN	-	-	21,2	-	-	23,5	-	-	-	-	-	-	-	-	15696	-	16881	-	-	-	-	-	-	-	4,60	-	4,90	-	-	
	25-CST	-	-	17,8	-	-	19,0	-	-	-	-	-	-	-	-	14843	-	15472	-	-	-	-	-	-	-	3,60	-	3,90	-	-	
	25-CT1	-	-	23,3	-	-	25,3	-	-	-	-	-	-	-	-	15536	-	17178	-	-	-	-	-	-	-	4,80	-	5,80	-	-	
	25-CT2	-	-	26,2	-	-	27,2	-	-	-	-	-	-	-	-	18838	-	19705	-	-	-	-	-	-	-	5,50	-	5,60	-	-	
	25-CT3	-	-	28,8	-	-	33,0	-	-	-	-	-	-	-	-	18264	-	23755	-	-	-	-	-	-	-	6,40	-	7,10	-	-	
	25-CT4	-	-	23,2	-	-	24,1	-	-	-	-	-	-	-	-	17956	-	17292	-	-	-	-	-	-	-	6,00	-	6,50	-	-	
	25-CT5	-	-	20,6	-	-	22,1	-	-	-	-	-	-	-	-	16207	-	16087	-	-	-	-	-	-	-	4,80	-	5,40	-	-	
	25-CT6	-	-	22,4	-	-	24,6	-	-	-	-	-	-	-	-	18088	-	17548	-	-	-	-	-	-	-	3,70	-	4,50	-	-	
26	26-M1A	-	-	29,0	-	-	31,0	-	39,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,00	-	6,00	-	6,00	
	26-M1B	-	-	27,0	-	-	26,0	-	33,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00	-	4,50	-	5,30	
	26-M2A	-	-	20,0	-	-	30,0	-	29,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,30	-	5,30	-	5,50	
	26-M2B	-	-	16,0	-	-	22,0	-	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,60	-	3,90	-	4,40	
	26-M3A	-	-	20,0	-	-	30,0	-	25,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,30	-	5,20	-	5,30	
	26-M3B	-	-	12,0	-	-	19,0	-	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,10	-	3,10	-	4,00	
	26-M4A	-	-	18,0	-	-	24,0	-	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00	-	4,20	-	4,30	
	26-M4B	-	-	12,0	-	-	20,0	-	23,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,40	-	3,60	-	3,90	
	26-M5A	-	-	16,0	-	-	23,0	-	25,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,50	-	4,00	-	4,30	
	26-M5B	-	-	10,0	-	-	17,0	-	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,70	-	3,40	-	3,80	
	26-M6A	-	-	14,0	-	-	18,0	-	22,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,40	-	3,90	-	4,20	
26-M6B	-	-	10,0	-	-	13,0	-	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,20	-	3,10	-	3,60		
28	28-M1	-	-	-	-	-	-	-	-	42,4	-	45,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	28-M2	-	-	-	-	-	-	-	-	38,9	-	41,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M3	-	-	-	-	-	-	-	-	32,1	-	39,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M4	-	-	-	-	-	-	-	-	19,8	-	25,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M5	-	-	-	-	-	-	-	-	22,3	-	31,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M6	-	-	-	-	-	-	-	-	19,7	-	19,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 58.

Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.

RESULTADOS DE LABORATORIOS																					
REF.	NOM.	PROPIEDADES DE DURABILIDAD																			
		Permeabilidad al ion cloruro (Coulombs)			Sortividad (mm/s ^{1/2})						Carbonatación		Resistividad (Ωm)		Porosidad (%)		Sulfatos		ISAT (ml/m ² xs)		
		28d	56d	90d	I - 28d	I - 56d	I - 90d	S - 28d	S - 56d	S - 90d	Ka (mm/año)	Kc (mm/año)	28d	90d	28d	90d	Expansión %	días	10min	20 ó 30min	30 ó 60min
1	1-M1	2474	2988	-	0.0136	0.0043	-	0.0031	0.0019	-	5.50	59	-	-	-	-	2.410	68	0.160	0.070	0.040
	1-M2	2361	2377	-	0.0139	0.0035	-	0.0024	0.0015	-	4.40	47	-	-	-	-	1.980	68	0.180	0.080	0.040
	1-M3	2403	2526	-	0.0150	0.0052	-	0.0041	0.0020	-	5.00	53	-	-	-	-	1.660	68	0.200	0.140	0.050
2	2-M1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.043	120	-	-	-
	2-M3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.070	120	-	-	-
	2-M4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.032	120	-	-	-
	2-M5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.034	120	-	-	-
	2-M7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.032	120	-	-	-
	2-M10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012	120	-	-	-
	2-M12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.033	120	-	-	-
	2-M13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.040	120	-	-	-
	2-M15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.044	120	-	-	-
	2-M19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.009	120	-	-	-
	2-M21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.079	120	-	-	-
	2-M22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.031	120	-	-	-
	2-M24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.028	120	-	-	-
	2-M25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.010	120	-	-	-
2-M27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	120	-	-	-	
5	5-AN1	2587	-	1853	0.0066	-	0.0195	0.0023	-	0.0036	2.99	32	70.25	89.28	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR2	5195	-	2489	0.0086	-	0.0074	0.0026	-	0.0015	3.46	37	51.83	107.73	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR3	4692	-	3357	0.0196	-	0.0099	0.0043	-	0.0020	3.46	37	44.42	86.88	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR4	5627	-	4173	0.0200	-	0.0020	0.0046	-	0.0022	3.37	36	31.72	65.49	-	-	-	-	-	-	-
	5-AN5	6168	-	3123	0.0103	-	0.0051	0.0035	-	0.0009	-	-	55.22	77.94	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR6	5081	-	2841	0.0215	-	0.0069	0.0018	-	0.0016	-	-	63.40	71.97	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR7	3400	-	2762	0.0212	-	0.0073	0.0028	-	0.0018	-	-	50.19	65.89	-	-	-	-	-	-	-
	5-ACR8	6075	-	2023	0.0231	-	0.0077	0.0030	-	0.0020	-	-	68.22	76.95	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 59.

Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.

RESULTADOS DE LABORATORIOS																					
REF.	NOM.	PROPIEDADES DE DURABILIDAD																			
		Permeabilidad al ion cloruro (Coulombs)			Sortividad (mm/s ^{1/2})						Carbonatación		Resistividad (Ωm)		Porosidad (%)		Sulfatos		ISAT (ml/m2xs)		
		28d	56d	90d	I - 28d	I - 56d	I - 90d	S - 28d	S - 56d	S - 90d	Ka (mm/año)	Kc (mm/año)	28d	90d	28d	90d	Expansión %	días	10min	20 ó 30min	30 ó 60min
8	8-CTRL	2994	-	2107	0.0190	-	0.0107	0.0234	-	0.0168	-	-	-	-	9.8	7.8	-	-	-	-	-
	8-M2	3237	-	2278	0.0198	-	0.0124	0.0236	-	0.0192	-	-	-	-	10.9	8.4	-	-	-	-	-
	8-M3	3136	-	2327	0.0210	-	0.0170	0.0244	-	0.0210	-	-	-	-	11.7	8.6	-	-	-	-	-
	8-M4	3012	-	2092	0.0173	-	0.0111	0.0221	-	0.0178	-	-	-	-	10.8	8.3	-	-	-	-	-
	8-M5	3517	-	2309	0.0214	-	0.0124	0.0245	-	0.0194	-	-	-	-	11.3	8.7	-	-	-	-	-
	8-M6	3820	-	2544	0.0200	-	0.0112	0.0230	-	0.0191	-	-	-	-	11.5	9.7	-	-	-	-	-
	8-M7	4100	-	3003	0.0238	-	0.0148	0.0274	-	0.0240	-	-	-	-	12.0	10.5	-	-	-	-	-
12	12-1A	-	2597	-	-	0.0346	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-1B	-	2316	-	-	0.0417	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-2A	-	3201	-	-	0.0255	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-2B	-	2822	-	-	0.0477	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-3A	-	3972	-	-	0.0128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-3B	-	2983	-	-	0.0393	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-4A	-	4466	-	-	0.0210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-4B	-	3345	-	-	0.0474	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-5A	-	5005	-	-	0.0251	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-5B	-	3849	-	-	0.0388	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-6A	-	4271	-	-	0.0151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-6B	-	3857	-	-	0.0514	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-7A	-	4050	-	-	0.0122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-7B	-	5149	-	-	0.0441	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	16-MP1	4326	-	4249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.3	11.6	-	-	0.203	0.127	0.097
	16-MP2	3655	-	5072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.0	14.4	-	-	0.150	0.100	0.073
	16-MC1	5860	-	5035	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.3	18.7	-	-	0.160	0.110	0.077
	16-MC2	5696	-	4829	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.9	18.3	-	-	0.180	0.127	0.093
	16-MC3	4919	-	3910	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.4	17.6	-	-	0.143	0.093	0.067
	16-MC4	5100	-	4743	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.0	18.3	-	-	0.243	0.160	0.123

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 60.

Resumen de las propiedades de durabilidad según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 3.

RESULTADOS DE LABORATORIOS																						
REF.	NOM.	PROPIEDADES DE DURABILIDAD																				
		Permeabilidad al ion cloruro (Coulombs)			Sortividad (mm/s ^{1/2})						Carbonatación		Resistividad (Ωm)		Porosidad (%)		Sulfatos		ISAT (ml/m ² xs)			
		28d	56d	90d	I - 28d	I - 56d	I - 90d	S - 28d	S - 56d	S - 90d	Ka (mm/año)	Kc (mm/año)	28d	90d	28d	90d	Expansión %	días	10min	20 ó 30min	30 ó 60min	
23	23-M1	2480	2994	-	0.0138	0.0045	-	0.0033	0.0021	-	5.50	59	-	-	-	-	2.420	68	0.160	0.070	0.040	
	23-M2	2367	2383	-	0.0141	0.0037	-	0.0026	0.0017	-	4.40	47	-	-	-	-	1.990	68	0.180	0.080	0.040	
	23-M3	2409	2532	-	0.0152	0.0054	-	0.0043	0.0022	-	5.00	53	-	-	-	-	1.670	68	0.200	0.140	0.050	
24	24-A	-	-	-	0.0071	-	0.0022	0.0044	-	0.0009	-	-	-	-	-	22.6	17.0	0.045	180	0.149	0.093	0.072
	24-B	-	-	-	0.0088	-	0.0025	0.0056	-	0.0010	-	-	-	-	-	19.2	16.6	0.076	180	0.120	0.084	0.064
	24-AN1	-	-	-	0.0090	-	0.0056	0.0040	-	0.0035	-	-	-	-	-	20.0	15.9	0.048	180	0.196	0.125	0.079
	24-BN1	-	-	-	0.0287	-	0.0103	0.0012	-	0.0070	-	-	-	-	-	21.7	18.4	0.115	180	0.199	0.144	0.111
	24-AS1	-	-	-	0.0215	-	0.0027	0.0044	-	0.0012	-	-	-	-	-	19.0	13.6	0.032	180	0.196	0.132	0.101
	24-BS1	-	-	-	0.0303	-	0.0101	0.0035	-	0.0068	-	-	-	-	-	22.9	18.5	0.140	180	0.133	0.102	0.074
	24-AN2	-	-	-	0.0129	-	0.0043	0.0065	-	0.0022	-	-	-	-	-	19.0	16.1	0.085	180	0.193	0.144	0.106
	24-BN2	-	-	-	0.0176	-	0.0080	0.0063	-	0.0054	-	-	-	-	-	19.7	16.8	0.105	180	0.395	0.264	0.204
	24-AS2	-	-	-	0.0129	-	0.0058	0.0065	-	0.0019	-	-	-	-	-	18.3	13.3	0.056	180	0.137	0.091	0.073
	24-BS2	-	-	-	0.0156	-	0.0067	0.0050	-	0.0044	-	-	-	-	-	20.2	18.1	0.056	180	0.197	0.132	0.106
28	28-M1	-	-	-	-	-	0.0036	-	-	0.0063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M2	-	-	-	-	-	0.0262	-	-	0.0057	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.413	0.297	0.227
	28-M3	-	-	-	-	-	0.0033	-	-	0.0075	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M4	-	-	-	-	-	0.0393	-	-	0.0238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.630	0.480	0.367
	28-M5	-	-	-	-	-	0.0041	-	-	0.0119	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-M6	-	-	-	-	-	0.0442	-	-	0.0238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.767	0.623	0.513

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 61.

Resumen de las propiedades de adicionales según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 1.

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA																		
	1-M1	1-M2	1-M3	4-M1	4-M2	4-M3	4-M4	4-M5	4-M6	6-M1	6-M2	6-M3	7-VTN1	7-VTN2	7-VTN3	7-VTR1	7-VTR2	7-VTR3	
Asentamiento (cm)	7,5	10,0	7,0	6,6	4,9	1,9	5,5	4,0	0,4	8,0	4,5	4,0	-	-	-	-	-	-	-
Peso unitario (T/m ³)	2,22	2,21	2,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,28	2,29	2,30	2,28	2,28	2,28	2,28
Contenido de aire (%)	1,50	1,00	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacios (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA																			
	7-PN1	7-PN2	7-PR1	7-PR2	7-VN1	7-VN2	7-VR1	7-VR2	7-MN1	7-MN2	7-MR1	7-MR2	8-CTRL	8-M2	8-M3	8-M4	8-M5	8-M6	8-M7	
Asentamiento (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,1	10,5	10,4	10,4	10,2	10,1	10,0
Peso unitario (T/m ³)	2,20	2,26	2,22	2,18	2,21	2,30	2,32	2,30	2,21	2,30	2,32	2,30	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de aire (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacios (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA																							
	9-A3	9-A4	9-A5	9-A6	9-B6	9-B7	9-B8	9-C5	9-C6	9-C7	9-D3	9-D4	9-D5	9-E3	9-E4	9-E5	12-1A	12-1B	12-2A	12-2B	12-3A	12-3B	12-4A	12-4B
Asentamiento (cm)	7,0	6,5	5,5	6,5	7,0	7,0	6,0	6,0	7,0	5,5	6,5	6,0	6,0	6,5	6,0	6,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Peso unitario (T/m ³)	2,27	2,30	2,24	2,22	2,25	2,28	2,27	2,25	2,28	2,32	2,31	2,28	2,23	2,31	2,30	2,30	2,18	2,18	2,16	2,16	2,16	2,16	2,15	2,15
Contenido de aire (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacios (%)	30,7	30,7	31,2	31,0	29,5	28,3	28,6	31,0	28,9	30,3	32,5	30,2	30,6	31,9	28,4	29,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



Tabla 62.

Resumen de las propiedades de adicionales según resultados de laboratorios de cada tesis consultada – Parte 2.

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA																					
	12-5A	12-5B	12-6A	12-6B	12-7A	12-7B	16-MP1	16-MP2	16-MC1	16-MC2	16-MC3	16-MC4	17-AN	17-T0-1	17-T0-2	17-T1-1	17-T1-2	17-T2-1	17-T2-2	17-T3-1	17-T3-2	17-T4
Asentamiento (cm)	-	-	-	-	-	-	2,5	3,8	5,0	7,5	10,0	12,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Peso unitario (T/m ³)	2,14	2,14	2,13	2,13	2,06	2,06	2,15	2,15	2,16	2,12	2,13	2,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de aire (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacíos (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA																					
	18-T1	18-T2	18-T3	18-T4	18-T5	18-T6	18-T7	20-M0	20-M1	20-M2	20-M3	21-M0	21-M1	21-M2	21-M3	24-A	24-B	24-AN1	24-BN1	24-AS1	24-BS1	24-AN2
Asentamiento (cm)	10,0	9,5	8,5	9,0	7,5	9,5	7,5	3,0	2,0	2,5	2,8	7,5	7,5	7,4	7,3	-	-	-	-	-	-	-
Peso unitario (T/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32	2,30	2,32	2,30	2,24	2,25	2,27
Contenido de aire (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacíos (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Propiedades Adicionales	NOMENCLATURA DE LA MEZCLA										
	24-BN2	24-AS2	24-BS2	25-CN	25-CST	25-CT1	25-CT2	25-CT3	25-CT4	25-CT5	25-CT6
Asentamiento (cm)	-	-	-	10,0	9,0	10,0	10,0	8,0	9,0	12,0	12,0
Peso unitario (T/m ³)	2,30	2,26	2,21	-	-	-	-	-	-	-	-
Contenido de aire (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vacíos (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.



7.3 PANORAMA ACTUAL DE PROVEEDORES Y PRODUCTOS A BASE DE RCD EN COLOMBIA

En Colombia, el desarrollo de tecnologías dispuestas para la fabricación de agregados reciclados es escaso. Sin embargo, algunas instituciones educativas, públicas y privadas, han tenido iniciativas para diseñar lineamientos a favor de ciudades libres de escombros, como son los casos de Bogotá y Medellín.

Con base en lo anterior, a continuación se presentan las empresas más reconocidas en Colombia (específicamente en la ciudad de Bogotá y sus alrededores), dedicadas al tratamiento y aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición:

- ✓ GRECO COLOMBIA S.A.S. (Granulados reciclados de Colombia).
- ✓ CICLOMAT S.A.
- ✓ RECICLADOS INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.

Cada una de las empresas mencionadas ofrecen los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de los RCD.

Tabla 63.

Resumen de productos que ofrece la empresa GRECO S.A.S.

GRECO COLOMBIA S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Filtros (arena clasificada)	Construcción de filtros de drenaje, camas de tuberías y mejoramiento de vías terciarias	0-10	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Gravas y arenas trituradas	Elaboración de concreto (sin especificar si es estructural o no estructural)	0-5 arenas 5-25 gravas 5-40 gravas	
Material de relleno	Base para instalar estructuras de pavimento (compactado)	25-40	
Base granular	Conforma la estructura del pavimento (entre la subbase y la capa asfáltica)	25-40	
Subbase granular	Conforma la estructura del pavimento (entre la base y la subrasante)	0-25 0-40	

Fuente: Productos y descripción de agregados tomados de (GRECO, 2018). Elaboración propia.



Tabla 64.

Resumen de productos que ofrece la empresa CICLOMAT S.A.

CICLOMAT S.A.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Bases granulares tipo A, B, C	Conformación de vías vehiculares, ciclovías, vías peatonales y zonas duras	No especifica	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Subbases granulares tipo A, B, C			
Arena Ciclomat T5	Elaboración de mortero de piso y contrapiso		
Mixto de 1/2"	Andenes y concretos no estructurales	0-13	
Mixto de 3/4"		0-19	
Materiales prefabricados	Adoquín vehicular	200x100x80	
	Adoquín vehicular color	200x100x80	
	Adoquín peatonal	200x100x60	
	Adoquín peatonal color	200x100x60	
	Sardinell tipo A10	800x200x500	
	Bordillo tipo A80	800x200x350	
	Cañuela tipo A120	800x300x225	

Fuente: Productos y descripción de agregados tomados de (CICLOMAT, 2017). Elaboración propia.



Tabla 65.

Resumen de productos que ofrece la empresa RECICLADOS INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.

RECICLADOS INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Base granular	Materiales tipo IDU: BG-A, BG-B, BG-C, PEA 1, PEA 2, rajón	No especifica	No especifica
Subbase granular			
Arena			
Grava - gravilla			
Mixto de 3/4"			
	No especifica el uso		

*Fuente: Productos y descripción de agregados tomados de (Reciclados Industriales, 2018).
Elaboración propia.*

Según la descripción de los productos que actualmente ofrecen los proveedores (GRECO, CICLOMAT y RECICLADOS INDUSTRIALES), se puede establecer que la industria está incursionando en la producción de agregados gruesos reciclados, para su implementación en el uso de concretos no estructurales elaborados a base de residuos de concreto puro y mixto. No obstante, dichos proveedores carecen de especificaciones técnicas para la elaboración de concretos de uso estructural y no estructural reciclados, más allá de las especificaciones dadas por la norma NTC 174.

Conforme al análisis anterior, se puede concluir que la propuesta de guía de uso de los RCD para Colombia será un aporte significativo para la industria, al momento de buscar especificaciones técnicas que contribuyan a mejorar el comportamiento del concreto estructural y no estructural, usando agregados gruesos reciclados provenientes del RCD.



8 PROPUESTA DE GUÍA DE USO DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS PARA COLOMBIA

El concreto hidráulico es una mezcla homogénea compuesta de agua, cemento, agregados finos, agregados gruesos, aire libre o incorporado y en algunas ocasiones aditivos. Cada uno de los componentes tiene una proporción en volumen o peso dentro de la composición total de la mezcla.

Composición típica del concreto hidráulico

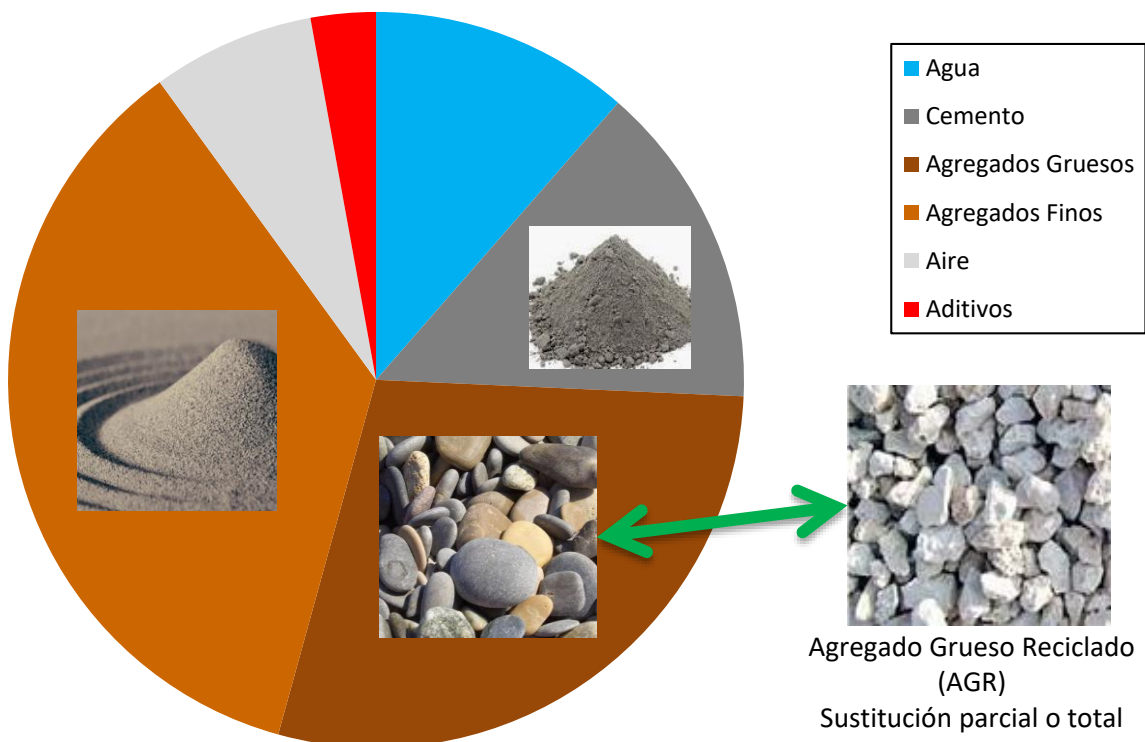


Figura 12. Composición típica del concreto hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

Conforme a la definición anterior, esta guía de uso de los RCD tiene como objeto establecer las especificaciones técnicas que deben tener los AGR provenientes de los residuos de construcción y demolición (RCD) para Colombia, en la elaboración de concretos hidráulicos de uso estructural y no estructural.



La propuesta se divide en los siguientes aspectos:

- Modo de uso de la guía.
- Definición de los materiales reciclables y no reciclables del RCD.
- Proceso de clasificación de los componentes del RCD.
- Requisitos de contenidos según la categoría del AGR.
- Requisitos según ensayos para los AGR.
- Requisitos INVIAS y NTC aplicados a la combinación de AGN con AGR.
- Usos y restricciones según la categoría del AGR.

Los criterios técnicos de esta propuesta de guía de uso de los RCD como agregados gruesos reciclados para Colombia, fueron seleccionados con base en las normativas internacionales mostradas en el capítulo "4 NORMATIVA Y CLASIFICACIÓN DE LOS RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS" y en las experiencias de los ensayos de laboratorios mostradas en el capítulo "7 ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA. Además, se tomaron algunos elementos de la guía española GEAR.

8.1 MODO DE USO DE LA GUÍA

Con el fin de facilitar la aplicabilidad de los requisitos y recomendaciones de esta guía, se presentan a continuación cinco (5) pasos que se deben seguir para utilizar los RCD en la generación de agregados gruesos reciclados (AGR) para uso en concretos hidráulicos.

Paso 1. Cuando se quieren utilizar los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de agregados gruesos reciclados (AGR) para su uso en concreto hidráulico, lo primero que se tiene que establecer es el uso que se le quiere dar al concreto. Para efectos de esta guía corresponden dos usos:

- USO ESTRUCTURAL.
- USO NO ESTRUCTURAL.



Dependiendo de la necesidad del usuario se establece la categoría del AGR que más le conviene y que puede llegar a cumplir con los requisitos de ensayos, con las restricciones de uso y ambientes dadas en esta guía.

- Para usos estructurales y no estructurales exigentes y con exposición a ambientes agresivos, se recomienda clasificar el RCD en la categoría COL.
- Para usos estructurales y no estructurales menos exigentes y con ambientes moderados, se recomienda clasificar el RCD en la categoría COL MIX.
- Para usos exclusivamente no estructurales con ambientes de exposición leves, se recomienda clasificar el RCD en la categoría COL LOW.

Paso 2. Una vez seleccionada la categoría, se procede a separar y limpiar los componentes reciclables y no reciclables del RCD como se describen en la Tabla 66 y Tabla 67.

Se recomienda realizar los procesos de clasificación y limpieza de los componentes reciclables y no reciclables de los RCD, siguiendo los procedimientos descritos en el capítulo 8.3, sin embargo, se permite que el usuario de esta guía utilice cualquier medio a su disposición para realizar la clasificación, siempre y cuando se realice como mínimo un proceso de separación y limpieza de los componentes de la siguiente manera:

- Deben eliminarse las partículas de tamaño fino (menores al tamiz No.4 – 4.76 mm) y las partículas de tamaño grande (mayores al tamiz de 1½’’).
- Los materiales reciclables (CON, MAR, ASF) deben quedar libres de impurezas y agentes contaminantes.

Paso 3. Una vez el material esté clasificado y libre de impurezas y contaminantes, se procede a verificar los contenidos mínimos y máximos tanto de los componentes reciclables como de los no reciclables para la categoría seleccionada (Ver Tabla 69).

- Si el RCD clasificado **CUMPLE** con los requisitos de contenidos de la categoría seleccionada, entonces se procede al paso 4.



- Si el RCD clasificado **NO CUMPLE** con los requisitos de contenidos de la categoría seleccionada, se procede a rechazar el material.

Paso 4. El material que cumple con los contenidos mínimos y máximos exigidos para la categoría seleccionada pasa a la etapa de verificación de la calidad por medio de ensayos.

En esta etapa existen dos opciones:

- *Opción No.1:* El concreto hidráulico a fabricar contiene únicamente agregados gruesos reciclados AGR. (Ver requisitos capítulo 8.5).
- *Opción No.2:* El concreto hidráulico a fabricar contiene una combinación entre agregados gruesos naturales AGN y reciclados AGR. (Ver requisitos capítulo 8.6).

Cuando se opte por la *opción No.1*, el agregado grueso reciclado (AGR) debe cumplir con los requisitos dados en el capítulo 8.5 “REQUISITOS SEGÚN ENSAYOS PARA LOS AGR” y resumidos en la Tabla 71.

Cuando se opte por la *opción No.2*, la combinación entre el agregado grueso de origen natural (AGN) y el reciclado (AGR) debe cumplir con los requisitos dados en el capítulo 8.6 “REQUISITOS INVIAS Y NTC APLICADOS A LA COMBINACIÓN DE AGN CON AGR” .

Al ejecutar los ensayos de aceptación del material reciclado o combinado, existen dos posibilidades:

- El material **CUMPLE** con los requisitos mínimos según ensayos y se prosigue al paso 4.
- El material **NO CUMPLE** con los requisitos mínimos según ensayos y por lo tanto no puede ser utilizado.

Paso 5. Una vez que el material reciclado o combinado cumpla con los requisitos de composición de la categoría asignada y con los requisitos de los ensayos, se procede a



verificar el tipo de exposición al cual se puede someter el concreto tal como se describe en el capítulo 8.7.2.

Existen dos posibilidades:

- **CUMPLE:** El material reciclado o combinado cumple con los requisitos de exposición del concreto y se puede utilizar en la fabricación de concreto hidráulico.
- **NO CUMPLE:** El material reciclado o combinado no cumple con los requisitos de exposición del concreto y debe mejorarse.

El material reciclado o combinado que no cumpla con los requisitos de exposición debe mejorarse aplicando alguno de los siguientes métodos:

- Aumentar la resistencia a la compresión del concreto ($F'c$).
- Sustituir un menor porcentaje de AGR en la fabricación del concreto.
- Utilizar una menor relación agua/ cemento en la fabricación del concreto.
- Aplicar los métodos de protección dados en la norma NTC 5551 y comprobar por medios experimentales que no se tienen efectos adversos sobre la durabilidad, resistencia y calidad del concreto puesto en obra.

Si después de aplicar los métodos para mejorar el comportamiento del material reciclado o combinado este aún no cumple con los requisitos de exposición, se debe rechazar el material.

NOTA: Es importante tener en cuenta todas las recomendaciones de almacenaje del AGR dadas en el capítulo 8.7.3, y todas las recomendaciones adicionales dadas en el capítulo 8.7.4 para lograr obtener un concreto hidráulico de adecuada manejabilidad, resistencia, durabilidad y calidad.

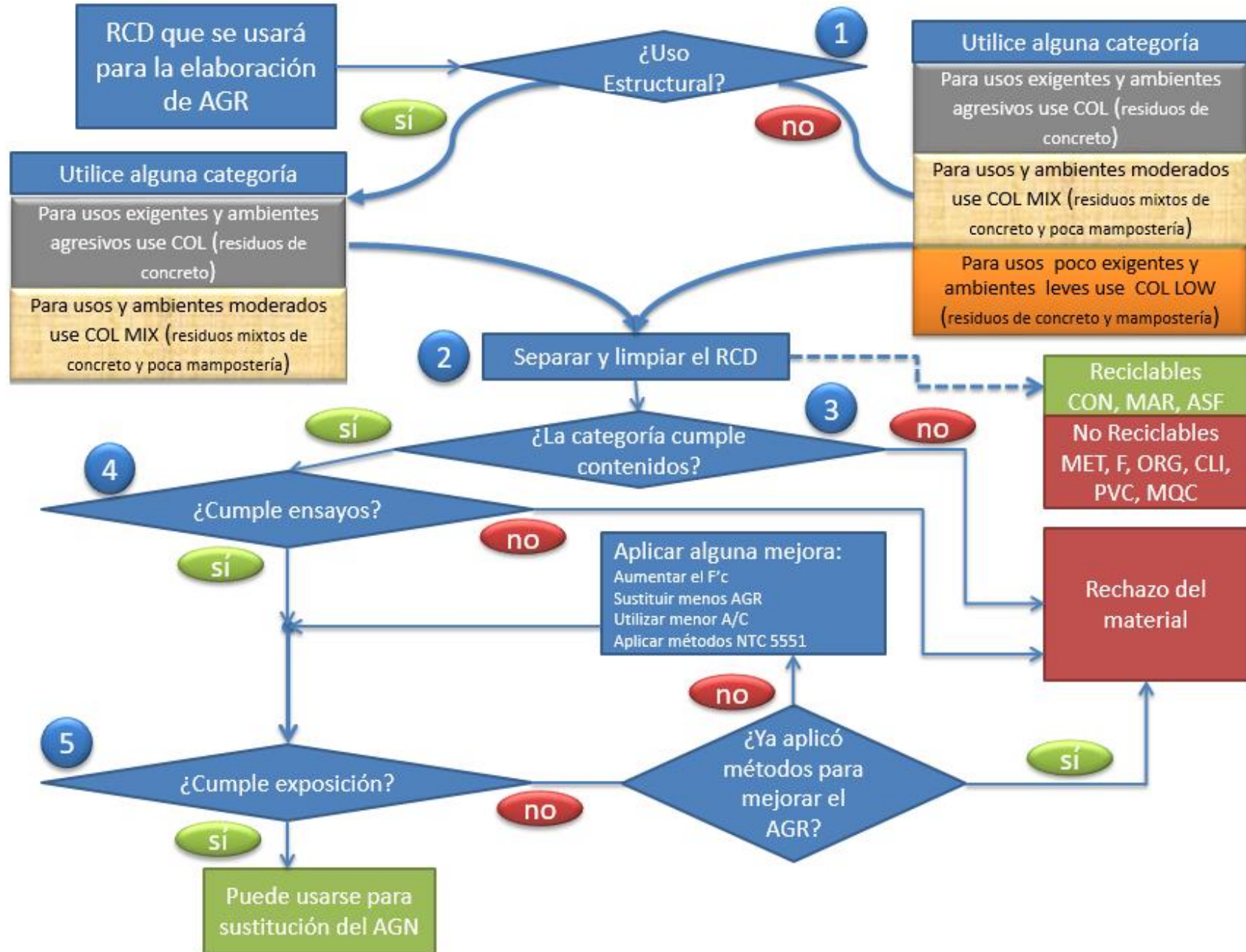


Figura 13. Esquema general de uso de la guía para Colombia.

Fuente: Elaboración propia.



8.2 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES RECICLABLES Y NO RECICLABLES DEL RCD

Los materiales **RECICLABLES** que son constituyentes de los agregados se agrupan así:

Tabla 66.

Lista de materiales RECICLABLES según la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia.

ID material reciclable	Descripción de sus componentes
CON	<ul style="list-style-type: none"> - Residuos de concreto - Agregados ligados y no ligados - Residuos de mortero - Piedras - Bloques de concreto
MAR	<ul style="list-style-type: none"> - Residuos de mampostería - Residuos de material cerámico - Ladrillos de arcilla
ASF	<ul style="list-style-type: none"> - Residuos de concreto asfáltico - Residuos de material bituminoso

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales **NO RECICLABLES**, para fines de esta guía, se agrupan así:

Tabla 67.

Lista de materiales NO RECICLABLES según la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia.

ID material NO reciclable	Descripción de sus componentes
MET	<p>Materiales metálicos magnéticos y no magnéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acero, hierro, metal galvanizado, níquel. - Aluminio, latón, cobre, zinc, plomo, titanio, (se incluye el mármol por su gran densidad).
F	<p>Partículas de tamaño fino:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Partículas que pasan el tamiz de 75 µm (No.200). - Terrones de arcilla o partículas deleznable.



ORG	Residuos de materia orgánica : <ul style="list-style-type: none">- Residuos vegetales o masas orgánicas.- Tierra o lodos.- Residuos de madera.- Residuos de bambú o guadua.- Bareque o adobe.
LIV	Materiales de construcción liviana tales como: <ul style="list-style-type: none">- Drywall o similares, que contengan yeso.- Residuos de cartón.- Materiales a base de fibrocemento.- Residuos de vidrio.- Productos a base de caucho.
PVC	<ul style="list-style-type: none">- Tuberías en PVC.- Plásticos.- Derivados del polipropileno.- Residuos de fibras sintéticas.
MQC	Material químicamente contaminado o expuesto a ambientes agresivos: <ul style="list-style-type: none">- Ambientes industriales (pesada, metalúrgica, química o similares)- Contacto directo con el suelo o con ambientes de extrema humedad.- Contacto directo y prolongado con lixiviados.- Contacto directo con agua de mar.- Elementos con altos contenidos de pintura o barniz.

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales no reciclables deben ser transportados o puestos a disposición de entidades o empresas que estén a cargo de su manejo y reciclaje.

Es decir que dichos materiales no reciclables no son necesariamente desechos y por el contrario, pueden servir para usos no competentes al objeto de esta guía.



8.3 PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL RCD

El proceso de clasificación de los residuos de construcción y demolición RCD se plantea esquemáticamente en la Figura 14 y se ejecuta en cinco pasos generales:

1) Admisión.

El proceso de reciclaje inicia por la etapa de admisión de la materia prima. Al ingresar a la planta de reciclaje la materia prima debe pasar por una fase de pesaje del material, posteriormente a la identificación visual y retiro inicial de contaminantes de gran tamaño, llevado a cabo por medios manuales o mecánicos. (Ver lista de materiales **NO RECICLABLES**).

Una vez retirados los materiales contaminantes de gran tamaño, se procede a definir el lugar de acopio del material, según sus características visuales (homogéneo o heterogéneo) o de origen del material.

Si el material que ingresa a la planta de reciclaje fue previamente seleccionado y visualmente contiene únicamente residuos de un solo material, entonces puede clasificarse como homogéneo.

Por el contrario, el material se considera heterogéneo si a su ingreso a la planta no fue previamente seleccionado, no se tienen datos de su origen y visualmente contiene varios tipos de materiales.



2) Clasificación por tamaños.

Al concluir la etapa de admisión de la materia prima, se continúa con la etapa de separación de partículas por medios mecánicos o manuales, según su tamaño.

Esta guía establece tres tamaños:

- **Tamaño Fino:** partículas inferiores al tamiz No.4 (4.76 mm).
- **Tamaño Normal:** se compone de partículas que están entre el tamiz No.4 (4.76 mm) y el tamiz de 1½" (38.1mm).
- **Tamaño Grande:** se compone de partículas que superan el tamiz de 1½" (38.1mm).

Las partículas finas pasan directamente al paso 5 de disposición final y son consideradas como material de rechazo.

Por su parte, las partículas de tamaño normal siguen su proceso de clasificación y limpieza expuestas en el paso 3.

Finalmente, las partículas de tamaño grande son reducidas mecánicamente y luego, continúan su proceso de clasificación y limpieza en el paso 3.

3) Separación y limpieza.

Una vez clasificadas las partículas según el tamaño definido en el paso 2, se procede a separar la materia prima en dos grupos según sus materiales constituyentes:

- Grupo 1: materiales pétreos clasificados como tipo **CON** y tipo **MAR**, y materiales bituminosos clasificados como tipo **ASF**.
- Grupo 2: materiales no pétreos clasificados como **MET, F, ORG, LIV, PVC** y **MQC**.

Existen diversos tipos de dispositivos en el mercado que permiten separar y limpiar el material para dejarlo libre de impurezas y materiales contaminantes. En la Tabla 68 se muestran algunos de los dispositivos más utilizados según la guía española GEAR.



Tabla 68.

Dispositivos de clasificación y limpieza de los RCD según la guía GEAR.

Técnica	Tipo	Material	Diferencia	Parámetro
Aquamotor	Base de agua	Materiales ligeros y pesados	Peso / Densidad	Rápido flujo de agua
Coal – spiral	Base de agua	Materiales con distintas densidades	Densidad	Rápido flujo de agua / cantidad de alimentación
Separación por color	En seco	Materiales con distintos colores	Color	Separación visual
Machacadora Foucault	En seco / Base de agua	Partículas grandes con metales no magnéticos	Tamaño de la partícula / metal no magnético	Tamaño de la partícula / corriente eléctrica
Separación por cama fluida	Base de agua	Materiales con distintas densidades	Densidad	Tamaño de partícula y densidad / suministro de agua
Grab cane	En seco	Materiales ligeros y pesados	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula
Separación manual	En seco	Materiales ligeros y pesados	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula
Humphrey spiral	Base de agua	Materiales con distintas densidades	Densidad	Densidad de la partícula / cantidad de alimentación / suministro de agua
Jigging	Base de agua	Materiales con distintas densidades	Densidad	Densidad de la partícula / rapidez y frecuencia del flujo de agua
Detector por infrarrojo	En seco	Materiales con distintas densidades	Densidad	Densidad (identificación por infrarrojo) / separación por aire
Separación magnética	En seco	Materiales con metales férricos u oxido de acero	Susceptibilidad magnética	Corriente eléctrica
Cibrado	En seco / Base de agua	Materiales con distintos tamaños	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula a ser removida
Método térmico	Base agua	-	Propiedad térmica (retracción)	Temperatura o tiempo
Tamizado por viento	Base agua	Materiales ligeros	Peso	Fuerza del viento

Fuente: Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (GERD, AIDICO, AITEMIN, & INTROMAC, 2011).

*Se recomienda el uso de dispositivos de separación magnética antes y después del proceso de trituración de la materia prima.



*Se recomienda el uso de dispositivos de limpieza que sean a base de agua o de aire/agua para obtener una mejor calidad del agregado reciclado.

4) Tamizaje y ensayos.

Con el material clasificado tanto por tamaño como por tipo de constituyente, se procede a realizar la trituración del material hasta llevarlo al tamaño requerido según la granulometría exigida para los diferentes usos. Posteriormente se tamiza y clasifica el material reciclado por tamaños comercialmente comunes.

*Se recomienda utilizar molinos de conos en el proceso de trituración ya que generan menor contenido de finos.

Con los materiales constituyentes clasificados por tamaños comercialmente comunes, se procede a realizar los diferentes tipos de ensayos dados en el capítulo 8.4 REQUISITOS DE CONTENIDOS SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR.

5) Disposición final.

El último paso del proceso de clasificación de los componentes reciclables y no reciclables se divide en dos casos:

- **CASO 1:** el material cumple con los requisitos de contenidos dados en el capítulo 8.4 y puede ser clasificado dentro de una de las categorías allí descritas para los diferentes usos que propone esta guía.
- **CASO 2:** el material NO cumple con los requisitos de contenidos para ser utilizado como constituyente de los agregados gruesos reciclados, por lo tanto se considera como material de rechazo que no es necesariamente un desecho, por el contrario, es un material que puede servir para usos no competentes al objeto de esta guía.

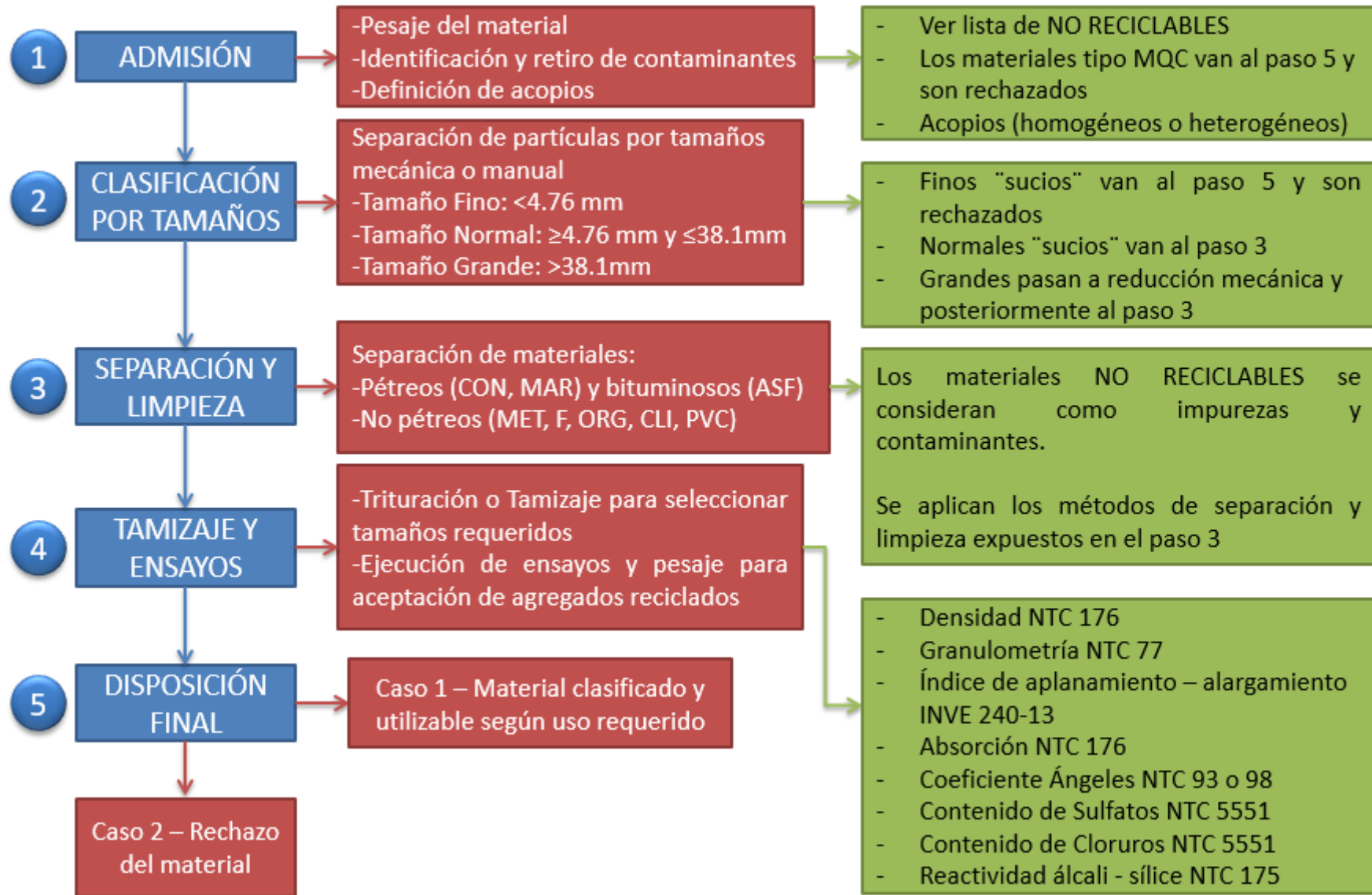


Figura 14. Esquema general del proceso de clasificación de los RCD según la propuesta de guía de uso para Colombia.

Fuente: Elaboración propia.



NOTA: se permite realizar procesos de clasificación de los componentes reciclables y no reciclables distintos al que se propone en esta guía, siempre y cuando se cumpla como mínimo con los requisitos que se exigen en el capítulo 8.4 REQUISITOS DE CONTENIDOS SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR.

8.4 REQUISITOS DE CONTENIDOS SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR

Las categorías de materiales que conforman los agregados reciclados para Colombia se definieron con base en la información recopilada en el capítulo 5.3 RESUMEN GENERAL DE CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS MATERIALES INTERNACIONALES RECICLADOS, y en el análisis del capítulo 6.1; de esta manera se presentan a continuación 3 categorías:

- COL: agregados gruesos reciclados fundamentalmente de concreto.
- COL MIX: agregados gruesos reciclados mixtos conformados por concreto y un bajo porcentaje de mampostería.
- COL LOW: agregados gruesos reciclados conformados por concreto y un porcentaje significativo de mampostería.

Las categorías deben cumplir con los siguientes requisitos de contenidos mínimos y máximos, medidos como porcentaje del peso total del material, según los componentes que conformen cada material:

Tabla 69.

Contenidos mínimos y máximos de las categorías de agregados gruesos reciclados según sus componentes – Guía de uso de los RCD para Colombia.

CONTENIDOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS MATERIALES SEGÚN SUS COMPONENTES									
CATEGORÍA	PORCENTAJE DE MATERIAL MEDIDO SEGÚN EL PESO								
	CON	MAR	ASF	MET	F	ORG	LIV	PVC	MQC
COL	≥90	<10	<2	<2	<3	<1	<1	<2	<1
COL MIX	≥70	<30	<5	<2	<4	<1	<2	<2	<1
COL LOW	>40	≤50	<5	<3	<4	<1	<2	<2	<1

Fuente: Elaboración propia.



Se permite utilizar mayores valores de **ASF** del tipo concreto asfáltico siempre y cuando se demuestre, por medios experimentales, que la categoría puede cumplir con los requisitos mínimos de ensayos, usos y restricciones dados en esta guía.

8.5 REQUISITOS SEGÚN ENSAYOS PARA LOS AGR

A continuación, se presentan los requisitos mínimos que deben cumplir los agregados gruesos reciclados para Colombia. Los requisitos fueron establecidos con base en los análisis realizados en el capítulo 6.2.

8.5.1 Granulometría

Se deben cumplir los requisitos mínimos de gradación dados en la norma NTC 174, (2000), conforme a los procedimientos de tamizaje descritos en la norma (NTC 77), o los requisitos de la tabla 500 –3 de las especificaciones técnicas del INVIAS, conforme a los procedimientos descritos en la norma INVE E-213 (2013).

Para la fabricación de concreto hidráulico elaborado a partir de agregados gruesos reciclados, se recomienda cumplir con los límites granulométricos que van desde el No.4 hasta el No.7, establecidos en la norma NTC 174 (2000), o con el límite granulométrico AG3 de la tabla 500 – 3 del INVIAS, como se muestra en la Tabla 70.



Tabla 70.

Requisitos de gradación para el agregado grueso reciclado.

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa por uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)						
		37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm
4	37,5 mm a 19 mm	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-
57 o AG3	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5

Fuente: Datos tomados de la (NTC 174, 2000) y de la tabla 500 – 3 (INVIAS, 2013). Elaboración propia.

En cualquier caso, se permite realizar el ajuste de la granulometría siguiendo los procedimientos descritos en la metodología Weymouth y Füller, método del comité 211 del ACI, método Walker o similares.

8.5.2 Densidad aparente o bulk

La densidad aparente “ ρ_s ” de los agregados gruesos reciclados debe determinarse conforme a los procedimientos descritos en la norma NTC 176 y deberá cumplir con los límites establecidos en la Tabla 71.

8.5.3 Absorción

La absorción “%A” de los agregados gruesos reciclados debe determinarse conforme a los procedimientos descritos en la norma NTC 176, y deberá cumplir con los límites establecidos en la Tabla 71.



8.5.4 Masa unitaria

La masa unitaria suelta "M.U.S" y la masa unitaria compacta "M.U.C" del agregado grueso reciclado, deben determinarse conforme a los procedimientos descritos en la (NTC 92) y deberán reportarse como valores de referencia, siguiendo lo establecido en la Tabla 71.

8.5.5 Resistencia al desgaste por abrasión e impacto (máquina de los ángeles)

La resistencia al desgaste del agregado grueso reciclado se mide por medio del coeficiente de los ángeles determinado por medio de la norma NTC 93 o NTC 98, según el tamaño del agregado grueso a ensayar. En todo caso, el agregado grueso reciclado debe cumplir con los límites establecidos en la Tabla 71.

8.5.6 Contenido de sulfatos

El contenido de sulfatos del agregado grueso reciclado se determina conforme a los procedimientos descritos en la norma INVE E-233 (2013), y debe cumplir los límites establecidos en la Tabla 71.

8.5.7 Contenido de cloruros

El contenido de cloruros del agregado grueso reciclado debe determinarse conforme a los procedimientos descritos en la norma internacional UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013 (2013), y debe cumplir los límites establecidos en la Tabla 71.

8.5.8 Reactividad álcali – agregado

Se debe determinar la reactividad potencial de agregado grueso reciclado conforme al porcentaje de expansión descrito en los procedimientos de la norma ASTM C1260-14, y se deberán cumplir los límites establecidos en la Tabla 71.



8.5.9 Resumen de los requisitos para los AGR

A continuación, se presenta la tabla de requisitos mínimos que deben cumplir los agregados gruesos reciclados, según la categoría del material.

Tabla 71.

Resumen de requisitos según ensayos para los agregados reciclados de acuerdo con su categoría.

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS SEGÚN ENSAYOS									
CATEGORÍA	Granulometría (NTC 174)	ρ_s (g/cm ³)	A (%)	M.U.S (g/cm ³)	M.U.C (g/cm ³)	Coef. Angeles	Sulfatos (%)	Cloruros (%)	ASTM C1260-14 Expansión (%)
COL	Desde curva	≥ 2.0	≤ 10	Reportar		≤ 50	< 1	< 0.50	< 0.10
COL MIX	No.4 hasta	≥ 1.8	≤ 12	Reportar		≤ 50	< 1	< 0.50	< 0.10
COL LOW	curva No.7	≥ 1.8	≤ 14	Reportar		NR	< 1	< 1	< 0.10

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales que no cumplan con alguno de los requisitos mínimos exigidos en este capítulo pueden ser utilizados para los diferentes usos establecidos en esta guía. Sin embargo, se debe demostrar por medios experimentales que al obtener concreto de uso estructural o no estructural, se cumplan la totalidad de las restricciones dadas en la guía. De otro modo, los materiales que no cumplan con los límites establecidos en la Tabla 71 se tratarán como material de rechazo.

*Se recomienda evitar el uso de agregados gruesos reciclados con formas alargadas o aplanadas (índice de aplanamiento o alargamiento $< 10\%$ obtenido según procedimientos descritos en la norma INVE 240 – 13), situación que se corrige con un buen proceso de trituración de la materia prima a reciclar.



8.5.10 Frecuencia de ensayos para el control de calidad en la producción de AGR

Las categorías de agregados gruesos reciclados (COL, COL MIX y COL LOW) deberán estar debidamente separadas y organizadas por acopios o lotes (material que proviene de una misma fuente de RCD), formados para cada categoría y para cada gradación granulométrica.

De dichos acopios o lotes deben extraerse muestras parciales, recogidas aleatoriamente al menos dos veces al día por cada tipo de categoría. Cada muestra parcial debe contener al menos 10 kg del material.

La recolección debe ejecutarse en distintos puntos del acopio, evitando efectuar la extracción del material en la base del acopio. Debe evitarse la contaminación del material recolectado para la ejecución de los ensayos.

El productor o usuario de esta guía deberá como mínimo realizar muestreos y ensayos con las frecuencias expuestas en la Tabla 72, con el fin de garantizar la calidad de los agregados gruesos reciclados.

Tabla 72.

Frecuencia de ensayos para el control de calidad en la producción de AGR.

Propiedad por determinar	Ensayo para ejecutar	Frecuencia de ensayos
Granulometría	NTC 77	1 cada 2000m ³ o a cada lote
Densidad aparente o bulk	NTC 176	1 cada 2000m ³ o a cada lote
Absorción	NTC 176	1 cada 2000m ³ o a cada lote
Masa unitaria	NTC 92	1 cada 5000m ³ o a cada lote
Resistencia al desgaste por abrasión e impacto (máquina de los ángeles)	NCT 93 o NTC 98	1 cada 2000m ³ o a cada lote
Contenido de sulfatos	INVE 233-13	1 cada 5000m ³ o a cada lote
Contenido de cloruros	UNE-EN 1744-1	1 cada 5000m ³ o a cada lote
Reactividad álcali-agregado	ASTM C1260-14	1 cada 5000m ³ o a cada lote



Fuente: Basada en la norma brasilera ABNT NBR 15116 (2004). Elaboración propia.

Las frecuencias de ensayos para esta guía se determinaron según la norma brasilera ABNT NBR 15116 (2004) y a la guía española GEAR.

Pueden utilizarse frecuencias más exigentes a las mostradas en la Tabla 72, cuando se tengan dudas sobre la calidad en la producción del AGR o cuando un valor medido este muy cercano a algún límite especificado en la Tabla 71.

NOTA: En otros países las frecuencias de ensayos se realizan con diferentes criterios. Por ejemplo, en el caso de Portugal las frecuencias de los ensayos se realizan según el tiempo, como se especifica en la guía E-471 (2009), en Holanda por tiempo y peso según la norma BRL 2506-1 (2017) y en Colombia según las especificaciones técnicas del IDU para bases y subbases granulares recicladas, las frecuencias de ensayos se realizan por metro cuadrado de obra ejecutada. Sin embargo, los criterios de la norma brasilera y española son los que más se adaptan a esta guía.

8.6 REQUISITOS INVIAS Y NTC APLICADOS A LA COMBINACIÓN DE AGN CON AGR

Al elaborar concreto hidráulico de uso estructural o no estructural desde la combinación de agregados gruesos naturales con reciclados, se debe en todo caso cumplir con todos los requisitos que exige el INVIAS en las especificaciones generales de construcción de carreteras, expuestos en el artículo 500.2.1.4 o en la norma NTC 174.

A continuación, se presenta un resumen general de los requisitos dados en las normas citadas.

8.6.1 Granulometría NTC 174 e INVIAS artículo 500.2.1.4

Para la combinación de agregados gruesos naturales con reciclados se deben cumplir los requisitos mínimos de gradación dados en la norma NTC 174 (2000), conforme a los procedimientos de tamizaje descritos en la NTC 77 o los requisitos de la tabla 500



–3 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS 2013, como se muestra en la Tabla 74.

En cualquier caso, se permite realizar el ajuste de la granulometría siguiendo los procedimientos descritos en la metodología Weymouth y Füller, método del comité 211 del ACI, Walker o similares.

8.6.2 Requisitos de la norma NTC 174

La norma técnica colombiana NTC 174 establece límites para las sustancias dañinas y las propiedades físicas que debe tener un agregado grueso, llamada “Designación de clase” establecida en función de la localización de la construcción o del tipo de elemento a construir y de la zona pluviométrica donde se encuentra ubicada la obra.

En la Tabla 74 se muestra el resumen de los límites establecidos en la norma. Sin embargo, se recomienda al usuario de la guía consultar la norma citada para tener mayor claridad.

8.6.3 Requisitos del INVIAS artículo 500.2.1.4

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en sus especificaciones generales para la construcción de carreteras, artículo 500.1.2.4 tabla 500 – 4, presenta los requisitos que debe tener el agregado grueso.

En la Tabla 74 se muestra el resumen de los requisitos del INVIAS, no obstante, se recomienda al usuario de la guía consultar la norma citada para tener mayor claridad.



Tabla 73.

Requisitos de gradación NTC 174 e INVIAS para los agregados gruesos.

ID	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa por uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5 mm a 19 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57 o AG3	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5
AG1	Fracción 1: 2½'' a 1''	-	-	-	100	90-100	35-75	0-15	-	0-5	-	-	-	-
	Fracción 2: 1½'' a No.4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
AG2	Fracción 1: 2'' a 3/4''	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
	Fracción 2: 1'' a No.4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-5	0-10	0-5	-

Fuente: Datos tomados de la norma NTC 174 (2000) y de la tabla 500 – 3 INVIAS (2013). Elaboración propia.



Tabla 74.

Requisitos de los agregados gruesos según NTC 174 e INVIAS para la combinación de agregado grueso natural y reciclado.

Ensayo	Propiedad por determinar	Porcentajes máximos permitidos en INVIAS y NTC												
		INVIAS	Designación de clase según NTC 174											
			1S	2S	3S	4S	5S	1M	2M	3M	4M	5M	1N	2N
NTC 589 o INVE E-211	Terrones de arcilla partículas deleznales	<3	<10	<5	<5	<3	<2	<10	<5	<5	<5	<3	<5	<10
NTC 130 y NTC 3773	Chert (peso específico SSS <2,40)	-	-	-	<5	<5	<3	-	-	<8	<5	<3	-	-
-	Sumatoria arcilla y Chert	-	-	-	<7	<5	<3	-	-	<10	<7	<5	-	-
NTC 78	Material que pasa el tamiz No.200	-	<1											
NTC 130	Carbón y lignitos	-	<1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<1
NTC 93 o NTC 98 o INVE E-218	Abrasión máquina de los ángeles	<40	<50											
NTC 126 o INVE E-220	Sanidad o pérdida de solidez por sulfatos de magnesio	<10 sodio <15 magnesio	-	-	<18	<18	<18	-	-	<18	<18	<18	-	-
INVE E-238	Abrasión por micro-Deval	<30	No aplican para NTC											
INVE E-224	Resistencia mecánica por 10% finos	<90 seco <75 húmedo												
INVE E-221	Partículas livianas	<0,5												
INVE E-227	Partículas fracturadas	<60												
INVE E-240	Partículas planas y alargadas	<10												
INVE E-233	Sulfatos en el material combinado	<1												

Fuente: Datos tomados de la (NTC 174, 2000) y de la tabla 500 – 3 (INVIAS, 2013). Elaboración propia.



8.6.4 Reactividad álcali-agregado

En cualquier caso, la reactividad potencial del agregado grueso, en combinación entre el reciclado y el de origen natural, debe determinarse conforme a los procedimientos descritos en la norma ASTM C1260-14 y, además, deberá cumplir con los límites de expansión del concreto allí estipulados.

- Las expansiones de los especímenes de menos del 0,10% a los 16 días se consideran inocuas, es decir que el agregado **CUMPLE**.
- Las expansiones de los especímenes de más del 0.20% a los 16 días son indicativas de efecto de expansión potencialmente perjudicial, es decir que el agregado **NO CUMPLE**.

Se recomienda al usuario de esta guía consultar la norma citada con el fin de interpretar adecuadamente los procedimientos y resultados del ensayo.

8.7 USOS Y RESTRICCIONES SEGÚN LA CATEGORÍA DEL AGR

Una vez definida la categoría del agregado grueso reciclado, y cumpliendo con los requisitos mínimos según ensayos, se procede a establecer los usos y restricciones que tienen los AGR en cada categoría.



8.7.1 Usos permitidos, porcentajes de sustitución y resistencias ($F'c$) máximas

Los límites y usos dados en la Tabla 75 se seleccionaron con base en los datos presentados en el capítulo 6.1.

Tabla 75.

Usos y porcentaje de sustitución de los AGN por AGR según categoría.

USOS Y % DE SUSTITUCIÓN SEGÚN LA CATEGORÍA				
CATEGORÍA	ELEMENTOS ESTRUCTURALES		ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES	
	$F'c$ (MPa)	%Sustitución	$F'c$ (MPa)	%Sustitución
COL	≤ 35	≤ 25	≤ 25	≤ 100
COL MIX	≤ 30	≤ 25	≤ 20	≤ 100
COL LOW	-	-	≤ 15	≤ 50

Fuente: Elaboración propia.

En todo caso, los concretos elaborados con la combinación de agregados gruesos naturales y reciclados que estén destinados a ser de uso estructural, deberán tener una resistencia $F'c$ mínima que cumpla con los requisitos del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, tal como se describe a continuación:

- ✓ Concreto en estructuras con capacidad de disipación de energía moderada (DMO) y especial (DES) $F'c \geq 21$ MPa. (Ver apartado C.21.1.4.2 del NSR-10).

Por otra parte, todos los concretos estructurales deberán tener una resistencia $F'c$ mínima como se describe a continuación:

- ✓ Todo concreto construido de acuerdo con el reglamento NSR-10 debe satisfacer $F'c \geq 17$ MPa. (Ver apartado C.5.1.1 del NSR-10).

8.7.2 Requisitos de durabilidad y clases de exposición permitidas

Todo concreto hidráulico elaborado con agregados gruesos reciclados o con la combinación de agregados gruesos naturales y reciclados, deberá cumplir los requisitos de durabilidad establecidos en el capítulo C.4 del reglamento NSR-10 o con los requisitos dados en la norma NTC 5551 (2007).



En la Tabla 76 se presenta un resumen de las clases de exposición dadas en la tabla C.4.2.1 del reglamento NSR-10 y en la Tabla 1 de la NTC 5551.

Tabla 76.

Resumen clases de exposición del reglamento NSR-10 y la norma NTC 5551.

Categoría de exposición NSR-10	Descripción de la exposición del concreto	Clase
F	Exterior expuesto a la humedad y a ciclos de congelamiento y deshielo.	F0, F1, F2, F3
S	Contacto con suelo o agua que contenga cantidades perjudiciales de iones sulfatos solubles en agua.	S0, S1, S2, S3
P	Contacto con agua y que requiere baja permeabilidad.	P0, P1
C	Condiciones que requieren protección adicional del refuerzo contra la corrosión.	C0, C1, C2
Clase de exposición según NTC 5551	Descripción de la exposición del concreto	Subclase
1	Ningún riesgo de corrosión o ataque.	1
2	Corrosión inducida por carbonatación.	2.1, 2.2, 2.3
3	Corrosión inducida por cloruros del agua de mar.	3.1, 3.2, 3.3
4	Corrosión inducida por cloruros diferentes a los que provienen del agua del mar.	4.1, 4.2, 4.3
5	Ataque por hielo y deshielo.	5
6	Ataque químico débil, medio o fuerte.	6.1, 6.2, 6.3
7	Desgaste por abrasión o desgaste superficial.	7

Fuente: Datos tomados del título A. del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) y de la norma (NTC 5551, 2007). Elaboración propia.

Se recomienda ver las normas definidas en el reglamento NSR-10 y en la norma NTC 5551, con el fin de comprender en su totalidad todas las definiciones de clases y subclases de exposición.

En la Tabla 77 se presentan las clases de exposición permitidas y no permitidas con sus correspondientes restricciones para el USO ESTRUCTURAL.



Tabla 77.

Clases de exposición permitidas según NSR-10 y NTC 5551 para AGR de uso estructural.

CLASES DE EXPOSICIÓN SEGÚN LA CATEGORÍA						
CATEGORÍA	USO ESTRUCTURAL					
	NSR-10			NTC 5551		
	A/C	F'c (MPa)	Clase	A/C	F'c (MPa)	SubClase
COL	N/A	≥17	F0, S0, P0, C0	≤0,65	N/A	1
	≤0,50	≥17	C1	≤0,60	≥24	2.1
	≤0,50	≥28	S1, P1	≤0,50	≥28	2.2, 2.3, 3.1, 4.1, 4.2, 7
	≤0,45	≥31	F1,F2,F3, S2, S3	≤0,45	≥31	5, 6.1
	No se permite en C2			No se permite en 3.2, 3.3, 4.3, 6.2, 6.3		
COL MIX	N/A	≥17	F0, S0, P0, C0	≤0,65	N/A	1
	≤0,50	≥17	C1	≤0,60	≥24	2.1
	≤0,50	≥28	S1, P1	≤0,50	≥28	2.2, 2.3, 3.1, 4.1, 4.2, 7
	No se permite en C2, F1,F2,F3, S2, S3			No se permite en 3.2, 3.3, 4.3, 5, 6.1, 6.2, 6.3		
COL LOW	No se permite esta categoría en el uso estructural					

Fuente: Datos tomados del título A. del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) y de la norma (NTC 5551, 2007). Elaboración propia.

En la Tabla 78 se presentan las clases de exposición permitidas y no permitidas con sus correspondientes restricciones para el USO NO ESTRUCTURAL.



Tabla 78.

Clases de exposición permitidas según el reglamento NSR-10 y la norma NTC 5551 para AGR de uso no estructural.

CLASES DE EXPOSICIÓN SEGÚN LA CATEGORÍA						
CATEGORÍA	USO NO ESTRUCTURAL					
	NSR-10			NTC 5551		
	A/C	F'c (MPa)	Clase	A/C	F'c (MPa)	SubClase
COL	N/A	≥17	F0, S0, P0, C0	≤0,65	N/A	1
	≤0,50	≥17	C1	≤0,60	≥24	2.1
	No se permite en C2, S1, P1, F1,F2,F3, S2, S3			No se permite en 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 5, 6.1, 6.2, 6.3, 7		
COL MIX	N/A	≥17	F0, S0, P0, C0	≤0,65	N/A	1
	≤0,50	≥17	C1	No se permite en 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 5, 6.1, 6.2, 6.3, 7		
	No se permite en C2, S1, P1, F1,F2,F3, S2, S3					
COL LOW	N/A	Ver (1)	F0, S0, P0, C0	≤0,65	N/A	1
	No se permite en C1, C2, S1, P1, F1,F2,F3, S2, S3			No se permite en 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 5, 6.1, 6.2, 6.3, 7		

(1) Al aplicar los métodos de protección del concreto presentados en la NTC 5551 se permite utilizar un $F'c \leq 15$ MPa.

Fuente: Datos tomados del título A. del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) y de la norma NTC 5551 (2007). Elaboración propia.

NOTA IMPORTANTE: Se pueden utilizar concretos para fines estructurales o no estructurales elaborados a partir de cualquiera de las categorías de agregados gruesos reciclados (COL, COL MIX y COL LOW), sin restricción de las clases de exposición siempre y cuando se apliquen los métodos de protección dados en la norma NTC5551



y se compruebe, por medios experimentales, que no se tienen efectos adversos sobre la durabilidad, resistencia y calidad del concreto puesto en obra.

8.7.3 Requisitos de almacenaje

Se deben aplicar los mismos requisitos de almacenaje tanto a agregados naturales como reciclados, teniendo especial precaución para evitar la contaminación de los AGR con sustancias perjudiciales.

Los agregados reciclados deben separarse de acuerdo con su tamaño para evitar su segregación, ya sea en acopios o en silos hechos para tal fin. En todo caso, la superficie del suelo para el acopio debe ser dura, sin contenido de material arcilloso o sustancias orgánicas y se deben evitar variaciones fuertes en el contenido de humedad de los agregados.

Cualquier material que se contamine o deteriore no debe utilizarse en la elaboración de concreto hidráulico.

8.7.4 Recomendaciones adicionales

Se recomienda emplear aditivos plastificantes o superplastificantes cuando se utilicen mezclas de concreto con altos contenidos de agregados gruesos reciclados, con el fin de mejorar la manejabilidad de las mezclas en obra.

Se debe tener especial precaución con los efectos de retracción y fluencia del concreto cuando se utilizan altos contenidos de agregados gruesos reciclados; situación que puede evitarse con un exhaustivo proceso de curado o con la aplicación de aditivos reductores de tales efectos.



Los concretos fabricados con altos contenidos de agregados gruesos reciclados son más susceptibles a tener problemas de durabilidad, debido a que presentan una alta permeabilidad con respecto a la de los concretos elaborados con agregados naturales. Esto ocurre debido a la presencia de la pasta de cemento adherida en el agregado reciclado y a las propiedades físicas de los agregados provenientes de la trituración de mampostería. Esta situación puede mejorarse de las siguientes maneras:

- Aumentar el recubrimiento de los elementos fabricados con AGR.
- Disminuir la relación agua/cemento de la mezcla.
- Impermeabilizar los elementos fabricados con AGR.

Aunque las propiedades mecánicas referidas al módulo de elasticidad y al de ruptura del concreto fabricado con AGR han sido ampliamente estudiadas en las investigaciones nacionales e internacionales, se recomienda realizar ensayos en el concreto que permitan determinar el comportamiento de dichas propiedades cuando se utilicen los AGR asignados en las categorías planteadas en esta guía.

Por último, es importante aplicar los controles de calidad en la producción de agregados gruesos reciclados, según las frecuencias de ensayos dadas en esta guía, para evitar reducir la calidad de los concretos fabricados con material reciclado.



9 HORIZONTE DE INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA CUANDO SE USA RCD PARA ELABORAR CONCRETO HIDRÁULICO

Con el fin de plantear futuros temas de investigación, que complementen la propuesta de guía de uso de los RC, para la elaboración de concreto hidráulico o para la reutilización de materiales en las obras civiles, se proponen los siguientes temas:

- **Procesos de clasificación y limpieza de los RCD:** analizando los procesos planteados en el capítulo 8.3 de la propuesta de guía de uso de los RCD, se pueden establecer futuros temas de investigación enfocados a mejorar y desarrollar técnicas o tecnologías de clasificación en obra de los materiales reciclables y no reciclables. Se pueden investigar mejores procesos de limpieza de los RCD en planta o in situ.
Dichos procesos deben ser coherentes con los desarrollos tecnológicos y con la capacidad económica de la industria colombiana, para que los proveedores puedan implementar, de una manera económica y ambientalmente sostenible, las técnicas y tecnologías investigadas.
- **Reciclaje del material de rechazo:** en el proceso de reciclaje de los RCD planteado en la propuesta de guía de uso, existen condiciones que impiden la reutilización plena de algunos agregados reciclables, como el incumplimiento de los requisitos mínimos según ensayos o de los contenidos mínimos y máximos del material para alguna de las categorías de agregados reciclables.
Dichos materiales, considerados en la guía como “material de rechazo”, pueden ser utilizados para fines diferentes a la elaboración de concretos hidráulicos de uso estructural y no estructural; por lo cual, se puede investigar el uso de los materiales que no cumplen los requisitos mínimos de la propuesta de guía de uso de los RCD, planteada en este documento.



- **Reciclaje de los agregados finos:** En todos los procesos de transporte, trituración y tamizaje de los agregados reciclados se generan residuos de tamaño fino (partículas menores tamiz No.4 – 4.76 mm), los cuales no suelen ser reutilizados en la normativa internacional y existen pocas investigaciones colombianas donde se utilicen como componente en la fabricación de concreto hidráulico. Por lo tanto, es indispensable profundizar la investigación sobre el manejo de los residuos de tamaño fino y sus posibles usos en la fabricación de materiales reciclados.
- **Materiales mixtos y su durabilidad:** Se deben realizar investigaciones enfocadas a mejorar las condiciones de durabilidad de los concretos fabricados con agregados reciclados mixtos.

En las investigaciones se deben ejecutar pruebas y ensayos con las categorías de materiales reciclados mixtos propuestos en la guía, en sus tolerancias permitidas. Esto con el fin de disminuir las restricciones de usos y ambientes de exposición de las categorías y así implementarlas en un mayor rango de ambientes de exposición.

Con los temas de investigación planteados para el futuro se busca desarrollar los conocimientos necesarios para el reciclaje de los RCD en Colombia y promover su futura aplicación en la generación de materiales para la construcción sostenible. Este concepto de construcción sostenible en Colombia es impulsado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) desde el año 2008 y se promueve en la industria por medio de la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design).

La certificación LEED es un sistema que consiste en la medición de la eficiencia energética en una construcción. La calificación de las obras depende de aspectos como el diseño, el uso eficiente del agua, la reutilización de los materiales, entre otros.



Con base en lo anterior, la reutilización de los RCD en la generación de agregados reciclados para Colombia es un tema que requiere ser investigado, aplicado e industrializado, con el fin de convertir nuestras prácticas constructivas en construcciones sostenibles y ambientalmente responsables.

10 CONCLUSIONES

Con base en la revisión detallada de las especificaciones técnicas dadas en las normativas internacionales, se puede concluir que:

- Los residuos de construcción y demolición (RCD) deben pasar por un proceso de clasificación y limpieza de sus componentes, antes de ser usados como material constituyente de los agregados reciclados.
- Los procesos de clasificación y limpieza de los RCD deben ejecutarse bajo estrictos esquemas de demolición planificada en obra, de tal manera que se genere la menor contaminación posible de los materiales aprovechables.
- La calidad del agregado reciclado depende en muchas ocasiones de la homogeneidad de la fuente de materia prima de los RCD.
- Los sobrantes y desperdicios que se crean en los procesos de demolición no planificada suelen generar RCD heterogéneo de difícil clasificación y limpieza, lo cual disminuye la calidad final del agregado reciclado.

Con la revisión de las investigaciones colombianas se puede concluir lo siguiente:

- Los agregados gruesos reciclados utilizados como materia prima para la elaboración de concreto hidráulico de las investigaciones colombianas presentan las propiedades presentadas en la Tabla 79:



Tabla 79.

Resumen de la caracterización de los agregados gruesos reciclados de las investigaciones colombianas.

RANGOS	ρS (g/cm ³)	ρN (g/cm ³)	$\rho S.S.S.$ (g/cm ³)	% A	T.M.N	T.M	M.U.S (T/m ³)	M.U.C (T/m ³)
Promedio	2.15	2.53	2.30	8.57	3/4"	3/4"	1.136	1.309
Mínimo	1.90	2.26	2.09	4.83	1/2"	1/2"	0.980	1.100
Máximo	2.60	2.64	2.64	13.40	1 1/2"	1 1/2"	1.323	1.660

(1) En las columnas T.M.N y T.M, el promedio hace referencia al tamaño de agregado más utilizado.

Fuente: investigaciones, tesis y trabajos de grado colombianos. Elaboración propia.

- Los materiales que conforman los agregados reciclados utilizados en la mayoría de las investigaciones colombianas provienen de fuentes de materia prima pura, como los residuos que se generan en la trituración de cilindros de concreto almacenados en los laboratorios, estos rara vez contienen impurezas o contaminantes, como los que habitualmente se generan en obra o en procesos de demolición. Por lo tanto, no son una fuente de materia prima real y práctica en el ámbito de la construcción y el reciclaje a gran escala.
- De los resultados de laboratorios de las tesis colombianas se puede establecer que los concretos fabricados a partir de agregados reciclados, provenientes de la trituración de concretos, que originalmente presentan bajas resistencias, suelen tener resultados desfavorables desde el punto de vista de la resistencia y la durabilidad final del concreto.
- El desconocimiento de la fuente original de la materia prima en la generación de agregados reciclados, suele ser un indicativo de posibles resultados desfavorables tanto en la resistencia como en la durabilidad del concreto reciclado.



- En las investigaciones colombianas es escaso el uso de material reciclado mixto, el cual contiene residuos de concreto, mampostería y algunos contaminantes e impurezas, y por lo tanto, no es posible parametrizar el comportamiento de los concretos reciclados fabricados a partir de las condiciones nombradas. Sin embargo, en el ámbito internacional sí existen parámetros que permiten medir la resistencia y durabilidad máximas alcanzadas por los concretos fabricados a partir de material reciclado mixto.
- En ninguna de las tesis colombianas se implementaron procesos de demolición, clasificación y limpieza de los RCD. Por el contrario, se utilizaron materiales puros y bien clasificados por lo que se obtienen resultados poco confiables desde el punto de vista industrial, ya que los procesos de demolición reales implican necesariamente contaminación de la materia prima aprovechable.

En conclusión, la propuesta de guía de uso de los RCD como agregados reciclados para Colombia establece los requisitos de contenidos mínimos y máximos de los componentes reciclables y no reciclables del RCD, para la generación de agregados reciclados. Además, especifica los tipos y cantidades de ensayos que se deben ejecutar para obtener materiales reciclables de buena calidad.

En este sentido, la guía expone los tipos de usos que se permiten para el concreto hidráulico de uso estructural y no estructural, fabricado a partir de agregados reciclados, dependiendo de la resistencia a la compresión $F'c$ y de las clases de exposición a las que se someterán los elementos fabricados con RCD reciclado.



11 BIBLIOGRAFÍA

- ABNT NBR 15116. (2004). Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil - utilización en pavimentos y preparación de concretos sin función estructural - requisitos. Brasil.
- ABNT NBR 9917. (2009). Agregados para concreto - determinación de sales, cloruros y sulfatos solubles. Brasil.
- ACI 221R-96. (2001). Guía para el uso de peso normal y agregados pesados en concreto. Estados Unidos.
- ACI 555R-01. (2002). Remoción y Reutilización de Concreto Endurecido. Estados Unidos.
- ACI E1-16. (2016). Agregados para concreto. Estados Unidos.
- Agreda, G., & Moncada, G. (2015). Viabilidad en la elaboración de prefabricados en concreto usando agregados gruesos reciclados (Tesis de Pregrado). *Universidad Católica de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Alcaldía mayor de Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra. Bogotá, Colombia.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). *Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra*. Bogotá, Colombia.
- Aldana, S. (2014). Uso de material cerámico como material para curado interno en mezclas de concreto (Tesis de Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- Arriaga, L. (2013). Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado (Tesis de Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- ASTM C1012/C1012M-18b. (s.f.). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2018.
- ASTM C1157/ C1157-17. (s.f.). Standard performance specification for hydraulic cement. *ASTM international*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2017.
- ASTM C1202-18. (s.f.). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2018.
- ASTM C1260-14. (s.f.). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2014.
- ASTM C1585-13. (s.f.). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2013.
- ASTM C295-08. (s.f.). Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2008.



- ASTM C595/C595M-18. (s.f.). Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2018.
- ASTM C642-13. (s.f.). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *ASTM International*. West Conshohocken, Estados Unidos, 2013.
- Beltran, G. (2014). Comportamiento mecánico de concreto con agregado reciclado tratado con lechadas pobres (Trabajo de grado Maestría). *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia.
- Benavides, R. (2014). Concreto de alto desempeño (Tesis de Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- Bobadilla, N. (2012). Estado del arte del aprovechamiento del concreto reciclado (Tesis de Pregrado). *Universidad de los Andes*. Bogotá, Colombia.
- Bojacá, N. (2013). Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado (Trabajo de Grado Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- Brito, J., & Saikia, N. (2013). Agregado reciclado en concreto: uso de residuos industriales, de construcción y demolición. *Springer-Verlag*.
- BRL 2506-1. (2017). Guía de evaluación para reciclar granulados. Holanda.
- BS 1881 Part 208. (s.f.). Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete. *BRITISH STANDARD*.
- BS 8500-1:2015+A2:2019. (2019). Concreto - Norma británica complementaria a BS EN 206 Parte 1. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- BS 8500-2:2015+A2:2019. (2019). Concreto - Norma británica complementaria a BS EN 206 Parte 2. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- BS EN 12620. (2002). Agregados para concreto. *European Standard*. Reino Unido.
- BS EN 13043:2013. (2013). Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- BS EN 13242:2013. (2013). Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- Bugallo, L. (2005). *Wikimedia*. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mineral_Granate_GDFL047.jpg
- Castaño, J. (2009). Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados - Influencia del contenido de áridos reciclados en las deformaciones diferidas del hormigón estructural (Tesis de Maestría). *Universidad Politécnica de Valencia*. Valencia, España.
- Cement Concrete & Aggregates. (2008). Uso de agregados reciclados en la construcción. Australia.
- Chávez, A., Guarín, N., & Cortes, M. (2013). Determinación de propiedades físico-químicas de los agregados en Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol. 12(No.22), pp 45-57.
- CICLOMAT. (2017). *Venta de Materiales ECO-Granulares y Prefabricados*. Recuperado el 10 de Mayo de 2019, de <http://www.cicloamat.com/venta-de-materiales/>
- COAMBIENTE S.A. (2009). Gestión Integral de escombros – Anteproyecto para la gestión integral de los RC&D en el distrito Capital. Bogotá, Colombia.



- Collazos, D. (2014). Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras (Tesis de Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- Construction Standard CS3. (2013). Agregados para concreto. Hong Kong.
- COPRO PTV 406. (2018). Requisitos técnicos para granulados reciclados. Bélgica.
- Cruz, M., & Gómez, O. (2013). Influencia del material reciclado de mampostería en el comportamiento del concreto reciclado (Trabajo de grado Mestría). *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia.
- CSIRO Construcción de Edificios e Ingeniería. (2002). Desarrollo de especificaciones de guías para agregados reciclados en construcciones de concreto. Australia.
- CSIRO HB-155. (2002). Guía de hormigón reciclado y materiales de albañilería. Australia.
- DIN 4226-102:2017-08. (2017). Agregados reciclados para hormigón según DIN EN 12620 - Parte 102: Ensayos de tipo y control de producción en fábrica. *Comité de Normas de Construcción DIN*. Alemania.
- Dreamstime. (2016). *Paso de mezcla concreto de la arena, del cemento y del agua por la construcción*. Recuperado el 20 de Abril de 2018, de <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-paso-de-mezcla-concreto-de-la-arena-del-cemento-y-del-agua-por-la-construccion-y-del-agua-por-la-construccion-w-image85813183>
- DS EN12620+A1:2008. (2008). Agregados para concreto. *Dansk Standard*. Dinamarca.
- E-471. (2009). Guía para la utilización de agregados reciclados gruesos en hormigones de ligantes hidráulicos. *Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil*. Portugal.
- E-472. (2009). Guía para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en central. *Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil*. Portugal.
- E-473. (2009). Guía para la utilización de agregados reciclados en capas no ligadas de pavimentos. *Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil*. Portugal.
- E-474. (2009). Guía para la utilización de materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en terraplenes y capas de lecho de infraestructuras de transporte. *Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil*. Portugal.
- EHE-08. (2008). Anejo 15 Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. España.
- EHE-08. (2008). Anejo 18 Hormigones de uso no estructural. España.
- EHE-08. (2008). Instrucción de hormigón estructural - Propiedades tecnológicas de los materiales. España.
- Escandon, J. (2011). Diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de Bogotá (Tesis de Pregrado). *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia.
- Ferreira, J. (2009). Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto (Tesis de Pregrado). *Universidad Pontificia Bolivariana*. Bucaramanga, Colombia.



- García Ubaque, C. A. (2017). Modelos implementados en el manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de residuos de construcción y demolición en latinoamérica (Monografía). *Universidad Distrital Fransisco José de Caldas*. Bogotá, Colombia.
- Garzón, W. (2013). Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado (Tesis de Maestría). *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- GB/T 25176. (2011). Recycled fine aggregate for concrete and mortar. *Academia China de Investigación para la Construcción*. China.
- GB/T 25177. (2011). Recycled coarse aggregate for concrete. *Academia China de Investigación para la Construcción*. China.
- Gerardo, A., & Rivera, L. (2016). *Concreto Simple*. Popayan, Colombia: Universidad del Cauca.
- GERD, AIDICO, AITEMIN, & INTROMAC. (2011). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). España.
- Gómez, J., & Bedoya, C. (2008). Concreto reciclado como una opción técnica, económica y ambiental para la construcción en Colombia. *IV Seminario Internacional de la Sostenibilidad*.
- Goncalves, P., & Brito, J. (2008). Utilización de agregados reciclados de hormigón, análisis comentado de la reglamentación existente. *Instituto Superior Técnico and Universidad Técnica de Lisboa*. Portugal.
- Gonzalez de la Cotera, M. (1991). Exposición en el ciclo. *Capitulo Peruano sobre corrosión de estructuras en concreto*. Perú.
- GRECO. (2018). *Granulados Reciclados de Colombia GRECO*. Recuperado el 10 de Mayo de 2019, de Productos Reciclados que cumplen especificaciones técnicas: <https://www.recicladosgreco.com/productos>
- Gutiérrez, P. A. (2008). *Tipos y propiedades de áridos reciclados*. España: CEDEX.
- Guzmán, D. S. (1993). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Bhandar editores Ltda.
- Hincapié, A., & Aguja, E. (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista Universidad EAFIT, Vol.39(No.132)*, pp 76-89.
- IDU - Pontificia Universidad Javeriana - Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2018). Actualización de las especificaciones técnicas generales IDU ET - 2011, a partir de los resultados y análisis de los ensayos de campo y laboratorio. Bogotá, Colombia.
- Instrucción Técnica 70085. (2015). Uso de materiales de construcción minerales secundarios en la construcción de refugios. *Departamento Federal de Defensa, Protección Civil y Deportes DDPS*. Suiza.
- INVE E-211. (2013). Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-213. (2013). Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-218. (2013). Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.



- INVE E-220. (2013). Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-221. (2013). Cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-224. (2013). Determinación del valor del 10% de finos. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-227. (2013). Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-233. (2013). Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-238. (2013). Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato MICRO-DEVAL. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVE E-240. (2013). Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras. *Instituto Nacional de INVIAS*. Colombia.
- INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. *Capítulo 5 - Pavimentos de Concreto*. Bogotá: Ministerio de Transporte.
- IPWEA (NSW) Roads & Transport Directorate. (2010). Especificación para el suministro de material reciclado para pavimentos, movimientos de tierras y drenaje. Australia.
- JIS A 5021. (2018). Agregado reciclado para hormigón clase H. *Japanese Industrial Standard / Japanese Standards Association*. Japón.
- JIS A 5022. (2012). Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados clase M. *Japanese Industrial Standard / Japanese Standards Association*. Japón.
- JIS A 5023. (2012). Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados Clase L. *Japanese Industrial Standard / Japanese Standards Association*. Japón.
- Jované, M. (2009). Comparación de permeabilidad en el concreto mediante ensayo de sortividad y permeabilidad superficial inicial (Tesis de Maestría). *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Laverde, A. (2014). Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados (Tesis de Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- León, A. (2001). Propiedades del concreto reciclado como agregado (Trabajo de grado Maestría). *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Londoño, O., Maldonado, L., & Calderón, L. (2016). *Guía para construir estados del arte*. Bogotá: International Corporation of Networks of Knowledge.
- Magalhães Gonçalves, P. C. (2007). Concreto con agregados reciclados, Análisis comentado de la legislación existente. *Instituto Superior Técnico and Universidad Técnica de Lisboa*. Lisboa, Portugal.
- Medina, V. (2015). *Geoxnet*. Obtenido de <https://post.geoxnet.com/rocas-igneas/>
- Ministerio de Infraestructura. (2008). Aprobación de las nuevas normas técnicas para la construcción. Italia.
- Monje, C., & Rodríguez, D. (2016). Carbonatación acelerada en agregados reciclados de concreto y evaluación de su desempeño en mezclas de concreto para vías (Trabajo de grado Maestría). *Universidad Santo Tomas*. Bogotá, Colombia.



- Mora, D. (2016). Propiedades mecánicas y de permabilidad de concreto fabricado con agregado reciclado (Trabajo de grado Maestría). *Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Moreno, J. (2013). *Blogger*. Obtenido de <http://jdmoreno3.blogspot.com.co/2013/10/carbonatacion-versus-ataque-por-ion.html>
- Muñoz, A. (2017). Carbonatación acelerada de agregados finos reciclados y su influencia en mezclas de mortero (Trabajo de grado Maestría). *Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito*. Bogotá, Colombia.
- NBN EN206:2013+A1:2016. (2016). Concreto - Especificación, rendimiento, producción y conformidad. *NBN Instituto Belga de normalización*. Bélgica.
- NEN 5905:2010. (2010). Suplemento holandés a NEN-EN 12620 + A1 "Agregados para concreto". *NEN, estandarización y estándares*. Holanda.
- Norma E.060. (2009). Concreto armado. *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima, Perú.
- NSR-10. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Colombia.
- NTC 121. (2014). Cemento portland, especificaciones físicas y mecánicas. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, 5 p. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 126. (s.f.). Método de Ensayo Para determinar La Solidez (Sanidad) de agregados para el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 130. (s.f.). Método de ensayo para la determinación de partículas livianas en los agregados. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 174. (2000). Especificaciones de los agregados para concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 175. (s.f.). Método químico para determinar la reactividad potencial alcalí-silíce de los agregados. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 175. (s.f.). Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 176. (s.f.). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, 12 p. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 2008. (2008). Italian Building Code. *Ministry of Infrastructure and Transport*. Italia.
- NTC 237. (2001). Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, 11 p. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 2871. (s.f.). Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios). *Instituto*



- Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 32. (s.f.). Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá: ICONTEC.
- NTC 32. (s.f.). Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 321. (s.f.). Cemento portland, especificaciones químicas. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 33. (s.f.). Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 3459. (2001). Agua para la elaboración de concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 3773. (s.f.). Guía para la inspección petrográfica de agregados para concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 396. (s.f.). Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 4025. (s.f.). Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 5551. (2007). Durabilidad de estructuras de concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, 24 pp. Bogotá: ICONTEC.
- NTC 5551. (2007). Durabilidad de estructuras de concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, 24 pp. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 589. (s.f.). Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 673. (s.f.). Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 77. (s.f.). Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 92. (s.f.). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 93. (s.f.). Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos mayores de 19 mm, utilizando la máquina de los ángeles. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTC 98. (s.f.). Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la



- máquina de los ángeles. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- NTP 400.037. (2014). Agregados, especificaciones normalizadas para agregados en concreto. *Norma Técnica Peruana INDECOPI*. Lima, Perú.
- NTP 400.053. (2014). Manejo de residuos de la actividad de la construcción, reciclaje de concreto de demolición. *Norma Técnica Peruana INDECOPI*. Lima, Perú.
- Pacheco Torgal, W.Y. Tam, V., J.A. Labrincha, Y. Ding, & J. de Brito. (2013). Manual de Residuos de Demolición y Hormigón Reciclado. *Woodhead Publishing Limited*.
- Paetanom, P. (2005). 123RF. Obtenido de https://es.123rf.com/photo_42763429_stock-photo.html
- Palacio-Leon, O., Chávez, A., & Velásquez, Y. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Revista Tecnura, Vol.21*(No.53), pp 96-106.
- PD 6682-1 Aggregates. (2013). Part 1: Aggregates for concrete – Guidance on the use of BS EN 12620. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- PD 6682-2:2009+A1:2013. (2013). Part 2: Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas – Guidance on the use of BS EN 13043. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- PD 6682-6:2009+A1:2013. (2013). Part 6: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering works and road construction – Guidance on the use of BS EN 13242. *BSI Standards Publication*. Reino Unido.
- Perea, M. (2015). Evaluación de la influencia de agregados reciclados de concreto (Trabajo de grado Maestría). *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia.
- Pérez Aguila, A. (2016). Valoración teórico – metodológica del proceso de reciclado de los residuos de construcción y demolición (Diplomado). *UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS*. Santa Clara, Cuba.
- Pérez, Á. (2012). Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto. *Revista INGENIUM, Vol.13*(No.26), pp 116-126.
- Reciclados Industriales. (2018). Recuperado el 10 de Mayo de 2019, de <http://www.recicladosindustriales.co/>
- RESIBA. (1999-2002). Recycled Aggregates for Construction and Building. Noruega.
- Safiuddin, M., Salam, M. A., Jumaat, Z., Ubagaram, J. A., & Rahman, M. M. (2013). Uso de agregado de hormigón reciclado en concreto: una revisión. *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Sanchez, I. (2016). Propiedades mecánicas y durabilidad de concretos haciendo uso de agregados reciclados en construcción de viviendas en el municipio de Ocaña Norte de Santander (Tesis de Pregrado). *Universidad Fransisco de Paula Santander Ocaña*. Ocaña, Colombia.
- Sarmiento, J., & Bonilla, J. (2016). Propuesta metodológica para la adecuada reutilización de residuos de construcción a partir de un análisis de caso (Tesis de Pregrado). *Universidad de la Salle*. Bogotá, Colombia.



- SIA 162/4 . (1995). Béton de recyclage. *Société suisse des ingénieurs et des architectes*. Suiza.
- Syda Productions. (2016). *depositphotos*. Obtenido de <https://mx.depositphotos.com/106961456/stock-photo-cracked-gray-concrete-wall-texture.html>
- The masterbuilder. (2015). Obtenido de <https://www.masterbuilder.co.in/understanding-alkali-silica-reaction-concrete/>
- Theus, P. (2005). *Wikimedia*. Obtenido de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kiesel.jpg>
- TL Gestein-StB. (2004). Prescripciones técnicas de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras y caminos. Alemania.
- TL SoB-StB. (2004). Prescripciones técnicas de suministro para mezclas de material de construcción y suelos utilizados en capas no ligadas en la construcción de carreteras y caminos. Alemania.
- UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. (2013). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. *Normalización Española*. España: UNE.
- Valdés, A. J., Morán del Pozo, J., Rodríguez Robles, D., & Nele De Belie. (2016). Residuos de la construcción y demolición (RCD) cerámicos y mixtos: una fuente de áridos gruesos técnicamente viable y medioambientalmente respetuosa para la producción de hormigón. *Univesidad de León and Ghent University*.
- Vanegas Cabrera, J., & Robles Castellanos, J. P. (2008). Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para su uso en edificaciones convencionales (Tesis de Especialización). *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia.
- W.Y. Tam, V., Soomro, M., & Jorge Evangelista, A. C. (2018). Una revisión del agregado reciclado en aplicaciones de concreto. *Western Sydney University, Shenzhen University and Federal University of Rio de Janeiro*.
- Yepes, V. (2017). *Poliblogs Universidad Politecnica de Valencia*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/fabricacion-del-hormigon/>



ANEXO A. Listado de normas y guías internacionales sobre el RCD

PAÍS	NORMA / GUÍA
Colombia	<ul style="list-style-type: none">• Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra – 2015.• Actualización de las especificaciones técnicas generales IDU ET - 2011, a partir de los resultados y análisis de los ensayos de campo y laboratorio – 2018.
España	<ul style="list-style-type: none">• Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) – 2011.• EHE-08 Instrucción de hormigón estructural – Propiedades tecnológicas de los materiales – 2008.• EHE-08 Anejo 15 Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados – 2008.• EHE-08 Anejo 18 Hormigones de uso no estructural – 2008.
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none">• BS8500-1:2015+A2:2019 Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206 (Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier)• BS8500-2:2015+A2:2019 Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206 (Part 2: Specification for constituent materials and concrete)• BS EN 13043:2013 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas.• BS EN 13242:2013 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction.• PD 6682-1 Aggregates (Part 1: Aggregates for concrete – Guidance on the use of BS EN 12620).• PD 6682-2:2009+A1:2013 (Part 2: Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas – Guidance on the use of BS EN 13043).• PD 6682-6:2009+A1:2013 (Part 6: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering works and road construction – Guidance on the use of BS EN 13242)
Portugal	<ul style="list-style-type: none">• E 471 – 2009 Guía para la utilización de agregados reciclados gruesos en hormigones de ligantes hidráulicos.



- E 472 – 2009 Guía para el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en central.
- E 473 – 2009 Guía para la utilización de agregados reciclados en capas no ligadas de pavimentos.
- E 474 – 2009 Guía para la utilización de materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en terraplenes y capas de lecho de infraestructuras de transporte.

Brasil • ABNT NBR 15116 Agregados reciclados de residuos sólidos de la construcción civil - utilización en pavimentos y preparación de concretos sin función estructural – requisitos – 2004.

Alemania • DIN 4226-102:2017-08 Agregados reciclados para hormigón según DIN EN 12620 - Parte 102: Ensayos de tipo y control de producción en fábrica.

Holanda • NEN 5905:2010 Suplemento holandés a NEN-EN 12620 + A1 Agregados para concreto.
• BRL 2506-1 Guía de evaluación para reciclar granulados – 2017.

Bélgica • COPRO PTV 406 Requisitos técnicos para granulados reciclados – 2018.
• NBN EN206:2013+A1:2016 Concreto - Especificación, rendimiento, producción y conformidad.

Australia • IPWEA (NSW) Especificación para el suministro de material reciclado para pavimentos, movimientos de tierras y drenaje – 2010.
• CSIRO Desarrollo de especificaciones de guías para agregados reciclados en construcciones de concreto – 2002.
• CSIRO HB-155 Guía de hormigón reciclado y materiales de albañilería – 2002.

Estados Unidos • ACI 221R-96 Guía para el uso de peso normal y agregados pesados en concreto – 2001.
• ACI 555R-01 Remoción y Reutilización de Concreto Endurecido – 2002.
• ACI E1-16 Agregados para concreto – 2016.

Perú • NTP 400.053 Manejo de residuos de la actividad de la construcción, reciclaje de concreto de demolición – 2014.
• Norma E.060 Concreto armado – 2009.

Italia • NTC 2008 – Italian Building Code.



Noruega • RESIBA – Recycled Aggregates for Construction and Building – 2002.

China • GB/T 25177 Recycled coarse aggregate for concrete – 2011.
• GB/T 25176 Recycled fine aggregate for concrete and mortar – 2011.

Hong Kong • Construction Standard CS3:2013 Agregados para concreto.

Dinamarca • DS EN12620+A1:2008 Agregados para concreto.

Suiza • Instrucción técnica 70085 Uso de materiales de construcción minerales secundaria en la construcción de refugios – 2015.
• SIA 162/4 Béton de recyclage – 1995.

Japón • JIS A 5021 Agregado reciclado para hormigón clase H – 2018.
• JIS A 5022 Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados clase M – 2012.
• JIS A 5023 Hormigón reciclado utilizando áridos reciclados clase L – 2012.
