

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Caracterización del agregado grueso proveniente del concreto reciclado
para ser reutilizado en nuevos concretos**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta

Daniela Ramírez Picado

Director del proyecto de graduación:

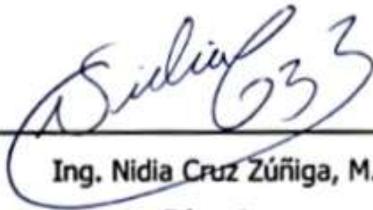
Ing. Nidia Cruz Zúñiga, MSc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

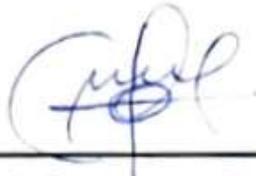
Julio, 2021

MIEMBROS DEL COMITÉ ASESOR



Ing. Nidia Cruz Zúñiga, M.Sc

Directora



Ing, Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA.

Asesor



Ing, Einer Rodriguez Rojas, MAP, MIng

Asesor



Daniela Ramirez Picado

Estudiante

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Fecha: julio, 2021

El suscrito, Daniela Ramírez Picado, cédula 5-0412-0840, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B45655**, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación **Caracterización del agregado grueso proveniente del concreto reciclado para ser reutilizado en nuevos concretos**, bajo la dirección de la Ing. Nidia Cruz Zuñiga, Msc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y por los sacrificios que conlleva el estar lejos del hogar y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron para llegar hasta el final de este arduo camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al LanammeUCR por facilitar el uso de sus instalaciones y por suministrar todos los materiales requeridos para el desarrollo de esta investigación. En especial al Laboratorio de Concretos y al personal técnico e ingenieril, por estar siempre anuente a ayudarme con las pruebas realizadas. Particularmente al Ing. Nelson Acuña y al Téc. Marcos Sandoval.

A la directora de este trabajo la Ing. Nidia Cruz quien me motivo a realizar esta investigación, a mis asesores el Ing. Luis Carlos Meseguer y el Ing. Einer Rodriguez por su disponibilidad para ayudarme y aclarar mis dudas.

A mis padres y a toda mi familia por apoyarme en toda mi carrera universitaria y motivarme a culminar esta ardua etapa.

Agradezco de forma infinita a Brayan por haber sido paciente y ayudarme en todo lo posible.

Por último, a mis amigos civiles Pablo, Pri Granados, Pri Alfaro, Javi, Jordy, Eladio, Allan y Fio por estar siempre dispuestos a ayudarme y llenar de risas momentos largos de estudio. Y a todas las personas que, aunque no mencione fueron parte de este proceso y que me recordaron que era capaz de lograrlo.

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo 1. Generalidades.....	1
1.1. Tema	1
1.2. Justificación.....	1
1.2.1. Problema específico	1
1.2.2. Importancia	2
1.2.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Delimitación del problema.....	8
1.4.1. Alcance.....	8
1.4.2. Limitaciones	8
1.5. Metodología de la investigación	9
1.5.1. Fase 1: Investigación preliminar.....	9
1.5.2. Fase 2: Preparación de materiales.....	10
1.5.3. Fase 3: Desarrollo experimental.....	10
1.5.4. Fase 4: Análisis de resultados	11
Capítulo 2. Marco teórico	14
Capítulo 3. Marco legal y normativo	18
3.1. Normativa existente en Costa Rica.....	18
3.1.1. Ley General de Salud (Ley N°5395, 1974).....	18
3.1.2. Ley Orgánica del Ambiente (Ley N°7554, 1995)	19
3.1.3. Plan de Residuos Sólidos - Costa Rica (PRESOL) (2008)	20
3.1.4. Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley N°8839, 2010).....	21
3.1.5. Reglamento para la Declaración de Residuos de Manejo Especial (Reglamento N°38272-S, 2014).....	22
3.1.6. Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Reglamento N°37567, 2015).....	23

3.1.7.	Oficialización de la Estrategia Nacional para la Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (Ministerio de Salud, 2016).	24
3.1.8.	Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos (2016)	25
3.1.9.	Reglamento de Centro de Recuperación y Residuos Valorizables (Reglamento N°41052-S, 2018)	27
3.1.10.	Plan de Acción para la Gestión Integral de Residuos (2019)	28
3.2.	Normativa internacional	30
3.2.1.	Brasil	30
3.2.2.	México	31
3.2.3.	Unión Europea	32
3.2.4.	España	33
3.3.	Normativa internacional aplicable	35
Capítulo 4. Comportamiento mecánico del concreto con agregado reciclado		38
4.1.	Agregados para reciclar	38
4.2.1.	Fuente Pared de Mampostería	38
4.2.2.	Fuente baldosas prefabricadas	40
4.2.3.	Fuente concreto colado en sitio	41
4.3.	Metodología para obtener el agregado grueso reciclado	42
4.3.3.	Fuente concreto colado en sitio	43
4.4.	Propiedades físicas y mecánicas de los agregados grueso reciclados y agregado grueso natural	46
4.4.1.	Granulometrías iniciales y granulometrías corregidas	46
4.4.2.	Gravedad específica y absorción: agregado grueso reciclado y agregado grueso natural	53
4.4.3.	Peso unitario y razón de vacíos	54
4.4.4.	Resistencia a la abrasión	55
4.5.	Propiedades físicas y mecánicas agregado fino natural	56
4.6.	Densidad del cemento	58
4.7.	Diseño de Mezcla	58
4.8.1.	Asentamiento de las mezclas de concreto	63

4.8.2. Temperatura	64
4.8.3. Relación agua/cemento	65
4.8.4. Peso unitario del concreto fresco.....	65
4.8.5. Contenido de aire	66
4.9. Resistencia a la compresión de los cilindros de prueba	67
Capítulo 5. Conclusiones	73
Capítulo 6. Recomendaciones	77
Fuentes de consulta.....	79
Apéndice	85
A. Resultados de la norma INTE C39:2018 (ASTM C39)	85

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación.....	12
Figura 2. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación (cont.).....	13
Figura 3. Esquema de patrones típicos de falla	17
Figura 4. Bloques utilizados en la pared de mampostería	39
Figura 5. Pared de baldosas	40
Figura 6. Refuerzo baldosas prefabricadas.....	41
Figura 7. Cilindros de concreto	42
Figura 8. Pared de mampostería.....	43
Figura 9. Trituración inicial pared de mampostería	43
Figura 10. Trituración inicial pared de baldosas.....	43
Figura 11. Quebrador de muelas	44
Figura 12. Tamizadora de agregados	45
Figura 13. Agregado grueso reciclado con la granulometría deseada.....	46
Figura 14. Material de pega bloques de mampostería	49
Figura 15. Curva granulométrica agregado grueso natural	50
Figura 16. Curva granulométrica corregida baldosas prefabricadas trituradas	51
Figura 17. Curva granulométrica corregida pared de mampostería triturada	52
Figura 18. Curva granulométrica corregida concreto colado en sitio triturado.....	53
Figura 19. Curva granulométrica agregado fino.....	57
Figura 20. Asentamiento en el concreto mediante el Cono de Abrams.....	63
Figura 21. Temperatura del concreto fresco.....	64
Figura 22. Determinación del peso unitario del concreto fresco	66
Figura 23 . Cámara de aire vertical	66
Figura 24 . Especímenes cilíndricos de concreto	68
Figura 25. Maquina ensayo resistencia a la compresión	68
Figura 26. Resistencias a la compresión obtenidas a 7 , 14 y 28 días	69
Figura 27. Detalle de falla tipo 3.....	72

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidades para formar la granulometría del agregado grueso reciclado	45
Cuadro 2 . Granulometría inicial pared de baldosas prefabricadas trituradas	48
Cuadro 3 . Granulometría inicial pared de mampostería triturada.....	48
Cuadro 4 . Granulometría inicial concreto colado en sitio triturado	49
Cuadro 5 . Granulometría agregado grueso natural, fuente Cerro Minas.....	50
Cuadro 6 . Granulometría corregida baldosas prefabricadas trituradas	51
Cuadro 7 . Granulometría corregida pared de mampostería triturada	52
Cuadro 8. Granulometría corregida concreto colado en sitio triturado.....	52
Cuadro 9. Densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.....	54
Cuadro 10 . Peso unitario y razón de vacíos del agregado grueso.	55
Cuadro 11 . Desgaste del agregado grueso, utilizando la máquina de Los Ángeles.	56
Cuadro 12. Granulometría agregado fino natural, fuente Río Chirripó.....	57
Cuadro 13. Gravedad específica agregado fino natural.....	58
Cuadro 14 . Densidad del cemento	58
Cuadro 15. Proporción por peso seco	59
Cuadro 16. Proporción corregida por absorción y humedad del agregado	60
Cuadro 17. Asentamiento, temperatura y relación agua/cemento del concreto en estado fresco.....	62
Cuadro 18. Peso unitario y contenido de aire del concreto en estado fresco	62
Cuadro 19. Resistencia a compresión de los especímenes a 7, 14 y 28 días.....	68
Cuadro 20. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Natural (N3 100%).	85
Cuadro 21. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B1 30%).	86
Cuadro 22. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B2 30%).	87
Cuadro 23. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B3 30%).	88
Cuadro 24. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Baldosas prefabricadas 50% agregado natural (B1 50%).	89

Cuadro 25. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Baldosas prefabricadas 50% agregado natural (B2 50%).....	90
Cuadro 26. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Baldosas prefabricadas (B1 100%).....	91
Cuadro 27. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Baldosas prefabricadas (B2 100%).....	92
Cuadro 28. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Mampostería 70% agregado natural (M1 30%).....	93
Cuadro 29. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Mampostería 70% agregado natural (M2 30%).....	94
Cuadro 30. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Mampostería 50% agregado natural (M1 50%).....	95
Cuadro 31. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Mampostería 50% agregado natural (M2 50%).....	96
Cuadro 32. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Mampostería (M1 100%).....	97
Cuadro 33. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Mampostería (M2 100%).....	98
Cuadro 34. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Concreto colado en sitio 70% agregado natural (C2 30%).....	99
Cuadro 35. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Concreto colado en sitio 70% agregado natural (C3 30%).....	100
Cuadro 36. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Concreto colado en sitio 50% agregado natural (C1 50%).....	101
Cuadro 37. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Concreto colado en sitio 50% agregado natural (C2 50%).....	102
Cuadro 38. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Concreto colado en sitio (C1 100%).....	103
Cuadro 39. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Concreto colado en sitio (C2 100%).....	104

Ramírez Picado, Daniela

Caracterización del agregado grueso proveniente del concreto reciclado para ser reutilizado en nuevos concretos

Proyecto Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José. CR.

D. Ramírez P., 2021

xii, 85, [20]h, ils. col – 59 refs.

RESUMEN

En esta investigación se estudiaron las características físicas y mecánicas del agregado grueso reciclado proveniente de tres distintas fuentes: muros de mampostería, concreto colado en sitio y baldosas prefabricadas para la elaboración de nuevos concretos.

Se trituró cada fuente de agregado reciclado y se armó una granulometría que cumpliera con los límites recomendados para la elaboración de concreto, establecidos en la norma INTE C15:2018 (ASTM C33:2018). Seguidamente, se caracterizó el material mediante la ejecución de los siguientes ensayos: análisis granulométrico, gravedad específica, densidad masiva y abrasión siguiendo las normas INTECO. Con los resultados de los ensayos se realizaron los diseños de mezcla utilizando tres combinaciones de agregados: 30% reciclado - 70% natural, 50% reciclado - 50% natural, 100% de material reciclado y el patrón con 100% agregado natural para finalmente elaborar 9 especímenes cilíndricos por mezcla para la determinación de la resistencia a compresión.

Se obtuvieron resultados muy favorables en cuanto a la resistencia a la compresión de los concretos con material reciclado contemplando siempre un diseño de mezcla que se ajustara a las características de cada agregado. Además, se logró determinar la absorción como uno de los factores más importantes de conocer al momento de elaborar el concreto. Al finalizar la investigación se concluye que el reciclaje de agregado grueso es técnicamente factible.

RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN, RECICLAJE DE AGREGADOS, CONCRETOS SOSTENIBLES.

Ing. Nidia Cruz Zuñiga, Msc.

Director de la Investigación

Escuela de Ingeniería Civil

Ramírez Picado, Daniela

Characterization of coarse aggregate from recycled concrete to be reused in new concrete.

Degree project- Civil Engineering - San José. CR.

D. Ramírez P., 2021

xii, 85, [20]h, ils. col – 59 refs.

ABSTRACT

In this study, physical and mechanical characteristics of recycled coarse aggregate from three different sources were analyzed: masonry walls, cast-in-place concrete and precast tiles for the production of new concrete.

Each source of recycled aggregate was crushed and a particle size was assembled that complied with the recommended limits for the production of concrete specified by INTE C15:2018 (ASTM C33:2018). The material was then characterized by performing the following tests: granulometric analysis, specific gravity, mass density and abrasion according to INTECO standards. Along with these tests results, concrete mix designs were elaborated employing three aggregates combinations: 30% recycled - 70% natural, 50% recycled - 50% natural, 100% recycled material and the pattern with 100% natural aggregate. Finally, 9 cylindrical specimens per mix were prepared to determine the compressive strength.

Very favorable results were obtained regarding the compressive strength of the recycled material concrete always contemplating an adequate mix design for accomplishing a minimum resistance at 28 days of 210 kg/cm² that would properly fit to each aggregate's properties. In addition, it was possible to determine the absorption as one of the most important factors to consider at the time for concrete's production. Above all, it was concluded that the recycling of coarse aggregate is technically feasible.

CONSTRUCTION WASTE, AGGREGATE RECYCLING, SUSTAINABLE CONCRETE.

Ing. Nidia Cruz Zuñiga, Msc.

Research Director

Civil Engineering

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Tema

Caracterización del agregado grueso proveniente del concreto reciclado para ser reutilizado en nuevos concretos.

1.2. Justificación

1.2.1. Problema específico

El sector construcción desempeña un papel importante en el desarrollo y crecimiento de Costa Rica, al generar la base para el desarrollo de múltiples sectores de la economía. Para el año 2020 y 2021, el Banco Central proyectó que cerca del 3.8% de la producción total del país corresponde al sector construcción, con un ligero decrecimiento con respecto a los años anteriores (Cámara Costarricense de la Construcción, 2020). Según investigaciones realizadas en el Instituto Nacional de Estadística y Censo, en el año 2020 se realizaron 2 269 ampliaciones, 3 244 reparaciones y 25 162 construcciones con un área total de 3 038 090 m² (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2020)

A nivel mundial, se espera que para el año 2030 el sector construcción aumente en un 85% su producción mundial para alcanzar los \$15 500 millones (Pedrosa, 2016).

La industria de la construcción está asociada a un elevado consumo de materias primas, destacando los agregados gruesos y finos, los cuales junto con la pasta cementicia constituyen el concreto. En Costa Rica el concreto es uno de los materiales más importantes para la construcción, ya que se utiliza para cimientos, piso, paredes, carreteras, puentes, entre otros (Abarca y Leandro, 2016).

Sumado al alto consumo de materias primas, el sector construcción genera importantes cantidades de residuos sólidos durante las etapas de construcción y demolición. El mayor volumen de residuos corresponde a escombros, los cuales tienen como destino final autorizado los rellenos sanitarios. Estos sitios no son diseñados para disponer de este tipo de residuos no tradicionales, lo que significa un uso ineficiente de la inversión en saneamiento. Peor aún existen residuos de construcción que son abandonados en espacios públicos, carreteras, lotes baldíos, ríos, entre otros (Castro, 2019).

En la actualidad el país se encuentra en un momento de cambio, las construcciones de uno y dos niveles están dando paso a torres de apartamentos. Además, la ciudad está envejeciendo, en los próximos años una cantidad importante de edificaciones estarán cumpliendo su vida útil y su demolición será una de las opciones más viables.

Es posible desmantelar un edificio de forma tal que materiales como la madera, el acero, el vidrio entre otros sean reutilizados en nuevas construcciones, sin embargo, para el caso de los escombros el país no cuenta con los estudios necesarios que permitan identificar posibles formas de reutilizar dichos materiales. Como sí es el caso de otros países como Bélgica, Holanda y Luxemburgo, en los cuales no solo se han realizado estudios para utilizar los escombros como material granular en nuevos concretos, sino que también están siendo utilizados. Estos países producen alrededor de 459 ton/km², 626 ton/km² y 1044 ton/km² toneladas de concreto reciclado por kilómetro cuadrado de territorio respectivamente, disminuyendo la cantidad de desechos, la cantidad de material granular natural utilizado y por ende el impacto ambiental ocasionado (Alonso et al., 2015).

1.2.2. Importancia

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el sector construcción a nivel mundial y Costa Rica no es la excepción. Este se utiliza ya sea colado en sitio o en elementos prefabricados como baldosas y bloques de mampostería. Así mismos estudios actuales demuestran que el mayor volumen de residuos producidos durante la etapa de construcción corresponde al concreto (Castro, 2019). Si a estos se le suman los residuos de concreto generados al demoler una estructura, da como resultado grandes cantidades de residuos que en la actualidad no son tratados y cuya su disposición final se ve limitada a un relleno sanitario u otro sitio, donde únicamente son apilados.

En Costa Rica no se han realizado pruebas suficientes que determinen las características de los agregados reciclados provenientes de concreto colado en sitio, elementos prefabricados o de muros de mampostería. Tampoco se tiene información técnica oficial de su comportamiento al ser utilizados como agregado en el concreto. Se cuenta únicamente con la caracterización de agregado que resulta de la trituración de bloques de mampostería (Poveda, 2008).

Con la presente investigación se aportan los resultados de los ensayos realizados al material granular que se genera de triturar escombros provenientes de paredes de mampostería, elementos de concreto colado en sitio y elementos prefabricados.

Es de suma importancia generar información de las características del agregado reciclado, ya que el país es conocido a nivel mundial por su interés en cuidar el ambiente, sin embargo, en cuanto al manejo de residuos de la construcción y en específico de escombros el país no cuenta con una estrategia para tratar estos residuos de forma tal que se minimice el impacto en el ambiente.

Según Rocha 2011, el consumo energético de reciclar concreto es igual o mayor al de extraer materia prima, pero el impacto ambiental que se genera al extraer agregado natural justifica dicho consumo energético. Además, el reciclaje de concreto en el proyecto minimizaría el impacto ambiental provocado al transportar el agregado al sitio de la construcción. Por otra parte, el manejo inadecuado que actualmente se da a los escombros es uno de los motivos por los cuales algunos proyectos no obtienen la certificación de edificios sostenibles, lo que aleja inversiones importantes para la economía del país.

1.2.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A nivel nacional los escombros tienen como disposición final los rellenos sanitarios y la legislación nacional lo aprueba, ya que no cuenta con una estrategia para hacer frente a esta problemática (Cruz, 2015).

Es importante el desarrollo de políticas que promuevan la reutilización del escombros como agregado y el convencimiento del sector construcción para la utilización de este material. Cruz (2015) aborda este tema mediante un análisis y propuesta de gestión integral de residuos de construcción y demolición específicamente para el cantón de Alajuela. Esta investigación se enfoca en la prefactibilidad de crear una planta de tratamiento de escombros para su reutilización como agregado y de la maquinaria a utilizar para este proceso. La principal conclusión de esta investigación es que la rentabilidad de la planta depende de la demanda de escombros a procesar la cual no se alcanza con los residuos proyectados en el cantón, pero que podría alcanzarse con los residuos de otros cantones cercanos. Al mismo tiempo pone en contexto la problemática existente y la necesidad de concretar una ley que establezca la gestión

integral de los residuos de construcción, de esta manera la demanda mínima para una planta de tratamiento de escombros en el cantón de Alajuela podría ser satisfecha.

En varias investigaciones se evidencia la carencia de legislación nacional en la gestión de desechos sólidos de la construcción y el bajo costo que tiene deshacerse de los escombros como se hace actualmente (Cruz, 2015; Poveda 2008). Por ello es que se busca tener más información experimental que le permita a las autoridades del país normar mejor los residuos del sector.

La presente investigación busca dar insumos para la toma de decisiones respecto a la reutilización de concretos como agregados en nuevas mezclas, lo cual había sido estudiado de alguna forma por Poveda (2008), quien evaluaba la prefactibilidad técnica y financiera de reutilizar los residuos de construcción específicamente los bloques de mampostería como agregado para concreto.

Por otra parte, en cuanto a las características del agregado reciclado Poveda (2008) lo describe como agregado natural recubierto con mortero adherido con una textura más irregular y angulosa que el agregado natural. Además, presentaba menor densidad, mayor absorción y menor resistencia que los agregados naturales.

En cuanto al comportamiento del agregado reciclado en el concreto Poveda (2008) determinó una diferencia máxima entre la resistencia promedio a compresión de la mezcla con agregado reciclado y la mezcla con agregado natural del 26%, esto para un esfuerzo promedio a 28 días de 199 kg/cm², la cual corresponde a la sustitución del 50%.

A nivel internacional el reciclaje de concreto ha sido estudiado de forma más amplia. Alonso et al (2015) hace una revisión acerca del reciclaje de concreto en el mundo, donde menciona que el reciclaje del concreto data desde la década de los 40 producto de los escombros generados en la Segunda Guerra Mundial. El primer informe de concreto reciclado fue realizado por Gluzhge en el año 1946, en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

Según la investigación de Alonso et al (2015) Europa encabeza la lista de toneladas de concreto reciclado con países como Holanda, Bélgica y Dinamarca que reciclan alrededor del 90% de los escombros, debido a la escases de agregado natural, le siguen Finlandia, Austria y Reino Unido, con porcentajes de reciclaje entre 40% y 70%, en estos países el elevado costo impuesto sobre el vertido de escombros son el principal motivo de su reutilización. A nivel de América, países

como Estados Unidos, Colombia, México y Brasil han optado por la utilización de agregado reciclado, pero a una menor escala (Alonso et al, 2015).

A diferencia de Costa Rica, donde los estudios realizados en los agregados reciclados son escasos, en países como Brasil ya se investiga la utilización de aditivos minerales que permitan un remplazo del 100 % del agregado natural por agregado grueso reciclado. Entre las adiciones utilizadas en dicha investigación se encuentran humo de sílice, cenizas volantes y escoria granulada de alto horno, las cuales son importantes de abordar en estudios posteriores. (Lacerda, 2019).

Hallack, Gutiérrez y Mungaray (2015) elaboraron un diseño de mezcla con 30% de agregado grueso reciclado y 70% de agregado grueso natural que compararon con un diseño de mezcla patrón con 100% agregado grueso natural. De este estudio se pudo determinar que la incorporación de agregado reciclado con características específicas permite obtener concretos con resistencias competitivas con las obtenidas de mezclas con agregado natural, a un menor costo económico y ambiental. Cabe resaltar que este estudio se realizó en México, donde el costo de extraer agregado natural es mayor que en Costa Rica. Ambos diseños de mezcla presentaron tamaños de partículas bien graduadas, pero densidades y porcentajes de absorción distintos. La mezcla con agregado de reciclaje presentó una resistencia apropiada según los estándares mexicanos para trabajos como aceras, bordillos y muros de contención, por el contrario, no resulta apropiada para losas de pavimento de concreto hidráulico.

Di Maio y Zega (2007) evaluaron el efecto del agregado grueso reciclado de fuentes desconocidas sobre las propiedades del concreto en estado fresco y estado endurecido, mediante un remplazo del 75% del agregado grueso natural por agregado reciclado. Al igual que otros autores ya mencionados, obtuvieron resistencias similares al del concreto convencional. Al analizar las propiedades de los agregados reciclados determinaron que la presencia de mortero altera la capacidad de absorción y de desgaste del agregado reciclado, sin embargo, estas características no se vieron reflejadas en las diferentes características del concreto elaborado con ellos.

Caycho y Espinoza (2019) en su investigación *Mezcla de concreto con agregado grueso reciclado usando cemento Portland tipo HS para cimentaciones*, evaluaron el comportamiento del concreto diseñado para soportar una resistencia de 280 kg/cm², resistencia necesaria para la elaboración de cimentaciones. En esta investigación obtuvieron valores de resistencia a la

compresión del concreto mayores al de diseño, con una tendencia a disminuir con forme se aumenta el porcentaje de agregado reciclado, este mismo comportamiento se replicó en la resistencia a tracción y flexión. Además, resaltan que la resistencia del concreto no se ve afectada considerablemente al sustituir solo el 25% del agregado natural por agregado reciclado.

Adicionalmente, se cuenta con las normas del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) encargado de normalizar las normas de la American Society for Testing and Material (ASTM). La ASTM es un ente internacional encargado de desarrollar y publicar acuerdos de normas técnicas aplicables a materiales de construcción. Para este trabajo aplican las siguientes normas:

- INTE C62:2020 (ASTM C702:2018) " Norma para reducir muestras de agregado a tamaño de ensayo ",
- INTE C46:2020 (ASTM C136:2019) "Método de ensayo para el análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso",
- INTE C49:2018 (ASTM C117:2017) " Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm (Nº 200) en agregados minerales. Método de ensayo ",
- INTE C15:2018 (ASTM C33:2018) " Agregados para Concreto. Requisitos".
- INTE C68:2016 (ASTM C127:2015) "Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso",
- INTE C58:2013 (ASTM C29:2009) "Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado",
- INTE C64:2017 (ASTM C131:2014) "Método de ensayo para la determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso pequeño, utilizando la máquina de Los Ángeles",
- INTE C49:2018 (ASTM C136:2017) " Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm (Nº 200) en agregados minerales. Método de ensayo ",
- INTE C141:2018 (ASTM C188:2017) "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement",
- INTE C71:2020 (ASTMC566:2019) " Determinación del contenido total de humedad evaporable en agregados mediante secado. Método de ensayo",
- INTE C18:2016 (ASTM C192) "Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio",

- INTE C43:2018 (ASTM C1064:2017) " Medición de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado ",
- INTE C41:2017 (ASTM C143) "Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico "
- INTE C72:2018 (ASTM C138) " Método para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico ",
- INTE C42:2017 (ASTM C231M " Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco por el método de presión ".
- INTE C16:2017 (ASTM C617) " Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada" ,
- INTE C39:2018 (ASTM C39) "Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto ".

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar el agregado grueso proveniente de concreto reciclado de tres diferentes fuentes: muros de mampostería, concreto colado en sitio y elementos prefabricadas, para ser reutilizado en nuevos concretos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las diferentes características físicas de los agregados gruesos provenientes de concreto reciclado mediante una muestra puntual de diferentes fuentes de escombros: muros de mampostería, concreto colado en sitio y elementos prefabricados tipo baldosas.
- Comparar las características físicas de los agregados gruesos reciclados provenientes de las fuentes antes mencionadas.
- Evaluar la resistencia de especímenes cilíndricos de concreto utilizando un 30%, 50% y 100 % de agregado grueso reciclado.

1.4. Delimitación del problema

1.4.1. Alcance

En el presente estudio solo se trataron los agregados gruesos reciclados provenientes de demoliciones de elementos de mampostería, concreto colado en sitio y prefabricados tipo baldosas.

Los escombros utilizados como materia prima provienen de muestreos puntuales de materiales que han sido utilizados para diferentes pruebas en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme). En capítulos posteriores son descritos de forma detallada.

Se evaluaron las siguientes propiedades físicas de los agregados naturales y los agregados gruesos reciclados: granulometría, gravedad específica seca (Gbs), absorción, abrasión y contenido de vacíos. Los valores de cada agregado reciclado se compararon con los resultados obtenidos del agregado grueso natural y otros resultados obtenidos de revisión bibliográfica. Además, se determinó la densidad del cemento a utilizar. Con respecto al concreto fresco se analizó la trabajabilidad, temperatura, peso unitario y contenido de aire. En su estado endurecido se midió la resistencia, mediante la falla a compresión de especímenes cilíndricos de concreto a los 7, 14 y 28 días.

Se realizó por cada fuente de agregado reciclado tres diseños de mezcla que se repitió dos veces y en algunas ocasiones tres veces, las proporciones de agregado grueso reciclado utilizadas son: 100%, 50% y 30%, los resultados obtenidos se promediaron y se compararon con un diseño patrón con 100% de agregado natural. De cada diseño de mezcla se realizarán nueve especímenes cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm, fallando tres en cada una de las fechas antes mencionadas. En esta investigación no se utilizó agregado fino reciclado.

1.4.2. Limitaciones

Los materiales que se utilizaron (muros de mampostería, cilindros de concreto y baldosas prefabricadas) provienen de diferentes ensayos destructivos realizados en el LanammeUCR, los procesos constructivos utilizados siguen la normativa en su totalidad y son realizados en un ambiente controlado muy difícil de conseguir en obra. Además, todos los materiales triturados tienen edades inferiores a un año contado desde el día que fueron construidos o elaborados en el caso de los cilindros. En cuanto al agregado natural y el tipo de cemento que se utilice se limitó al disponible en el laboratorio. La fuente del agregado grueso natural es el Tajo Cerro

Minas, el agregado fino proviene del Río Chirripó y el cemento utilizado es Holcim Fuerte de Uso General.

El equipo mecánico que se va a utilizar para triturar el escombros es el quebrador de muelas marca "MASSCO", propiedad del Lanamme. Se excluye cualquier otro tipo de quebrador o separador por cuestiones de disponibilidad.

No se utilizaron las almohadillas de neopreno mencionadas en la norma INTE C39:2018 (ASTM C39) para el acondicionamiento de las placas de carga utilizadas en el ensayo de resistencia a la compresión, ya que el Laboratorio no las usa habitualmente en la falla de los cilindros.

Los ensayos no fueron realizados por personal técnico de Lanamme, únicamente la autora recibió una capacitación previa, por tanto, la experiencia para ejecutar los mismos será reducida.

El escombros que se utilizó no se seleccionó siguiendo ningún tipo de muestreo estadístico y solamente se trituró la cantidad que se requería. Por tanto, los resultados no pueden tomarse como representativos para todos los agregados reciclados del país, sin embargo, si sirven de base para posteriores estudios.

1.5. Metodología de la investigación

La ejecución de este trabajo se divide en cuatro fases que se describen a continuación:

1.5.1. Fase 1: Investigación preliminar.

En esta fase se hace una aproximación teórica al problema planteado, para ello se indaga sobre las investigaciones realizadas hasta el momento y la normativa existente tanto a nivel nacional como internacional, con el fin de proveer toda la información necesaria y más relevante, con su debida validación, para proceder con la segunda fase. Teniendo la información recopilada se procede a realizar una estrategia metodológica para afrontar la problemática establecida. De igual forma se validarán los permisos necesarios en el Lanamme para hacer uso de sus instalaciones para la ejecución de los diferentes ensayos.

Se seleccionaron las muestras a utilizar de residuos de concreto para llevar a cabo la investigación. Se cuantificaron en detalle las necesidades de otras materias primas como el

cemento, el agregado grueso y el agregado fino de origen natural los cuales fueron donados por el Lanamme.

1.5.2. Fase 2: Preparación de materiales.

En esta etapa se procedió a triturar el concreto para obtener el agregado reciclado. A los muros de mampostería y las baldosas prefabricadas se les disminuyó su tamaño con un rotamartillo y un mazo al mismo tiempo se les retiró el acero de refuerzo, al tener los escombros de menores tamaños se trituraron de forma mecánica en el triturador disponible en el Lanamme. Los cilindros de concreto, al no tener acero, solamente se quebraron con un mazo hasta que el escombros obtuviera el tamaño adecuado para que alcanzara en el triturador mecánico, este se encargó de disminuir el tamaño del escombros hasta obtener un agregado con un tamaño máximo deseado. Ya con el escombros triturado se almacenó debidamente rotulado, para seguir con la tercera fase del proceso.

1.5.3. Fase 3: Desarrollo experimental.

Una vez triturado el escombros se procedió con la fase de ensayos de laboratorio tanto para las tres diferentes muestras de agregado reciclado como para el agregado grueso y fino natural, el cemento y el concreto producido con las proporciones indicadas en los alcances, en estado fresco y endurecido. Los ensayos se efectuaron a las tres diferentes muestras de agregados, siguiendo las normas INTECO y las ASTM correspondientes. Primeramente, se realizó un análisis granulométrico a cada una de las muestras tal cual sale del quebrador siguiendo la INTE C46:2016 (ASTM C136:2014), al no cumplir con los requisitos granulométricos para el tamaño máximo nominal seleccionado se tamizó el material y se combinó de forma que cumpla con la granulometría requerida para elaborar concreto y se asemeje a la granulometría del agregado grueso natural (INTE C15:2014, ASTM C33), este proceso se hizo con cada material por separado.

Una vez se obtuvo el material graduado se procedió a determinar el peso unitario y porcentaje de vacíos en agregados (INTE C58:2013, ASTM C29:2009), seguido la gravedad específica y la absorción del agregado grueso (INTE C68:2016, ASTM C127-15). También se midió que tan propenso al desgaste es el agregado mediante la norma INTE C64:2017 (ASTM C131:2014). Por último, con respecto a las características físicas del agregado se determinó el peso unitario

y los vacíos en agregados. Posterior a la caracterización física del agregado se procedió a determinar la densidad del cemento.

Seguido se inició con la elaboración de los tres diseños de mezcla 30% reciclado – 70% natural, 50% reciclado - 50% natural, 100% de material reciclado y el patrón solo con agregado natural, cada diseño de mezcla se repitió dos veces, con excepción del patrón. Teniendo los diseños de mezcla se fabricaron nueve especímenes de cilíndricos de 100 mm x 200 mm por cada diseño para ser fallados a 7, 14 y 28 días. Al concreto en estado fresco se le determinó el asentamiento, temperatura, contenido de aire y peso unitario del concreto fresco. Realizados los especímenes se curaron hasta el día de falla, se pulió la cara de arriba de todos los cilindros y la cara de debajo de los que fueron necesarios y se colocaron en la máquina de falla a compresión donde se sometieron a una carga hasta que el espécimen falló.

1.5.4. Fase 4: Análisis de resultados

A partir de los resultados de los ensayos, se realizó un análisis comparativo entre las características físicas de las diferentes fuentes de agregado grueso reciclado, y el agregado natural, con el fin de poder generar información que permita sugerir posibles usos dependiendo de la fuente. En esta etapa también se procesaron los datos generados de las fallas de los cilindros de concreto y se compararon los resultados para cada fuente de agregado, con el fin de poder determinar cuál de ellas es la óptima y de igual forma establecer si se alcanza la resistencia esperada.

Además, se determinó si existieron debilidades del agregado reciclado al ser utilizado en nuevos concretos para dar pie a futuras investigaciones que analicen la utilización de aditivos para contrarrestar los efectos y asemejar las propiedades del agregado natural.

Finalmente, se presentaron las principales conclusiones del presente trabajo y recomendaciones para futuras investigaciones que se vayan a realizar con agregados provenientes de concretos reciclados. En la Figura 1 y Figura 2 se muestra un esquema de la metodología descrita anteriormente.

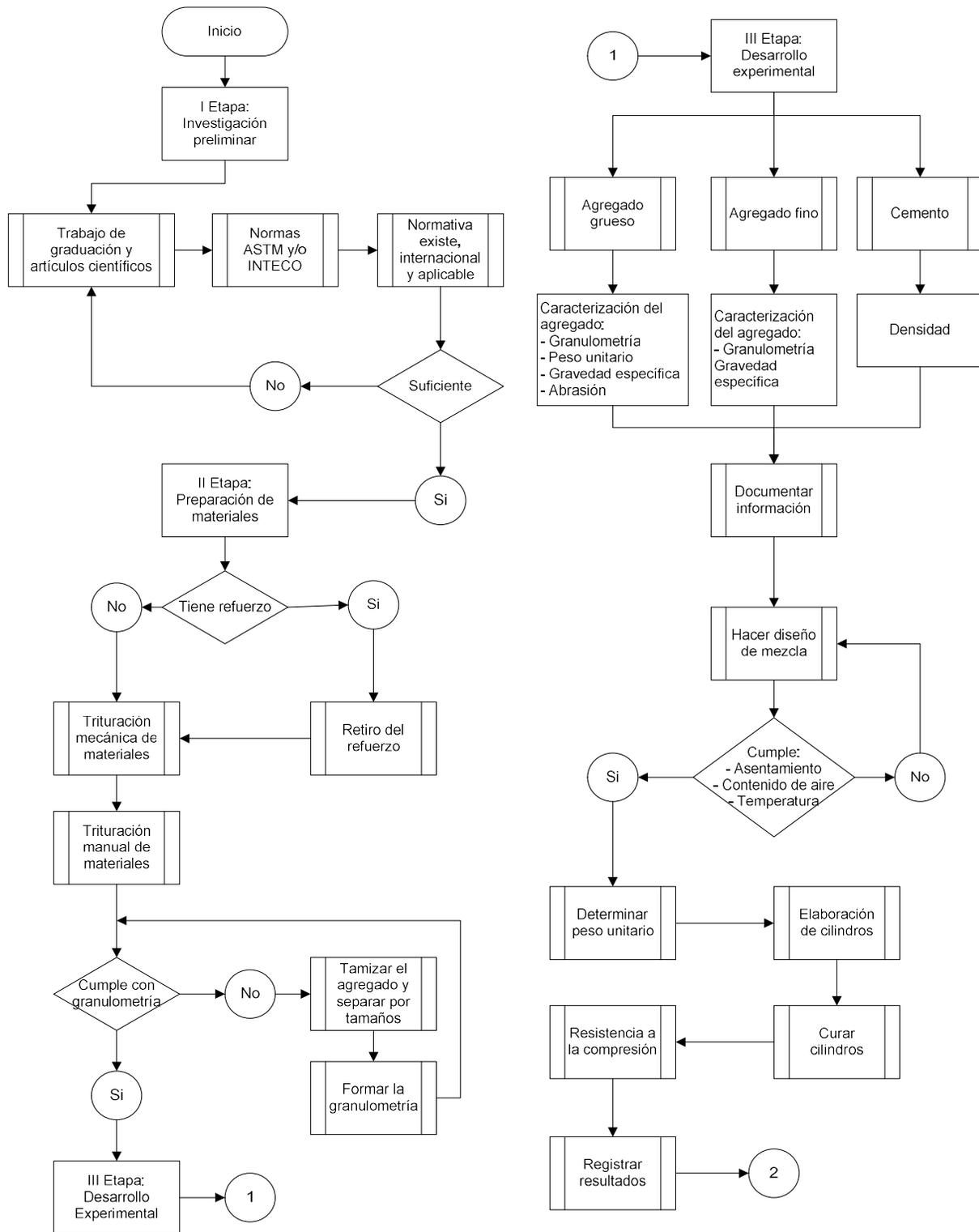


Figura 1. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación.

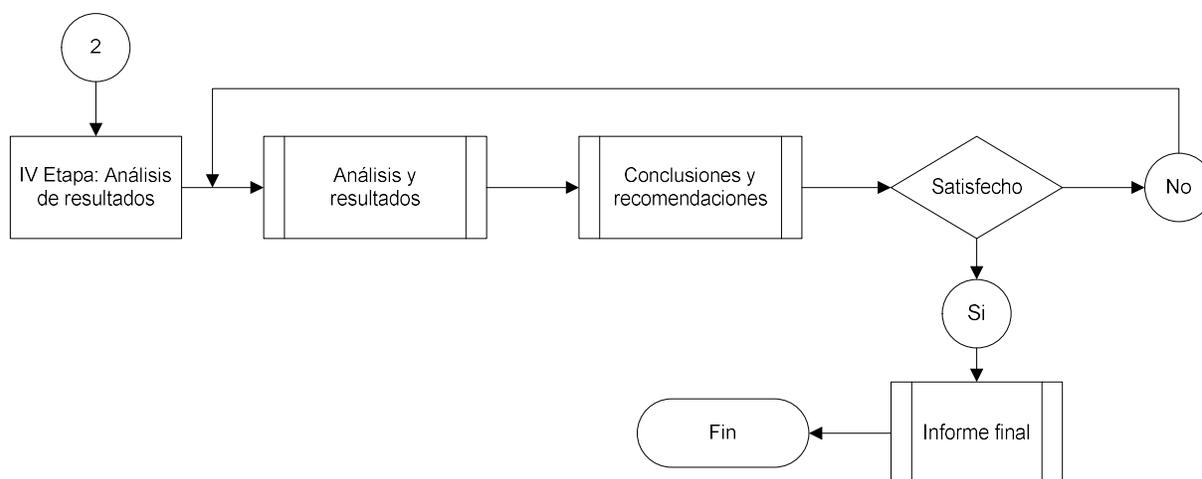


Figura 2. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación (cont.).

Capítulo 2. Marco teórico

En el siguiente apartado se muestran todos los conceptos relacionados con el reciclaje de escombros y aquellas características más importantes de los agregados para la elaboración del concreto.

Primeramente, es necesario definir el termino residuo como aquel material en estado líquido, sólido o gaseoso que ha perdido utilidad para su gestor o generador y deben o requieren deshacerse de él. Los residuos deben ser valorizados o tratados como primera opción y en caso de no ser posible disponerlos en sistemas adecuados y autorizados (Ley N°8839, 2010).

Un proceso de valorización es el reciclaje y se define como la transformación y reprocesamiento de residuos, impidiendo su disposición final en botaderos clandestinos o rellenos sanitarios. Para que este proceso sea factible debe conllevar un ahorro de energía y materias primas, sin generar una afectación mayor en la salud y el ambiente (Ley N°8839, 2010)

La valorización de los residuos forma parte de los procesos necesarios en una economía circular, la cual se define como un modelo de producción y consumo en el que un producto o material es reutilizado, reparado, renovado y reciclado todas las veces que sea posible para alargar el ciclo de vida y reducir al mínimo los residuos (Parlamento Europeo, 2015).

Para la presente investigación el material a reciclar son los escombros producidos por el sector construcción y la demolición de edificios, específicamente los constituidos únicamente por residuos de concreto (Cabillo et al, 2008). El concreto está compuesto por agregado y pasta. La pasta por su parte es la mezcla de cemento con agua que sirve de aglutinante. El cemento es un polvo fino color grisáceo que resulta de la combinación de materias primas con granulometría definida, cocinadas a temperaturas que rondan los 1500 °C. Por otra parte, el agua que se utiliza tiene que ser agua limpia, libre de impurezas no necesariamente pura o químicamente tratada (Madrigal, 2004).

Por otra parte, los agregados constituyen entre el 70 % y el 80 % del concreto, es un material granular que proporciona relleno, da resistencia y reduce grandes variaciones en el volumen del concreto. Al ser un material indispensable en el concreto, con un volumen considerable es de suma importancia buscar fuentes alternativas a las naturales tajos o ríos, ambos recursos agotables (Madrigal, 2004).

Las propiedades del concreto varían según las características físicas de los agregados, las principales son la forma, textura, angularidad o esbeltez, granulometría, densidad masiva y contenido de vacíos, gravedad específica, absorción y humedad superficial, abrasión y contenido de humedad al momento de la dosificación. A medida que se establece la influencia de esas características en el concreto resulta más fácil conseguir mezclas a menores precios sin sacrificar resistencia y durabilidad (León y Ramírez, 2010).

A continuación, se describen las características de los agregados reciclados necesarias para elaborar un adecuado diseño de mezcla, que a su vez sirven de parámetro para comparar la calidad del agregado reciclado con respecto al agregado natural:

- La forma es una descripción de la geometría del agregado y está estrechamente relacionado con la angularidad o esbeltez y la textura superficial de estos. La forma representa el cambio en la escala de dimensión grande, la angularidad representa el cambio en la dimensión mediana y por último la textura superficial es el cambio en la dimensión pequeña. Todos los cambios en las diferentes dimensiones del agregado dependen del origen y el clivaje de estos (León y Ramírez, 2010).
- La granulometría o graduación de los agregados se puede definir como la distribución de tamaños de las partículas de un agregado y se determina a través del análisis de tamices de malla con aberturas cuadradas. La granulometría y los límites granulométricos se suelen expresar de forma porcentual con respecto a la muestra total ensayada. Esto es una propiedad de importancia a la hora de estudiar los agregados de fuentes recicladas, porque por lo general presentan granulometrías distintas, que pueden influir en el diseño de la mezcla (Kosmatka et al., 2004).
- La densidad masiva es la masa o peso del agregado requerido para llenar un recipiente con un volumen unitario específico. Este volumen corresponde a aquel que ocupan los agregados y los vacíos existentes entre las partículas del agregado (Kosmatka et al., 2004).
- La gravedad específica es la relación entre la masa del agregado y la masa del agua con el mismo volumen. Al multiplicar la gravedad específica por la densidad del agua se obtiene la densidad del agregado. La densidad del agregado va a tener un efecto directo en la densidad del concreto y los posibles usos de este (Kosmatka et al., 2004).
- La absorción se define como la capacidad del agregado para contener agua en sus vacíos. La absorción en combinación con el contenido de humedad afecta directamente

la relación agua cemento de la mezcla de concreto, de aquí radica la importancia de determinar esta propiedad en los agregados reciclados (Kosmatka et al., 2004).

- La abrasión se define como la capacidad del agregado para resistir al desgaste. Agregados con poca resistencia al desgaste tienen mayor cantidad de finos que aquellos con una resistencia mayor. Esta característica se utiliza como un índice general de la calidad del agregado. Al igual que la absorción la abrasión afecta la relación agua cemento, ya que agregados con baja resistencia al desgaste puede aumentar la cantidad de agregado fino en el concreto aumentando la demanda de agua (Kosmatka et al., 2004).

Las propiedades del concreto en estado fresco también son necesarias de verificar para asegurarse el adecuado comportamiento del concreto, a continuación, se describen estas características:

- El asentamiento del concreto es una forma de medir la consistencia del concreto, a su vez sirve como indicador de trabajabilidad de la mezcla. Concretos con valores de asentamiento por debajo de 50 mm van tener una consistencia muy rígida, por el contrario, si tiene valores por encima de 100 mm va a tener una consistencia muy fluida, en ambos casos el concreto es difícil de manipular y puede disminuir su resistencia (Kosmatka et al., 2004).
- El peso unitario y se refiere a la cantidad en kilogramos del material por metro cubico, se afecta principalmente por el peso de los agregados (Kosmatka et al., 2004).
- El contenido de aire en el concreto, este corresponde al volumen de los poros o vacíos de aire en la mezcla de concreto, de esta se excluye el contenido de aire de los agregados y se expresa como la relación porcentual entre el contenido de vacíos y el volumen total de concreto (Jiménez y Lozano, 2018).

Con respecto a las propiedades mecánicas del concreto endurecido las cuales definen los posibles usos de este material, se tienen que la principal característica es la resistencia a la compresión, la cual mide la capacidad del material a deformarse ante una carga a compresión, el ensayo a compresión de especímenes cilíndricos de concreto da como resultado el esfuerzo aplicado al llegar a su estado límite de falla (Jiménez y Lozano, 2018).

Las fallas de los cilindros pueden mostrarse de diferentes formas, las patrones más típicos de falla se muestran en la Figura 3 . La falla de tipo 1 o falla de cono es la falla ideal, en esta se

muestran grietas en forma de x y ocurre cuando tanto la cara de los especímenes y la del plato de carga están perfectamente pulidas y planas. La falla de tipo 2 o columnar y cono presenta grietas verticales en la parte superior y una grieta en forma de cono en la parte inferior, se da cuando se presenta el plato de carga y/o la cara superior del convexo o por irregularidades en las caras del espécimen. En la falla de tipo 3 o columnar se muestran grietas verticales en todo el espécimen, ocurre cuando el plato de aplicación y/o la cara del espécimen tiene algún grado de concavidad, también puede ocurrir por deficiencia en el pulido o irregularidades en las placas de carga.

La falla de tipo 4 es la falla por cortante, se muestra como una única fractura en diagonal, ocurre cuando no se cumple con la perpendicularidad y planicidad del espécimen o se está muy cerca de límite de tolerancia. En falla de tipo 5 se muestra pequeñas fracturas en las parte superior e inferior, ocurre normalmente cuando se utilizan almohadillas de neopreno. Por último, la falla de tipo 6 es similar al tipo 5 pero las fracturas se dan solo en la parte superior formando una punta, ocurre cuando hay deficiencias en el material de cabeceo o irregularidades en el plato cabeceador o placas de carga.

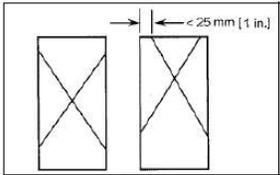
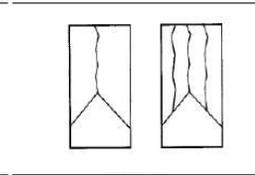
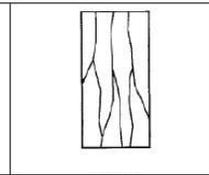
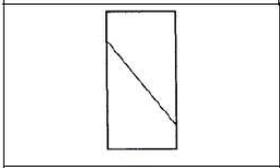
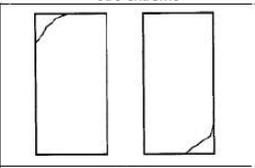
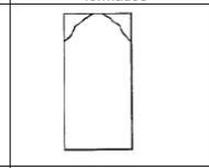
		
<p>TIPO 1</p> <p>Conos bien formados en ambos extremos y menos de 25 mm de la grieta a través de la corona</p>	<p>TIPO 2</p> <p>Cono bien formado en un extremo, grietas verticales a través de la cabeza, cono no bien definido en el otro extremo</p>	<p>TIPO 3</p> <p>Agrietamiento vertical columnar a través de ambos extremos. Conos no bien formados</p>
		
<p>TIPO 4</p> <p>Fractura diagonal sin agrietamiento a través de los extremos, golpearlo con un martillo para distinguirlo del tipo 1.</p>	<p>TIPO 5</p> <p>Fracturas laterales en la parte de arriba o abajo (ocurren comúnmente con las almohadillas de neopreno)</p>	<p>TIPO 6</p> <p>Similar al tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo</p>

Figura 3. Esquema de patrones típicos de falla

Fuente: INTE C39:2020

Capítulo 3. Marco legal y normativo

Los escombros son residuos causantes de alteración en el ecosistema, proliferación de plagas y enfermedades. Su disposición final en lotes baldíos, aceras y ríos es frecuente en el país; en ocasiones son utilizados para rellenar terrenos sin un tratamiento previo o adecuación del sitio. Además, los escombros son materiales pesados, de gran volumen, con necesidades de almacenamiento diferentes y con un alto potencial de reciclaje.

El origen de los escombros puede ser residuos de construcción, residuos de demolición, residuos de ensayos de laboratorio y piezas prefabricadas que no pasaron control de calidad, en su mayoría compuestos principalmente por concreto.

Para elaborar un concreto estructural de 210 kg/cm^2 se requiere una dosificación 1:2:3, esto quiere decir que por cada parte de cemento se necesitan dos partes iguales de agregado fino y tres partes iguales de agregado grueso, este último aporta resistencia, durabilidad y junto con el agregado fino disminuyen los costos de la mezcla (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, 2006). Sin embargo, significa que casi el 50% de la mezcla está compuesta por agregado grueso extraído de fuentes naturales como tajos y ríos, generando un alto impacto negativo en el ecosistema (Alvarado, 2018).

Al ser el escombro un material de origen pétreo, este tiene potencial para ser reutilizado como agregado, sin embargo, la separación y trituración requiere de una logística que de acuerdo con los registros, ninguna empresa en el país ha realizado a gran escala. Es por esta razón que el reciclaje de escombros tiene que ser una iniciativa país, con apoyo de las leyes y políticas nacionales, además deben de existir normas para el transporte, disposición final y reciclaje de dicho material.

En este capítulo se hará una recopilación de la normativa nacional en cuanto a la disposición final y reciclaje de los escombros, a la vez se analizará algunas de las normativas internacionales de países que estén incursionando en el reciclaje de concreto, con el fin de poder establecer normativas aplicables en el país.

3.1. Normativa existente en Costa Rica

3.1.1. Ley General de Salud (Ley N°5395, 1974)

El primer intento de regular el tema del manejo de residuos en general se da en el año 1974 con la Ley General de Salud, en esta se obliga a los administradores a separar y reciclar los

residuos, adicionalmente se delega la responsabilidad a las municipales de la recolección, acarreo y disposición final de sus residuos ordinarios.

El principal objetivo de esta Ley es la disposición final de los residuos en rellenos sanitarios, para disminuir la utilización de vertederos, sin embargo, deja de lado procesos deseables en el manejo de residuos: evitar, reducir, reutilizar, valorizar y tratar. Además, en ningún punto menciona algún tipo de tratamiento o manipulación diferencia para los residuos de construcción.

Toda la información referente al tema de manejo de residuos se incluye en el capítulo II de esta Ley, denominado: Obligaciones y restricciones relativas a la recolección y eliminación de residuos sólidos. En el año 2010 algunos de los apartados de esta ley son derogados en la Ley para la Gestión Integral de Residuos.

3.1.2. Ley Orgánica del Ambiente (Ley N°7554, 1995)

Esta Ley es la N° 7554 y fue publicada en noviembre de 1995, tiene como objetivo proveer a los habitantes de la Nación y al Estado los instrumentos necesarios para tener un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.

Es importante destacar que uno de los principios de la Ley N°7554 delega la responsabilidad al Estado de velar por la utilización racional de los elementos naturales y obliga a propiciar un desarrollo económico y ambiental sostenible que no ponga en riesgo la satisfacción de las necesidades de futuras generaciones.

Para promover un desarrollo sostenible en el artículo 6 de la Ley Orgánica del Ambiente indica que el Estado y las municipalidades deben fomentar la participación activa y organizada de los habitantes en la toma de decisiones y acciones para proteger y mejorar el ambiente.

También se establece la creación de Consejos Regionales Ambientales que tienen como función proponer actividades, programas y proyectos que promuevan el desarrollo sostenible y la preservación del ambiente, mediante investigaciones científicas y tecnológicas. Sin embargo, desde la creación de este documento a la fecha no se cuenta con ningún proyecto específico acerca del tratamiento de los escombros. De igual forma deben analizar y preparar políticas para el uso sostenible de los recursos naturales como los son los agregados de origen natural o promover reformas jurídicas para transformar las políticas ya existentes.

Otro de los enfoques de esta Ley es el impacto ambiental de las actividades humanas. En el capítulo IV establece que toda actividad humana que altere o destruya elementos del ambiente o genere residuos va a requerir de la evaluación ambiental por parte de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) y solo con la aprobación de esta institución se podrán iniciar las actividades, obras o proyectos. En caso de que se requiera de la evaluación ambiental se deberá fijar un monto por la garantía de cumplimiento el cual corresponde a un 1% del monto total de la inversión. El cumplimiento abarca el periodo de diseño, ejecución del proyecto y el periodo de funcionamiento que puede variar entre cinco a diez años posteriores a la finalización del proyecto, este periodo varía dependiendo del impacto del proyecto y riesgo para los habitantes de la zona.

Dependiendo del grado de alteración o destrucción que vaya a provocar el proyecto o actividad la Evaluación de Impacto Ambiental se hará mediante alguno de los siguientes instrumentos: Declaración Jurada de Compromisos Ambientales (DJCA), Pronóstico del Plan de Gestión Ambiental (P-PGA), Estudio de Impacto Ambiental (EsIA). La Evaluación del Impacto Ambiental tiene como finalidad establecer las medidas de prevención, corrección, mitigación y/o compensación dependiendo de la severidad del impacto a generar.

Los EsIA lo tendrán que hacer aquellos proyectos o actividades que obtengan de la declaración jurada una puntuación de más de 1000. En este estudio se debe explicar la cantidad y calidad de los desechos sólidos que se generarán durante la fase de construcción e indicar la ubicación y características del sitio donde se depositarán. Además, se debe detallar el manejo que se le dará a los residuos (Reglamento N°31849, 2004).

Cabe mencionar que las construcciones con menos de 500 m² y los proyectos de edificaciones industriales y de almacenamiento de menos de 1000 m² (que no tengan relación directa con su operación), que se encuentren en un área con uso de suelo conforme que no sea ambientalmente frágil no requieren EsIA, pero es claro que eso no significa que no generen residuos o que no requiera la utilización de materiales de origen natural (Reglamento N°31849, 2004).

3.1.3. Plan de Residuos Sólidos - Costa Rica (PRESOL) (2008)

En el año 2008 se crea este plan, el cual busca dar soluciones integrales al manejo de los residuos sólidos en el país, considerando el beneficio económico, social y ambiental. Siendo el

manejo de los residuos uno de los principales problemas que aquejaban al país en ese momento y que actualmente sigue siendo una problemática necesaria de atender.

Este documento se declaró de interés público y nacional e incluía acciones a seguir por el sector público y privado, organizaciones sociales y la población costarricense en el manejo de los residuos sólidos, en el corto, mediano y largo plazo. Los artículos del 2 al 16 los cuales contenían este accionar fueron derogados en algunos de los artículos del Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos.

3.1.4. Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley N°8839, 2010)

La Ley N° 8839 se crea en Julio del 2010 con el objetivo de regular la gestión integral de los residuos, además delega la responsabilidad de esta labor al Ministerio de Salud, la cual contempla la dirección, monitoreo, evaluación y control de los residuos sólidos.

En esta ley se plantean varios objetivos específicos de los cuales se destacan los siguientes:

- Desarrollar mercados para la comercialización de productos reciclados como una forma de generar nuevas fuentes de empleo.
- Promover la creación de infraestructura pública y privada para la valorización de los residuos y otros procesos asociados a la gestión de residuos.
- Desarrollar y promover los incentivos establecidos en la legislación del país para contribuir a la gestión integral de residuos.

Para cumplir con estos objetivos se establecen las funciones a seguir por parte del Ministerio de Salud, municipalidades y los demás sectores involucrados. El Ministerio de Salud como ente rector, está encargado de formular, ejecutar, evaluar y adaptar políticas y planes nacionales necesarios para la gestión integral de cada tipo de residuos. Las municipalidades por su parte además de velar por el cumplimiento de la leyes y reglamentos en el tema de gestión integral de residuos sólidos, tienen la función de establecer y aplicar planes municipales para la gestión integral de residuos sólidos de cada territorio. Así mismo dictar la reglamentación para la clasificación, recolección selectiva y disposición final de los residuos de todo el territorio, para eliminar cualquier tipo de disposición final en sitios no autorizados. A los demás sectores involucrados el Ministerio de Salud les debe garantizar la participación en las comisiones necesarias para el cumplimiento de los objetivos.

Para lograr una gestión sostenible e integral de los residuos se establece la jerarquía en el manejo de los residuos, mostrada como una pirámide invertida con los procesos ordenados de mayor a menor deseabilidad. El orden de los procesos es el siguiente: evitar, reducir, reutilizar, valorizar, tratar y por ultimo disponer la menor cantidad en rellenos sanitarios.

Es importante mencionar que por medio de decreto ejecutivo o reglamento el Ministerio de Salud en conjunto con el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones puede adoptar medidas especiales para la gestión integral de residuos sólidos entre ellas restringir o prohibir la comercialización de productos que dificulten el cumplimiento de la legislación nacional en este tema y promover la comercialización de productos obtenidos a partir de residuos valorizables, como los son los agregados reciclados.

De la Ley N° 8839 también es importante mencionar la autorización a las instituciones estatales de promover la compra y utilización de materiales, reutilizables, reciclables, biodegradables y valorizables, mediante un incentivo del 20% adicionales a los oferentes de licitaciones y compras directas que ofrezcan productos que promuevan una gestión integral de residuos durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Por otra parte, la Ley N° 8839 obliga a los generadores de residuos a evitar la generación y en caso de que no sea posible minimizar las cantidades. Además, son responsables de manejarlos evitando la contaminación de suelos, subsuelos, agua aire y ecosistemas. Aquellas personas o instituciones que no acaten lo estipulado en la ley 8839 serán sancionadas según el grado de la infracción cometida.

Es importante destacar que esta Ley no contiene apartados específicos para los residuos de construcción y demolición, tomando las características propias del material, sin embargo, los apartados que fueron mencionados son aplicables al manejo de este tipo de residuos y a su posible valorización.

3.1.5. Reglamento para la Declaración de Residuos de Manejo Especial (Reglamento N°38272-S, 2014)

En este Reglamento se incluyen los pasos a seguir para declarar un residuo de manejo especial, además, tiene como objetivos establecer los criterios, procedimientos generales y responsables de la gestión de los residuos declarados de manejo especial, promover que los productores, importadores, distribuidores, comercializadores, generadores y gestores se involucren en el

manejo de estos residuos, en conjunto con la municipalidad. Al mismo tiempo, busca que la generación de residuos enviados a tratamiento y la disposición final se reduzca, mediante planes de cumplimiento y los planes municipales.

Cualquier persona física o jurídica puede postular ante el Ministerio de Salud la inclusión de un residuo particular en la lista, aportando la documentación que justifique su incorporación. Del mismo modo el Ministerio de Salud puede aceptar la solicitud y declarar un residuo de manejo especial.

Es importante mencionar que tanto para la solicitud como para la declaración de un residuo de manejo especial se requieren estudios técnicos, económicos y ambientales que demuestren que tiene al menos una de las siguientes condiciones: que el residuo por su composición requiere una separación de sus componentes previa a la valorización, que por su peso y volumen no puede ser transportado junto con los residuos ordinarios, que demande condiciones de almacenaje especiales, que tenga posibles formas de uso y valor de recuperación del residuo.

A pesar de que los escombros cumplen con todas las condiciones antes mencionadas no han sido incluidos en la lista de residuos declarados de manejo especial. La falta de estudios es uno de los factores que ha influido en esta situación, degradando de forma sistemática la calidad del ecosistema y desaprovechando su potencial como agregado para elaborar nuevos concretos.

3.1.6. Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Reglamento N°37567, 2015)

Este documento tiene como función reglamentar la Ley No. 8839 Ley para la Gestión Integral de Residuos Sólidos de forma tal que se asegure el cumplimiento de los objetivos y principios medioambientales y sanitarios establecidos.

En este reglamento se indican los requisitos a seguir en caso de que un generador desee elaborar un programa de manejo integral de residuos y la información que se debe incluir. De manera que las autoridades tengan toda la información pertinente y puedan verificar el cumplimiento de la normativa. Así mismo, muestra los contenidos necesarios para que los municipios elaboren los planes municipales de gestión de residuos, se debe indicar la problemática, composición y generación de residuos ordinarios, peligrosos y de manejo

especial, frecuencia de recolección y cobertura, experiencias, iniciativas y recursos existentes, sitios de disposición final y por último los requerimientos prioritarios para el cumplimiento de la legislación vigente.

A manera de fomentar la GIRS, el capítulo VII menciona que se dará un reconocimiento anual a los productores responsables como parte del Sistema de Reconocimientos Ambientales (SIREA). Se otorgará a aquellos productores que tomen medidas para minimizar el impacto negativo en la salud y el ambiente de aquellos residuos que no están declarados de manejo especial, mediante programas de diseño sostenible de producto, producción más limpia, reducción de residuos o recepción de sus productos al final de su vida útil. De igual forma pueden participar los productores cuyos productos si están declarados de manejo especial pero que han logrado resultados importantes más allá de las metas establecidas, al minimizar los impactos negativos de sus productos en la salud y el ambiente.

En el capítulo VIII se mencionan las iniciativas que se pueden financiar con el fondo para la gestión integral de residuos sólidos, entre ellas están los cambios operativos y tecnológicos del sector municipal y el fortalecimientos y formalización de las actividades de recuperación de residuos. Además, se menciona los rubros y proporciones en las que se puede hacer uso de los recursos del fondo. Los fondos serán asignados a microempresas, recuperadores, centros educativos y grupos comunales que lo soliciten mediante una carta dirigida al Ministerio de Salud.

Aquella persona física o jurídica, instituciones públicas o privadas o de economía mixta, que se quiera dedicar al manejo de residuos debe contar con un permiso sanitario de funcionamiento y patente municipal, pagar un monto por concepto de registro, completar el formulario adjunto en este reglamento y contar con un programa para la gestión integral de residuos sólidos. Cabe mencionar que en este Reglamento no se concreta nada en cuanto al manejo de escombros.

3.1.7. Oficialización de la Estrategia Nacional para la Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (Ministerio de Salud, 2016).

Este documento publicado en el 2016, incluye las acciones necesarias a seguir por cinco años para lograr una gestión integral de los residuos valorizables más eficiente y mejorar indicadores de salud y ambiente. Los ejes temáticos de esta estrategia están enfocados en la generación de mecanismos para armonizar el sistema de separación y recuperación de residuos, fortalecer

los centros de recuperación de residuos, crear mercados para la comercialización de residuos valorizables y establecer los ciclos de vida de los productos y sus materiales.

En las categorías para la separación de los tipos de residuos no se mencionan los escombros. A pesar de ser un residuo con necesidades de transporte y almacenaje diferentes a los residuos de origen domiciliario y que implican riesgos significativos a la salud y la degradación del ecosistema no se encuentra dentro del listado de residuos declarados de manejo especial.

Con respecto a la recolección de los residuos valorizables, las municipalidades en conjunto con gestores autorizados de residuos sólidos deben facilitar la creación de emprendimientos del sitio. Las municipalidades deben encargarse de recolección de residuos o delegar estas tareas a la empresa privada, velando por que exista una adecuada manipulación de los residuos y el cumplimiento leyes y lineamientos del país.

En general este documento está enfocado en la separación, recolección y tratamiento de los residuos sólidos domiciliarios, a su vez busca legalizar los centros de recuperación de residuos de uso domiciliario, deja de lado la gestión de los residuos de construcción, su separación, recolección y tratamiento, de forma tal que se minimice la disposición final en rellenos sanitarios y otros espacios no autorizados.

3.1.8. Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos (2016)

El Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos entro en vigencia en el año 2016 como respuesta a la Ley para la Gestión Integral de Residuos y comprende un periodo de 5 años que finaliza en el presente año. En él se establecen las acciones en tema de residuos, que realizarán las instituciones públicas y privadas, centros educativos y la ciudadanía, con el fin de mejorar la calidad de vida de la población y el ambiente. El plan se fundamentó bajo el principio que la salud es un bien de interés público titulado por el estado y se basa en la jerarquía del manejo de los residuos establecido en la Ley para la Gestión Integral de Residuos.

Pretende regular el manejo, disposición final y los procesos productivos con residuos como materia prima, convirtiéndose en una fuente de ingresos para las familias costarricenses. Este Plan fue elaborado por el Ministerio de Salud acorde con la realidad del país y la proyección de los años posteriores. Adicionalmente hace énfasis en la responsabilidad compartida y en la participación conjunta de la sociedad y los productores importadores, consumidores y gestores de los residuos públicos o privados.

Se establecen cuatro objetivos, el primero va orientado en promover la separación en la fuente y la clasificación de los residuos, el segundo objetivo busca generar fuentes de empleo con los procesos de separación y valorización de los residuos, con el tercer objetivo se pretende desarrollar mercados de productos y materiales valorizados, de forma tal que los residuos sirvan de materia prima y por último se quieren generar mercados para comercializar los productos obtenidos del reciclaje.

Todos estos objetivos son aplicables en el reciclaje de concreto y sirven de base para la creación de un mercado potencial de agregados reciclados cuyos fines se determinarán posteriormente. En la actualidad este mercado es inexistente en el país y la región centro americana.

En capítulo cuatro de este plan se establecen los actores, el ámbito, la línea política y las estrategias de cada una de las acciones planificadas. El ámbito 1 hace referencia al diseño e implementación de instrumentos legales para el manejo de los residuos que no cuentan con regulación entre ellos los escombros y otros residuos de construcción. La meta establecida para contar con dicha regulación es el presente año, sin embargo, a la fecha no se ha publicado ninguna ley al respecto. También se menciona el subsidio estatal para los requerimientos tecnológicos, operativos y administrativos para llevar a cabo proyectos para el beneficio de la población, este instrumento es importante para el subsidio de aquellas empresas que deseen adquirir maquinaria y equipo para el reciclaje de concreto.

Del ámbito 3, que hace referencia a la parte económica se destaca el establecimiento de una estrategia entre el gobierno y las organizaciones sociales para el desarrollo de una propuesta de proyecto anual sujeto a financiamiento mediante cooperación internacional. De esta actividad se pueden apoyar para la creación de empresas dedicadas al reciclaje y comercialización de los escombros como agregados para la elaboración de nuevos concretos.

También se hace referencia al Habitat Humano en el Ámbito 5, entre las actividades de este ámbito se destaca la promoción y aplicación de tecnologías para el tratamiento, valorización y disposición final de residuos para minimizar su impacto negativo en el medio ambiente mediante la implementación de proyectos cuya producción sea más limpia. Es importante destacar esta actividad, ya que las tecnologías aplicables al reciclaje de concreto convierten la construcción en un proceso más limpio al evitar la disposición final de escombros en rellenos sanitarios y minimizar la extracción de agregados naturales en tajos y ríos.

En la misma línea del ámbito 5, está la estrategia 6.1 del ámbito 6 Investigación y Desarrollo Tecnológico, la cual tiene como meta crear alianzas estratégicas para la implementación de proyectos tecnológicos e innovadores para mejorar los procesos de gestión integral de residuos.

El Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos se puede resumir como documento importante de apoyo para implementar proyectos de reciclaje de concreto, se destaca en sus metas la creación alianza público-privadas que permitan la incorporación de nuevas tecnologías para un manejo adecuado de los residuos procurando el menor impacto en el ambiente, que a la vez sirva de fuente de ingreso para las familias costarricenses. Este plan fue revisado en el año 2019.

3.1.9. Reglamento de Centro de Recuperación y Residuos Valorizables (Reglamento N°41052-S, 2018)

En este reglamento se establecen los requisitos y condiciones físicas que deben cumplir los centros de recuperación de residuos valorizables para su funcionamiento, en congruencia con la salud y el ambiente. Al mismo tiempo busca promover el comercio internacional justo y equitativo de los residuos.

Esta ley contiene las pautas necesarias con respecto a la construcción, ampliación y remodelación de los centros de recuperación de residuos valorizables. Además, establece los retiros y una cobertura máxima de 60% del área del lote o lo que indique el plan regulador.

Al igual que cualquier establecimiento comercial o espacio productivo, los centros de recuperación de residuos valorizables necesitan el permiso de funcionamiento del ministerio de salud.

Se responsabiliza al propietario del centro de cualquier ruido y/o olor provocados, de forma tal que este contenga cualquier molestia que se genere dentro de la propiedad sin que haya ningún riesgo para los trabajadores, ocupantes, visitantes y habitantes de la zona.

En el artículo 10 se establecen las condiciones físico-sanitarias de las instalaciones, sin embargo, todas están enfocadas en centro de recuperación de residuos ordinarios con características físicas y químicas distintas a las características de los escombros, por ejemplo, materiales como el cartón y el papel tienen entre sus principales características ser materiales combustibles. Al estar enfocada en este tipo de residuos no toma en cuenta uno de los aspectos

más importantes, al momento de triturar y almacenar escombros y es la contención de partículas de polvo. La generación de polvo junto con el ruido son los principales problemas asociados con la trituración y almacenamiento de escombros. En el punto 2 de los anexos se indica la necesidad de tomar las medidas para evitar cualquier riesgo para la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores del sitio y de las poblaciones vecinas, así también tomar las medidas necesarias para minimizar el impacto al medio ambiente. No se especifica ninguna medida puntual.

Para que un centro de recuperación de residuos valorizables tenga el aval del ministerio de salud requiere de un sistema de manejo ambientalmente adecuado, que incluya el programa de control, documentación registral e informes. También es necesario documentar el ingreso, almacenamiento y salida de los residuos.

Durante todo el periodo de funcionamiento del centro estará bajo la inspección del ministerio de salud que evaluará el desempeño de la instalación en relación con los aspectos de ambiente, salud y seguridad.

3.1.10. Plan de Acción para la Gestión Integral de Residuos (2019)

En el año 2019 como parte de la revisión del Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos se elabora el documento Plan de Acción para la Gestión Integral de Residuos. Este plan busca orientar las acciones intersectoriales a seguir para una adecuada gestión integral de residuos sólidos en el país, en un periodo que va desde el año 2019 al año 2025.

En primera instancia este Plan hace una comparación de la situación actual en cuanto al manejo de residuos ordinarios con respecto al periodo de aplicación del plan anterior que inicio en el año 2016. Cabe destacar que esta revisión se enfoca en los residuos ordinarios y no incluye otro tipo de residuos como los generados en la construcciones y demoliciones.

Como temas priorizados para el accionar del gobierno se tiene de primero la elaboración de proyectos regionales para la gestión integral de residuos que sean aparte de la gestión municipal, para garantizar la permanencia del plan con los cambios de administración. De segundo esta la implementación de tecnologías para tratamiento de residuos, mediante proyectos a largo plazo que favorezcan no solo a una localidad sino a varias. El tercer tema es responsabilizar al productor de los residuos generados para ello consideran la implementación de una legislación real para todo el país que tome en cuenta la realidad nacional. En cuarto y

quinto puesto se tiene sensibilizar y educar a la población y elaborar una estructura de coordinación intersectorial respectivamente. Todos los temas antes mencionados son aplicables a los escombros, pero se requiere definir por cada tema acciones concretas enfocadas en la gestión de este tipo de residuos.

Este plan también incluye metas que se desean alcanzar, de las cuales destacan el fomento y generación de soluciones técnicas en las regiones del país para el manejo integral de residuos, el reciclaje de escombros para ser utilizado como agregados para la elaboración de concreto viene siendo una solución técnica para el manejo de estos residuos que a su vez genera fuentes de empleo.

Otra de las metas destacables de este Plan es el fomento de investigación de alternativas tecnológicas para la disposición final de los residuos, aunque no se menciona que sea en el manejo de residuos de la construcción y demolición es importante que se fomenten y realicen investigaciones en esta línea, ya que se sabe que los países de ingresos bajos y medios como lo es Costa Rica se han quedado atrás en este tema (Abarca et al, 2019)

En cuanto a las estrategias que se mencionan, está el impulso de modelos de economía circular, esta es aplicable por completo al reciclaje de escombros, ya que se le da valor a las materias primas y a los recursos utilizados en la elaboración del concreto.

También propone el cobro diferencia por generación, tipo de actividad comercial y pesaje de los residuos de esta forma se podría incentivar la disminución de los residuos y el reciclaje de escombros.

En este plan no se mencionan los escombros, ni ninguna medida o estrategia específica para los residuos, sin embargo, destaca la necesidad de enfocar o dirigir esfuerzos a la gestión de aquellos residuos en los que la normativa tiene vacíos, como los son los residuos de construcción y demolición.

Por último el documento hace énfasis en la necesidad de revisar el reglamento de Rellenos Sanitarios y de actualizar la siguiente normativa La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2010-2021, el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021, la Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR) 2016-2021 y la Estrategia Nacional para sustituir el consumo de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021.

3.2. Normativa internacional

El marco normativo internacional es muy amplio, en este apartado se mencionarán algunas de las leyes internacionales destacables en cuanto al reciclaje de los escombros. Tomando en cuenta que las realidades de cada país son distintas. Se presentan países de referencia seleccionados por la autora de esta investigación.

3.2.1. Brasil

Brasil es uno del país del continente americano pioneros en la gestión de residuos sólidos. La Ley N° 12.305 establece la política nacional de residuos sólidos, en este país si se incluye de forma específica como residuos especiales los residuos de construcción, rehabilitación, reparación y demolición de obras de construcción civil. Además, enfatiza la responsabilidad de los generadores de residuos en el transporte, tratamiento y destino final de los residuos de construcción, garantizando el confinamiento del material hasta el momento De ser transportados. Así también generador identificar y cuantificar la cantidad de residuos que va a producir (Lei N°12.305, 2010). Al mismo tiempo los estados de este país cuentan con políticas estatales de residuos sólidos acordes con sus necesidades.

Otro de los instrumentos legales para la gestión de residuos de la construcción es la Resolución N°307 del Congreso Nacional de Medio Ambiente de Brasil. En este documento se incluyen los lineamientos, criterios y procedimientos para minimizar los impactos ambientales de los residuos de construcción. Los residuos de construcción tienen una clasificación clase A, la cual significa que existen tecnologías o aplicaciones económicamente viables que permiten ser reutilizados o reciclados como agregados (Resolução CONAMA N°307, 2002).

Los residuos de construcción no podrán ser depositados en áreas no autorizadas como vertederos de residuos domiciliar, en pendientes, cuerpos de agua, lotes baldíos y áreas protegidas. Deben ser reutilizados o reciclados en forma de agregado o enviarse a vertederos autorizados para residuos de construcción donde apunten a ser usados o reciclados en el futuro.

La Asociación Brasileña de Norma Técnica (ABNT), creó una serie de normas para regular el tema de los residuos de construcción, las cuales se detallan a continuación:

- N° 115.112:2004: Establece los requisitos para el diseño, implementación y operación de las áreas de transbordo y clasificación de residuos de construcción civil.

- N° 115.113:2004: Indica los requisitos para el diseño implementación y operación de los residuos sólidos de construcción y rellenos sanitarios inertes que permitan su uso a futuro.
- N° 115.114:2004: Incluye los requisitos para el diseño, implementación y operación de áreas de reciclaje RCC-clase A de materiales previamente clasificados para que de manera segura sean utilizados como agregados para obras de infraestructura y edificaciones
- N° 115.114:2004: Establece los lineamientos y procedimientos para la utilización del agregado reciclado en capas de refuerzo de la subrasante, base y subbase de pavimento y revestimiento primario en obras de pavimentación.
- NBR 15116:2004: Establece los requisitos para la utilización de agregados reciclados de residuos sólidos de construcción civil en pavimentos y concretos no estructurales.

Esta normativa le ha permitido a este país reducir el volumen total de residuos si procesar, disminuir la explotación de los áridos naturales y minimizar el impacto ambiental y social causado de esta actividad, generar fuentes de empleo, ingresos e inclusión social al generar un producto comercializable que a su vez mínima la disposición inadecuada de los residuos de construcción y las afectaciones asociadas (CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014).

3.2.2. México

En el 2003 se crea en México la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos en ella se incluye los lineamientos para la protección al ambiente mediante la prevención y la gestión integral de residuos, a su vez propiciando el desarrollo sostenible (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003).

La normativa mexicana declara los residuos de la construcción, mantenimiento y demolición como residuos de manejo especial. En caso de que se generen más de 80 m³ de residuos el generador deberá formular y desarrollar un plan de manejo sus residuos (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México en convenio con la Cámara Mexicana de la Industria de la construcción elaboraron el Plan Nacional de Manejo de Residuos de la Construcción que busca que los proyectos de construcción generen el mínimo costo

ambiental. En este plan se establecen posibles usos de los escombros como base en estructuras de pavimentos, como arena reciclada en cobertura en rellenos, en la fabricación de bloques y otros elementos prefabricados, como agregado reciclado en rellenos de cimentaciones, camas de tuberías, acostillamiento y relleno y en conformación de terrenos (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013).

Como estrategia para el manejo integral de los residuos el Plan incluye los pasos a seguir en cada etapa del proyecto. En la etapa de planeación de obra se deben identificar elementos que puedan ser elaborados con materiales de reúso y reciclaje, se calculará la cantidad y volumen del material que se reutilizará, reciclará dentro y fuera de obra y el material que ira a sitios de disposición final (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013).

Dentro de las obras los residuos incluyendo los escombros deberán tener un espacio adecuado en las obras en el que serán recolectados, acumulados y clasificados para enviarlos a diferentes sitios de tratamientos. Fuera del sitio de la obra los residuos se acondicionan para su uso posterior como agregado reciclado y los que no pueden valorizables serán llevados a depósitos permanentes autorizados (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013).

Es importante destacar que la aplicación de este plan no es obligatoria, las personas que deseen adherirse deberán enviar un oficio indicando su deseo de adhesión y compromiso voluntario de acatar las obligaciones del plan (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013).

3.2.3. Unión Europea

Los residuos de construcción y demolición representan un tercio de los residuos generados en la Unión Europea. El Parlamento Europeo y el Consejo Europea son los encargados de establecer el marco legislativo para la gestión de residuos de la Unión Europea.

En la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de noviembre de 2008, aclara que los residuos que ofrezcan un alto nivel de protección del medio ambiente y un beneficio ambiental y económico, dejaran de ser residuos en el momento que sean valorizados para convertirse en materias primas o productos, entre los residuos que menciona están los residuos de construcción y demolición.

Posteriormente en la Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo del 2018 estable la adopción de medidas por parte de los estados miembros para promover la

demolición selectiva, de esta forma se logra deconstruir la edificación permitiendo el manejo seguro de las sustancias peligrosas. A su vez permite facilitar la reutilización y el reciclaje de alta calidad.

Es importante destacar que a pesar de que en la Unión Europea se recicla el 50% de los residuos de construcción, la demanda de materiales reciclados es restringida y reducida producto de la desconfianza de la calidad de estos, además que existe la incertidumbre de si su utilización puede afectar la salud de los trabajadores (Comisión Europea, 2018).

3.2.4. España

En la constitución política de España se establece que sus habitantes tienen el derecho de disfrutar de un medio ambiente idóneo para el desarrollo de las personas, pero también tienen el deber de conservarlo y velar por el uso racional de los recursos natural.

España cuenta con normativa específica que regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. El Real Decreto 105/2008 establece los requisitos mínimos de producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. En este país los residuos de construcción y demolición son responsabilidad del propietario del bien inmueble y será el productor de los mismos, las empresas o personas encargadas de la construcción serán los poseedores del material.

Los proyectos de construcción deberán incluir de forma obligatoria un estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición que se generarán en la obra, en el que indique la cantidad estimada en toneladas y los costos asociados a la gestión de esa cantidad de residuos, estos aspectos deben de estar incluidos dentro del presupuesto del proyecto. En caso de que se realice algún tipo de demolición reparación o reforma se deberá hacer un inventario de los residuos peligrosos que se generen, separar estos residuos de los demás y entregarlos a gestores autorizados para tratar residuos de este tipo. Otra obligación de los productores es la elaboración de planos con la ubicación de las instalaciones previstas para el almacenamiento, manejo y separación de los residuos (Real Decreto 105/2008, 2008).

En la etapa de construcción se obliga a los poseedores de los residuos a elaborar un plan de gestión de los residuos durante el proceso constructivo, también deberá separar los residuos de construcción y demolición en obra, al mismo tiempo tiene que garantizar las condiciones adecuadas de higiene y seguridad con el fin de facilitar su valorización, en caso de que no

pueda por sí mismo gestionar sus residuos deberá entregarlos a un gestor de valorización o de eliminación de residuos autorizado, según corresponda (Real Decreto 105/2008, 2008).

La normativa española excluye de las obligaciones antes mencionadas a los productores y poseedores de residuos de construcción y demolición de obras menores de uso domiciliario, estos residuos son considerados como urbanos y se rigen bajo los requisitos de las distintas municipalidades (Real Decreto 105/2008, 2008).

Sin importar el tamaño de la construcción está prohibido la disposición final de los residuos sin un tratamiento previo, al mismo tiempo la legislación solicita establecer tarifas elevadas de desincentiven el depósito de residuos valorizables en vertederos (Real Decreto 105/2008, 2008).

Por otra parte, los gestores de residuos tienen la obligación de llevar un registro de las cantidades de residuos gestionados en toneladas y metros cúbicos, el tipo de residuos codificados, la identificación del productor, poseedor, obra de donde proceden o del gestor en caso de que aplique, método de gestión utilizado y por último las cantidades en toneladas y metros cúbicos de los productos y residuos resultantes y los destinos del material (Real Decreto 105/2008, 2008).

Si el gestor solo se encarga de la recolección, almacenamiento, transferencia o transporte deberá solicitar los certificados de operación de valorización o eliminación de los residuos a los gestores que vayan a tratar el material y suministrarle esta información al poseedor o al gestor que le entregó los residuos (Real Decreto 105/2008, 2008).

Con respecto a las actividades de valorización de residuos de construcción y demolición, solo se podrán realizar con la autorización previa de la institución responsable del medioambiente de la comunidad la cual realizará una visita al sitio para evaluar los técnicos responsables y las instalaciones. Los permisos se otorgan por un periodo de tiempo determinado y podrá ser renovados. En caso de que el poseedor realice las actividades de valorización in situ no requerirá la obtención del permiso, pero si la aprobación previa de dirección facultativa de la obra, para garantizar que no se pone en riesgo la salud de los trabajadores, vecinos y el medio ambiente y que no se provoca contaminación sonora, malos olores y afectaciones al paisaje (Real Decreto 105/2008, 2008).

Las empresas encargadas de valorizar escombros para la obtención de agregados reciclados deberán cumplir con los requisitos técnicos y legales del material, variables según el destino que se les dé (Real Decreto 105/2008, 2008).

En general la normativa española atiende las necesidades medioambientales y promueve una gestión adecuada de los residuos y principalmente fomenta la economía circular, de esta forma no se desechan materiales que pueden ser tratados y comercializados.

3.3. Normativa internacional aplicable

La normativa costarricense en cuanto al manejo de los residuos de construcción y demolición es muy limitada. El paso principal para una gestión adecuada de este tipo de residuos y en específico los escombros es entender que tienen características de peso, volumen y tasas de generación distintas a los residuos ordinarios y por lo tanto no pueden ser tratados de igual forma.

Cruz (2015) señala la necesidad de generar más investigación antes de poder normar la gestión de los residuos de construcción y demolición, de forma tal que se tenga claridad de cómo manejarlos. Desde la academia se está trabajando en estimar tasas de generación de residuos y caracterización de materiales derivados del tratamiento de residuos como lo es la presente investigación.

Basándose en la normativa internacional de países como España y Brasil, en este apartado se detallará posibles normativas que pueden ser aplicadas a tanto a los productores, poseedores, transportadores y gestores de residuos.

Primeramente, se necesita que los escombros sean declarados como residuos de manejo especial y elaborar una normativa que se aplique desde las etapas de concepción del proyecto. Es importante establecer el papel que va a tener el propietario del bien, los encargados de demoler las estructuras existentes (en caso de que aplique), y la o las empresas de diseñar y construir las edificaciones.

Como parte de la documentación para obtener un permiso de construcción se debería pedir un plan de gestión de los residuos para todas las obras de construcción y demolición, ya que actualmente las obras declaradas de muy bajo impacto ambiental no requieren presentarlo. Dicho plan debe incluir la cantidad estimada de los escombros a generar tanto en peso como volumen, el tipo de escombros, el sitio en el que serán almacenados y los lugares en los que

serán tratados esto con el fin de determinar desde antes de iniciar la obra si será necesario trasladarlos a un almacenamiento temporal. Para que el plan sea factible se deben calcular los costos asociados e incluirlos en el presupuesto.

Los escombros tienen potencial para ser utilizados como agregados reciclados en tanto se garantice la calidad de los mismo. Uno de los aspectos fundamentales es conocer la fuente de los escombros y definir si proveniente de una demolición o son residuos de nuevas construcciones, por ejemplo, si es una pared de mampostería, un elemento prefabricados, concreto colado en sitio de un puente, entre otros. Esta caracterización preliminar permitirá dar un indicio de la calidad del concreto y sus posibles usos (Cruz, 2015).

Durante el proceso constructivo es importante delimitar y señalar el sitio de almacenamiento de los residuos, para facilitar su ubicación por parte de la persona. No se debe permitir el almacenamiento de escombros en laderas, drenajes, lecho de ríos, para evitar deslizamientos y obstrucción de los cauces de los ríos e inundaciones, de igual forma hay realizar medidas de protección y control de lavado para evitar que en época lluvia se saturen sumideros y alcantarillas existentes. Además, es necesario determinar si el sitio que se seleccionó para almacenar los escombros no afecta los patrones de escorrentía También es necesario proteger los escombros para evitar que se contaminen con otros materiales como arcillas y materiales peligrosos (Oficina Regional para Mesoamérica y la Iniciativa Caribe, 2011).

Es importante que los escombros no se dispersen en la obra, se debe barrer y limpiar con frecuencia la zona donde se están generando los escombros, además a medida que se producen deben ser agrupados y trasladados al sitio del proyecto o trasladarlos a las escombreras (Oficina Regional para Mesoamérica y la Iniciativa Caribe, 2011).

Sin embargo, para que las acciones antes mencionadas tengan implicaciones en la conservación del ambiente y el desarrollo sostenible, los escombros no pueden ser llevados a los rellenos sanitarios para ser dispuestos de la misma forma que los residuos domiciliarios. Es necesario que se obligue al productor a tratar estos residuos, en plantas autorizadas y reguladas para que se transformen el escombro en subbase y base para estructuras de pavimentos o agregado reciclado para la elaboración de concreto y camas de elementos.

Es necesario que el agregado reciclado que se obtenga sea caracterizado de forma física y mecánica, por parte de personal calificado, para establecer posibles usos y calidad del material. Para ello se requiere también de normas de calidad específicas para agregados reciclados.

El transporte de los escombros también tiene que estar regulado. Al igual que como con los materiales áridos es importante proteger con una lona la caída del material. La separación de los escombros de otro tipo de residuos de construcción debe garantizarse en el transporte y la limpieza del material a procesar, para evitar en la medida de lo posible que esté contaminado con tierra o con residuos peligrosos.

Otra forma de promover el tratamiento de los escombros es establecer tarifas mínimas de recepción de residuos en rellenos sanitarios de esta manera los generadores de residuos preferirán que sean tratados a un coste igual o menor.

Es importante que la normativa que se aplique contenga todos los aspectos antes mencionados, de forma que se integren las variables y se logre reducir la cantidad de residuos, sus impactos negativos en el medio ambiente, se cree conciencia en la población y se fomente la economía circular.

Capítulo 4. Comportamiento mecánico del concreto con agregado reciclado

Como ya se mencionó anteriormente, los escombros son residuos de concreto producidos por el sector construcción y la demolición de edificios, puentes, muros, carreteras, entre otras edificaciones. La composición y característica del escombros puede ser muy variada y va a depender de los materiales utilizados en el proceso constructivo. En la mayoría de ocasiones van a estar unidos con elementos metálicos como varillas o mallas y otros materiales como concreto de pega o de relleno de bloques de mampostería.

En el capítulo anterior se menciona la normativa que puede aplicarse en el país para promover el reciclaje de este material como materia prima para la elaboración de nuevos concretos. En este capítulo se determinarán las propiedades físicas y mecánicas de los escombros provenientes de tres fuentes: baldosas prefabricadas, pared de mampostería y concreto colado en sitio, así como el comportamiento de mezclas de concreto fresco y endurecido con 30%, 50%, 100% de escombros reutilizados como agregado grueso.

4.1. Agregados para reciclar

Se utilizaron tres diferentes fuentes de escombros: baldosas prefabricadas, pared de mampostería y concreto colado en sitio, todas provenientes de ensayos realizados en el LanammeUCR durante el año 2020.

4.2.1. Fuente Pared de Mampostería

La pared de mampostería que se utilizó fue donada por el Laboratorio de Estructuras del Lanamme, la misma se elaboró en dicho laboratorio para el desarrollo del proyecto final de graduación para obtener el grado de licenciatura en ingeniería civil titulado "*Verificación de la capacidad de muros de mampostería confinada reforzada al variar la relación de aspecto*" de la estudiante Tara Natalia Sánchez Vargas. La pared de mampostería se construyó siguiendo las especificaciones y procedimientos constructivos descritos en el Código Sísmico de Costa Rica CR-2010/2014 por personal debidamente capacitado.

Para la elaboración de la pared de mampostería se utilizaron aproximadamente 63 bloques clase A cuyas dimensiones eran 15 cm x 20 cm x 40 cm (ver Figura 4), elaborados por Pedregal, planta Guanacaste. Sánchez (2019) como parte de su investigación tomó una muestra al azar de bloques y siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C140 verificó las

dimensiones de las unidades de mampostería, adicionalmente determinó la resistencia a compresión de la muestra de bloques de mampostería, el valor promedio obtenido fué de 298 kg/cm^2 , por encima del mínimo permitido en el CSCR 10/14 DE 133 kg/cm^2 .



Figura 4. Bloques utilizados en la pared de mampostería

Para la construcción de la pared de mampostería los bloques fueron dispuestos de forma manual y aparejados con mortero pre empacado INTACO tipo N. Según la ficha técnica del material, este es un mortero cementicio modificado con aditivos de alta calidad y cal hidratada, además posee una resistencia mayor o igual a 53 kg/cm^2 , su color una vez endurecido es blanco (Sanchez, 2019).

Para el relleno de las celdas de mampostería que contenían el acero de refuerzo se utilizó concreto pre empacado CRC Autocompactable. Sánchez (2019) también verificó el cumplimiento de la resistencia mínima del concreto de relleno para mampostería clase A establecida en el CSCR 10/14, obtuvo como valor de resistencia promedio de 197 kg/cm^2 . Las celdas son rellenas una vez colocados todos los bloques de mampostería y no una a una como la forma tradicional, para lograr esto se utilizó una bomba que permite rellenar toda la celda de manera uniforme.

La pared estaba compuesta por un paño de mampostería confinada por dos columnas y una viga corona, las cuales se descartaron para el desarrollo de la presente investigación. La pared contaba con un refuerzo previo de fibra de carbono en forma de franjas dispuestas a lo largo y ancho de la pared igualmente espaciadas, dos en la dirección verticales y cuatro en la dirección horizontal, sin embargo, se descartaron las áreas que tenían este material.

4.2.2. Fuente baldosas prefabricadas

La pared de baldosas fue donada por el Laboratorio de Estructuras del Lanamme, esta fue utilizada en el trabajo final de graduación "*Evaluación experimental de sistema prefabricado de columna y baldosas bajo la aplicación de cargas perpendiculares al plano de la pared*" del estudiante Andrey Bogantes Sánchez para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Todas las baldosas que constituían la pared tenían las mismas dimensiones 1.50 m x 0.50 m, formando un elemento de 3.30 m de largo por 2.50 m de alto ancho (ver Figura 5) fabricadas por IDS Casas Modulares y ensambladas por personal capacitado en el Lanamme. La pared se conformaba por dos paños cada uno con cinco baldosas confinadas por dos columnas en los extremos y una al centro, además estaba cimentada sobre una placa de fundación, ambos elementos se descartaron en la presente investigación para evaluar únicamente las propiedades de las baldosas.



Figura 5. Pared de baldosas

Como parte de la investigación de Bogantes, determinó la resistencia a flexión de 3 baldosas. La resistencia de cada una fue superior a 1000 Nm/m valor mínimo establecido por INTE C131:2019, el valor promedio que obtuvo fue de 1140 Nm/m (Bogantes, 2020). Durante el proceso de demolición de las piezas se observa la presencia de un aditivo en el concreto en forma de hebras, incluido para aumentar la resistencia a tensión del elemento. Cada baldosa

contenía en su interior varillas de refuerzo número dos en forma de tablero como se muestra en la Figura 6. Por último, una de las caras de la pared contaba con una capa de pintura en color blanco.



Figura 6. Refuerzo baldosas prefabricadas

4.2.3. Fuente concreto colado en sitio

El material que se utilizó fueron especímenes cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm (ver Figura 7) realizados por personal técnico calificado como parte de un ensayo interlaboratorial. Ambas coladas se hicieron con un mismo diseño de mezcla, con una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a 28 días. Para esta mezcla se utilizó agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm, agregado fino del Río Chirripó, se empleó cemento de uso general pero no se indicó la marca del mismo, no se agregó ningún aditivo.

Todos los cilindros se fallaron mediante la norma INTE C39:2018 para determinar su resistencia a compresión. En total se utilizaron 90 cilindros de concreto, los primeros 40 cilindros se fallaron a los 28 días, el segundo lote de 50 cilindros se falló a los 7 días. Los especímenes cilíndricos se curaron todos los días previos a su falla. Al momento de tritura los cilindros todos tenían más de 28 días.



Figura 7. Cilindros de concreto

4.3. Metodología para obtener el agregado grueso reciclado

Las características físicas de las fuentes utilizadas son distintas, por ello para cada una se requirió una metodología distinta para obtener el agregado grueso reciclado. Todos los procesos de trituración y posteriores se llevaron a cabo en el Lanamme con equipo aportado por la institución.

4.3.1. Fuente pared de mampostería

Primero se cortó con una esmeriladora los extremos de la pared donde no había acero y en aquellos donde si existía se utilizó un rotamartillo para dejar expuesto el acero y poder cortarlo, de esta manera se separó el paño de mampostería de las columnas. Al tener desligada el paño de mampostería de la columna fue posible derribarla y ponerla en posición horizontal (ver Figura 8).

Teniendo la pared en posición horizontal se utilizó un mazo para quebrar el material hasta conseguir trozos de aproximadamente 10 cm x 10 cm como se muestran en la Figura 9 . Esta reducción se realizó para que alcanzaran en la parte superior del quebrador. Posteriormente se seleccionan los trozos sin fibra de carbono, para descartar los que si tenían este material adherido. Con el material limpio de cualquier refuerzo se introduce en la parte superior del quebrador para obtener el agregado, es importante resaltar que el concreto de relleno también se quebró para formar un material compuesto por bloques de mampostería y concreto de relleno.



Figura 8. Pared de mampostería



Figura 9. Trituración inicial pared de mampostería

4.3.2. Fuente baldosas prefabricadas

Primero se desmontaron las 10 baldosas, una vez abajo se quebraron en trozos de menor tamaño utilizando un mazo, durante este proceso quedo expuesto el acero de refuerzo y los espaciadores de forma tal que fue simple retirarlos. Con el material en piezas de aproximadamente 10 cm x 10 cm (ver Figura 10) se introdujo en la parte superior del quebrador hasta convertirlo en agregado.



Figura 10. Trituración inicial pared de baldosas

4.3.3. Fuente concreto colado en sitio

Primero se partieron a la mitad utilizando un mazo aquellos cilindros que después de la falla permanecieron enteros. Los que se partieron durante la falla no fue necesario reducir su

tamaño. Con los cilindros en piezas 10 cm de diámetro por 10 cm de alto o en pedazos similares se introducen en la parte superior del quebrador, triturándolo hasta obtener agregado apto para utilizarse en la fabricación de concreto.

Con cada uno de los materiales en pedazos de aproximadamente 10 cm x 10 cm se procedió a introducirlos por separado en el quebrador. El equipo que se utilizó para tritura el material por factores de disponibilidad y accesibilidad fue el quebrador de muelas marca "MASSCO" propiedad del Lanamme que se observa en la Figura 11. Este equipo es de poca capacidad, se introducen los trozos uno a uno en la parte superior y se quiebran en diferentes tamaños. El quebrador permite ajustar la abertura del quebrador para obtener un tamaño máximo nominal específico, en este caso se ajustó la abertura en 20 mm.



Figura 11. Quebrador de muelas

Una vez triturado el material se realizó a cada material una granulometría preliminar (ver Cuadro 2 , Cuadro 3 , Cuadro 4) , sin embargo, al no cumplir con ninguna de las granulometrías necesarias para agregados empleados en concreto según la norma ASTM C33:2018 y contener gran porcentaje de agregado fino, se procede con la separación del material por tamaños utilizando la tamizadora mecánica propiedad del Lanamme (ver Figura 12) utilizando las mallas 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4 y la charola . Esto con la finalidad de poder armar una granulometría que se asemejara a la granulometría del agregado natural.



Figura 12. Tamizadora de agregados

De cada material se obtuvo una cantidad 110 kg de agregado grueso reciclado, esta cantidad es la mínima necesaria para realizar todas las pruebas requeridas para caracterizar el agregado, realizarles las pruebas al concreto en estado fresco y elaborar los especímenes cilíndricos de concreto. Una vez separado el material por tamaño se mezcló en dos bandejas de forma manual hasta obtener una mezcla uniforme, este procedimiento se realizó de la misma forma para los tres materiales. En la Figura 13 se puede observar este proceso para las tres fuentes de agregado grueso reciclado.

Los pesos se determinaron basándose en el porcentaje pasando de material en cada malla, de forma que si se combinan las cantidades del Cuadro 1 se obtienen porcentajes dentro de los límites establecidos en la ASTM C33:2018 para agregados de tamaño N°6.

Cuadro 1. Cantidades para formar la granulometría del agregado grueso reciclado

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 % Pas Tamaño No.6
3/4"	19,0	0,0	0	0	100	90-100
1/2"	12,5	55000,0	50	50	50	20-55
3/8"	9,50	44000,0	40	90	10	0-15
N° 4	4,75	11000,0	10	100	0	0-5



Fuente: Baldosas prefabricadas

Fuente: Pared de mampostería

Fuente: Concreto colado en sitio

Figura 13. Agregado grueso reciclado con la granulometría deseada

4.4. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados grueso reciclados y agregado grueso natural

4.4.1. Granulometrías iniciales y granulometrías corregidas

Para determinar la graduación de cada material al salir del quebrador se debe realizar una granulometría preliminar. Al ajustar el quebrador con una abertura de 20 mm se obtuvo en las tres fuentes agregado reciclado un tamaño máximo nominal de 19-20 mm que se verifica por medio de una inspección visual. Para poder hacer la granulometría y garantizar la representatividad se cuartea el material siguiendo la norma INTE C62:2020 (ASTM C702:2018) hasta obtener una muestra de 5.0 kg, cantidad necesaria para el tamaño máximo nominal de 19 mm según la norma INTE C46:2020 (ASTM C136:2019).

El procedimiento que se siguió para el análisis granulométrico en tamices se indica en la norma INTE C46:2020 (ASTM C136:2019). Primero se seca cada muestra en el horno a 110°C durante 24 horas, hasta obtener masa constante y se determina la masa inicial, posteriormente se lava el material en una malla No. 200 siguiendo la norma INTE C49:2018 (ASTM C117:2017) para eliminar las partículas con tamaños menores a 0.075 μm , en estos casos material cementicio que puede absorber el agua de mezcla necesaria para que el cemento reaccione. Con el material lavado se vuelve a introducir al horno por 24 horas a 110°C, se deja enfriar y se procede con la ejecución de la granulometría utilizando las mallas 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100, No.200, la parte gruesa se tamiza de forma manual y la parte fina mediante las maquinas tamizadoras. Por último, se tabula la masa retenida en cada malla para calcular el porcentaje de material retenido con respecto a la masa final de

muestra, el porcentaje de material retenido acumulado y el porcentaje de material pasando que es la diferencia entre el 100% y porcentaje retenido acumulado en la malla.

En el Cuadro 2 , Cuadro 3 y Cuadro 4 , se muestran los resultados obtenidos de las granulometrías iniciales. En todos los casos se obtiene un material compuesto por agregado fino y agregado grueso, en el caso de las baldosas prefabricadas y pared de mampostería se obtuvieron partículas alargadas mayores a 19 mm por la forma semicónica del canal de ingreso del quebrador, además en el proceso de trituración el material de pega de los bloques de mampostería se separaba del bloque, pero no se quebraba resultando en partículas grandes de espesor reducido (ver Figura 14). Por otra parte, en los tres casos el material que salió del quebrador contenía no solo agregado grueso si no también agregado fino y material más fino que la malla N°200.

La fuente que más porcentaje de material pasando la malla N°200 obtuvo en la granulometría preliminar fue la pared de mampostería con 4.89 % y el menor el concreto colado en sitio con 0.93 %, lo ideal es que este valor sea cero ya que partículas de 0.075 mm o menos absorben gran cantidad de agua de mezcla afectando las resistencia y durabilidad del concreto.

Otro aspecto importante que llevo a corregir la granulometría fue el módulo de finura. Este valor se obtiene al sumar los porcentajes retenidos entre 100, las mallas que se incluyen en esta sumatoria son: No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ ". En el agregado de baldosas prefabricadas se obtuvo un módulo de finura de 6.25, para el agregado de pared de mampostería 6.39 y para el agregado de concreto colado en sitio 6.15. Los valores de módulo de finura recomendados para agregados utilizados en concretos estructurales varía entre 2.35 y 3.15. Todos los módulos de finura dieron muy por encima de este rango (Roncalia, 2017).

Cuadro 2 . Granulometría inicial pared de baldosas prefabricadas trituradas

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018			
						% Pas Tamaño No. 6	% Pas Tamaño No. 67		
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100	100	100		
1"	25,0	187,0	3	3	97	100	100		
3/4"	19,0	583,5	11	14	86	90-100	90-100		
1/2"	12,5	1613,1	30	44	56	20-55	-		
3/8"	9,50	690,1	13	57	43	0-15	20-55		
Nº 4	4,750	1046,2	19	77	23	0-5	0-10		
Nº 8	2,360	580,8	11	87	13	0	0-5		
Nº 16	1,180	311,0	6	93	7	0	0		
Nº 30	0,600	168,7	3	96	4	0	0		
Nº 50	0,300	93,3	2	98	2	0	0		
Nº100	0,150	56,7	1	99	1	0	0		
Nº200	0,075	34,7	1	100	0	0	0		
Charola		17,81							
% Lavado malla 200		4,89							
Modulo de finura		6,25							

Cuadro 3 . Granulometría inicial pared de mampostería triturada

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018			
						% Pas Tamaño No. 6	% Pas Tamaño No. 67		
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100	100	100		
1"	25,0	49,9	1	1	99	100	100		
3/4"	19,0	757,4	15	16	84	90-100	90-100		
1/2"	12,5	1780,8	35	51	49	20-55	-		
3/8"	9,50	661,1	13	64	36	0-15	20-55		
Nº 4	4,75	863,0	17	81	19	0-5	0-10		
Nº 8	2,36	432,6	8	89	11	0	0-5		
Nº 16	1,18	244,1	5	94	6	0	0		
Nº 30	0,60	146,6	3	97	3	0	0		
Nº 50	0,30	82,1	2	98	2	0	0		
Nº100	0,15	47,1	1	99	1	0	0		
Nº200	0,075	26,8	1	100	0	0	0		
Charola		5,4							
% Lavado malla 200		3,41							
Modulo de finura		6,39							

Cuadro 4 . Granulometría inicial concreto colado en sitio triturado

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018	
						% Pas Tamaño No. 6	% Pas Tamaño No. 67
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100	100	100
1"	25,0	0,0	0	0	100	100	100
3/4"	19,0	355,2	7	7	93	90-100	90-100
1/2"	12,5	1226,5	25	33	67	20-55	-
3/8"	9,50	945,7	20	52	48	0-15	20-55
Nº 4	4,750	1245,9	26	78	22	0-5	0-10
Nº 8	2,360	475,2	10	88	12	0	0-5
Nº 16	1,180	296,1	6	94	6	0	0
Nº 30	0,600	153,9	3	97	3	0	0
Nº 50	0,300	79,9	2	99	1	0	0
Nº100	0,150	39,1	1	100	0	0	0
Nº200	0,075	17,2	0	100	0	0	0

Charola	4,3
% Lavado malla 200	0,93
Modulo de finura	6,15



Figura 14. Material de pega bloques de mampostería

De las granulometrías iniciales se observa que ninguno de los materiales cumplió en su totalidad con los porcentajes pasando recomendados para la elaboración de concreto con tamaño máximo nominal de 19 mm, establecidos en la INTE C15:2018 (ASTM C33:2018). Por esta razón se separó y remezcló el material de cada fuente por separado, para obtener un agregado con una granulometría controlada en este caso la granulometría No.6 descrita en la INTE C15:2018 (ASTM C33:2018). Se escogió esta graduación por ser la misma que tiene el agregado natural que se muestra en el Cuadro 5 .

Cuadro 5 . Granulometría agregado grueso natural, fuente Cerro Minas.

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 % Pas Tamaño No.6
3/4"	19,0	0,0	0	0	100	90-100
1/2"	12,5	2501,5	50	50	50	20-55
3/8"	9,50	2012,0	40	89	11	0-15
Nº 4	4,75	494,1	10	99	1	0-5

Charola	37,6
% Lavado malla #200	0,38
Modulo de finura	2,38

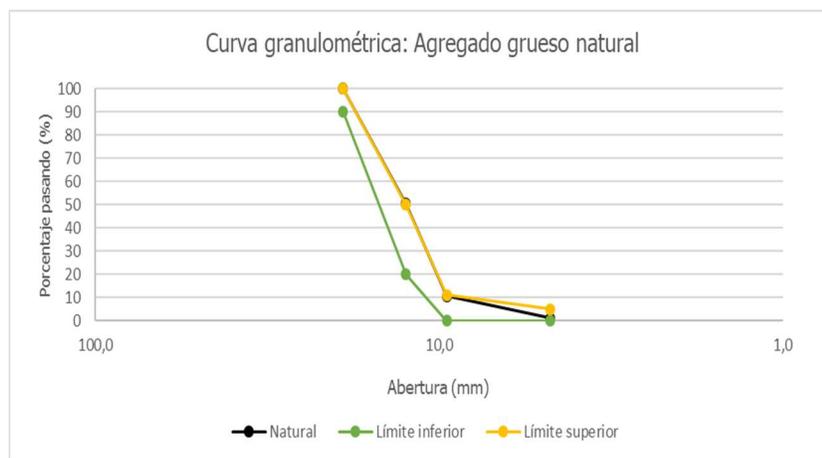


Figura 15. Curva granulométrica agregado grueso natural

En el *Cuadro 6* se muestra los resultados de la granulometría realizada al agregado reciclado de la fuente baldosas prefabricadas, el porcentaje de material pasando la malla de 3/8" está ligeramente por encima del límite superior, esto a pesar de que se mezclaron las cantidades necesarias para cumplir con ambos límites. Uno de los motivos es la degradación del material durante el proceso de mezcla, cuarteo y tamizado, esta hipótesis se valida al obtener un 3% de material retenido en la charola.

Cuadro 6 . Granulometría corregida baldosas prefabricadas trituradas

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 %Pas Tamaño No.6
3/4"	19,0	0,0	0	0	100	90-100
1/2"	12,5	2799,4	48	48	52	20-55
3/8"	9,50	1943,3	34	82	18	0-15
Nº 4	4,75	874,3	15	97	3	0-5

Charola	174,5
% Lavado malla #200	0,20
Modulo de finura	2,27

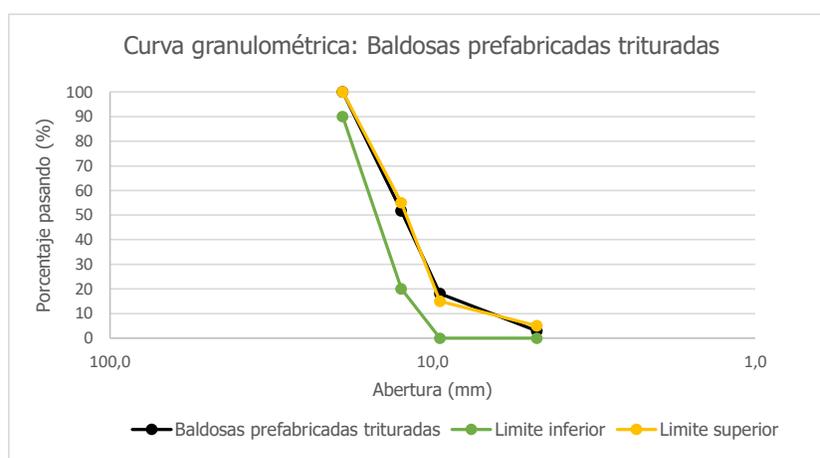


Figura 16. Curva granulométrica corregida baldosas prefabricadas trituradas

Los resultados de las granulometrías realizadas a los agregados reciclados de las fuentes pared de mampostería y concreto colado en sitio se muestran en el Cuadro 7 y Cuadro 8 en ambos casos los porcentajes pasando están dentro de los límites recomendados en la norma INTE C15:2018 (ASTM C33:2018) para la elaboración de concreto.

Con los porcentajes pasando obtenidos y los porcentajes pasando límite se grafica la curva granulométrica para cada material (ver Figura 16, Figura 17, Figura 18), de esta manera es más sencillo visualizar la distribución granulométrica del agregado. En todos los casos se observa como la curva se pega con el límite superior, lo que era de esperarse por el diseño granulométrico que se escogió para tratar de igual la granulometría del agregado natural disponible (ver Figura 15), a pesar de estar pegada al límite superior se mantiene una distribución continua por lo que se consideran aceptables.

Cuadro 7 . Granulometría corregida pared de mampostería triturada

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 %Pas Tamaño No.6
3/4"	19,0	0,0	0	0	100	90-100
1/2"	12,5	2734,3	49	49	51	20-55
3/8"	9,50	2022,6	36	85	15	0-15
Nº 4	4,75	752,0	13	98	2	0-5

Charola	113,4
% Lavado malla #200	0,25
Modulo de finura	2,31

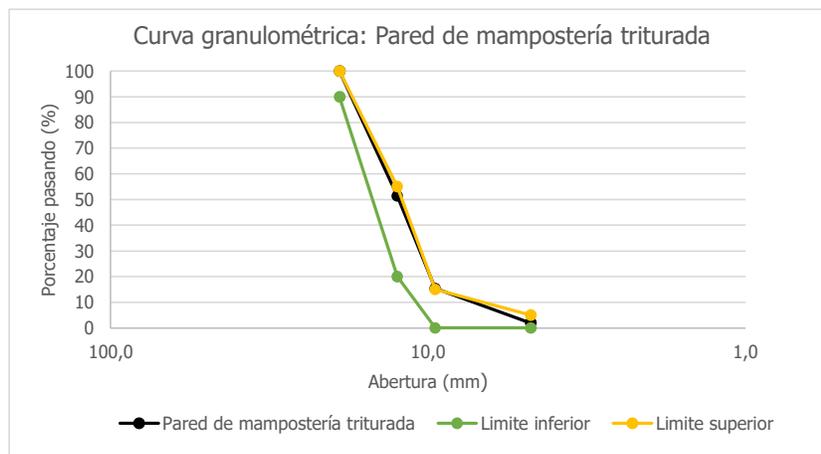


Figura 17. Curva granulométrica corregida pared de mampostería triturada

Cuadro 8. Granulometría corregida concreto colado en sitio triturado

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 %Pas Tamaño No.6
3/4"	19,0	7,6	0	0	100	90-100
1/2"	12,5	2834,9	52	53	47	20-55
3/8"	9,50	1955,0	36	89	11	0-15
Nº 4	4,75	535,2	10	99	1	0-5

Charola	74,2
% Lavado malla #200	0,27
Modulo de finura	2,40

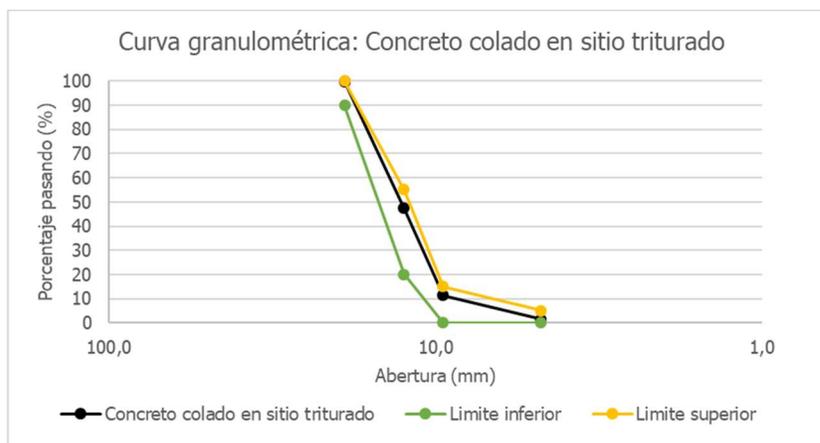


Figura 18. Curva granulométrica corregida concreto colado en sitio triturado

4.4.2. Gravedad específica y absorción: agregado grueso reciclado y agregado grueso natural

Después de verificar que los materiales cumplieran con la granulometría escogida se vuelve a cuartear cada material hasta obtener una muestra mínima de 3 kg para determinar la gravedad específica y la absorción del agregado reciclado siguiendo la norma INTE C68:2016 (ASTM C127:2015). En este ensayo se obtiene la masa de cada muestra seca, la masa del material saturado y la masa de la muestra superficie saturado seca, de esta forma se determina la densidad relativa (gravedad específica) seca al horno (Gbs), densidad relativa (gravedad específica) superficie saturada seca (Gbss), densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (Gs).

En el Cuadro 9 se muestran la densidades relativas y la absorción de los materiales reciclados y del agregado natural, los resultados obtenidos en los agregados reciclados son muy similares entre sí, pero en comparación con el agregado natural, presentan mayor absorción y menor densidad, este comportamiento ocurre por la alta capacidad absorción del cemento y mortero endurecido adherido a la superficie del agregado reciclado y las grietas ocasionadas durante el momento de trituración (Bazalar La Puerta y Cadenillas, 2019).

Beltrán (2014) realizó una recopilación de información con respecto al agregado reciclado, en la que destaca que la gravedad específica de los agregados reciclados varía según la fuente del material y el tamaño del agregado reciclado, con valores de Gbs entre 2,20 – 2,47 para agregados de tamaño máximo nominal de 19 mm, siempre por debajo de la Gbs obtenida del agregado natural, lo que concuerda con los resultados obtenidos en la presente investigación. Con respecto a los valores de absorción, Kosmatka et al (2004) menciona que para los

agregados reciclados varía entre 3% - 10%, el promedio de los resultados obtenidos es de 8.8%, hay que recordar que valores altos de absorción afectan la cantidad de agua añadida a la mezcla.

En una investigación realizada a nivel nacional, Poveda (2008) determinó las propiedades físicas y mecánicas de la trituración de bloques de mampostería. Para este material obtuvo un valor de Gbs de 2.30 y una absorción de 6.9 % para un agregado reciclado de tamaño máximo nominal de 19 mm. Los resultados no son iguales a los obtenidos en la presente investigación, la principal variable que pudo influir es que en la investigación realizada por Poveda se utilizan residuos de bloques de mampostería por si solos y no una pared de mampostería, la cual contiene otros materiales como mortero de pega y concreto de relleno.

Cuadro 9. Densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.

Material	Gravedad específica			Absorción (%)
	Gs	Gbs	Gbss	
Natural	2,80	2,66	2,71	1,8
Baldosas prefabricadas	2,71	2,18	2,38	8,9
Pared de mampostería	2,70	2,19	2,38	8,8
Concreto colado en sitio	2,68	2,18	2,36	8,6

4.4.3. Peso unitario y razón de vacíos

Después de obtener los valores de gravedad específica de los agregados reciclado se obtiene una muestra de 5 kg por el método de cuarteo para determinar el peso unitario y la razón de vacíos del agregado, para ello se siguió el procedimiento de envarillado descrito en la norma INTE C58:2013 (ASTM C29:2009). Los datos que se obtienen durante la ejecución del ensayo son masa de muestra y volumen del recipiente, al dividir la masa entre el volumen se obtiene el peso unitario en kg/m^3 del material, con el valor del peso unitario y el Gbs se determina la razón de vacíos. El ensayo se repite 3 veces y se reportan los valores promedio obtenidos de peso unitario y razón de vacíos.

Cuadro 10 . Peso unitario y razón de vacíos del agregado grueso.

Material	Peso Unitario Envarillado		Razón de vacíos Envarillado	
	Promedio (kg/m ³)	Desv. estandar	Promedio (%)	Desv. Estandar
Natural	1534	2,27	42	0,09
Baldosas prefabricadas	1175	5,92	50	0,25
Pared de mampostería	1205	1,56	45	0,07
Concreto colado en sitio	1224	2,65	44	0,12

En el Cuadro 10 se observa como los valores promedios de peso unitario envarillado de los agregados gruesos reciclados son menores en comparación con el agregado natural. Sin embargo, tanto los agregados gruesos reciclados como el agregado grueso natural se pueden clasificar como agregados de peso normal, por tener un peso unitario entre 1120 kg/cm³ – 1900 kg/cm³ (Fernández & Salas, 2002). Por otra parte, las razones de vacíos de los AGR están por encima del valor obtenido del agregado grueso natural. La razón de vacíos para los agregados de origen natural varía entre 30% y 45%, con forme incrementa este valor mayor será el requerimiento de pasta en el diseño de mezcla. La razón de vacíos está asociada con la forma de las partículas y la graduación del material, agregados con muchos ángulos y mal graduados van a aumentar la razón de vacíos, esto se observa en el agregado grueso reciclado de Baldosas prefabricadas cuya granulometría no estaba por completo dentro de los límites recomendados (Kosmatka et al, 2004).

4.4.4. Resistencia a la abrasión

Otra propiedad mecánica importante del agregado grueso reciclado es la resistencia a la abrasión o desgaste, esta depende por completo de la fuente del agregado. Para determinar el desgaste de los AGR y el AGN se toma una muestra por el método de cuarteo de 2.5 kg de agregado de 1/2" y 2.5 kg de agregado de 3/8" y se sigue el procedimiento B de la norma INTE C64:2017 (ASTM C131:2014) para agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm. Se introduce el material en la máquina de Los Ángeles y se continúa con el procedimiento descrito en la norma, por último, se determina la masa de muestra final lavada y seca, que se compara con la masa inicial y así obtener el porcentaje de desgaste del material.

Los porcentaje de desgaste de los agregado grueso reciclado y del agregado natural se muestran en el Cuadro 11 , los porcentajes de desgaste de lo agregado grueso reciclado están

por encima del obtenido del agregado natural. Al ser los agregados reciclados un material formado por un conglomerado de partículas se vuelve más susceptible al desgaste. El mayor porcentaje se obtuvo del agregado grueso reciclado fuente pared de mampostería cuyo resultado es 115% mayor al del agregado natural.

Cuadro 11 . Desgaste del agregado grueso, utilizando la máquina de Los Ángeles.

Material	Tipo de abrasión	Tamaño máximo nominal	Desgaste (%)
Natural	B	19,0 mm	20
Baldosas prefabricadas	B	19,0 mm	40
Pared de mampostería	B	19,0 mm	43
Concreto colado en sitio	B	19,0 mm	37

Es importante mencionar que los agregados gruesos reciclados ensayados de las tres diferentes fuentes no exceden el 50 % de desgaste, valor máximo recomendado en la norma INTE C64:2017 (ASTM C131:2014) para la elaboración de concreto.

4.5. Propiedades físicas y mecánicas agregado fino natural

En la presente investigación solo se utilizó agregado fino natural proveniente del Río Chirripó. No se utilizó agregado fino reciclado debido a la poca disponibilidad de material que no permitía tener las cantidades necesarias para caracterizar el material. Esta situación se presentó en las tres fuentes de material en estudio.

Para realizar el diseño de mezcla y verificar el cumplimiento del material se realizó el análisis granulométrico siguiendo el procedimiento descrito en la norma INTE C49:2018 (ASTM C136:2017). Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 12. La graduación del agregado fino no es la más óptima, su módulo de finura es elevado por lo que se puede considerar un agregado fino grueso, además contiene más material retenido en la malla No.8 del recomendado, sin embargo, por disponibilidad y por la distribución continua que presenta (ver Figura 19) se decide utilizar este material de forma directa.

Cuadro 12. Granulometría agregado fino natural, fuente Río Chirripó

Malla No.	Abertura (mm)	Masa Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Ac.	% Pas.	ASTM C33:2018 %Pas Tamaño No.6
N° 4	4,750	10,2	2	2	98	95-100
N° 8	2,360	105	20	22	78	80-100
N° 16	1,180	126,2	24	45	55	50-85
N° 30	0,600	132,1	25	70	30	25-60
N° 50	0,300	94,3	18	88	12	5-30
N°100	0,150	44,3	8	96	4	0-10
N°200	0,075	14,9	3	99	1	0-3

Charola	7,5
Modulo de finura	3,22

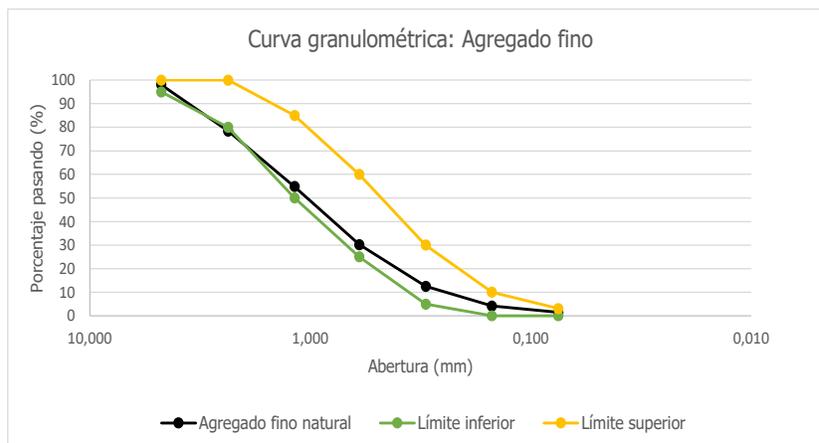


Figura 19. Curva granulométrica agregado fino

Como parte de la caracterización del agregado fino natural se determinó la gravedad específica bruta (G_b), gravedad específica superficie saturada seca (G_{bss}), gravedad específica aparente (G_s) y la absorción, todas las anteriores siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C128. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 13, todos los valores obtenidos están dentro de los rangos normales, con excepción del porcentaje de absorción del agregado fino el cual es alto, este normalmente ronda entre 0.2% y 2% y va a afectar el contenido de agua en la mezcla (Kosmatka et al, 2004).

Cuadro 13. Gravedad específica agregado fino natural

Gravedad específica			Absorción (%)
Gs	Gbs	Gbss	
2,66	2,33	2,45	5,4

4.6. Densidad del cemento

Para la elaboración de todo el concreto se utilizó cemento hidráulico Holcim Fuerte de uso general. En la ficha técnica del producto indica una resistencia a la compresión de 28 MPa, apropiado para elementos estructurales.

Como parte de la caracterización de materiales necesaria para el diseño de mezcla se determinó la densidad del cemento siguiendo el procedimiento descrito en la norma INTE C141:2018 (ASTM C188:2017), el valor obtenido fue de 2.9 g/cm³ (ver *Cuadro 14*).

Cuadro 14 . Densidad del cemento

Peso cemento (g)	Volumen inicial (mL)	Volumen final (mL)	Volumen desplazado (mL)	Densidad (g/cm ³)
64,10	0,80	22,90	22,10	2,90

4.7. Diseño de Mezcla

En la presente investigación se desea conocer el comportamiento de los agregados reciclado en nuevos concreto y como afecta la resistencia del concreto al aumentar la cantidad de agregado reciclado en la mezcla, para ello se escogieron tres combinaciones:

- 30% de agregado reciclado y 70% de agregado natural,
- 50% de agregado reciclado y 50% de agregado natural,
- 100% de agregado reciclado.

Todos los diseños de mezcla se realizaron para obtener una resistencia a la compresión del concreto a 28 días de 210 kg/cm², con el fin de poder determinar si el concreto con agregado reciclado cumple con la resistencia mínima permitida para la elaboración de elementos estructurales de concreto reforzado según el Código Sísmico de Costa Rica CSCR-2010.

El método utilizado para todos los diseños de mezcla es el de American Concrete Institute (ACI). Con el tamaño máximo nominal del agregado y el revenimiento seleccionado se determina la cantidad de agua para la mezcla, seguido se define la cantidad de cemento a partir de la relación agua/cemento (a/c). Con el módulo de finura de la arena se determinan los volúmenes de agregado grueso tanto natural como reciclado. Por último, se calcula el volumen de agregado fino necesario para obtener un metro cúbico de concreto (American Concrete Institute, 2019).

Al utilizar parámetros propios de los agregados reciclados y naturales se obtienen diferentes diseños de mezcla para cada material y cada porcentaje de agregado reciclado. En el Cuadro 15 se muestran la proporción por peso seco de los diferentes diseños de mezcla realizados. En las proporciones por peso seco no se presentan diferencias significativas, sin embargo, como se mencionó anteriormente los agregados reciclados tienen absorciones altas, además la arena se encontraba a la intemperie, por estas razones fue necesario hacer las correcciones por humedad y absorción de los agregados, con estos nuevos valores se determina la proporción corregida (Cuadro 16) y la dosificación por peso de cada mezcla (ver Cuadro 15). Esta corrección permite dosificar una cantidad adicional de agua para que el agregado alcance la condición superficie saturada seca y no absorba el agua de mezcla necesaria para que el cemento reaccione o por el contrario conociendo el agua libre presente en el agregado se dosifique una cantidad menor de agua de forma tal que no se afecte la trabajabilidad de la mezcla.

Cuadro 15. Proporción por peso seco

Combinación	Cemento	Arena	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado	Agua /Cemento
100 % Natural	1	1,7	2,2	0,0	0,45
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural	1	1,8	1,6	0,5	0,45
30% Pared de mampostería 70 % Natural	1	1,8	1,6	0,5	0,45
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	1	1,8	1,6	0,5	0,45
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural	1	1,8	1,1	0,9	0,45
50% Pared de mampostería 50 % Natural	1	1,8	1,1	0,9	0,45
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	1	1,8	1,1	0,9	0,45
100% Baldosas prefabricadas	1	1,9	0,0	1,7	0,45
100% Pared de mampostería	1	1,8	0,0	1,8	0,45
100% Concreto colado en sitio	1	1,8	0,0	1,8	0,45

Para identificar los especímenes cilíndricos y evitar confusiones al momento de la falla se estableció una nomenclatura para etiquetar los cilindros de cada muestra. La nomenclatura está compuesta por la inicial del material utilizado, seguido el número de mezcla realizado y por último el porcentaje de agregado reciclado utilizado, excepto la mezcla con agregado natural (patrón) que se indica el porcentaje de agregado natural. A continuación, se describe la letra inicial de cada material:

- Agregado grueso natural (N),
- Agregado grueso reciclado de baldosas prefabricadas (B),
- Agregado grueso reciclado concreto colado en sitio (C),
- Agregado grueso reciclado pared de mampostería (M).

Cuadro 16. Proporción corregida por absorción y humedad del agregado

Combinación	Muestra No.	Cemento	Arena	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado
100 % Natural	N3 100%	1	1,8	2,3	0,0
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B1 30% y B2 30%	1	1,9	1,6	0,5
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B3 30%	1	1,9	1,6	0,5
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M1 30% y M2 30%	1	1,9	1,6	0,5
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C1 30% y C2 30%	1	1,9	1,6	0,6
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C3 30%	1	1,8	1,6	0,6
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B1 50%	1	1,9	1,1	0,9
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B2 50%	1	1,9	1,1	0,9
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M1 50% y M2 50%	1	1,9	1,1	0,9
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C1 50%	1	1,8	1,1	0,9
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C2 50%	1	1,8	1,1	0,9
100% Baldosas prefabricadas	B1 100%	1	2,0	0,0	1,7
100% Baldosas prefabricadas	B2 100%	1	2,0	0,0	1,7
100% Pared de mampostería.	M1 100%	1	1,9	0,0	1,8
100% Pared de mampostería	M2 100%	1	1,9	0,0	1,8
100% Concreto colado en sitio	C1 100% y C2 100%	1	1,8	0,0	1,8

Es importante resaltar que no todas las mezclas de concreto se realizaron el mismo día, por esta razón la proporción corregida para una misma combinación va a variar según las condiciones de humedad en que se encuentre el agregado el día en que se elabore el concreto. Para determinar la humedad del agregado se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C71:2020 (ASTMC566:2019). Primero se tomó una muestra de cada material, se determinó su

masa, después se lleva al horno a 110°C hasta obtener masa constante, de esta forma se determina el porcentaje de humedad de los agregados.

En las mezclas B2 30%, B3 50%, C1 50% y B1 100% que se muestran en el Cuadro 16 se dosifico más agua de la establecida en el diseño de mezcla, ya que presentaba un asentamiento por debajo de los 40 mm, que difería significativamente al de las demás mezclas, por lo cual se procedió a añadir una cantidad adicional de agua y a medir nuevamente el asentamiento.

4.8. Concreto en estado fresco

Con la dosificación lista se procede a elaborar 9 especímenes cilíndricos por cada mezcla de concreto de 100 mm x 200 mm. Cada una de las mezclas se realizó en una batidora pequeña con ayuda del personal técnico del Lanamme. Se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C18:2016 (ASTM C192), pero con una modificación en el orden en que se agregan los materiales. La modificación consiste en agregar 60% de agua en el primer minuto junto con los agregados de forma tal que el agregado reciclado pueda absorber agua y alcanzar la condición superficie saturada, pasado el primer minuto se adiciona el cemento y se mezcla por dos minutos más, seguido se deja reposar por tres minutos y en los dos minutos siguientes se vuelve a mezclar y se agrega el otro 40% del agua. Otra ventaja de realizarse esta manera la mezcla es que se disminuye la abrasión del agregado reciclado y la generación de polvo.

Poveda (2008) realizó esta misma modificación en el proceso de elaboración de las mezclas de concreto, los primeros en observar este comportamiento en las mezclas de concreto con agregado reciclado fueron Tam WYV, Gao XF y Tam CM en el artículo "Análisis micro-estructural de concreto con agregados reciclados producido mediante la Mezcla de Dos Etapas, 2006", los cuales denominaron a esta procedimientos como "Two Stage Mixing".

Para medir las características del concreto fresco y como un indicio de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto se determinó el asentamiento del concreto, la temperatura y la relación agua/cemento, estos resultados se muestran en el Cuadro 17 . Además, se determinó el contenido de aire y el peso unitario de algunas de las mezclas, estas pruebas no se realizaron en todas las mezclas por disponibilidad del material, pero se hicieron al menos dos pruebas por tipo de material (ver Cuadro 18).

Cuadro 17. Asentamiento, temperatura y relación agua/cemento del concreto en estado fresco.

Combinación	Muestra No.	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	A/C
100 % Natural	N3 100%	103	20,8	0,50
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B1 30%	43	24,1	0,53
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B2 30%	50	21,7	0,48
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B3 30%	72	22,5	0,50
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M1 30%	72	23,4	0,49
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M2 30%	60	22,8	0,49
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C2 30%	90	23,2	0,49
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C3 30%	83	22,2	0,51
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B1 50%	91	24,1	0,51
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B2 50%	80	22,9	0,58
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M1 50%	95	23,0	0,51
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M2 50%	95	22,7	0,51
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C1 50%	78	23,3	0,55
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C2 50%	70	23,2	0,50
100% Baldosas prefabricadas	B1 100%	90	23,3	0,56
100% Baldosas prefabricadas	B2 100%	76	23,4	0,52
100% Pared de mampostería.	M1 100%	89	22,0	0,55
100% Pared de mampostería	M2 100%	79	22,6	0,59
100% Concreto colado en sitio	C1 100%	76	23,4	0,53
100% Concreto colado en sitio	C2 100%	76	22,2	0,53

Cuadro 18. Peso unitario y contenido de aire del concreto en estado fresco

Combinación	Muestra No.	Peso unitario (kg/m ³)	Contenido de aire (%)
100 % Natural	N3 100%	2465	1,3
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural	B3 30%	2395	1,5
30% Pared de mampostería 70 % Natural	M2 30%	2415	1,5
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C3 30%	2409	1,3
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M2 50%	2377	1,6
100% Baldosas prefabricadas	B2 100%	2312	1,9
100% Pared de mampostería	M2 100%	2303	1,9
100% Concreto colado en sitio	C2 100%	2300	1,9

4.8.1. Asentamiento de las mezclas de concreto

El asentamiento del concreto es una de las pruebas realizadas para ver la trabajabilidad, consistencia y plasticidad de la mezcla. Para realizar esta medición se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C41:2017 (ASTM C143). En esta prueba se coloca el concreto en el cono de Abrams como se especifica en la norma, se levanta el cono e inmediatamente se mide cuanto se asienta el concreto (ver Figura 20).

Malešev, Radonjanin y Bróceta (2014) en su investigación sobre las propiedades del concreto con agregados reciclados menciona como el uso de áridos reciclados secos disminuye la fluidez de la mezcla, principalmente por la absorción, la forma y textura de los agregados reciclados, sin embargo, al utilizar agregados reciclados secos con superficie saturada se pueden obtener mezclas con consistencia similares a las convencionales.



Figura 20. Asentamiento en el concreto mediante el Cono de Abrams

El asentamiento del concreto va a variar según el elemento a construir, sin embargo, por lo general se encuentra entre 50 y 100 mm. Mezclas de concreto con valores por debajo de 50 mm serán muy rígidas, por el contrario, si el asentamiento está por encima de 100 mm será una mezcla muy fluida que puede provocar segregación del agregado, en ambos casos la trabajabilidad disminuye y se afecta la resistencia del elemento (Kosmatka et al, 2004).

En el Cuadro 17 se observa como la mayoría de asentamientos de las mezclas con concreto reciclado presentan resultados entre 70 mm y 90 mm. Con este parámetro de acuerdo con el Instituto Costarricense del Cemento y Concreto se pueden clasificar como mezclas blandas (ICCYC, 2009). Además, se observa como están ligeramente por debajo del al valor obtenido de la mezcla patrón realizada con agregado 100% natural.

Dos mezclas presentaron asentamientos de 50 mm y 43 mm cuyos resultados son producto de no haber curado el Cono de Abrams y el carretillo, estas mezclas no son descartadas por que presentaron valores de resistencia normales los cuales serán analizados en incisos posteriores.

4.8.2. Temperatura

Otra de las variables importantes en las mezclas de concreto es la temperatura. Esta se afecta principalmente por la temperatura de los agregados y del agua. Agregados a la intemperie en sitios con altas temperaturas van a aumentar la temperatura de la mezcla. Para medir la temperatura del concreto se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C43:2018 (ASTM C1064:2017), se coloca en un recipiente el concreto y se introduce el sensor de temperatura, se deja por un periodo de entre 2 y 5 min y se toma la lectura, en la Figura 21 se muestra una de las tomas de temperatura realizadas.

Concretos con temperaturas por encima de los 30°C puede presentar afectación en la trabajabilidad, propensión de contracción por secado, agrietamiento por diferencial de temperatura, acabado superficial poco uniforme. Además, la temperatura del concreto afecta el contenido de aire de la mezcla, a mayor temperatura menor contenido de aire (ICCYC y CFIA, 2007)



Figura 21. Temperatura del concreto fresco

Todas las temperaturas de las mezclas de concreto se encontraron dentro de los rangos normales. Algunos casos se incrementan principalmente por la temperatura del agregado fino el cual se encontraba a la intemperie.

4.8.3. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento o agua/material cementante abreviada como a/c es una proporción entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento dosificado. Es uno de los factores principales que determinan la resistencia de la mezcla, a mayor relación agua/cemento mayor será la plasticidad de la mezcla, pero la resistencia del concreto va a disminuir, por los vacíos que crea el agua libre. Sin embargo, si la relación a/c es menor a la necesaria va a disminuir la resistencia de la mezcla, debido a que el agregado va a absorber el agua necesaria para la hidratar la pasta de cemento (Kosmatka et al, 2004)

La relación a/c teórica para todas las mezclas es de 0,45 , este valor no contempla la condición de humedad y absorción de los agregados. En el Cuadro 17 se muestran como la relación a/c real de la mezcla con agregado natural y las mezclas con 30% de agregado reciclado tienen valores similares, además se observa como con forme aumenta la cantidad de agregado reciclado incrementa la relación a/c, esto ocurre por la alta porosidad presente en el agregado reciclado (Hoffmann et al, 2012).

4.8.4. Peso unitario del concreto fresco

El peso unitario o densidad del concreto es directamente proporcional al peso de los agregados, por tanto, con forme se adiciona mayor cantidad de agregado reciclado menor será el peso unitario de la mezcla.

Para determinar el peso unitario del concreto fresco se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C72:2018 (ASTM C138). En la Figura 22 se muestra parte del procedimiento seguido para determinar el peso unitario del concreto fresco, el cual consta de rellenar el molde cilíndrico con concreto, apisonar, enrasar y tomar la masa de la muestra.



Figura 22. Determinación del peso unitario del concreto fresco

Los valores de densidad para los concretos frescos normales varían entre 2200 kg/m^3 y 2400 kg/m^3 . Este valor puede disminuir entre 1% y 5% en concretos con agregados grueso reciclado y agregado fino natural (Malešev et al, 2014). En el Cuadro 18 se muestran los valores de peso unitario obtenidos, todas las densidades se pueden clasificar como normales, son una ligera disminución en la muestra con 100 % de agregado reciclado.

4.8.5. Contenido de aire

El contenido de aire es el porcentaje de aire atrapado en el concreto, para determinarlo se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C42:2017 (ASTM C231M), utilizando una cámara de aire vertical como se muestran en la *Figura 23*. El apartado 6 de la norma indica la determinación del factor de corrección del agregado esto no se realizó.



Figura 23 . Cámara de aire vertical

Uno de los factores que afectan el contenido de aire es la forma, el tamaño y la superficie del agregado grueso. Las mezclas con agregados angulosos con textura áspera como la que tienen los agregados gruesos reciclados presentarán mayor contenido de aire (Poveda, 2008).

Conforme se aumente el porcentaje de agregado reciclado en la mezcla mayor será el contenido de aire que puede contrarrestarse con un aumento en el contenido de cemento. Concretos con alto contenido de aire presentan texturas ásperas, menos cohesivas y tienen una exudación más alta (Bazalar La Puerta y Cadenillas, 2019).

El contenido de aire de concretos normalmente varía entre 1% y 3%, en el Cuadro 18 se muestra como todas las mezclas se encuentran dentro del rango esperado, con un incremento en las mezclas que tienen 100% de agregado grueso reciclado (Caycho y Rodríguez, 2009).

4.9. Resistencia a la compresión de los cilindros de prueba

En los apartados anteriores se determinaron las características de los agregados reciclados y el comportamiento del concreto en estado fresco, sin embargo, la característica más importante en conjunto con la durabilidad del concreto, es la resistencia a la compresión, esto permitirá determinar posibles usos de la mezcla.

Se elaboraron en total 180 cilindros de 100 mm x 200 mm siguiendo el procedimiento descrito en la norma INTE C18:2016 (ASTM C192). Por cada colada se realizaron 9 cilindros para fallar 3 cilindros a 7 días, 3 cilindros a 14 días y 3 cilindros a 28 días. En la Figura 24 se muestran algunos de los cilindros elaborados, estos se protegen durante las primeras 24 horas de la pérdida de humedad.

Todos los cilindros se curaron en la cámara húmeda desde que se desmoldaron hasta el momento de la falla. Previo a la prueba de resistencia a la compresión todos los cilindros se coronaron en la parte superior y en caso de que la parte inferior presentara alguna imperfección también, de esta forma se provee de una superficie plana, para la prueba esto se realizó siguiendo el procedimiento de la norma INTE C16:2017 (ASTM C617).

Con los especímenes pulidos se procede a ejecutar el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, norma INTE C39:2018 (ASTM C39). Primero se verificó el cumplimiento de la perpendicularidad y planicidad de los especímenes cilíndricos, todos los cilindros cumplieron con ambas características. El siguiente paso fue tomar dos lecturas de diámetro y tres lecturas de longitud que luego se promediaron. Finalmente se coloca los

especímenes en la máquina de ensayo que se muestra en la Figura 25 y se aplica la carga hasta que el espécimen falla.



Figura 24 . Especímenes cilíndricos de concreto



Figura 25. Maquina ensayo resistencia a la compresión

En el Cuadro 19 se muestran las resistencias promedio y la desviación estándar obtenida por cada combinación, además se muestran los resultados obtenidos de la muestra patrón la cual contiene agregado 100 % de origen natural. En los cilindros de las tres fuentes se presentó una disminución de la resistencia con el aumento del porcentaje de agregado grueso utilizado.

Cuadro 19. Resistencia a compresión de los especímenes a 7, 14 y 28 días

Combinación	Resistencia promedio 7 días		Desviación Estandar		Resistencia promedio 14 días		Desviación Estandar		Resistencia promedio 28 días		Desviación Estandar	
	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)
100 % Natural	21,9	223	-	-	26,2	267	-	-	32,6	332	-	-
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural	21,4	218	2,06	21,0	25,9	264	2,40	24,5	31,0	316	2,46	25,1
30% Pared de mampostería 70 % Natural	22,6	231	0,78	7,91	27,7	283	1,70	17,3	32,8	335	0,68	6,95
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	20,2	206	0,73	7,44	25,1	256	0,86	8,73	30,0	305	1,31	13,4
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural	20,1	205	0,29	2,99	24,6	251	0,11	1,14	28,7	292	0,93	9,50
50% Pared de mampostería 50 % Natural	19,8	201	0,65	6,64	24,3	248	0,83	8,46	29,7	303	0,27	2,71
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	20,0	204	1,38	14,1	24,6	251	0,37	3,75	29,4	300	0,96	9,79
100% Baldosas prefabricadas	17,0	173	0,95	9,73	20,7	211	0,50	5,08	24,6	251	0,62	6,35
100% Pared de mampostería	18,4	187	1,09	11,1	23,5	240	0,38	3,87	28,2	287	1,18	12,0
100% Concreto colado en sitio	17,9	182	0,01	0,06	22,4	229	0,85	8,6	27,0	275	0,12	1,25

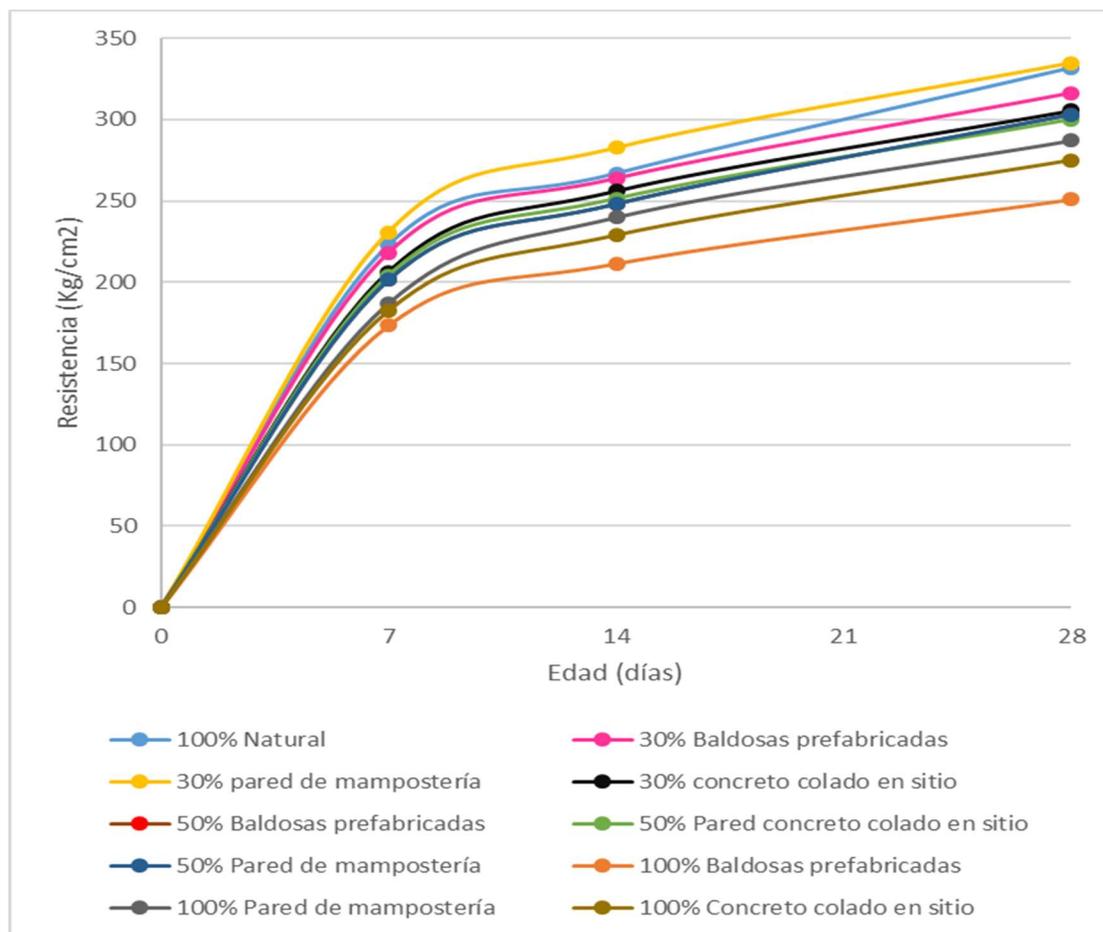


Figura 26. Resistencias a la compresión obtenidas a 7 , 14 y 28 días

A pesar de disminuir la resistencia al aumentar el porcentaje de agregado grueso reciclado, todas las mezclas con agregado grueso reciclado presentaron resistencias mayores a los 210 kg/cm², de igual forma cada espécimen sin promediar superó el valor de f'_c propuesto. La menor resistencia a 28 días fue de 251 kg/cm², y se obtuvo al utilizar 100% de agregado grueso reciclado de baldosas prefabricadas, esta resistencia es 24.4% menos que la resistencia a 28 días de la mezcla patrón con 100% agregado natural. Uno de los factores que pudo influir en que el agregado grueso reciclado de baldosas prefabricadas tuviera el menor valor de resistencia a 7 días es debido a que el tamaño máximo nominal del agregado grueso virgen utilizado en estos elementos es menor al tamaño máximo nominal utilizado en la presente investigación, esto significa que las partículas de agregado grueso reciclado van a tener un porcentaje mayor de pasta y menor porcentaje de árido virgen.

Por otra parte, las mezclas que contenían de agregado grueso reciclado de pared de mampostería dieron mayores resultados que las que contenían agregado grueso reciclado de concreto colado en sitio y baldosas prefabricadas. La combinación de 30% de agregado grueso reciclado de pared de mampostería dio una resistencia a 28 días de 0.8% por encima de la resistencia obtenida con 100% agregado grueso natural a la misma edad de falla. Una de las causas de este comportamiento es el contenido de piedra caliza proveniente de Nicoya en los bloques de mampostería. La piedra caliza formada bajo presiones altas es densa y muy resistente, con porcentajes de abrasión bajos (Cham et al, 2003).

En cuanto al comportamiento de la resistencia de las mezcla en el tiempo, en la Figura 26 se muestra como todas tiene una tendencia logarítmica esperable, con un desarrollo de resistencia con el paso del tiempo.

La desviación estándar de los resultados estuvo entre 0.82 kg/cm^2 y 25.1 kg/cm^2 , el promedio de todas las desviaciones a los 7 días fue de 9 kg/cm^2 , a los 14 días de 9 kg/cm^2 y a los 28 días 9.7 kg/cm^2 , la dispersión se mantuvo casi constante a lo largo del tiempo. Se puede calificar como buena la preparación del concreto cuando la desviación estándar de la resistencia a compresión es menor a 48 kg/cm^2 (Worgrin,1974).

Con respecto a la manera en que fallaron los cilindros, del total de especímenes realizados 7 presentaron falla tipo 4, 81 especímenes presentaron falla tipo 3 y la falla que más se presento fue de tipo 2 con 92 especímenes.

El tipo de falla 4 presenta una fractura en diagonal sin fisuras a través de los extremos, tal y como se muestra en la Figura 3 , este comportamiento es una falla típica por cortante y ocurre cuando la carga es aplicada en un punto o sector y no de forma distribuida, ya sea por tener la superficie irregular, no lograr la perpendicularidad de la cara del espécimen o una incorrecta alineación vertical del cilindro con la carga aplicada (Kosmatka et al, 2004). Esta falla errónea pasó únicamente en el 4% de las pruebas.

La falla de tipo 3 se muestran grietas verticales, este tipo de falla la presentaron el 45% de los especímenes. Este agrietamiento es normal y ocurre cuando hay una inapropiada distribución de las cargas (Cemex, s.f.).

Por último, la falla de tipo 2 se vio en el 52% de los especímenes, este tipo de falla tiene un comportamiento cónico - columnar, ocurre en especímenes que poseen una cara de aplicación convexa y/o por irregularidades en el plato de carga o la superficie del cilindro (Cemex, s.f.).

En una consulta al personal técnico del Laboratorio de concretos del Lanamme todos coinciden que tanto la falla 2, como la falla 3 son las más observadas en los ensayos realizados en el laboratorio, por tanto, se pueden considera representativas de la realidad nacional.

Todas las fallas que se presentaron pueden estar asociada a valores de carga máximos menores a los que realmente soporta el espécimen, para evitar esta situación se deben utilizar almohadillas de neopreno, las cuales no son utilizadas comúnmente en este laboratorio. Por tanto, no sería representativo utilizarlas.

Es importante mencionar que el concreto con agregado reciclado presenta dos tipos de zonas de transición interfacial, una zona antigua, ubicada en el interior del agregado reciclado, entre las partículas de agregado natural y el mortero adherido y una zona nueva formada entre las partículas de agregado reciclado y el nuevo mortero de cemento. La zona de transición antigua no se ve afectada en la elaboración de nuevos concretos, sin embargo, la forma en que se elabora y dosifica el concreto con agregado reciclado afecta la nueva zona de transición interfacial. Factores como liberación de agua cuando el agregado está húmedo, absorción de agua cuando el agregado está seco, penetración de la pasta en los poros del agregado reciclado y reacciones químicas van a incidir en las propiedades de la zona de transición interfacial nueva. Entre mejor sean las propiedades mecánicas del agregado reciclado más semejantes serán las zonas de transición interfacial a las ordinarias (Malešev et al, 2014)

En la falla tipo 3 obtenidas, es posible ver una grieta clara en forma vertical de arriba hacia abajo. Todos los cilindros mantuvieron la forma y la cohesión típica al alcanzar el punto de falla, para lograr ver el comportamiento interno del espécimen se dejó caer sobre una superficie rígida. Es posible ver la falla de la zona interfacial nueva, donde el agregado reciclado y natural se desprendieron del mortero, pero no es posible observa macroscópicamente la falla de la zona interfacial antigua.



Figura 27. Detalle de falla tipo 3.

Capítulo 5. Conclusiones

Los escombros y otros residuos de construcción no están siendo tratados. Los sitios autorizados para disponer de estos residuos son los rellenos sanitarios, sin embargo, en estos lugares no se cuenta con sitios específicos de almacenamiento o fosas diseñadas para disponer de escombros, de forma tal que están siendo colocados del mismo modo y en el mismo sitio que los residuos domiciliarios o industriales. En condiciones más críticas los están tirando en lotes baldíos, montañas, botaderos clandestinos, ríos y aceras, provocando contaminación al medio ambiente y al paisaje.

La legislación costarricense no cuenta con una normativa específica que regule la generación, transporte, tratamiento y disposición final de los escombros. A la fecha no han sido declarados como residuos de manejo especial debido a la falta de sustento técnico y más estudios que avalen posibles tratamientos; pero si se justifica la aplicación de dicha declaratoria tomando en cuenta características de peso, volumen y taza de generación.

Países como España, Brasil y México tienen una visión más clara de los que requiere en cuanto a la gestión integral de residuos de construcción y demolición. Cuentan con normativa específica y planes de manejo de residuos sólidos que establecen los pasos a seguir en la etapa de diseño y construcción. Además, obligan a los generadores y poseedores a tratar los escombros para ser reutilizados como agregados, de esta manera solo una pequeña parte de estos residuos son destinados en rellenos sanitarios. También cuentan con normativa para garantizar la calidad de los agregados reciclados de tal modo que puedan ser utilizados para la elaboración de concreto y estructura de pavimentos.

Se necesita incluir en todos los permisos de construcción sitios de almacenamiento temporal y clasificación de los residuos, cantidades aproximadas en peso y volumen y tipos de residuos a generar. Además, se requiere que los costos de la gestión de los residuos y su adecuada disposición se incluyan en el presupuesto y se traslade al propietario del bien.

Por otra parte, es conveniente aumentar las tarifas de extracción de agregados vírgenes y destinarlas a la implementación de tecnologías para el reciclaje de concreto. Al aumentar las tarifas también se logra incentivar el consumo de materiales alternativos como los agregados reciclados.

Los agregados gruesos reciclados requieren de un proceso de tamizado para obtener la granulometría deseada. En ninguna de las tres fuentes de material fue posible obtener del quebrador una granulometría recomendada para la elaboración de concreto.

Los resultados obtenidos de la caracterización del agregado reciclado son menos favorables en comparación con el agregado natural pero siempre dentro de los rangos normales recomendados para la elaboración de concreto. La principal razón es la irregularidad de las partículas que están formadas por agregado virgen cubiertas por mortero o únicamente mortero.

Las características de las fuentes de materiales vírgenes utilizadas originalmente para los escombros procesados y los métodos constructivos afectan las características del agregado reciclado. Todos los resultados de la caracterización del agregado grueso reciclado son similares entre sí, sin embargo, los resultados de los ensayos realizados al agregado reciclado de baldosas prefabricadas son menos favorables, en comparación con el agregado reciclado de pared de mampostería y agregado reciclado de concreto colado en sitio. El agregado reciclado de baldosas prefabricadas posee menor peso unitario, mayor razón de vacíos y mayor porcentaje de absorción, debido principalmente a que el tamaño máximo nominal del agregado grueso virgen es menor al utilizado en el concreto colado en sitio y la pared de mampostería, esto implica una mayor cantidad de pasta.

Con respecto a las pruebas realizadas al concreto con agregado reciclado en estado fresco, todas mostraron resultados positivos. El asentamiento de las mezclas con agregado reciclados fue similar al asentamiento de la mezcla con 100% agregado natural. En todas las mezclas se tomó en cuenta el absorción y contenido de humedad de todos los agregados.

El agregado reciclado no afectó la temperatura de ninguna de las mezclas, todas dieron resultados dentro de los rangos normales.

La relación A/C aumentó conforme se incrementó la proporción de agregado reciclado en la mezcla, debido a la mayor demanda de agua del agregado reciclado para lograr una condición de las partículas superficie saturada seca.

La densidad de las mezclas con agregado reciclado es ligeramente inferior a la muestra con 100 % agregado natural, disminuyendo conforme aumenta la proporción de agregado

reciclado, aun así, se encuentran dentro de los rangos normales. Este comportamiento está asociado al menor peso unitario del agregado reciclado con respecto al agregado natural.

Los contenidos de aire de las mezclas con agregado reciclado se encontraron dentro de los rangos normales, con un pequeño incremento en todas las mezclas con 100% agregado reciclado por la angularidad y aspereza de sus partículas.

Se comprobó que pese a no tener el agregado grueso reciclado una caracterización igual a la del agregado grueso natural, la resistencia a compresión de los cilindros a los 28 días es superior a los 210 kg/cm², estos para las tres combinaciones utilizadas (30% de agregado reciclado - 70 % de agregado natural, 50% de agregado reciclado – 50% de agregado natural y 100% agregado reciclado) y las tres fuentes en estudio.

La resistencia a la compresión de las mezclas con 30% de agregado reciclado dieron resultados muy similares a los resultados con 100% agregado natural. Con forme se aumentó el porcentaje de agregado reciclado se disminuyó la resistencia, por tanto, se considera aceptable la fabricación de concreto con agregado reciclado.

La mezcla con agregado reciclado de pared de mampostería presentó los mejores resultados a 28 días en sus tres combinaciones en comparación con el agregado reciclado de baldosas prefabricadas y de concreto colado en sitio. Cabe destacar que al utilizar solo 30% de agregado reciclado de pared de mampostería se alcanzó una resistencia a la compresión a 28 días 0.8% mayor que la resistencia promedio de la muestra patrón con 100% agregado natural. Por tanto, de las tres fuentes es la más idóneo para reciclar.

Se observó una relación directa entre los resultados de la caracterización del agregado y la resistencia a compresión, al obtener los menores valores de resistencia en las mezclas con agregado grueso reciclado de baldosas prefabricadas. La resistencia promedio a compresión utilizando 100% de este agregado fué 24.4% menos con respecto a la mezcla patrón.

El método de mezclado en dos etapas contribuyó a alcanzar la resistencia de diseño, al saturarse el agregado reciclado antes de colocar el cemento, de forma que no interfirir en la absorción de agua del cemento y las reacciones químicas que ocurren en dicho proceso.

El factor más importante a tomar en cuenta en la elaboración de concreto con agregado reciclado es conocer la absorción del material y la humedad al momento de mezclado, ya que

a diferencia del agregado natural absorben gran cantidad de agua que si no se considera en el diseño de mezcla va a verse reflejado en una disminución en la resistencia del concreto.

Capítulo 6. Recomendaciones

6.1. Recomendación al utilizar agregado reciclado

- Para la elaboración de concreto con agregado reciclado es necesario conocer la fuente y la caracterización mecánica del material incluyendo granulometría, porcentaje de desgaste, gravedad específica y porcentaje de absorción, contenido de humedad al momento de la dosificación, peso unitario y contenido de vacíos, para poder determinar el porcentaje de agregado reciclado idóneo y elaborar el diseño de mezcla.
- Al momento de la elaboración del concreto se recomienda agregar los agregados reciclados y una porción del agua (mezclado en dos etapas) para garantizar la condición del agregado superficie saturada seca.

6.2. Recomendaciones para la elaboración e implementación de normativas

- Implementar una normativa que regule la generación, transporte, tratamiento y disposición final de los escombros. Al mismo tiempo que se elabora una normativa para reglamentar la utilización de agregados reciclados en concreto.
- Analizar la conveniencia país de seguir impulsando (a través de los costos de producción) el uso agregado virgen sobre el reciclaje. Si se quiere impulsar los agregados reciclados se requiere aumentar el costo del canon para la extracción de agregado natural, así como una adecuada inserción de los costos de tratamiento de los escombros en los rellenos sanitarios u otros sitios autorizados.
- Se recomienda elaborar campañas de concientización acerca de la gestión integral de residuos de construcción y demolición. De forma simultánea, es necesario difundir estudios que validen la utilización de escombros como agregados reciclado en la construcción de edificaciones.

6.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

- Determinar el índice de durabilidad del agregado reciclado para determinar la resistencia relativa para producir finos que puedan perjudicar la durabilidad de concreto., producto de la degradación del agregado.
- Caracterizar el agregado reciclado fino de forma química y mecánica para la elaboración de concreto y mortero, tomando en cuenta aspectos como reacción álcali-agregado y susceptibilidad al ataque de sulfatos.

- Analizar experimentalmente el comportamiento de concreto con agregado reciclado fino y grueso, para determinar si existe una pérdida significativa en la resistencia a compresión u otras características que se vieran comprometidas.
- Determinar características que afectan la durabilidad del concreto como porosidad, absorción, permeabilidad y hermeticidad del concreto para tener un indicio del comportamiento del concreto a mediano y largo plazo.
- Evaluar el comportamiento del concreto con agregado reciclado de una muestra de escombros tomada en sitio, para evaluar el efecto de otras variables menos controladas en la resistencia del nuevo concreto, tales como la edad de los escombros, condiciones menos favorables de mano de obra y métodos constructivos, malas prácticas en la construcción, entre otras.
- Realizar más investigaciones similares a esta con el fin de contar con datos con una cantidad de especímenes cilindros estadísticamente más representativa.
- Determinar si es posible obtener resultados favorables en la resistencia a compresión del concreto al reciclarlo dos o mas veces.
- Investigar el comportamiento de vigas de concreto con agregado reciclado para evaluar la capacidad a flexión de los elementos.
- Realizar un estudio comparativo entre el impacto ambiental de la trituración de escombros y el impacto ambiental de la extracción de material virgen de tajos y ríos.

Fuentes de consulta

- Abarca, L., Leandro, G., Hasbum, I., Solano, J. (2019) Gestión de materiales de construcción en Costa Rica para reducción de residuos: barreras y motivaciones. *Tecnología en Marcha*, 32, 65-77.
- Abarca, L., Leandro, G. (2016). Situación actual de la gestión de los materiales de construcción en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29(4), 111-122.
- Alonso, A., Bedolla, J., Chávez, H., González, F., Hernández, H., Lara, C., Martínez, W., Martínez, W., Pérez, J., Torres, A. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT* 5(3), (52-199).
- Alvarado, I. (2018). Valoración de los estudios de fauna acuática en la Evaluación de Impacto Ambiental de la extracción de materiales en cauce de dominio público y propuestas para el biomonitoreo acuático. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ecología y Gestión de Ambientes Acuáticos.
- American Concrete Institute. (2019). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19). ACI Capítulo Costa Rica.
- Aurélio, M., dos Passos, A., de Oliveira, A. (2013). O gerenciamento dos resíduos sólidos da construção civil e de demolição no município de Belo Horizonte. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 2(2), (45-68).
- Bazalar La Puerta, L. y Cadenillas, M. (2019). Propuesta de agregado reciclado para la elaboración de concreto estructural con $f'c=280$ kg/cm² en estructuras aporricadas en la ciudad de Lima para reducir la contaminación ambiental. Tesis para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Beltrán, G. y Borrego, C. (2014). Comportamiento mecánico de concreto con agregado reciclado tratado con lechadas pobres. Trabajo final para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.
- Cabildo, M. , Claramunt, R. , Cornago, M. , Escolástico, C. , Esteban, S. , Farrán, M. , García, M. , López, C. , Pérez, J. , Pérez, M. , Santa, M. , Sanz, D. (2008). Reciclado y tratamiento de residuos. Madrid, España: Editorial UNED.

- Castro, J. (2019). Cuantificación y caracterización de residuos de construcción para viviendas unifamiliares en la gran área metropolitana. Proyecto Final de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Cámara Costarricense de la Construcción. (2020). Informe Económico del Sector de la Construcción. Dirección de Investigación y Desarrollo Técnico. Costa Rica.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición. Recuperado de: https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM_RCD_Completo.pdf
- Caycho, H. y Espinoza, D. (2009). Mezcla de concreto con agregado grueso reciclado usando cemento portland tipo HS para cimentaciones, distrito la molina, año-2019. Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Ricardo Palma.
- Cham, J., Solís, C. y Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería* 7(2). 39-46
- Cemex (s.f.). Resistencia. Recuperado de: https://www.cemex.com/es/web/cemex-mexico/quizzes-full-view/-/asset_publisher/uG2W76KBBu5B/content/resistencia-pruebas-y-resultados.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2014). Áreas de Reciclagem e Aterros Resíduos Classe A. Recuperado de: <https://cetesb.sp.gov.br/sigor/wp-content/uploads/sites/37/2014/12/%C3%81reas-de-Reciclagem-e-Aterros-Res%C3%ADduos-Classe-A.pdf>
- Comisión Europea. (2018). Protocolo y directrices de la UE para residuos de construcción y demolición. Recuperado de: <https://residuscirera.net/es/protocolo-y-directrices-de-la-ue-para-residuos-de-construccion-y-demolicion/>
- Cruz, N. (2015). Gestión de residuos de construcción y demolición: Análisis y propuesta para el cantón de Alajuela Costa Rica. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Magister en Medio Ambiente con mención de Ingeniería de Tratamiento de Residuos, Universidad de Santiago de Chile.
- Decreto Ejecutivo N°34647. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 29 de julio del 2008.

- Di Maio, A., Zega, C. (2007). Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. *IMME*, 45(2).
- Directiva 2008/98/CE. Diario oficial de la Unión Europea, Luxemburgo, 19 de noviembre de 2008.
- Directiva 2018/851. Diario oficial de la Unión Europea, Luxemburgo, 30 de mayo de 2018.
- Kosmatka, S. Kerkhoff, B. Panarese, W y Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Illinois, Estados Unidos. Portland Cement Association.
- Fernández, A. y Salas, A. (2002). Evaluación y revisión de las proporciones recomendadas para mezclas de concreto en obras menores utilizando dos fuentes de agregados nacionales. Proyecto Final de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Hallack, M., Gutiérrez, M., Mungaray, A. (2015). Reutilización de escombros de concreto hidráulico como nuevo material en procedimientos constructivos: una alternativa sustentable en el noroeste de México. *Revista de la Construcción*, 14(2).
- Hoffmann, C. , Schubert, S. , Leemann, A. y Motavalli, M. (2012). Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. *Construction and Building Materials*, 35, 701-709.
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. (2009). Manual de consejos prácticos sobre el concreto. San José, Costa Rica. Grafos S.A. .
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. (2006). Manual de elaboración de concreto en obra. San José, Costa Rica. KS Publicida.
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto y Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2007). Calidad del concreto en la Zona del Pacífico Central. informe de investigación. Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020). Estadísticas de la Construcción. 2020. Número de construcciones, área en metros cuadrados y valor en miles de colones

por clase de obra según provincia y cantón. Recuperado de:
<https://www.inec.cr/economia/estadisticas-de-la-construccion>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020). Estadísticas de la Construcción. 2020. Número de ampliaciones, área en metros cuadrados y valor en miles de colones por clase de obra según provincia y cantón. Recuperado de:
<https://www.inec.cr/economia/estadisticas-de-la-construccion>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020). Estadísticas de la Construcción. 2020. Número de reparaciones, área en metros cuadrados y valor en miles de colones por clase de obra según provincia y cantón. Recuperado de:
<https://www.inec.cr/economia/estadisticas-de-la-construccion>

Jiménez, K. y Lozano, H. (2018). Análisis de la influencia de sulfatos y cloruros en el deterioro de estructuras en concreto en zonas costeras del atlántico colombiano. Trabajo de investigación, Universidad Católica de Colombia.

Lacerda, C. (2019). Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica. Matéria (Rio de Janeiro), 24(2).

León, M. y Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción. 25(2), 215-240.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario oficial de la Federación, Ciudad de Mexico, Mexico, 08 de octubre de 2003.

Ley N°5395. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 24 de octubre de 1974.

Ley N°7554. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 13 de noviembre de 1995.

Ley N°8839. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 24 de junio de 2010.

Lei N°12.305. Diário Oficial da União, Brasil, 02 de agosto del 2010

Madrigal, G. (2004). Estudio para determinar la viabilidad de aprovechar los residuos de concreto premezclado en estado fresco, para la producción de nuevos concretos. Proyecto Final de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

- Malešev, M. , Radonjanin, V. y Bróceta, G. (2014). Properties of recycled aggregate concrete. *Contemporary Materials*, 2, 239-249.
- Ministerio de Salud. (2019). Plan de Acción para la Gestión Integral de Residuos. Recuperado de: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planes-en-salud/planes-en-salud/5076-plan-de-accion-para-la-gestion-integral-de-residuos-2019-2025/file>
- Ministerio de Salud. (2016). Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos. Recuperado de: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planes-en-salud/planes-en-salud/3025-plan-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-2016-2021/file>
- Ministerio de Salud. (2016). Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR). Recuperado de: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planes-en-salud/estrategias/3026-estrategia-nacional-de-reciclaje-2016-2021/file>
- Oficina Regional para Mesoamérica y la Iniciativa Caribe. (2011). Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción. San José, Costa Rica. Impresiones Unicornio.
- Parlamento Europeo. (2015). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Poveda, M. (2008). Evaluación de la prefactibilidad técnica y financiera de reutilizar los residuos de construcción como agregados para concreto. Proyecto Final de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Pedrosa, M. (2016) Construcción Pan-Americana. Estados Unidos: Route One Americas. Recuperado de: <https://www.construccion-pa.com/noticias/panorama-mundial-la-construccion/>
- Real Decreto 105/2008. Boletín Oficial del Estado, España, 01 de febrero de 2008
- Rocha, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. Revista Nodo, 6(11), 99-116.

Reglamento N°31849. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 28 de junio del 2004.

Reglamento N°37567. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 20 de mayo del 2013.

Reglamento N°38272-S. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 25 de setiembre del 2014.

Reglamento N°41052-S. Diario oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 01 de junio del 2018.

Resolução CONAMA N°307. Diário Oficial da União, Brasil, 05 de julho de 2002.

Roncalia, D. (2017). Influencia del módulo de finura de la combinación de agregados en el módulo de elasticidad del concreto reoplástico. Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada Antenor Orrego.

Worgrin, A. (1973). El control estadístico de la calidad en la técnica del hormigón. Zement und Beton. N°66-67, 18-25

Apéndice

A. Resultados de la norma INTE C39:2018 (ASTM C39)

Cuadro 20. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Natural (N3 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		25/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,89	201,41	7994,40	172,50	21,58	220,03	3
1	101,09	201,88	8026,13	173,20	21,58	220,05	3
9	100,67	201,64	7959,58	178,60	22,44	228,81	3
PROMEDIO:	101	202	7993	175	21,9	223	
DESV ESTD.:	0,21	0,24	33,3	3,34	0,50	5,06	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,78	203,29	7976,19	218,0	27,33	278,70	2
2	100,705	200,19	7965,11	199,9	25,10	255,92	3
6	101,135	201,20	8033,28	219,9	27,37	279,13	2
PROMEDIO:	101	202	7971	209	26,2	267	
DESV ESTD.:	0,05	2,20	7,8	12,8	1,6	16,1	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
4	100,63	202,25	7952,46	259,40	32,62	332,62	2
8	101,05	201,91	8018,99	265,80	33,15	338,00	3
7	100,78	201,36	7976,98	254,70	31,93	325,59	2
PROMEDIO:	101	202	7983	260	32,6	332	
DESV ESTD.:	0,21	0,45	33,6	5,57	0,61	6,22	

Cuadro 21. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B1 30%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		25/1/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
4	100,91	200,67	7996,78	199,00	24,89	253,76	3
6	100,56	203,89	7941,40	182,00	22,92	233,70	3
8	100,44	202,40	7922,46	170,80	21,56	219,84	2
PROMEDIO:	101	202	7954	184	23,1	236	
DESV ESTD.:	0,24	1,61	38,6	14,2	1,67	17,1	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	101,02	201,87	8015,02	220,50	27,51	280,53	5
9	101,13	199,81	8032,48	240,70	29,97	305,57	2
1	101,665	201,66	8117,70	225,30	27,75	283,01	2
PROMEDIO:	101	201	8055	229	28,4	290	
DESV ESTD.:	0,35	1,14	54,9	10,6	1,35	13,8	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,93	201,87	8000,74	287,70	35,96	366,68	2
2	100,83	203,80	7984,90	234,70	29,39	299,72	3
3	100,96	202,46	8005,50	288,60	36,05	367,61	2
PROMEDIO:	101	203	7997	270	33,8	345	
DESV ESTD.:	0,07	0,99	10,8	30,9	3,82	38,9	

Cuadro 22. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B2 30%).

Edad de falla (Días):	7	Fecha de moldeo:	25/1/2021				
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	100,74	200,66	7969,86	151,00	18,95	193,20	3
2	100,98	202,50	8007,88	149,20	18,63	189,99	2
3	100,49	204,03	7930,35	156,50	19,73	201,23	2
PROMEDIO:	101	202	7969	152	19,1	195	
DESV ESTD.:	0,25	1,69	38,8	3,80	0,57	5,79	
Edad de falla (Días):	14						
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
4	101,03	203,10	8016,61	181,3	22,62	230,61	2
9	99,725	201,30	7810,84	199,2	25,50	260,06	2
7	101,22	201,80	8046,79	183,4	22,79	232,41	2
PROMEDIO:	101	202	7958	188	23,6	241	
DESV ESTD.:	0,81	0,93	128	9,78	1,62	16,5	
Edad de falla (Días):	28						
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,37	203,36	7911,42	245,9	31,08	316,94	3
6	100,88	203,89	7992,82	231,1	28,91	294,84	3
5	100,42	203,62	7919,30	238,6	30,13	307,23	3
PROMEDIO:	101	204	7941	239	30,0	306	
DESV ESTD.:	0,3	0,27	44,9	7,40	1,09	11,1	

Cuadro 23. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Baldosas prefabricadas 30% agregado natural (B3 30%).

Edad de falla (Días):	7	Fecha de moldeo:	11/3/2021				
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,77	201,18	7974,61	175,90	22,06	224,92	3
7	100,94	202,32	8001,54	177,60	22,20	226,33	3
4	100,92	202,54	7999,16	171,80	21,48	219,01	2
PROMEDIO:	101	202	7992	175	21,9	223	
DESV ESTD.:	0,09	0,73	14,9	2,98	0,38	3,89	
Edad de falla (Días):	14						
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	100,81	201,19	7980,94	203,8	25,54	260,39	2
8	100,97	201,51	8007,09	201,5	25,17	256,61	2
3	100,89	203,50	7993,61	206,9	25,88	263,93	3
PROMEDIO:	101	202	7994	204	25,5	260	
DESV ESTD.:	0,08	1,25	13,1	2,71	0,36	3,66	
Edad de falla (Días):	28						
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,74	203,40	7969,86	249,6	31,32	319,35	3
5	100,81	200,13	7981,73	227,5	28,50	290,65	3
9	100,91	201,24	7996,78	221,6	27,71	282,57	3
PROMEDIO:	101	202	7983	233	29,2	298	
DESV ESTD.:	0,09	1,66	13,5	14,8	1,90	19,3	

Cuadro 24. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Baldosas prefabricadas 50% agregado natural (B1 50%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		12/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,96	203,08	8004,71	161,40	20,16	205,61	2
6	100,79	202,21	7978,56	163,10	20,44	208,45	2
4	100,99	203,21	8009,47	162,80	20,33	207,27	2
PROMEDIO:	101	203	7998	162	20,3	207	
DESV ESTD.:	0,11	0,54	16,6	0,91	0,14	1,43	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,93	202,42	8000,74	197,20	24,65	251,34	2
3	101,01	201,14	8013,43	195,50	24,40	248,78	3
1	100,915	199,32	7998,37	196,40	24,56	250,39	4
PROMEDIO:	101	201	8004	196	24,5	250	
DESV ESTD.:	0,05	1,56	8,10	0,85	0,13	1,30	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,24	201,09	7891,73	241,20	30,56	311,66	2
9	100,81	201,59	7981,73	231,20	28,97	295,37	2
5	100,87	203,10	7991,24	227,60	28,48	290,43	2
PROMEDIO:	101	202	7955	233	29,3	299	
DESV ESTD.:	0,35	1,05	54,9	7,05	1,09	11,1	

Cuadro 25. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Baldosas prefabricadas 50% agregado natural (B2 50%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		17/2/2021	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
9	101,01	201,92	8013,43	147,00	18,34	187,06	2
8	101,00	202,05	8011,05	160,70	20,06	204,55	2
4	100,55	201,33	7940,61	169,00	21,28	217,03	2
PROMEDIO:	101	202	7988	159	19,9	203	
DESV ESTD.:	0,26	0,39	41,4	11,1	1,48	15,1	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	100,60	202,93	7948,51	195,50	24,60	250,81	2
3	100,90	200,53	7995,99	198,70	24,85	253,40	2
2	100,82	202,55	7982,52	196,60	24,63	251,14	2
PROMEDIO:	101	202	7976	197	24,7	252	
DESV ESTD.:	0,15	1,29	24,5	1,63	0,14	1,41	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,97	203,69	8007,09	213,8	26,70	272,28	3
7	100,86	202,62	7989,65	221,5	27,72	282,70	3
5	100,465	200,65	7927,19	234,9	29,63	302,16	3
PROMEDIO:	101	202	7975	223	28,0	286	
DESV ESTD.:	0,27	1,54	42,0	10,7	1,49	15,2	

Cuadro 26. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Baldosas prefabricadas (B1 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		17/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,99	200,78	8009,47	131,80	16,46	167,80	2
4	101,03	200,95	8015,81	125,00	15,59	159,02	2
6	100,70	201,59	7963,53	134,90	16,94	172,74	4
PROMEDIO:	101	201	7996	131	16,3	167	
DESV ESTD.:	0,18	0,43	28,5	5,06	0,68	6,95	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,765	203,20	7974,61	158,50	19,88	202,67	2
3	100,825	201,79	7984,11	167,50	20,98	213,93	2
8	100,6	201,00	7948,51	161,10	20,27	206,68	3
PROMEDIO:	101	202	7969	162	20,4	208	
DESV ESTD.:	0,12	1,11	18,4	4,63	0,56	5,70	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,77	203,52	7974,61	184,30	23,11	235,67	2
1	101,11	201,91	8029,31	198,40	24,71	251,97	2
9	101,20	203,41	8043,61	198,40	24,67	251,52	2
PROMEDIO:	101	203	8016	194	24,2	246	
DESV ESTD.:	0,23	0,90	36,4	8,14	0,91	9,29	

Cuadro 27. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Baldosas prefabricadas (B2 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		18/2/2021	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,88	203,24	7992,03	139,10	17,40	177,48	2
9	100,89	202,09	7994,40	145,60	18,21	185,72	3
2	101,31	199,88	8060,31	140,40	17,42	177,62	3
PROMEDIO:	101	202	8016	142	17,7	180	
DESV ESTD.:	0,24	1,71	38,8	3,44	0,46	4,72	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	101	202,05	8011,85	161,40	20,15	205,42	2
4	100,81	202,82	7981,73	173,00	21,67	221,02	2
3	101,035	201,04	8017,40	171,70	21,42	218,38	2
PROMEDIO:	101	202	8004	169	21,1	215	
DESV ESTD.:	0,12	0,89	19,2	6,36	0,82	8,35	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,925	201,36	7999,9523	202,9	25,36	258,63	4
6	100,955	201,7	8004,70899	199,7	24,95	254,40	2
1	100,89	202,69	7994,40462	198,4	24,82	253,07	2
PROMEDIO:	101	202	8000	200	25,0	255	
DESV ESTD.:	0,03	0,69	5,16	2,32	0,28	2,90	

Cuadro 28. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Mampostería 70% agregado natural (M1 30%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		11/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	101,05	201,25	8018,99	182,10	22,71	231,56	3
9	100,77	201,35	7974,61	176,20	22,10	225,31	3
2	100,61	200,78	7949,30	196,80	24,76	252,45	3
PROMEDIO:	101	201	7981	185	23,2	236	
DESV ESTD.:	0,22	0,31	35,3	10,6	1,39	14,2	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,61	200,45	7950,09	207,30	26,08	265,89	3
8	100,98	201,65	8008,67	215,00	26,85	273,75	3
5	100,73	199,70	7969,07	212,10	26,62	271,40	3
PROMEDIO:	101	201	7976	211	26,5	270	
DESV ESTD.:	0,19	0,98	29,9	3,89	0,40	4,03	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,99	201,53	8009,47	255,00	31,84	324,65	2
4	101,10	203,07	8027,72	262,20	32,66	333,06	2
7	100,87	200,96	7990,44	260,00	32,54	331,80	3
PROMEDIO:	101	202	8009	259	32,3	330	
DESV ESTD.:	0,12	1,09	18,6	3,69	0,44	4,54	

Cuadro 29. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Mampostería 70% agregado natural (M2 30%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		11/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,87	200,03	7991,24	187,40	23,45	239,13	3
3	100,77	198,89	7975,40	167,60	21,01	214,29	2
1	100,83	199,04	7984,90	174,10	21,80	222,34	2
PROMEDIO:	101	199	7984	176	22,1	225	
DESV ESTD.:	0,05	0,62	7,97	10,1	1,24	12,7	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
9	100,865	201,45	7990,44	231,60	28,98	295,56	3
6	101,04	201,49	8018,19	230,90	28,80	293,65	3
2	100,94	201,58	8002,33	231,80	28,97	295,38	3
PROMEDIO:	101	202	8004	231	28,9	295	
DESV ESTD.:	0,09	0,07	13,9	0,47	0,10	1,06	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,81	201,65	7980,94	275,50	34,52	352,00	3
4	100,87	202,50	7990,44	270,20	33,82	344,82	2
8	100,32	202,06	7903,54	249,70	31,59	322,16	3
PROMEDIO:	101	202	7958	265	33,3	340	
DESV ESTD.:	0,30	0,43	47,7	13,6	1,53	15,6	

Cuadro 30. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Mampostería 50% agregado natural (M1 50%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		12/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,44	199,50	7923,25	151,30	19,10	194,72	2
6	100,94	202,36	8001,54	152,20	19,02	193,96	3
4	100,47	202,49	7927,98	156,60	19,75	201,42	3
PROMEDIO:	101	201	7951	153	19,3	197	
DESV ESTD.:	0,28	1,69	43,9	2,8	0,40	4,1	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,97	202,35	8007,09	187,90	23,47	239,29	2
8	100,99	201,38	8010,26	189,70	23,68	241,49	2
9	100,94	201,89	8002,33	192,80	24,09	245,68	2
PROMEDIO:	101	202	8007	190	23,7	242	
DESV ESTD.:	0,03	0,49	3,99	2,48	0,32	3,24	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,67	201,75	7958,79	237,50	29,84	304,30	3
1	100,69	202,84	7962,74	228,00	28,63	291,98	2
7	100,76	201,16	7973,82	240,40	30,15	307,43	2
PROMEDIO:	101	202	7965	235	29,5	301	
DESV ESTD.:	0,05	0,85	7,79	6,49	0,80	8,17	

Cuadro 31. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Mampostería 50% agregado natural (M2 50%).

Edad de falla (Días):	7	Fecha de moldeo:	12/2/2021				
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,80	203,06	7979,36	162,40	20,35	207,54	4
9	100,35	200,29	7908,27	166,20	21,02	214,30	3
4	100,69	202,88	7962,74	153,40	19,26	196,45	3
PROMEDIO:	101	202	7950	161	20,2	206	
DESV ESTD.:	0,24	1,55	37,2	6,57	0,88	9,02	
Edad de falla (Días):	14						
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,98	204,49	8008,67	187,80	23,45	239,12	2
7	100,82	201,77	7983,32	205,70	25,77	262,74	2
8	100,86	866,70	7989,65	204,10	25,55	260,49	3
PROMEDIO:	101	424	7994	199	24,9	254	
DESV ESTD.:	0,08	383	13,2	9,91	1,28	13,0	
Edad de falla (Días):	28						
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,88	201,34	7992,03	231,50	28,97	295,37	3
1	101,04	202,62	8017,40	238,50	29,75	303,34	3
3	100,81	202,27	7980,94	247,70	31,04	316,48	3
PROMEDIO:	101	202	7997	239	29,9	305	
DESV ESTD.:	0,12	0,66	18,7	8,12	1,05	10,7	

Cuadro 32. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Mampostería (M1 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		19/2/2021	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	101,06	201,55	8020,57	151,30	18,86	192,36	2
4	100,89	201,43	7994,40	152,00	19,01	193,88	3
2	100,93	202,44	7999,95	156,00	19,50	198,85	2
PROMEDIO:	101	202	8005	153	19,1	195	
DESV ESTD.:	0,09	0,56	13,8	2,54	0,33	3,39	
Edad de falla (Días):		14		Edad (Días)		28,00	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	101,15	202,76	8035,66	191,10	23,78	242,50	3
7	100,88	201,88	7992,82	198,00	24,77	252,61	3
6	101,225	203,17	8047,58	184,20	22,89	233,40	2
PROMEDIO:	101	203	8025	191	23,8	243	
DESV ESTD.:	0,18	0,66	28,8	6,90	0,94	9,61	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,63	202,92	7953,25	228,00	28,67	292,33	3
9	100,94	202,17	8002,33	213,90	26,73	272,57	3
8	100,97	200,68	8006,29	213,20	26,63	271,54	3
PROMEDIO:	101	202	7987	218	27,3	279	
DESV ESTD.:	0,19	1,14	29,5	8,35	1,15	11,72	

Cuadro 33. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Mampostería (M2 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		24/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,45	202,83	7924,83	132,50	16,72	170,49	3
3	100,72	202,18	7967,49	140,70	17,66	180,07	3
2	101,16	200,93	8037,25	147,60	18,36	187,27	3
PROMEDIO:	101	202	7977	140	17,6	179	
DESV ESTD.:	0,36	0,96	56,8	7,56	0,83	8,41	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,94	201,56	8001,54	199,20	24,90	253,86	3
7	101,19	201,36	8042,02	181,80	22,61	230,52	2
1	101,00	203,08	8011,05	178,90	22,33	227,72	2
PROMEDIO:	101	202	8018	187	23,3	237	
DESV ESTD.:	0,13	0,94	21,2	11,0	1,41	14,4	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,90	201,04	7995,20	235,5	29,46	300,36	3
4	100,975	200,93	8007,88	230,7	28,81	293,77	3
9	100,785	202,61	7977,77	229,4	28,75	293,22	2
PROMEDIO:	101	202	7994	232	29,0	296	
DESV ESTD.:	0,10	0,94	15,1	3,21	0,39	3,97	

Cuadro 34. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Concreto colado en sitio 70% agregado natural (C2 30%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		10/2/2021	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	101,32	202,47	8061,90	155,00	19,23	196,05	4
4	100,76	202,60	7973,82	159,30	19,98	203,72	2
2	100,73	203,52	7969,07	159,30	19,99	203,84	2
PROMEDIO:	101	203	8002	158	19,7	201	
DESV ESTD.:	0,33	0,57	52,3	2,48	0,44	4,46	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,79	201,23	7977,77	201,8	25,30	257,94	2
6	100,96	201,18	8004,71	195,0	24,36	248,41	3
9	100,72	203,77	7966,70	190,1	23,86	243,32	2
PROMEDIO:	101	201	7991	196	24,5	250	
DESV ESTD.:	0,12	0,04	19,0	4,81	0,73	6,74	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
1	100,81	201,63	7980,94	233,40	29,24	298,21	3
3	100,82	203,42	7982,52	220,50	27,62	281,67	3
7	100,46	195,37	7926,40	239,50	30,22	308,11	3
PROMEDIO:	101	200	7963	231	29,0	296	
DESV ESTD.:	0,20	4,23	32,0	9,70	1,31	13,4	

Cuadro 35. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 30% Concreto colado en sitio 70% agregado natural (C3 30%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		10/3/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,65	201,84	7956,42	167,00	20,99	214,03	2
1	100,77	202,92	7975,40	158,50	19,87	202,65	2
5	100,84	201,09	7985,69	171,10	21,43	218,48	3
PROMEDIO:	101	202	7973	166	20,8	212	
DESV ESTD.:	0,09	0,92	14,9	6,43	0,80	8,16	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,94	201,92	8002,33	197,0	24,62	251,03	3
3	100,88	200,93	7992,82	216,7	27,11	276,46	2
2	101,06	201,77	8021,37	203,9	25,42	259,21	2
PROMEDIO:	101	201	7998	207	25,7	262	
DESV ESTD.:	0,04	0,70	6,72	13,9	1,27	13,0	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,79	202,84	7977,77	244,40	30,64	312,39	3
4	100,69	202,49	7962,74	241,00	30,27	308,63	2
9	100,84	201,61	7986,48	253,50	31,74	323,67	3
PROMEDIO:	101	202	7976	246	30,9	315	
DESV ESTD.:	0,08	0,64	12,0	6,46	0,77	7,83	

Cuadro 36. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Concreto colado en sitio 50% agregado natural (C1 50%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		10/2/2021	
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,96	203,23	8004,71	153,20	19,14	195,16	2
1	101,01	203,74	8013,43	158,10	19,73	201,18	2
5	100,45	202,71	7924,83	144,70	18,26	186,19	2
PROMEDIO:	101	203	7981	152	19,0	194	
DESV ESTD.:	0,31	0,52	48,8	6,78	0,74	7,54	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
8	100,98	203,08	8008,67	189,8	23,70	241,67	2
6	100,82	201,86	7983,32	200,8	25,15	256,48	2
9	101,115	202,01	8030,10	195,0	24,28	247,62	2
PROMEDIO:	101	202	7996	195	24,4	249	
DESV ESTD.:	0,11	0,86	17,9	7,78	0,73	7,46	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Díametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,77	203,30	7974,61	220,70	27,68	282,21	3
4	100,73	201,50	7968,28	235,60	29,57	301,50	2
2	100,92	200,68	7998,37	231,60	28,96	295,27	2
PROMEDIO:	101	202	7980	229	28,7	293	
DESV ESTD.:	0,10	1,34	15,9	7,71	0,97	9,85	

Cuadro 37. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 50% Concreto colado en sitio 50% agregado natural (C2 50%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		11/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,07	199,06	7864,20	170,60	21,69	221,21	3
2	100,27	201,78	7895,66	166,80	21,13	215,42	2
1	101,04	199,49	8017,40	161,60	20,16	205,54	2
PROMEDIO:	100	200	7926	166	21,0	214	
DESV ESTD.:	0,51	1,46	80,9	4,52	0,78	7,93	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
5	100,78	203,06	7976,19	191,4	24,00	244,70	2
9	100,635	201,6	7954,04	195,9	24,63	251,15	3
3	100,645	201,24	7955,62	207,4	26,07	265,84	2
PROMEDIO:	101	202	7965	194	24,9	254	
DESV ESTD.:	0,10	1,03	15,7	3,18	1,06	10,83	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	101,03	202,34	8016,61	236,80	29,54	301,21	2
8	100,72	202,15	7967,49	244,00	30,62	312,28	2
4	100,85	203,33	7987,27	240,50	30,11	307,04	3
PROMEDIO:	101	203	7990	240	30,1	307	
DESV ESTD.:	0,16	0,64	24,7	3,60	0,54	5,54	

Cuadro 38. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Concreto colado en sitio (C1 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		18/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,65	202,14	7955,62	141,00	17,72	180,73	2
8	100,76	202,91	7973,02	139,10	17,45	177,90	3
4	100,73	198,64	7969,07	147,60	18,52	188,87	3
PROMEDIO:	101	201	7966	143	17,9	182	
DESV ESTD.:	0,06	2,27	9,1	4,46	0,56	5,69	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
6	100,76	202,06	7973,82	179,9	22,56	230,06	2
5	100,98	202,603333	8008,67	189,4	23,65	241,16	2
1	100,975	200,75	8007,88	183,4	22,90	233,54	4
PROMEDIO:	101	202	7991	185	23,0	235	
DESV ESTD.:	0,16	0,38	24,6	6,72	0,56	5,67	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
3	100,02	203,02	7857,12	221,80	28,23	287,86	2
9	100,79	202,71	7977,77	203,10	25,46	259,60	3
2	100,90	202,98	7995,99	219,50	27,45	279,92	3
PROMEDIO:	101	203	7944	215	27,0	276	
DESV ESTD.:	0,48	0,17	75,5	10,2	1,43	14,6	

Cuadro 39. Resultados resistencia a compresión especímenes cilíndricos de concreto, combinación 100% Concreto colado en sitio (C2 100%).

Edad de falla (Días):		7		Fecha de moldeo:		19/2/2021	
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
9	100,87	202,53	7990,44	150,20	18,80	191,68	3
3	101,28	201,97	8055,53	137,90	17,12	174,56	3
4	100,75	201,01	7971,44	141,50	17,75	181,01	4
PROMEDIO:	101	202	8006	143	17,9	182	
DESV ESTD.:	0,28	0,77	44,1	6,32	0,85	8,65	
Edad de falla (Días):		14		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
2	100,75	200,85	7972,23	171,4	21,50	219,24	2
8	100,905	201,97	7996,78	169,4	21,18	216,01	2
1	100,845	202,04	7987,27	182,4	22,84	232,87	3
PROMEDIO:	101	201	7985	170	21,8	223	
DESV ESTD.:	0,11	0,79	17,4	1,41	0,88	8,95	
Edad de falla (Días):		28		Fecha de moldeo:			
No. Especimen	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de falla
7	100,66	202,07	7957,21	213,90	26,88	274,11	2
5	100,85	201,94	7987,27	213,70	26,76	272,83	3
6	101,17	201,55	8038,05	216,90	26,98	275,16	2
PROMEDIO:	101	202	7994	215	26,9	274	
DESV ESTD.:	0,26	0,27	40,9	1,79	0,11	1,17	