

REPOSITORIO ACADÉMICO UPC

Propuesta de concreto reciclado usando la tecnología de impresión 3D para reducir los residuos de construcción y demolición (RCD) en lima metropolitana

Item Type	info:eu-repo/semantics/bachelorThesis
Authors	Baquerizo Tarazona, Victor Alberto; Ortega Pino, Wilman Lorenzo
DOI	http://doi.org/10.19083/tesis/684151
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	info:eu-repo/semantics/openAccess
Download date	03/03/2026 22:08:18
Item License	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	http://hdl.handle.net/10757/684151



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de concreto reciclado usando la tecnología de impresión 3D para reducir los residuos de construcción y demolición (RCD) en lima metropolitana

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Baquerizo Tarazona, Victor Alberto
Ortega Pino, Wilman Lorenzo

0000-0002-5428-151X
0000-0003-4842-2803

ASESOR(ES)

Eyzaguirre Acosta, Carlos Augusto

0000-0001-9769-2135

Lima, 02 de enero de 2025

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis familiares que me dieron el apoyo para realizar la carrera de ingeniería civil. En especial a mi madre Mary y a mi padre Edgar por el apoyo incondicional para lograr mis metas y propósitos.

Victor Alberto Baquerizo Tarazona

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa gracias por apoyarme en lograr cada una de mis metas. En especial a mi madre Gloria y a mi padre Lorenzo por el esfuerzo que hicieron para concluir con la carrera.

Wilman Lorenzo Ortega Pino

AGRADECIMIENTOS

A nuestros familiares por habernos apoyado en todo momento durante nuestra vida universitaria, lo que nos a permitido forjar los conocimientos para realizar la presente investigación.

A nuestra alma mater y los profesores que nos brindaron los conocimientos para lograr las capacidades necesarias para terminar la carrera de ingeniería civil. Un profundo agradecimiento a nuestro asesor el Ing. Carlos Eyzaguirre Acosta por ayudarnos a realizar la presente investigación. Asimismo, agradecemos al Ing. José Antonio Torres Flores por brindarnos los conocimientos sobre los ensayos reológicos y a la empresa Ofilab Perú S.A.C. por darnos sus instalaciones y equipos para realizar estos ensayos y culminar con la presente investigación.

RESUMEN

La generación de residuos de construcción y demolición (RCD), es uno de los problemas que mayor contaminación genera en Lima metropolitana. El poco control que existe sobre estos residuos se ve reflejado en los vertederos que se generan en diversos puntos de los espacios públicos como vías, parques, orillas de ríos, etc. Por ello, reducir los RCD's mediante la cultura de reciclaje en la construcción es una solución sostenible que puede generar muchos beneficios en este sector. Esto se puede realizar mediante el uso de agregados de concreto reciclado (ACR) en la producción de un nuevo concreto (concreto reciclado). Asimismo, este concreto se puede producir mediante un sistema de impresión 3D que es una técnica que se está fomentado su uso durante los últimos años, debido a que presenta muchos beneficios como el ahorro en el costo y tiempo de producción.

Por lo que la presente investigación, busco encontrar un diseño óptimo para la producción un concreto reciclado mediante la impresión 3D. Para ello, se plantearon 6 diseños de mezcla de concreto con una tasa de reemplazo del agregado natural por ACR del 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. Donde, se evaluaron el comportamiento reológico en función del esfuerzo de fluencia estática del concreto en estado fresco y la resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido. Los resultados mostraron un aumento del esfuerzo de fluencia estática de los diseños conforme aumenta la tasa de reemplazo del agregado natural por ACR. Por otro lado, se encontró que la resistencia a la compresión disminuía conformé aumentaba la tasa de reemplazo. Además, se determinó que el diseño con una tasa de reemplazo del 20% del agregado natural por ACR como el óptimo para producir un concreto reciclado, basándonos en el cumplimiento de las características de imprimibilidad (bombeabilidad, extrusión y edificabilidad) que debe tener un concreto para que sea impreso exitosamente. Finalmente, se analizó que usando el concreto reciclado propuesto se puede lograr reducir un 13.5 % y 28.5% de los RCD's que se generan en proyectos de construcción y demolición respectivamente, en Lima metropolitana.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición (RCD); agregados de concreto reciclado (ACR); impresión 3D de concreto; comportamiento reológico; esfuerzo de influencia estática; resistencia a la compresión.

Proposal for recycled concrete using 3D printing technology to reduce construction and demolition waste (CDW) in metropolitan Lima.

ABSTRACT

The generation of construction and demolition waste (CDW) is one of the problems that generates the most pollution in metropolitan Lima. The lack of control over this waste is reflected in the dumps that are generated at various points in public spaces such as roads, parks, riverbanks, etc. Therefore, reducing CDW through a recycling culture in construction is a sustainable solution that can generate many benefits in this sector. This can be done by using recycled concrete aggregates (RCA) in the production of new concrete (recycled concrete). Also, this concrete can be produced using a 3D printing system, which is a technique that is being promoted for use in recent years, because it has many benefits such as savings in cost and production time.

Therefore, the present research sought to find an optimal design to produce recycled concrete through 3D printing. For this purpose, 6 concrete mix designs were proposed with a replacement rate of natural aggregate by RCA of 5%, 10%, 15%, 20%, 20%, 25% and 30%. The rheological behavior was evaluated as a function of the static yield stress of the fresh concrete and the compressive strength of the hardened concrete. The results showed an increase in the static yield stress of the designs as the rate of replacement of natural aggregate by RCA increases. On the other hand, it was found that the compressive strength decreased as the replacement rate increased. In addition, the design with a replacement rate of 20% of the natural aggregate by RCA was determined to be the optimum design for producing recycled concrete, based on the compliance with the printability characteristics (pumpability, extrusion and buildability) that some concrete must have to be successfully printed. Finally, it was analyzed that by using the proposed recycled concrete it is possible to reduce 13.5% and 28.5% of the CDW generated in construction and demolition projects, respectively, in metropolitan Lima.

Keywords: Construction and Demolition Waste (CDW); Recycled Concrete Aggregates (RCA); 3D Concrete Printing; Rheological Behavior; Static Yield Stress; Compressive Strength.

u201722377_Baquerizo Tarazona, Victor Alberto_Propuesta de concreto reciclado usando la tecnología de impresión 3D para reducir los residuos de construcción y demolición (RCD) en lima metropolitana

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	6%
2	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	6%
3	www.cedexmateriales.es Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	digital.cic.gba.gob.ar Fuente de Internet	<1%
7	oa.upm.es Fuente de Internet	<1%
8	Bayram, Bilal. "Photocatalytic Activity of Titania-silica Mixed Oxides Prepared with Co-	<1%

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	15
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
ESTADO DEL ARTE.....	23
HIPÓTESIS	26
OBJETIVOS.....	26
LIMITACIONES	27
DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	28
CAPITULO I: MARCO TEORICO	30
1.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).....	30
1.1.1 Clasificación de los RCD	31
1.1.2 Cuantificación de los RCD	32
1.2 AGREGADOS PARA CONCRETO	37
1.2.1 Tipos de agregados	37
1.2.2 Clasificación de los agregados	38
1.2.2.1 Por su composición granulométrica	38
1.2.2.2 Por su densidad.....	39
1.2.2.3 Por su forma	39
1.2.2.4 Por su origen pétreo.....	39
1.2.3 Propiedades de los agregados	40
1.3 AGREGADOS RECICLADOS (AR)	43
1.3.1 Uso de agregados reciclados en el contexto internacional	43
1.4 AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO (ACR)	58
1.4.1 Procedimiento para la obtención de ACR	60
1.4.2 Propiedades mecánicas del ACR.....	66
1.4.2.1 Granulometría.....	66
1.4.2.2 Forma y textura.....	67
1.4.2.3 Densidad	69
1.4.2.4 Absorción	69

1.4.2.5	Resistencia a la abrasión.....	71
1.4.3	Propiedades químicas del ACR.....	72
1.4.3.1	Zona de transición interfacial (ZTI)	72
1.4.3.2	Adherencia de mortero	73
1.5	IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO	76
1.5.1	Antecedentes de la impresión 3D en el sector constructivo	76
1.5.2	Técnicas de impresión 3D	77
1.5.3	Tipos impresora 3D	79
1.5.4	Sistemas constructivos en la impresión 3D	81
1.6	IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO CON ACR.....	82
1.6.1	Componentes del concreto impreso en 3D	83
1.6.1.1	Cemento.....	83
1.6.1.2	Adiciones del cemento	83
1.6.1.3	Agregado natural	84
1.6.1.4	Agregado de concreto reciclado (ACR)	85
1.6.1.5	Aditivos	85
1.6.2	Diseño de mezcla del concreto impreso en 3D.....	86
1.6.3	Propiedades del concreto impreso en 3D en estado fresco.....	88
1.6.3.1	Reología.....	88
1.6.3.2	Fuerza de atracción coloidal	92
1.6.3.3	Tixotropía	93
1.6.3.4	Fluidez	93
1.6.3.5	Imprimibilidad	95
1.6.3.5.1	Bombeabilidad.....	96
1.6.3.5.2	Extrusión.....	97
1.6.3.5.3	Edificabilidad.....	98
1.6.4	Propiedades del concreto impreso en 3D en estado endurecido.....	99
1.6.4.1	Resistencia a la compresión.....	100
1.6.4.2	Durabilidad	101
	CAPITULO II: METODOLOGÍA	102
2.1	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	102
2.1.1	Nivel de investigación	102
2.1.2	Diseño de investigación.....	102

2.1.3	Variables de estudio	103
2.2	PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	104
CAPÍTULO III: PROGRAMA EXPERIMENTAL		106
3.1	IDENTIFICACION DE LOS MATERIALES DEL CONCRETO	106
3.1.1	Cemento.....	106
3.1.2	Agregado natural	106
3.1.3	Agregado de concreto reciclado (ACR)	106
3.1.4	Aditivos y adiciones	107
3.1.5	Agua	108
3.2	CONDICIONES DEL CONCRETO IMPRESO EN 3D PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	109
3.3	OBJETIVO 1	111
3.3.1	Análisis granulométrico del agregado natural y ACR.....	111
3.3.2	Determinación del peso unitario del agregado natural y ACR.....	118
3.3.3	Contenido de humedad del agregado natural y ACR	122
3.3.4	Peso específico y absorción del agregado natural y ACR.....	125
3.4	OBJETIVO 2	129
3.4.1	Mezclas preliminares del concreto	129
3.4.1.1	Diseño de mezcla.....	129
3.4.1.2	Ensayo del reómetro rotacional	131
3.4.2	Comportamiento reológico de los diseños preliminares del concreto.....	138
3.4.3	Selección del diseño estándar del concreto impreso en 3D.....	142
3.5	OBJETIVO 3	147
3.5.1	Diseños de mezcla definitivos	147
3.5.2	Ensayo en estado fresco de los diseños definitivos	149
3.5.3	Ensayo en estado endurecido de los diseños definitivos	153
3.5.3.1	Elaboración de probetas cilíndricas de concreto	153
3.5.3.2	Resistencia a la compresión del concreto	154
3.6	OBJETIVO 4	156
3.7	OBJETIVO 5	157
3.7.1	Caso de obra de construcción	157
3.7.2	Caso de obra de demolición	157
CAPÍTULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS.....		158

4.1	OBJETIVO 1	158
4.1.1	Análisis de resultados de la granulometría del agregado natural y ACR..	158
4.1.1.1	Análisis de resultados del agregado natural	158
4.1.1.2	Análisis de resultados del ACR.....	158
4.1.2	Análisis de resultados del peso unitario del agregado natural y ACR.....	159
4.1.2.1	Análisis de resultados del agregado natural	159
4.1.2.2	Análisis de resultados del ACR.....	159
4.1.3	Análisis de resultados del contenido de humedad del agregado natural y ACR	160
4.1.3.1	Análisis de resultados del agregado natural	160
4.1.3.2	Análisis de resultados del ACR.....	160
4.1.4	Análisis de resultados del peso específico y absorción del agregado natural y ACR	160
4.1.4.1	Análisis de resultados del agregado natural	160
4.1.4.2	Análisis de resultados del ACR.....	160
4.1.5	Análisis comparativo del agregado natural y ACR	161
4.2	OBJETIVO 2	162
4.2.1	Análisis de resultados de los diseños de mezcla preliminares del concreto	162
4.3	OBJETIVO 3	163
4.3.1	Análisis de resultados del concreto en estado fresco.....	163
4.3.1.1	Esfuerzo de fluencia estática de diseños definitivos	163
4.3.2	Análisis de resultados del concreto en estado endurecido.....	165
4.3.2.1	Resistencia a la compresión de diseños definitivos.....	165
4.4	OBJETIVO 4	166
4.4.1	Validación de diseños definitivos.....	166
4.4.2	Análisis comparativo de los diseños estándar y definitivos	170
4.4.3	Selección del diseño de mezcla optimo.....	173
4.5	OBJETIVO 5	174
4.5.1	Análisis de reducción de RCD para una obra de construcción en Lima metropolitana	174
4.5.2	Análisis de reducción de RCD para una obra de demolición en Lima metropolitana	176

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	179
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	183
REFERENCIAS	186
ANEXOS	203
ANEXO 1. CALCULOS DE DISEÑOS DE MEZCLA PRELIMINARES.....	203
ANEXO 2. CALCULOS DE DISEÑOS DE MEZCLA DEFINITIVAS	204
ANEXO 3. VALORES DE ESFUERZOS CORTANTES DE LOS DISEÑOS PRELIMINARES	205
ANEXO 4. VALORES DE ESFUERZOS CORTANTES DE LOS DISEÑOS DEFINITIVOS.....	207
ANEXO 5. VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS DISEÑOS DEFINITIVOS.....	209

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y su Reciclaje en la UE.....	3
Tabla 2. Coeficientes de RCD por m ² de Área Construida.....	5
Tabla 3. Cantidad de RCD por m ³ en Espacios Públicos en Lima Metropolitana y Callao .	6
Tabla 4. Cantidad de RCD por m ³ en Espacios Públicos en el Distrito de Ate	7
Tabla 5. Cálculo de Volumen Neto de RCD de una Edificación Multifamiliar en Jesús María - Lima	9
Tabla 6. Cantidad de RCD del Edificio Clement en San isidro – Lima	10
Tabla 7. Cantidad de RCD del TMN – Callao	12
Tabla 8. Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en las Paredes Exteriores por Departamentos del Perú, 2017	18
Tabla 9. Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en los Pisos por Departamentos del Perú, 2017	19
Tabla 10. Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en los Techos por Departamentos del Perú, 2017	20
Tabla 11. Cuadro Comparativo del Uso de la Impresión 3D de Concreto y el Sistema Tradicional.....	22
Tabla 12. Limitaciones de la Investigación	27
Tabla 13. Clasificación de los RCD Según su Naturaleza	31
Tabla 14. Clasificación de los RCD Según su Procedencia	32
Tabla 15. Identificación de RCD´s de un Proyecto en el Sector de la Construcción	33
Tabla 16. Ratios de Cuantificación de RCD´s para Proyectos de Construcción y Demolición	34
Tabla 17. Cuantificación de RCD´s para un Proyecto de Construcción	35
Tabla 18. Cuantificación de RCD´s para un Proyecto de Demolición	35
Tabla 19. Composición Granulométrica de los Agregados Finos y Gruesos por Tamiz	38
Tabla 20. Propiedades del Agregado Influenciadas en las Propiedades del Concreto	42
Tabla 21. Límites de Reemplazo de Agregados Naturales Gruesos (%) por Agregados Reciclados Gruesos.....	45

Tabla 22. Características del Concreto con Agregado Reciclado Utilizado en Diversas Estructuras	46
Tabla 23. Clasificación de los Agregados Reciclados por BRE Digest 433	48
Tabla 24. Requisitos para diferentes tipos de Agregados Reciclados por RILEM	49
Tabla 25. Requisitos para los Agregados Reciclados en Base a la Normativa Española....	54
Tabla 26. Resumen de Características y Especificaciones de los Agregados Reciclados en Diversos Países	57
Tabla 27. Coeficiente de los Ángeles de Agregados Naturales y ACR de Diferentes Estudios	72
Tabla 28. Tratamientos para Mejorar la Calidad de los ACR	75
Tabla 29. Tipos de Impresoras 3D de Concreto en la Construcción	80
Tabla 30. Variables de Estudio de la Investigación.....	103
Tabla 31. Materiales Usados en la Mezcla del Concreto en la Investigación	108
Tabla 32. Análisis Granulométrico del Agregado Natural Fino.....	114
Tabla 33. Análisis Granulométrico del Agregado de Concreto Reciclado.....	116
Tabla 34. Peso Unitario Suelto del Agregado Natural Fino	120
Tabla 35. Peso Unitario Compactado del Agregado Natural Fino	120
Tabla 36. Peso Unitario Suelto del Agregado de Concreto Reciclado	121
Tabla 37. Peso Unitario Compactado del Agregado de Concreto Reciclado	121
Tabla 38. Contenido de Humedad de Agregado Natural Fino	124
Tabla 39. Contenido de Humedad de Agregado de Concreto Reciclado	125
Tabla 40. Peso Específico y Absorción del Agregado Natural Fino	127
Tabla 41. Peso Específico y Absorción del Agregado de Concreto Reciclado.....	128
Tabla 42. Consideraciones para la Elaboración del Diseño de Mezcla.....	129
Tabla 43. Niveles de Variación del Aditivo Superplastificante de los Diseños Preliminares del Concreto.....	130
Tabla 44. Dosificación de los Diseños Preliminares para 1 m ³ de Concreto.....	131
Tabla 45. Procedimiento de Mezclado de la Muestra de Concreto para el Ensayo Reológico	134
Tabla 46. Esfuerzo de Fluencia Estática de los Ensayos Preliminares.....	141
Tabla 47. Requisitos de Imprimibilidad para un Concreto Impreso en 3D.....	143
Tabla 48. Validación de Resultados de Esfuerzos de Fluencia Estática de los Ensayos Preliminares	146

Tabla 49. Tasa de Sustitución del Agregado Natural por el Agregado de Concreto Reciclado	148
Tabla 50. Dosificación de los Diseños Definitivos Para 1 m ³ de Concreto.....	148
Tabla 51. Esfuerzos de Fluencia Estática de los Ensayos Definitivos	152
Tabla 52. Resultados de Resistencia a la Compresión de Diseños Definitivos.....	156
Tabla 53. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas del agregado Natural y el ACR	162
Tabla 54. Validación de Diseños de Mezcla Definitivos	169
Tabla 55. Cantidad de RCD Para el Caso de una Obra de Construcción en Lima Metropolitana	174
Tabla 56. Cuantificación de RCD's Generados en Tn para una Obra de Construcción en Lima Metropolitana	175
Tabla 57. Cantidad de Concreto Reciclado en m ³ Para Reducir los Residuos de Concreto en una Obra de Construcción en Lima Metropolitana	176
Tabla 58. Cantidad de RCD para el Caso de una Obra de Demolición en Lima Metropolitana	176
Tabla 59. Cuantificación de RCD's Generados en Tn Para una Obra de Demolición en Lima Metropolitana	177
Tabla 60. Cantidad de Concreto Reciclado en m ³ para Reducir los Residuos de Concreto en una Obra de Demolición en Lima Metropolitana.....	178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	1
Figura 2. Materiales que Componen los RCD en Colombia	4
Figura 3. Materiales que Componen los RCD en Chile	5
Figura 4. Cantidad de RCD en Espacios Públicos en Lima Metropolitana y Callao	7
Figura 5. Cantidad de RCD en espacios públicos en el distrito de Ate.....	8
Figura 6. Cantidad de RCD en Toneladas en una Edificación Multifamiliar en Jesús María - Lima.....	10
Figura 7. Cantidad de RCD Total del Edificio Clement en San isidro – Lima	11
Figura 8. Porcentaje de material reciclable del edificio Clement en San isidro – Lima	11
Figura 9. Cantidad de RCD Total del TMN – Callao.....	12
Figura 10. Porcentaje de Material Reciclable del TMN – Callao	13
Figura 11. Composición Física de los Residuos de Construcción y Demolición de Proyectos de la Inmobiliaria La Venturosa (% m3).....	14
Figura 12. Diagrama de Ishikawa de la Generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Lima Metropolitana.....	16
Figura 13. Flujo Circular del Sistema de Reciclaje del Concreto	65
Figura 14. Curva de Distribución Granulométrica de Diferentes ACR	67
Figura 15. Porcentaje de Absorción de Agua de Agregados Naturales y Reciclados	70
Figura 16. Zona de Transición Interfacial del ACR y la Pasta de Cemento.....	73
Figura 17. Tipos de ACR Obtenido Mediante Trituración.....	74
Figura 18. Técnicas de Impresión 3D de Concreto	79
Figura 19. Estructuras de Concreto Masivo y Reforzado Mediante la Impresión 3D.....	81
Figura 20. Diseños De Mezcla Óptimos de Investigaciones Sobre Impresión 3D de Concreto	87
Figura 21. Modelo Reológico de Bingham	89
Figura 22. Comportamiento reológico de un Concreto con ACR Impreso en 3D	91
Figura 23. Puente de Unión de Partículas de Cemento en el Proceso de Floculación	92
Figura 24. Asentamiento y Flujo de Asentamiento para un Concreto Impreso en 3D.....	94
Figura 25. Requisitos Reológicos Contradictorios Entorno a las Características de Imprimibilidad del Concreto	96

Figura 26. Diagrama Esquemático de Interfaz Entra Capas Extruidas del Concreto Impreso en 3D	99
Figura 27. Diagrama de Flujo de la Investigación	105
Figura 28. Residuos de Concreto Usados en la Investigación.....	107
Figura 29. Sistema de Impresión de Concreto de la Empresa COBOD	110
Figura 30. Análisis Granulométrico del Agregado Natural Fino	113
Figura 31. Análisis Granulométrico del Agregado de Concreto Reciclado	113
Figura 32. Curva de Distribución Granulométrica del Agregado Natural Fino	115
Figura 33. Curva de Distribución Granulométrica del Agregado de Concreto Reciclado	116
Figura 34. Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado Natural	119
Figura 35. Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado de Concreto Reciclado	119
Figura 36. Secado del Agregado Natural Fino en El Horno a 100 °c.....	123
Figura 37. Esfuerzo de Fluencia Estática del Concreto Tixotrópico.....	132
Figura 38. Esfuerzos de Fluencia Estática Requerido Según la Altura de Impresión del Concreto	133
Figura 39. Muestra de Concreto para el Ensayo Reológico	134
Figura 40. Reómetro Rotacional AMETEK Brookfield Modelo RSX-SST	135
Figura 41. Configuración de Parámetros Iniciales de Control del Reómetro en el Software Rheo3000.....	136
Figura 42. Interconexión del Reómetro con el Software Rheo3000	137
Figura 43. Ensayo de Reómetro Rotacional de las Muestras de Mezclas Preliminares....	138
Figura 44. Reporte de Resultados del Software Rheo3000.....	138
Figura 45. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño A1	139
Figura 46. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A2.....	139
Figura 47. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A3.....	140
Figura 48. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A4.....	140
Figura 49. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A5.....	141
Figura 50. Esfuerzo de Fluencia Estática de Diferentes Tiempos de los Ensayos Preliminares	142
Figura 51. Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 0 min	144
Figura 52. Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 10 min	144

Figura 53. Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 20 min	145
Figura 54. Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 30 min	145
Figura 55. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R1	149
Figura 56. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R2	150
Figura 57. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R3	150
Figura 58. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R4	151
Figura 59. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R5	151
Figura 60. Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R6	152
Figura 61. Elaboración de Probetas Cilíndricas de Concreto de los Diseños Definitivos.	154
Figura 62. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto de Diseños Definitivos	155
Figura 63. Esfuerzo de Fluencia Estática en Diferentes Tiempos de los Ensayos Definitivos	164
Figura 64. Resistencia a la Compresión de los Diseños Definitivos	166
Figura 65. Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=0 Min	167
Figura 66. Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=10 Min	167
Figura 67. Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=20 Min	168
Figura 68. Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=30 Min	168
Figura 69. Grafica Comparativa de Diseños Elegibles Para el Concreto Reciclado impreso en 3D	171

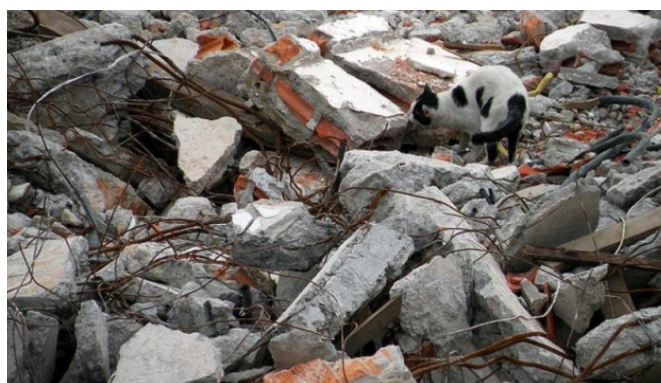
INTRODUCCIÓN

En Lima Metropolitana como en cualquier capital del mundo, la construcción de viviendas, centros educativos, centros de salud, pistas, veredas entre otros; se ha incrementado significativamente en la última década. El continuo desarrollo y expansión del sector de la construcción han generado un aumento considerable en la producción de residuos de construcción y demolición (RCD). Este crecimiento se ha convertido en un desafío importante debido a sus implicaciones ambientales, ya que los RCD representan una fuente significativa de contaminación.

De acuerdo con la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO, 2017), en Lima Metropolitana se generan diariamente alrededor de 30,000 m³ de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), lo que equivale a aproximadamente 19,000 toneladas provenientes de proyectos de construcción y demolición. De estos residuos, un 70% acaba siendo vertido en lugares no autorizados, como el mar y los ríos de la ciudad, mientras que solo un 30% se dirige a puntos habilitados para la recolección de residuos sólidos. Además, existe una considerable diferencia de costos entre depositar los residuos en estos lugares autorizados y entregarlos a mercados informales. En la figura 1 se muestra el resultado de la demolición de una vivienda multifamiliar.

Figura 1

Residuos de Construcción y Demolición (RCD)



Nota. De “Impacto ambiental durante el proceso de construcción”, por A. Monroy, 2018. (<https://cmicac.com/2018/12/13/impacto-ambiental-durante-el-proceso-de-construccion/>).

Realidad problemática

A nivel internacional, la Agencia Europea de Medio Ambiente ha señalado que en la Unión Europea (UE) se producen anualmente alrededor de 900 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), lo que equivale aproximadamente al 30% del total de residuos generados en la región. Según Monier et al. (2011), el concreto de cemento Portland (PCC) es el material más producido globalmente, lo que resulta en que este componente forme entre el 60% y el 70% de los RCD en la UE. Esto conlleva a impactos ambientales negativos, tales como el agotamiento y degradación de la tierra, el elevado consumo de energía, la generación de residuos sólidos, la emisión de gases contaminantes, la contaminación acústica y el uso de recursos naturales no renovables (Lu & Yuan, 2011).

Además, Monier et al. (2011) calcularon que en los países de la UE se produjeron alrededor de 0,94 toneladas de RCD por persona, lo que totaliza aproximadamente 461 millones de toneladas. Por otro lado, los autores estimaron el porcentaje de reciclaje de RCD para diversos países de la UE, obteniendo un promedio del 46%. Asimismo, en países como Dinamarca y los Países Bajos han dado prioridad al reciclaje frente a otras opciones, como el vertido, logrando tasas de reciclaje superiores al 90%. Esta decisión se debe principalmente a la escasez de agregados naturales y a la falta de espacio para vertederos. Para alcanzar estas altas tasas de reciclaje, se ha incrementado el costo del vertido o, en algunos casos, se ha prohibido, como ocurre en Dinamarca y los Países Bajos. Otros países, como Francia o Austria, han adoptado un enfoque similar, aunque con tasas de reciclaje más moderadas, que oscilan entre el 40% y el 60%. Sin embargo, aún existen países donde el reciclaje de RCD es bajo, y la mayoría de estos residuos termina en vertederos. En la tabla 1 se muestra la cantidad de RCD generada anualmente y las tasas de reciclaje en varios países de la UE.

Tabla 1*Cantidad de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y su Reciclaje en la UE*

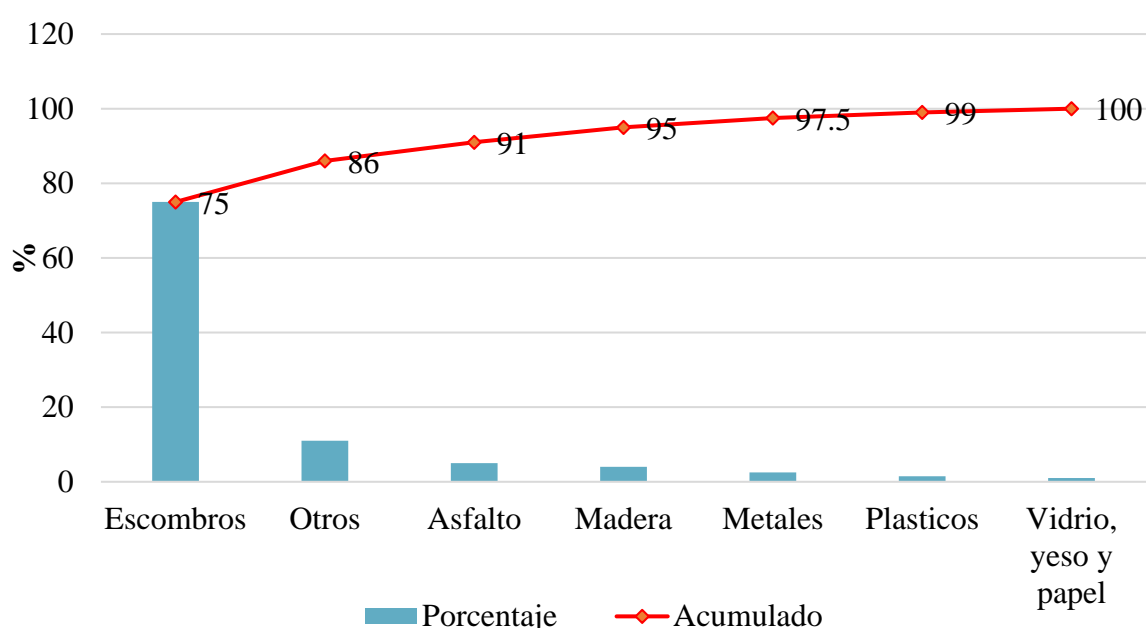
País	RCD's (mill.toneladas/año)	Reciclaje (%)
UE-27	531,38	46
Austria	6,60	60
Bélgica	11,02	68
Bulgaria	7,80	0
Chipre	0,73	1
República Checa	14,70	23
Dinamarca	5,27	94
Estonia	1,51	92
Finlandia	5,21	26
Francia	85,65	45
Alemania	72,40	86
Grecia	11,04	5
Hungría	10,12	16
Irlanda	2,54	80
Italia	46,31	0
Letonia	2,32	46
Lituania	3,45	60
Luxemburgo	0,67	46
Malta	0,80	0
países Bajos	23,90	98
Polonia	38,19	28
Portugal	11,42	5
Rumania	21,71	0
Eslovaquia	5,38	0
Eslovenia	2,00	53
España	31,34	14
Suecia	10,23	0
Reino Unido	99,10	75

Nota. Adaptado de “RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN” por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2010. (https://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICIONNOV2014.pdf).

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2016), a nivel mundial, se estima que los residuos de construcción y demolición representan entre el 35% y el 40% del total de desechos sólidos, y en América Latina, esta tendencia es similar. En países vecinos como Colombia, la mayoría de RCD's que se generan en la industria de la construcción son de los escombros (Concreto, ladrillos, cerámicos, etc.) con un 75%. En la figura 2 se muestra un diagrama de Pareto sobre los componentes de residuos de construcción y demolición en Colombia.

Figura 2

Materiales que Componen los RCD en Colombia

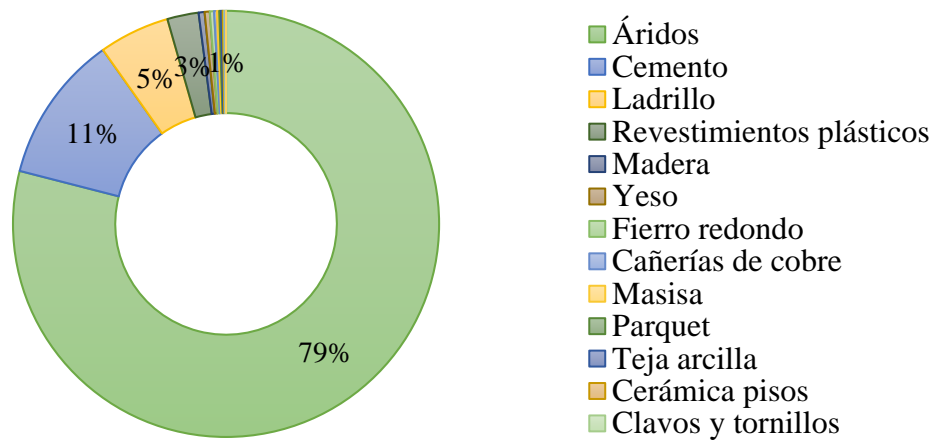


Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

En Chile, según la Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile (CONAMA, 2010), de todos los residuos generados en el país, un 75% son generados por la industria de la construcción que sería una cantidad de 5 millones de toneladas de RCD al año. En la figura 3 se muestra los materiales que componen los RCD en Chile que la mayoría de su composición son materiales que se usan en la elaboración del concreto.

Figura 3

Materiales que Componen los RCD en Chile



Nota. Elaborado a partir de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

Además, se tiene la información de los estudios de investigación elaborados por Agudelo y Rodríguez (2014) en Villavicencio, Colombia y García (2016) en Antofagasta, Chile. Debido a que estas ciudades presentan un crecimiento urbano con características de autoconstrucción y construcción informal con incidencias similares a Lima metropolitana. En la tabla 2 se muestra coeficientes de RCD por metro cuadrado de área construida recopilada de las investigaciones mencionadas.

Tabla 2

Coefficientes de RCD por m2 de Área Construida

Ciudad	m3 de RCD/m2 construido
Villavicencio, Colombia	0.144 (vivienda)
Antofagasta, Chile	0.220 (viviendas multifamiliares)
	0.200 (viviendas unifamiliares)

Nota. Adaptado de “Situación de la gestión y manejo de los residuos sólidos de las actividades de construcción civil del sector vivienda en la ciudad de Lima y Callao” por M. Carbajal, 2018. (<https://hdl.handle.net/20.500.12996/3215>).

Según estos datos, se hizo un cálculo con un alto grado de incertidumbre. Donde, se determinó que la generación de residuos en Lima oscila en 0.144 m³ RCD/m² construido y 0.22 m³ RCD/m² construido (Carbajal, 2018).

Acerca de los RCD en Lima metropolitana, según el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF, 2020), en el Perú existen más de 2000 puntos críticos que concentran los residuos de construcción y demolición. Donde, en Lima metropolitana se encuentran la mitad de estos puntos. Asimismo, se producen 30 000 m³ de RCD diariamente en el cual más del 70% termina arrojado a los ríos o el mar. Esto genera que anualmente por obra promedio se produzca un aproximado de 9 millones de RCD al año, donde mayormente 6 millones terminan en ríos y el mar (CAPECO, 2017). En la tabla 3 se muestra que en Lima metropolitana y Callao se encontraron 2408 puntos de vertimientos de RCD.

Tabla 3

Cantidad de RCD por m³ en Espacios Públicos en Lima Metropolitana y Callao

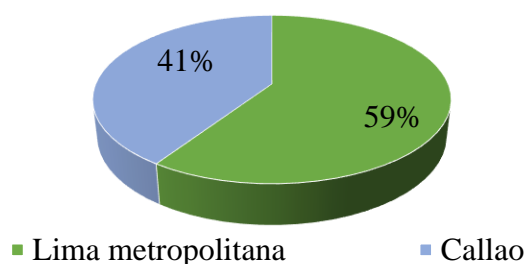
Región	Cantidad de RCD (m³)	Puntos Críticos Vertimientos
Lima metropolitana	887,918	2,246
Callao	607,777	162
Total	1,495,695	2,408

Nota. Recopilación de la información hasta el 2014. Elaborado a partir de “MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN”, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2015. (<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialtrujillo/archivos/public/docs/6649.pdf>).

Asimismo, en la figura 4 se puede observar la distribución porcentual de los RCD en Lima metropolitana y Callao.

Figura 4

Cantidad de RCD en Espacios Públicos en Lima Metropolitana y Callao



Nota. Recopilación de la información hasta el 2014. Elaborado a partir de “MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN”, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2015. (<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-trujillo/archivos/public/docs/6649.pdf>).

También, Ate siendo uno de los distritos que concentran una población de gran magnitud en Lima metropolitana, se encontró puntos de vertimientos públicos en su gran mayoría en ríos y vías de tránsito. En la tabla 4 se puede observar los espacios públicos donde se vierten en el distrito de Ate.

Tabla 4

Cantidad de RCD por m³ en Espacios Públicos en el Distrito de Ate

Espacios públicos	Volumen estimado (m ³)	Puntos Críticos Vertimientos
Vías	1794	51
Parques	6	1
Fajas marginales de río	3060	2
Otros	307	8
Total	5167	62

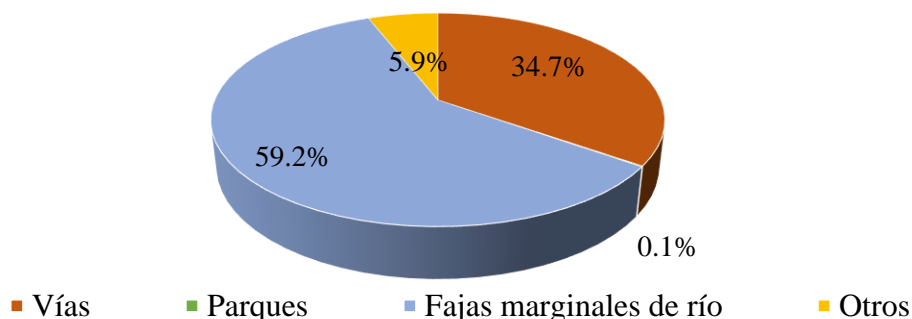
Nota. Adaptado de “Plan de gestión de residuos sólidos de la construcción y demolición depositados en espacios públicos y de obras menores”, por Municipalidad Distrital de Ate, 2013.

(<https://www.muniate.gob.pe/ate/files/transparencia/GERENCIA%20DE%20GESTION%20AMBIENTAL/SUB%20GERENCIA%20DE%20GESTION%20Y%20MANEJO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS/PLAN%20DE%20GESTION%20DE%20RCD%20MDA.pdf>).

Asimismo, en la figura 5 se observa la distribución porcentual de estos puntos de vertientes.

Figura 5

Cantidad de RCD en espacios públicos en el distrito de Ate



Nota. Elaborado a partir de “Plan de gestión de residuos sólidos de la construcción y demolición depositados en espacios públicos y de obras menores”, por Municipalidad Distrital de Ate, 2013.

(<https://www.muniate.gob.pe/ate/files/transparencia/GERENCIA%20DE%20GESTION%20AMBIENTAL/SUB%20GERENCIA%20DE%20GESTION%20Y%20MANEJO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS/PLAN%20DE%20GESTION%20DE%20RCD%20MDA.pdf>).

Para profundizar acerca de la clasificación de los materiales que pertenecen a los RCD, se analizaron proyectos en diversos tipos de actividades relacionadas a la industria de la construcción, que detalla cuales son los materiales que más se encuentran en los RCD en diversos distritos de Lima metropolitana.

RCD’s generados en proyectos de construcción en Lima metropolitana:

1. Edificación multifamiliar en Jesús María

- Nombre de la compañía: Constructora La Muralla
- Dirección de Obra: Avenida San Felipe 423 – Jesús María – Lima
- Tipo de construcción: Edificio multifamiliar de 9 pisos y 3 sótanos
- Área de construcción: 821 m²

En la tabla 5 se observa de que materiales están compuestos los RCD que se generen en una edificación multifamiliar en distrito de Jesús María.

Tabla 5*Cálculo de Volumen Neto de RCD de una Edificación Multifamiliar en Jesús María - Lima*

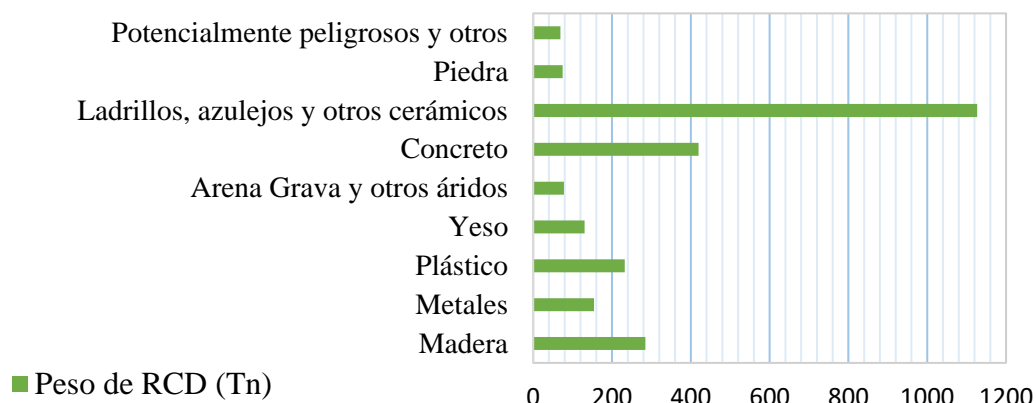
Evaluación teórica del peso por tipología de RCD				
	%	Tn	D	Vt
	% del peso total	Toneladas brutas de cada tipo de RCD	Densidad media (T/m3)	Volumen neto de Residuos (m3)
Residuos No Peligrosos				
Madera	9.64%	284.71	0.60	474.52
Metales	5.23%	154.34	1.50	102.90
Papel	9.14%	269.73	0.90	299.70
Plástico	7.87%	232.26	0.90	258.07
Vidrio	0.25%	7.49	1.50	4.99
Yeso	4.42%	130.37	1.20	108.64
Residuos Inertes				
Arena Grava y otros áridos	2.64%	77.92	1.50	51.95
Concreto	14.21%	419.57	2.50	167.83
Ladrillos, azulejos y otros cerámicos	38.17%	1126.85	1.50	751.24
Piedra	2.54%	74.92	1.50	49.95
Residuos Peligrosos				
Basuras	3.55%	104.89	0.90	116.55
Potencialmente peligrosos y otros	2.34%	68.93	0.50	137.86
Estimación total de RCD	100.00%	2952.00	1.20	2524.18

Nota. Adaptado de “Planteamiento de un manual para la gestión de los residuos de construcción y demolición en edificaciones urbanas”, por L. Arce y E. Tapia, 2014. (<https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/1161>).

De la tabla se puede analizar que los mayores porcentajes de RCD lo tienen el concreto y los ladrillos, azulejos y otros cerámicos con un 52.4 %. En la figura 6 se observa la cantidad de RCD que se generó en toneladas en la edificación.

Figura 6

Cantidad de RCD en Toneladas en una Edificación Multifamiliar en Jesús María - Lima



Nota. Elaborado a partir de “Planteamiento de un manual para la gestión de los residuos de construcción y demolición en edificaciones urbanas”, por L. Arce y E. Tapia, 2014. (<https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/1161>).

2. Edificación Clement en San isidro.

- Dirección de Obra: Av. Javier Prado Oeste 2367 – San Isidro – Lima
- Tipo de construcción: Edificio multifamiliar de 7 pisos y 2 sótanos
- Área de construcción: 420 m²

En la tabla 6 se puede observar los RCD que se generen en el edificio Clement en el distrito de San isidro.

Tabla 6

Cantidad de RCD del Edificio Clement en San isidro – Lima

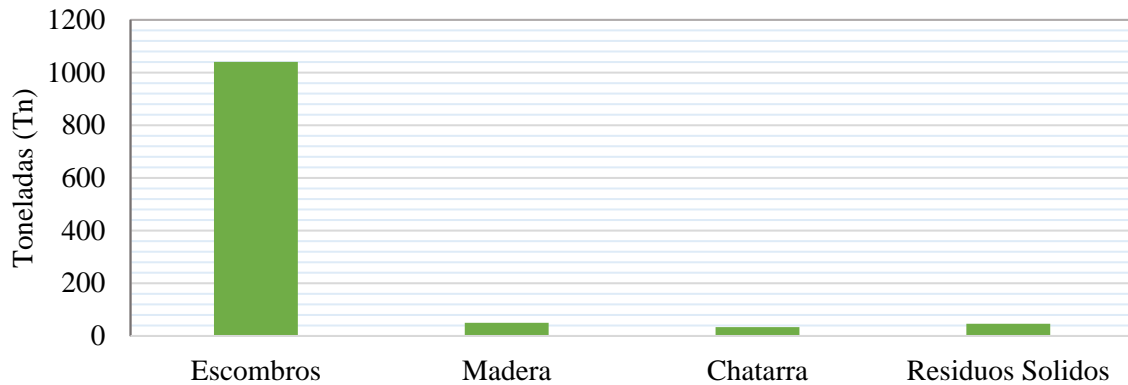
Material	Reciclable (Tn)	No Reciclable (Tn)
Escombros	1015.95	24.52
Madera	49.9	0
Chatarra	29.28	4.08
Residuos Solidos	44.2	2.05

Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

Se puede verificar que de los escombros (Arena, ladrillos, concreto, losetas, mármol, yeso, muros de albañilería y roca) tiene la mayor cantidad de RCD. En la figura 7 se puede apreciar la cantidad de RCD en toneladas del edificio Clement en San isidro.

Figura 7

Cantidad de RCD Total del Edificio Clement en San isidro – Lima

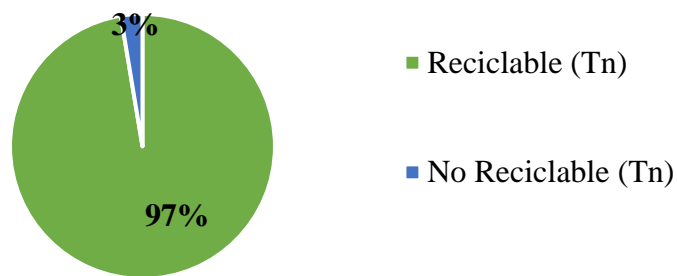


Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

De la tabla 6 se puede apreciar que la gran mayoría de los materiales se pueden reciclar. En la figura 8 se puede evidenciar esto de forma porcentual.

Figura 8

Porcentaje de material reciclable del edificio Clement en San isidro – Lima



Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

3. Modernización del terminal muelle norte (TMN) en Callao

- Dirección de Obra: Constitución 340 – Callao
- Tipo de construcción: Habilitaciones urbanas y muelle
- Área de construcción: 316,243.32 m²

En la tabla 7 se muestra los RCD generados en el terminal muelle norte en Callao.

Tabla 7

Cantidad de RCD del TMN – Callao

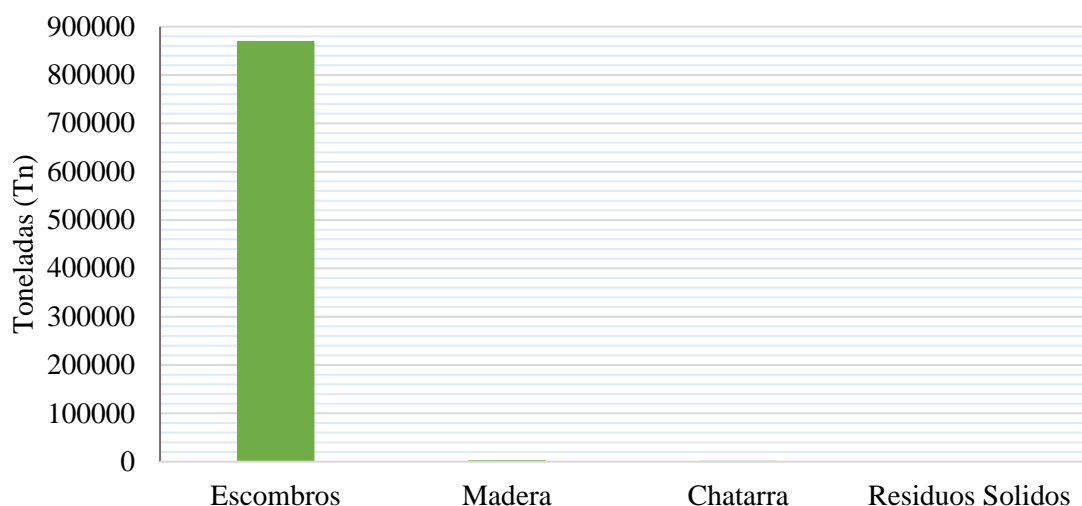
Material	Reciclable (Tn)	No Reciclable (Tn)
Escombros	761,777.13	108,516.46
Madera	3,061.87	-
Chatarra	1,612.83	291.56
Residuos Solidos	398.73	38.28

Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

Se puede verificar que de los escombros (Residuos de demolición, losetas, granito, arena, piedra, arcilla, roca, ladrillos y concreto) tiene la mayor cantidad de RCD. En la figura 9 se puede apreciar las diferencias entre las cantidades de cada residuo en toneladas.

Figura 9

Cantidad de RCD Total del TMN – Callao

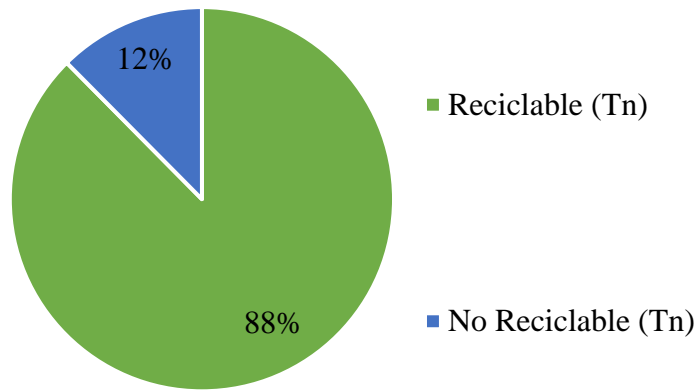


Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

De la tabla se puede apreciar que la gran mayoría de los materiales se pueden reciclar, y se complementa con la figura 10 que muestra la diferencia porcentual.

Figura 10

Porcentaje de Material Reciclable del TMN – Callao



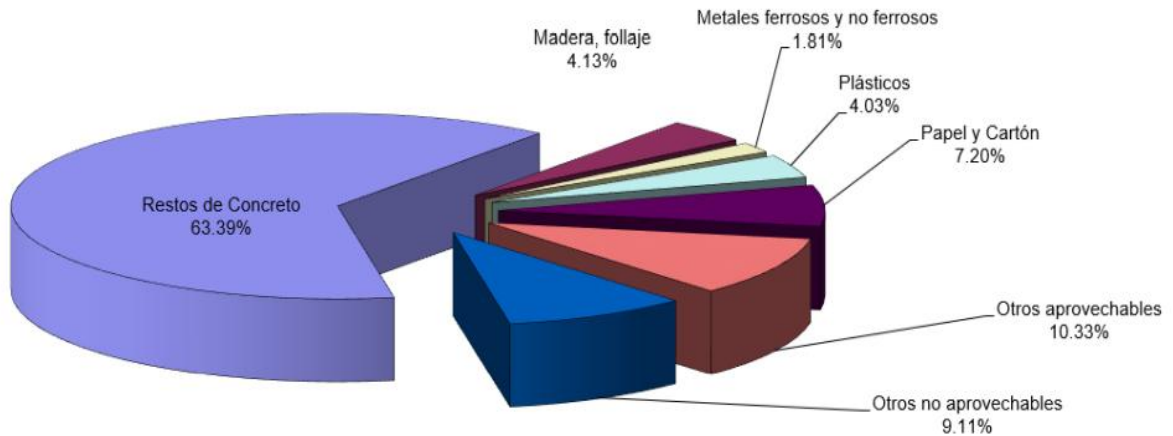
Nota. Adaptado de “Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)” por M. Bazán, 2018. (<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>).

4. Inmobiliaria La Venturosa.

Se recopiló la información de los siguientes proyectos constructivos: Condominio Esencial, Edificio Viverdi, Condominio Felizia, Edificio Uniko. Cabe mencionar, la información se obtuvo de los contenedores de residuos de la empresa Cajas Ecológicas SAC. De la recopilación, se realizó una gráfica de la composición de RCD's de estos proyectos que se muestra en la figura 11. Donde, se encontró los restos de concreto con un 63.39% como el que mayor residuo generó.

Figura 11

Composición Física de los Residuos de Construcción y Demolición de Proyectos de la Inmobiliaria La Venturosa (% m3)



Nota. Información recopilada entre enero del 2021 hasta junio del 2022. De “Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición” por Cajas Ecológicas S.A.C., 2022. (<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3423941/Presentacio%CC%81n%20Residuos%20Construccion%CC%81n%20-%20Renzo%20Avalo/MVCS.pdf>).

La industria de la construcción produce una gran cantidad de residuos sólidos, y la insuficiencia de vertederos para su almacenamiento y tratamiento representa un desafío significativo. La incorporación de tecnologías innovadoras para reciclar el concreto podría facilitar su reutilización en nuevas construcciones. El reciclaje de concreto proveniente de la construcción y demolición (RCD) ha sido implementado durante décadas en diversos países del mundo. Esta práctica ofrece dos beneficios principales: disminuye la extracción de materias primas y los impactos ambientales asociados, además de reducir la generación de residuos innecesarios que podrían ser recuperados y reaprovechados. Por ello, proponer el uso de residuos de concreto del sector de la construcción como agregados para elaborar nuevas mezclas de concreto se presenta como una solución sostenible para mitigar la acumulación de RCD en Lima Metropolitana. No obstante, es fundamental analizar las propiedades del concreto reciclado para asegurar que cumpla con los estándares de desempeño requeridos.

Delimitación del problema

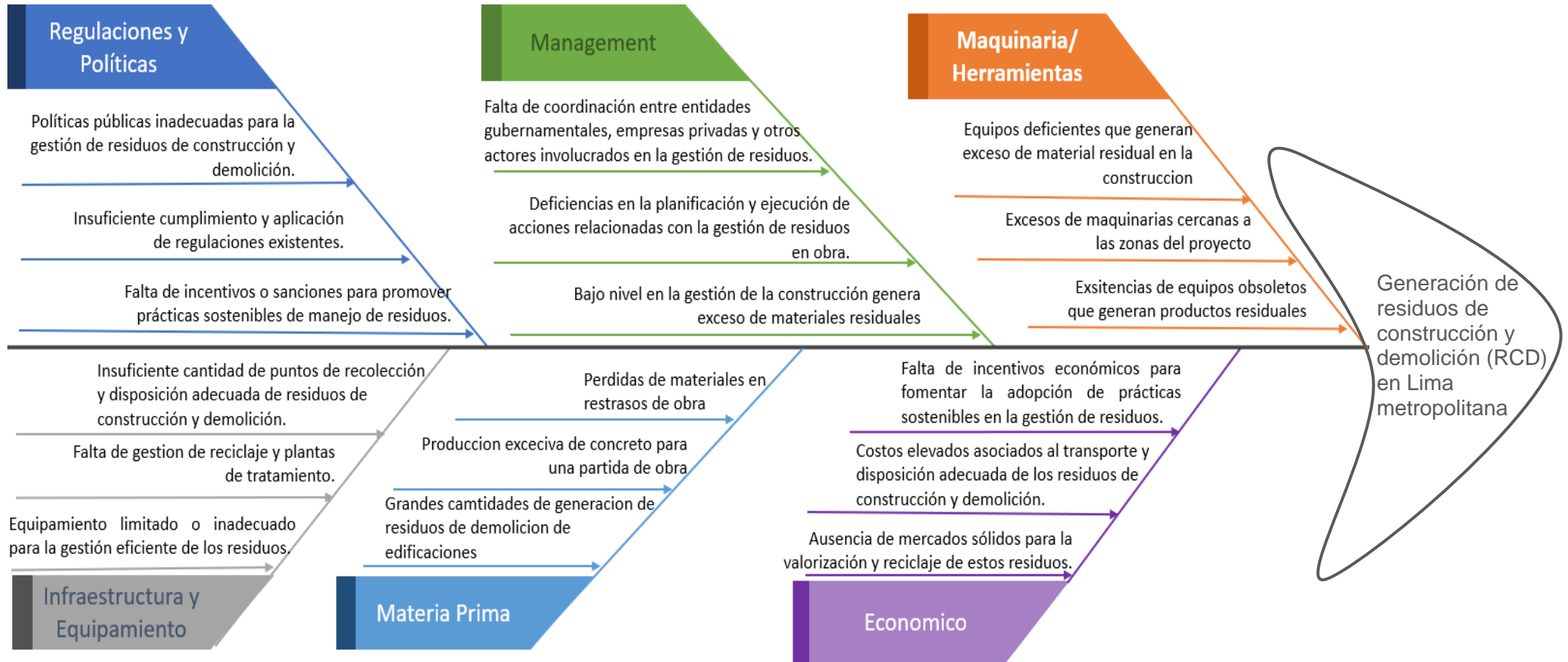
La investigación abarcará a la zona geográfica de Lima metropolitana, por lo que se utilizará la data correspondiente de la zona para fundamentar el uso de los materiales, técnicas, metodologías, etc. De esta manera, poder establecer en diseño óptimo para producir un concreto reciclado reutilizando los residuos de construcción y demolición (RCD), generando una cultura de reciclaje reduciendo la contaminación que generan estos residuos cuando se vierten en los diversos distritos de la capital.

Formulación del problema

Conforme a la recopilación de data encontrada acerca de los RCD, se determinó que los RCD son un problema de suma importancia que aqueja a la población limeña debido a diversos factores que la generan provocando diversas consecuencias que afectan de manera significativa a la población. En la figura 12 se presentará un diagrama de Ishikawa acerca de las causas que generan los RCD.

Figura 12

Diagrama de Ishikawa de la Generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Lima Metropolitana



De esta manera se realiza la formulación de la pregunta de investigación que se muestra a continuación:

¿De qué manera se podría utilizar las nuevas tecnologías constructivas para reducir las grandes cantidades residuos de construcción y demolición (RCD) que se generan en Lima metropolitana?

La pregunta se planteó centrándonos en buscar una solución en base a las nuevas tecnologías constructivas, técnicas y metodologías, que genera la contaminación de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la ciudad de Lima. De esta manera, fomentar su uso en la industria de la construcción debido a sus diversos beneficios.

Justificación del problema

En primer lugar, Para la justificación de la problemática se basó en los materiales que mayormente se usan en Lima metropolitana, es así como se recurrió al informe realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del censo realizado en el 2017, información acerca de los materiales más usados en las viviendas del Perú dividido en las paredes, pisos y techos donde se realizó el siguiente análisis.

En las paredes exteriores, se encontró a Lima metropolitana como la provincia más predominante en construcción y con el ladrillo y bloque de cemento como materiales más usados con un 85.1%. En la tabla 8 se puede observar los materiales que predominan en la construcción de paredes exteriores en el Perú.

Tabla 8

Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en las Paredes Exteriores por Departamentos del Perú, 2017

Departamento	Total	Material predominante en las paredes exteriores de la vivienda						
		Ladrillo o bloque de cemento	Piedra o sillar con cal o cemento	Adobe o tapia	Quincha (caña con barro)	Piedra con barro	Madera (pona, tornillo etc.)	Otro material 1/
Total	7 698 900	4 298 274	43 170	2 148 494	164 538	77 593	727 778	239 053
Amazonas	102 407	17 011	133	53 232	6 272	938	23 370	1 451
Ancash	295 899	115 565	422	141 794	2 631	885	4 025	30 577
Apurímac	120 548	25 092	132	91 752	141	1 935	799	697
Arequipa	381 388	294 599	17 613	30 835	7 279	6 249	10 537	14 276
Ayacucho	173 344	45 289	640	107 647	419	6 478	11 343	1 528
Cajamarca	376 223	83 293	339	264 310	9 023	9 708	8 315	1 235
Prov. Const. del Callao	244 820	183 084	1 206	4 505	2 802	176	50 477	2 570
Cusco	323 572	79 207	1 534	217 794	400	8 196	15 192	1 249
Huancavelica	102 996	12 598	464	84 835	147	4 417	232	303
Huánuco	189 813	54 931	347	104 930	370	1 149	26 901	1 185
Ica	221 679	152 981	577	29 064	7 891	305	9 021	21 840
Junín	324 075	160 311	678	107 473	6 318	1 850	43 830	3 615
La Libertad	441 862	203 065	912	228 792	1 585	1 588	1 307	4 613
Lambayeque	289 969	157 972	460	121 671	5 186	224	877	3 579
Lima	2 418 047	1 981 354	11 705	130 745	12 163	2 767	208 178	71 135
Loreto	189 526	67 618	254	1 334	277	430	113 460	6 153
Madre de Dios	39 381	21 010	398	723	5	30	16 310	905
Moquegua	56 457	34 161	145	11 161	310	449	3 187	7 044
Pasco	63 938	25 252	244	21 626	529	505	14 313	1 469
Piura	469 272	222 500	1 429	130 735	61 090	983	8 294	44 241
Puno	386 671	119 455	2 015	226 775	303	26 213	7 754	4 156
San Martín	210 790	103 570	387	23 261	17 695	1 198	60 544	4 135
Tacna	97 545	78 910	478	7 650	465	248	2 613	7 181
Tumbes	60 902	30 935	412	4 766	21 129	433	2 137	1 090
Ucayali	117 776	28 511	246	1 084	108	239	84 762	2 826
Provincia de Lima 2/	2 175 200	1 850 434	10 905	52 272	7 089	1 244	197 660	55 596
Región Lima 3/	242 847	130 920	800	78 473	5 074	1 523	10 518	15 539

Nota. De “Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares”, por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2018. (https://www.censos2017.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1538/libro.pdf).

En los pisos de las viviendas, se tiene a Lima metropolitana como la provincia con más viviendas con el cemento como material más predominante con un 57 %. Como se observa en la tabla 9 los materiales que predominan en la construcción de pisos en el Perú.

Tabla 9

Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en los Pisos por Departamentos del Perú, 2017

Departamento	Total	Material predominante en los pisos de la vivienda						
		Parquet o madera pulida	Láminas asfálticas	Losetas, terrazos, cerámicos o similares	Maderas (pona, tornillo, etc.)	Cemento	Tierra	Otro material 1/
Total	7 698 900	391 995	144 412	1 236 153	230 639	3 246 505	2 448 766	430
Amazonas	102 407	63	93	3 159	2 851	32 686	63 554	1
Ancash	295 899	2 068	1 077	32 783	1 220	112 054	146 695	2
Apurímac	120 548	545	396	4 995	2 082	28 559	83 971	-
Arequipa	381 388	16 882	17 981	60 463	2 331	221 367	62 351	13
Ayacucho	173 344	667	565	9 727	1 973	52 232	108 180	-
Cajamarca	376 223	1 775	582	21 970	4 351	102 862	244 683	-
Prov. Const. del Callao	244 820	19 108	7 670	68 020	4 076	131 969	13 962	15
Cusco	323 572	9 698	2 572	27 199	20 380	85 236	178 486	1
Huancavelica	102 996	366	141	2 059	2 964	18 461	79 005	-
Huánuco	189 813	925	597	13 778	9 573	60 708	104 231	1
Ica	221 679	2 764	1 574	44 469	657	126 795	45 419	1
Junín	324 075	7 186	2 586	29 179	18 670	140 032	126 416	6
La Libertad	441 862	13 805	2 598	66 233	1 764	190 094	167 334	34
Lambayeque	289 969	3 584	2 131	62 355	838	133 839	87 192	30
Lima	2 418 047	301 028	92 808	644 235	29 315	1 155 999	194 442	220
Loreto	189 526	213	593	14 723	62 163	65 938	45 896	-
Madre de Dios	39 381	126	142	3 636	4 447	24 578	6 452	-
Moquegua	56 457	715	1 968	8 635	237	28 811	16 090	1
Pasco	63 938	519	252	2 689	18 595	21 158	20 724	1
Piura	469 272	1 110	1 983	60 414	1 679	168 995	235 086	5
Puno	386 671	5 436	1 899	7 530	11 521	110 430	249 853	2
San Martín	210 790	376	668	17 097	3 132	99 425	90 019	73
Tacna	97 545	2 729	3 137	15 015	373	49 548	26 729	14
Tumbes	60 902	131	196	8 419	270	33 601	18 285	-
Ucayali	117 776	176	203	7 371	25 177	51 128	33 711	10
Provincia de Lima 2/	2 175 200	298 751	91 740	609 326	26 720	1 017 917	130 607	139
Región Lima 3/	242 847	2 277	1 068	34 909	2 595	138 082	63 835	81

Nota. De “Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares”, por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2018. (https://www.censos2017.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1538/libro.pdf).

Finalmente, en los techos de las viviendas tenemos a lima metropolitana como la provincia con más viviendas con el concreto armado como material mayor predominante con un

porcentaje de 74.3 %. Como se observa en la tabla 10 los materiales que predominan en la construcción de techos en el Perú.

Tabla 10

Cantidad de Viviendas Particulares por Material Predominante en los Techos por Departamentos del Perú, 2017

Departamento	Total	Material predominante en los techos de la vivienda							
		Concreto armado	Madera	Teja	Planchas de calamina, fibras de cemento o similares	Caña o estera con torta de barro o cemento	Triplay / estera / carrizo	Paja, hojas de palmeras y similares	Otro material 1/
Total	7 698 900	3 298 280	154 802	600 274	3 016 332	260 969	142 864	225 336	43
Amazonas	102 407	8 459	1 148	10 320	70 769	500	214	10 997	-
Ancash	295 899	84 845	1 971	60 300	101 858	17 016	25 716	4 192	1
Apurímac	120 548	19 043	524	37 718	54 476	298	192	8 296	1
Arequipa	381 388	235 171	4 148	2 211	120 836	9 361	7 547	2 112	2
Ayacucho	173 344	39 720	1 080	30 206	93 589	1 191	977	6 576	5
Cajamarca	376 223	61 319	2 810	93 578	213 620	2 430	697	1 769	-
Prov. Const. del Callao	244 820	156 937	22 180	1 682	55 766	2 823	4 861	570	1
Cusco	323 572	52 829	2 557	118 566	121 408	1 065	501	26 644	2
Huancavelica	102 996	11 108	223	38 021	47 952	300	435	4 957	-
Huánuco	189 813	38 722	1 660	14 345	121 892	954	374	11 866	-
Ica	221 679	120 456	5 480	1 688	13 076	58 493	21 515	969	2
Junín	324 075	114 274	3 120	62 353	125 579	1 828	857	16 063	1
La Libertad	441 862	179 570	2 290	64 006	144 285	37 212	8 311	6 177	11
Lambayeque	289 969	128 063	887	2 965	133 381	21 890	2 526	254	3
Lima	2 418 047	1 709 457	76 651	14 550	472 686	91 757	49 032	3 911	3
Loreto	189 526	8 739	6 407	979	140 592	263	1 242	31 303	1
Madre de Dios	39 381	6 507	1 442	117	29 766	219	190	1 140	-
Moquegua	56 457	28 937	791	518	21 791	1 123	2 765	532	-
Pasco	63 938	5 648	1 505	931	50 938	214	238	4 464	-
Piura	469 272	95 852	2 137	38 305	319 285	4 448	8 402	841	2
Puno	386 671	93 251	1 204	2 316	225 934	1 839	1 285	60 840	2
San Martín	210 790	28 519	5 092	2 939	165 120	1 690	965	6 465	-
Tacna	97 545	51 737	1 091	594	38 263	2 536	3 020	300	4
Tumbes	60 902	10 515	520	449	48 015	1 180	189	34	-
Ucayali	117 776	8 602	7 884	617	85 455	339	813	14 064	2
Provincia de Lima 2/	2 175 200	1 616 788	70 951	12 324	417 514	21 627	33 153	2 841	2
Región Lima 3/	242 847	92 669	5 700	2 226	55 172	70 130	15 879	1 070	1

Nota. De “Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Perú: Características de las viviendas particulares y los hogares”, por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2018. (https://www.censos2017.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1538/libro.pdf).

En conclusión, se tiene a Lima metropolitana como unas de las provincias donde se construyen mayores viviendas en el Perú, por lo que es un indicativo que es una de las zonas donde mayormente se encontrarán residuos de construcción y demolición. Asimismo, se encontró los materiales que forman parte del concreto como uno de los más predominantes que se usan en su construcción, por lo que la mayor generación de residuos de construcción lo conformaran estos tipos de materiales.

Por lo tanto, la utilización de residuos de concreto como agregado reciclado para el diseño de un concreto sostenible es una alternativa viable en el contexto de Lima metropolitana que fomenta la cultura de reciclaje en el sector de la construcción. Los beneficios de utilizar agregado reciclado en la producción de concreto son numerosos. Desde una perspectiva ambiental, este enfoque reduce la necesidad de extraer agregados naturales, conservando recursos y disminuyendo el impacto ambiental asociado con la minería y el transporte de materiales vírgenes. En términos de eficiencia energética, la producción de concreto con agregado reciclado suele ser menos intensiva en energía y genera menos emisiones de CO₂ en comparación con el uso de agregados naturales, debido a la reducción en la extracción y transporte de materiales. Dado el contexto en el que se quiere aplicar la solución a la problemática, mostrando la importancia en el sector de la construcción, se requiere una solución tecnológica e innovadora para aplicar el uso de estos agregados reciclados en la elaboración de un nuevo concreto que sea de uso sostenible para reducir los residuos de construcción y demolición (RCD) en Lima metropolitana.

De lo explicado anteriormente, la tecnología de impresión 3D de concreto es una propuesta factible, pues implementa técnicas innovadoras sobre el proceso de fabricación del concreto que aportaría en el sector de la construcción en el Perú. De esta manera, impulsar el uso de herramientas digitales de manera sistematizada, con el fin de erradicar las malas prácticas constructivas que ha conllevado a tener pérdidas económicas, salud, etc. Asimismo, se busca en un futuro implementar máquinas que controlan de manera informática, donde componentes de construcción se pueden personalizar en masa y producir individualmente en serie, combinando así los beneficios del sistema tradicional y la producción industrializada. También se tendría impacto al reducir el costo y la cantidad de materiales para la construcción en comparación con los métodos tradicionales de construcción.

A continuación, se muestra en la tabla 11 una comparación sobre las ventajas y desventajas del uso de esta tecnología de la impresión 3D con respecto al sistema tradicional.

Tabla 11

Cuadro Comparativo del Uso de la Impresión 3D de Concreto y el Sistema Tradicional

Impresión 3D de concreto	Sistema tradicional
El concreto empleado en impresoras 3D de gran formato puede elaborarse utilizando materiales reciclados, lo que contribuye positivamente a la protección del medio ambiente	Se usan materiales convencionales para elaborar el concreto y se generan residuos de construcción.
La impresión 3D reduce significativamente la generación de residuos en proyectos de construcción, ya que utiliza únicamente la cantidad exacta de material necesario para fabricar la estructura. Esto puede representar un importante ahorro de materiales.	Se generan mayores residuos de construcción en las edificaciones en la etapa de construcción.
El uso de la impresión 3D en la construcción reduce significativamente la tasa de accidentes y lesiones laborales al automatizar gran parte del proceso. Este método se basa en datos digitales estandarizados y precisos, lo que garantiza una mayor eficiencia y exactitud en la construcción, minimizando errores y la necesidad de realizar ajustes posteriores.	Se necesita más mano de obra para realizar diversas actividades constructivas. En consecuencia, aumenta la tasa de accidentes y lesiones laborales.
La impresión 3D ofrece la ventaja de crear formas arquitectónicas libres, permitiendo la fabricación de una amplia variedad de geometrías, desde muros rectos hasta estructuras curvas, con gran precisión y flexibilidad.	Limitaciones para crear diversas formas para un elemento de concreto
El costo de un muro impreso en 3D es más bajo debido a la rapidez del proceso, la eficiencia en el uso de materiales y la disminución de la mano de obra necesaria.	Costos elevados en la elaboración de concreto con el sistema constructivo tradicional.
En la construcción de muros, no se requieren moldes, lo que elimina tanto los residuos como los costos asociados a su fabricación.	El sistema tradicional genera bajo control de calidad en el producto final. Asimismo, el exceso de material desperdiciado genera mayores costos y el proceso de ejecución toma mayor tiempo.
Los muros impresos en 3D pueden reducir los costos energéticos en aproximadamente un 60%, debido a las propiedades térmicas que poseen.	
La edificación de 70 metros cuadrados se puede llevar a cabo en un tiempo inferior a las 24 horas.	

Estado del Arte

Durante los últimos años, la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en el mundo es un problema que ha ido en aumento, sobre todo en países donde la tecnología y la sobrepoblación está en constante crecimiento, esto genera que la industria de la construcción produzca mayores infraestructuras civiles, que a su vez genere la demolición de construcciones antiguas otras estructuras que han superado su límite de uso. Es por ello, que implementar la cultura del reciclaje en la construcción, es una de las formas más sostenibles para reducir los problemas que generan los RCD. En ese sentido, una de las formas de reciclaje en la construcción ha sido aplicada en los últimos años, son el uso de agregados de concreto reciclado (ACR) para utilizarlo en la elaboración de nuevo concreto. Por otro lado, la industria de la construcción está adoptando nuevas tecnologías para la construcción de infraestructuras, especialmente edificios, mejorando la calidad de concreto, reutilizando materiales de construcción y demolición, y reduciendo el impacto ambiental. Esto ha generado que se presenten nuevas tecnologías que buscan sustituir los métodos tradicionales en la construcción. Una de estas tecnologías es la impresión 3D, que ha atraído cada vez más la atención en el sector de la construcción debido a sus grandes ventajas de digitalización, automatización y alto grado de inteligencia, en el futuro puede ser una alternativa en sustituir del método tradición en nuestro país.

Con lo mencionado anteriormente, esta investigación busca reducir las grandes cantidades de residuos de construcción y demolición que se generan, mediante la reutilización de agregados reciclados de concreto en la elaboración de un nuevo concreto con la impresión 3D. es por ello, que la investigación abordo diversos temas que se dividieron 4 tipologías: Residuos de construcción y demolición (RCD), agregados reciclados de concreto (ACR), tecnología de impresión 3D de concreto y el diseño de concreto con agregados reciclados de concreto.

Para el estudio de residuos de construcción y demolición (RCD) es necesario contar con información relevante sobre la magnitud del problema que nos estamos enfrentando y tomar acciones para futuros investigaciones. En primer lugar, para el caso de RCD, se ha analizado a grandes ciudades en crecimiento que se enfrentan a los riesgos ambientales por generar

grandes cantidades de RCD, los países en desarrollo como China la generación anual de RCD se estima que fueron alrededor de 2.400 millones de toneladas en la última década, en India alcanzaron a los 530 millones de toneladas y en EE. UU florida la cantidad producido de desechos de residuos de construcción y demolición fue de 3,750.000 toneladas. Sin embargo, solo alrededor del 5% RCD se reutilizaron en estos países y el resto termina en gran medida en vertederos para su eliminación. Para disminuir la cantidad de RCD que terminan en vertederos, se necesita investigación adicional y acción rápida sobre la caracterización y gestión de RCD, particularmente para los países en desarrollo para ello se necesita Involucrar a profesionales del mundo de la construcción (Duan et al., 2019).

En segundo lugar, es importante especificar como categorizar los RCD para ello se ha evaluado diferentes tipos de RCD como lo son los residuos de concreto, residuos cerámicos y residuos mixtos donde se determina que el residuo de concreto es más adecuado para producir elementos estructurales debido a sus favorables características, después de una revisión exhaustiva de las propiedades como es la resistencia mecánica, deformación y durabilidad. En conclusión, se encontró una determinada proporción de residuos de concreto que se puede usar como agregado (ACR) para realizar una nueva mezcla de concreto sin alterar las características de su diseño (González-Fonteboa et al., 2018).

En tercer lugar, y como un mayor soporte a la solución que se está planteando, esta la impresión 3D de concreto como una tecnología innovadora que propone otros beneficios en el sector constructivo, como se menciona párrafos anteriores, comparados en base al sistema tradicional. Además, es importante mencionar que la metodología de impresión 3D concreto por inyección, tiene como característica principal imprimir el concreto mediante la acumulación de capas horizontales, proponiendo generar impresiones espaciales más complejas mediante el uso de la robótica. En una investigación, se clasificó a la impresión 3D de concreto por inyección en 3 tipos de variaciones, analizando diversas variables como, la sección que describen la configuración robótica utilizada, los flujos de trabajo digitales y los materiales desarrollados. El propósito de esta investigación es presentar una revisión sistemática del impacto de esta tecnología en la construcción de edificios y en la

optimización de los recursos consumidos por el sector, implementando la tecnología de la impresión 3D con el objetivo de influir en el impacto ambiental (Hack et al., s. f.).

Finalmente, centrándonos en las características del concreto con impresión 3D este requiere una atención especial, en comparación con la construcción tradicional, debido a que se tiene que analizar otro tipo de variables para lograr la función del cual se está diseñando, desde la deposición a la boquilla, la extrusión, la edificabilidad, la bombeabilidad y las diversas propiedades en estado fresco y endurecido son de suma importancia para lograr un concreto imprimible. En algunas investigaciones se ha adoptado usar un mayor contenido de cemento como solución general para cumplir con el requisito, sin embargo, el uso elevado de cemento puede provocar otros problemas críticos, como grietas por contracción. En consecuencia, fue necesario aplicar diferentes aditivos minerales o químicos para mejorar las propiedades del concreto imprimible. Además, varios estudios sugieren que la incorporación de agregados reciclados en las fórmulas de concreto para impresión 3D podría ofrecer oportunidades para fomentar una economía circular y contribuir a la mejora de la sostenibilidad de las mezclas utilizadas en este tipo de impresión (Rahul et al., 2022).

Hipótesis

Al sustituir un porcentaje óptimo de agregados naturales por agregados de concreto reciclado (ACR) en la producción de un concreto reciclado, este tendrá propiedades similares o mayores a la de un concreto impreso en 3D, por lo que será una alternativa sostenible que reducirá los residuos en la construcción y demolición (RCD), y así mitigar la contaminación que se genera en Lima metropolitana.

Objetivos

Objetivo General:

- Proponer un diseño óptimo para la producción de un concreto reciclado usando la tecnología de impresión 3D para reducir los residuos de construcción y demolición (RCD) en Lima metropolitana.

Objetivos Específicos:

- Determinar las propiedades mecánicas del agregado natural y del agregado de concreto reciclado (ACR).
- Elaborar mezclas preliminares para determinar el diseño de mezcla estándar del concreto para impresión 3D.
- Elaborar mezclas definitivas de concreto con una relación de sustitución del agregado natural por el agregado de concreto reciclado para determinar su comportamiento reológico en estado fresco y su resistencia a la compresión en estado endurecido.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados de los diseños de mezclas para determinar el diseño de mezcla óptimo del concreto reciclado para su aplicación en la impresión 3D.
- Determinar la reducción de residuos de construcción y demolición al producir el diseño óptimo del concreto reciclado para impresión 3D.

Limitaciones

La investigación al presentar un nivel explicativo y de carácter experimental, se pueden tener diferentes limitaciones que puedan interferir en lograr los objetivos planteados para el avance de la investigación en el tiempo programado. Estas limitaciones se pueden clasificar en diferentes tipologías como se puede apreciar en la tabla 12.

Tabla 12

Limitaciones de la Investigación

Tipologías	Limitaciones
Recursos	La selección de los materiales para la elaboración del concreto es uno de los procesos fundamentales para el diseño. Las dificultades que se pueden tener en la selección del agregado de concreto reciclado esta que existen pocas plantas de tratamiento para el reciclaje de RCD, lo que genera incertidumbre en la obtener la caracterización correcta de estos agregados. Por otro lado, la impresión 3D de concreto es una técnica de producción con un elevado costo inicial (debido a la maquinaria, capacitación, etc.), de manera que no se podrá producir un concreto en estas condiciones para esta investigación. En consecuencia, los ensayos que se realicen no serán directamente de esta tecnología.
Técnicas	Al ser una investigación experimental, puede que las propuestas de concreto que se estén planteando no sea las necesarias para lograr la solución al problema. Asimismo, al ser una tecnología poco estudiada en el Perú no hay regulaciones que puede establecer los estándares a los resultados que se obtengan de los ensayos realizados al concreto con impresión 3D
Temporal	Respecto al tiempo, en el proceso de elaboración del concreto se puede presentar eventualidades (no lograr las condiciones en sus propiedades, errores de diseño, mala calibración de equipos, etc.) que tengan que modificar algunas etapas de la etapa experimental generando retrabajos y retrasando la investigación.
Culturales	Esto refiere a las bajas expectativas que se tiene por optar por nuevas tecnologías constructivas en la población, así como la falta de cultura de reciclaje que se tiene en el país. Es por ello, que mediante esta investigación se quiere lograr un aporte para cambiar esos aspectos.

Descripción del Contenido

En la investigación se aborda diversos capítulos para presentar el proceso que se tuvo que realizar para proponer un concreto con agregados de concretos reciclados utilizando la impresión 3D para su elaboración. Se inició con una introducción que expone el tema y el título de la tesis, así como el problema que se pretende abordar, comenzando con una descripción del estado actual. También se presenta el problema de investigación, la hipótesis, los objetivos y los resultados esperados de la tesis. Al final, se detallan las limitaciones y supuestos del estudio. Además, se incluyó un estado del arte basado en una revisión bibliográfica de los principales temas que sustentan la propuesta metodológica.

En el primer capítulo, se describe el marco teórico que es la fundamentación de los conceptos, técnicas, metodologías usadas en la investigación. En este capítulo se profundizó acerca del uso de los agregados naturales y de los agregados reciclados de concreto para la elaboración de concreto, analizando sus propiedades y los requerimientos que se tienen regularizados. Además, se describe acerca de la tecnología de impresión 3D de concreto sobre las propiedades que presenta y las condiciones que se debe presentar para lograr producir el concreto con esta técnica. Finalmente, se menciona acerca del comportamiento que presenta el concreto impreso cuando se reemplaza el agregado natural por ACR.

En el segundo capítulo, se describe la metodología para realizar la investigación, donde se describe las condiciones que presenta la impresora 3D y otros parámetros para el que se quiere elaborar el concreto propuesto. De esta manera, plantear los materiales que se utilizaran en el programa experimental de la investigación, lo que permitirá desarrollar a profundidad el estudio. Asimismo, la linealidad que permitirá comprender de primera mano el diseño, técnicas de recolección de datos, variables del estudio, entre otros aspectos que contribuyen a la investigación.

En el cuarto capítulo, se describe el programa experimental, donde se aplicará los conceptos planteando para elaborar los ensayos de laboratorio. Para ello, se realizará prediseños de

concreto con una variable de control para determinar el diseño del concreto estándar. Luego, se realizará los diseños de mezcla con una relación de sustitución del agregado natural (AN) con el agregado reciclado (ACR). Finalmente, se realizarán los ensayos para determinar las propiedades planteadas en los objetivos específicos.

En el quinto capítulo, se realizará el análisis de los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados para determinar propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, esto fue establecido mediante tablas y gráficos para su mayor comprensión. Asimismo, se realizará el análisis comparativo del concreto estándar y los propuestos en base a estándares e investigaciones. Luego, se realizará un análisis para determinar la reducción que generara el uso del concreto en proyectos de construcción y demolición en Lima metropolitana.

Finalmente, en el sexto y séptimo capítulo se describe las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron del programa experimental y del análisis de resultados que fue establecido para cada objetivo específico. Planteando la visión de generar con esta investigación el reciclaje de residuos de construcción y demolición mediante agregados reciclados en la elaboración de nuevos concretos con impresión 3D.

CAPITULO I: MARCO TEORICO

En este capítulo se presentará la información teórica sobre la revisión de la literatura acerca del uso de agregados de concretos reciclados (ACR) en la producción de un concreto sostenible y el uso de la tecnología de impresión 3D para producir concreto. Inicialmente, se describirá sobre los residuos de construcción y demolición (RCD) entorno a su clasificación y cuantificación de los materiales que lo conforman en los proyectos del sector constructivo. En segundo lugar, se describirá acerca de los agregados naturales, y como se está regularizando el uso los agregados reciclados en diversos países. Seguidamente, se hablará de los ACR, así como las zonas en las que se pueden obtener, y estudios acerca de la producción de concreto sostenible con ACR. Además, se describirá acerca de las propiedades, comportamiento y clasificación de los ACR y cuál es su influencia en la producción de concreto. En tercer lugar, se explicará acerca del uso de la impresión 3D de concreto, las técnicas y tipos de impresión que se encuentran en el mercado en la actualidad. Finalmente, se detallará las consideraciones que se deben tener para el diseño de mezcla del concreto elaborado la impresión 3D y las propiedades que se deben lograr para fabricar este concreto de forma exitosa.

1.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son los desechos generados durante las actividades de construcción y demolición de edificaciones e infraestructuras. Estos residuos abarcan una amplia gama de materiales, tales como concreto, ladrillos, asfalto, vidrio, metales, plásticos, madera y materiales de excavación como tierra y rocas. La naturaleza de estos residuos es heterogénea y su composición puede variar significativamente dependiendo del tipo de construcción, los materiales utilizados y la fase específica del proyecto. Asimismo, los RCD representan una parte considerable de los residuos sólidos producidos globalmente. En muchos países, pueden constituir hasta el 40% del total de residuos sólidos urbanos. Esta alta proporción subraya la importancia de desarrollar estrategias eficaces de gestión y tratamiento para minimizar su impacto ambiental. La acumulación inadecuada de

estos residuos puede llevar a la contaminación del suelo y del agua, emisión de polvo y partículas, y efectos adversos sobre la biodiversidad y la salud pública.

1.1.1 Clasificación de los RCD

La clasificación de los RCD es un proceso fundamental para su gestión adecuada y sostenible. Este proceso implica separar y categorizar los diferentes tipos de residuos generados durante las actividades que se generan en el sector de la construcción. De acuerdo con el artículo 7 del Decreto Supremo 003-2013-VIVIENDA (2013), en el Perú los RCD se clasifican según su naturaleza en peligrosos y no peligrosos. En la tabla 13 se puede ver esta clasificación y los materiales que lo corresponden.

Tabla 13

Clasificación de los RCD Según su Naturaleza

Tipo	Grupo	Componentes
No peligrosos (Reutilizables)	Residuos inertes mezclados	Concreto , mortero, ladrillos, cerámicos, agregados finos y gruesos que no sobrepasen el tamiz #200
	Residuos inertes de material fino	Arcillas, limos y lodos inertes
	Residuos no inertes	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios, cauchos.
	Residuos metálicos	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc
	Residuos orgánicos	Residuos de tierra negra, residuos vegetales y otras especies bióticas.
Peligrosos (No reutilizables)	Residuos peligrosos	Restos de madera tratada, pinturas, aerosoles, envases de removedores de grasa, adhesivos, líquidos para remover pintura, pesticidas, contrachapados de madera, colas, lacas, tubos de fluorescentes, transformadores, condensadores, planchas de fibrocemento con asbesto, pisos de vinilo asbesto, paneles divisores de asbestos, Restos de PVC, Envases de solventes, Restos de cerámicos, baterías, Filtros de aceite, envases de lubricantes.

Nota. Elaborado a partir de “Guía informativa: Manejo de residuos de construcción y demolición en obras menores”, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2016. (<https://redrrss.minam.gob.pe/material/20160622094218.pdf>).

Asimismo, los RCD se pueden clasificar por su procedencia como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14

Clasificación de los RCD Según su Procedencia

Tipo	Descripción
Excavación	Es considerado a los residuos generados en todo trabajo de excavación, en la etapa inicial de una obra.
Construcción	Son los residuos generados en todo el proceso constructivo, ya sea de un proyecto nuevo, de reparación o rehabilitación.
Demolición	Son todos los residuos que se origina de las estructuras que hayan cumplido su vida útil, que son obtenidos de demoliciones, liberaciones y desmontajes.

Nota. Elaborado a partir de “Aplicación del uso de los residuos de construcción para la fabricación de bloques de hormigón en la ciudad de Riobamba, análisis de costo e impacto ambiental”, por R. Carrasco, 2018. (<https://repositorio.puce.edu.ec/items/cd7c64ec-b80e-4210-8d8f-cdf04a079bc8>).

1.1.2 Cuantificación de los RCD

La cuantificación de los RCD es un proceso de suma importancia, pues es la forma de estimar la cantidad de residuos según los materiales que se estén usando en un proyecto constructivo. Por tanto, para la presente investigación se determinó usar la legislación establecida por la Unión Europea al ser una de las entidades de gran reconocimiento, y basado específicamente en la Regulación de La Producción y Gestión de Los Residuos de Construcción y Demolición del Gobierno de España (2008) para establecer la lista de identificación de RCD's que se encuentran los proyectos del sector construcción. Esta lista está basada en el código de la Lista Europea de Residuos (LER). Pues, esta proporciona un sistema estandarizado para identificar y clasificar los residuos, facilitando su tratamiento, reciclaje y disposición final adecuada. En la tabla 15 se muestra la lista de RCD's clasificándose en residuos de naturaleza pétreo, naturaleza no pétreo y potencialmente peligrosos.

Tabla 15*Identificación de RCD's de un Proyecto en el Sector de la Construcción*

Tipos de RCD	Código LER
1. Naturaleza pétreo	
Concreto	17 01 01
Ladrillos	17 01 02
Tejas y Materiales Cerámicos	17 01 03
Mezcla de concreto, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	17 01 07
Residuos de grava y rocas trituradas	01 04 08
Residuos de arena y arcilla	01 04 09
RCD's mezclados distintos de los códigos 17 09 01, 02 y 03	17 09 04
2. Naturaleza no pétreo	
Mezclas Bituminosas distintas a las del código 17 03 01	17 03 02
Madera	17 02 01
Cobre, bronce, latón	17 04 01
Aluminio	17 04 02
Plomo	17 04 03
Zinc	17 04 04
Hierro y acero	17 04 05
Estaño	17 04 06
Metales mezclados	17 04 07
Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10	17 04 11
Papel	20 01 01
Plástico	17 02 03
Vidrio	17 02 02
Materiales de Construcción a partir de Yeso distintos de los 17 08 01	17 08 02
3. Potencialmente peligrosos y otros	
Residuos biodegradables	20 02 01
Mezclas de residuos municipales	20 03 01
Otros residuos de construcción y demolición que contienen SP's	17 09 03

Nota. Identificación de RCD's que se generan en una obra de construcción en base a la Lista Europea de Residuos (LER). De "CÁLCULO DE RESIDUOS", por V. Blanca et al., 2010. (<https://riunet.upv.es/handle/10251/7557>).

Identificado los RCD's que existen en un proyecto constructivo, se tiene que realizar la cuantificación de estos RCD's. La cuantificación de estos residuos en diferentes obras de construcción es un desafío debido a la variabilidad inherente en los tipos de proyectos, los métodos de construcción, los materiales utilizados y las prácticas de gestión de residuos. Sin embargo, es posible establecer ciertos parámetros y metodologías para aproximar la cantidad de residuos que una obra de construcción puede generar. En Lima no se ha realizado

estimaciones de la cuantificación del RCD's. Sin embargo, existen estudios que se realizaron a obras específicas y análisis estadísticos que dan una alta variabilidad según el tipo de proyecto que se esté realizando. Por ello, se usará la guía de ratios nacionales de generación de residuos de construcción y demolición realizado por el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) y el Consejo Superior de Arquitectos (CSCAE) para estimar las cantidades de RCD's que se generan en obras de construcción y demolición. En la guía se estimó ratios de RCD's en base la cuantificación realizada a múltiples proyectos constructivos aplicando análisis de datos y agrupando la información según el tipo de obra y regiones climáticas de la zona. En la tabla 16 se puede observar las ratios de estimación de RCD's para proyectos de construcción y demolición recopilados de la guía.

Tabla 16

Ratios de Cuantificación de RCD's para Proyectos de Construcción y Demolición

Uso de proyecto	Región climática	Tipo de proyecto			
		Construcción		Demolición	
		Ratio de volumen (m ³ /m ²)	Ratio de peso (Tn/m ²)	Ratio de volumen (m ³ /m ²)	Ratio de peso (Tn/m ²)
Multifamiliares, unifamiliares, comerciales, administrativos y residenciales	Mediterránea Litoral	0.143	0.147	0.849	0.945
	Semiárida	0.110	0.134	0.665	0.811
	Oceánica	0.114	0.099	1.056	0.848
	Continental Norte	0.143	0.169	1.094	1.480
	Continental Sur	0.086	0.111	0.852	0.741

Nota. Elaborado a partir de “Ratios nacionales. Generación de residuos de construcción y demolición”, por Granados et al., 2020. (<https://www.cscae.com/index.php/conoce-cscae/area-tecnica/seguimiento-de-normativas/reglamentos-regulaciones-y-otros/6306-guia-ratios-nacionales-generacion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion>).

Estas ratios fueron realizadas para las regiones climáticas de España y según el uso de los proyectos que mayormente son edificaciones y viviendas. Asimismo, en la guía se describe los sistemas constructivos que son usados en las regiones climáticas definidas. Por ello, se

selecciona la región Semiárida para la cuantificación de los materiales que componen los RCD's que se generan en Lima Metropolitana, debido a que presenta la zona climática y sistemas constructivos similares. Esto se observa en las tablas 17 y 18, que muestra la cuantificación de RCD's de proyectos de construcción y demolición.

Tabla 17

Cuantificación de RCD's para un Proyecto de Construcción

Código LER	Tipos de RCD	Porcentaje peso (%)	Ratio volumen (m³/m²)	Ratio peso (Tn/m²)
1. Naturaleza pétreo				
17 01 01	Concreto	13.46	0.012	0.018
17 01 03	Tejas y Materiales Cerámicos	53.84	0.054	0.072
01 04 08	Residuos de grava y rocas trituradas	4.49	0.004	0.006
17 09 04	RCD's mezclados distintos de los códigos 17 09 01, 02 y 03	8.10	0.009	0.011
2. Naturaleza no pétreo				
17 03 02	Mezclas Bituminosas distintas a las del código 17 03 01	3.74	0.005	0.005
17 02 01	Madera	1.79	0.004	0.002
17 04 07	Metales mezclados	2.8	0.003	0.004
20 01 01	Papel	1.26	0.002	0.002
17 02 03	Plástico	0.84	0.002	0.001
17 02 02	Vidrio	3.05	0.004	0.004
17 08 02	Materiales de Construcción a partir de Yeso distintos de los 17 08 01	1.12	0.001	0.001
3. Potencialmente peligrosos y otros				
20 03 01	Mezclas de residuos municipales	4.01	0.007	0.005
17 09 03	Otros residuos de construcción y demolición que contienen SP's	1.50	0.004	0.002

Nota. Adaptado de "Ratios nacionales. Generación de residuos de construcción y demolición", por Granados et al., 2020. (<https://www.csaec.com/index.php/conoce-csaec/area-tecnica/seguimiento-de-normativas/reglamentos-regulaciones-y-otros/6306-guia-ratios-nacionales-generacion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion>).

Tabla 18*Cuantificación de RCD's para un Proyecto de Demolición*

Código LER	Tipos de RCD	Porcentaje peso (%)	Ratio volumen (m3/m2)	Ratio peso (Tn/m2)
1. Naturaleza pétreo				
17 01 01	Concreto	28.47	0.131	0.231
17 01 07	Mezcla de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	59.31	0.384	0.481
17 09 04	RCD's mezclados distintos de los códigos 17 09 01, 02 y 03	5.40	0.058	0.044
2. Naturaleza no pétreo				
17 02 01	Madera	5.23	0.076	0.042
17 04 02	Aluminio	-	-	-
17 04 03	Plomo	-	-	-
17 04 04	Zinc	-	-	-
17 04 05	Hierro y acero	-	-	-
17 04 06	Estaño	-	-	-
17 04 07	Metales mezclados	1.10	0.007	0.009
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10	-	-	-
20 01 01	Papel	0.16	0.003	0.001
17 02 03	Plástico	-	-	-
17 02 02	Vidrio	0.15	0.001	0.001
3. Potencialmente peligrosos y otros				
20 02 01	Residuos biodegradables	-	-	-
20 03 01	Mezclas de residuos municipales	0.10	0.002	0.001
17 09 03	Otros residuos de construcción y demolición que contienen SP's	0.08	0.003	0.001

Nota. Adaptado de “Ratios nacionales. Generación de residuos de construcción y demolición”, por Granados et al., 2020. (<https://www.csaec.com/index.php/conoce-csaec/area-tecnica/seguimiento-de-normativas/reglamentos-regulaciones-y-otros/6306-guia-ratios-nacionales-generacion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion>).

De esta forma, se podrá estimar las cantidades de residuos de concreto que se generan en proyectos de construcción y demolición en las zonas de lima metropolitana para analizar la reutilización (reciclaje) que se le dará para mejorar la gestión de RCD's y reducir la generación de estos.

1.2 AGREGADOS PARA CONCRETO

Según el Instituto Nacional de Calidad (INACAL, 2020a) son un grupo de partículas pétreas que pueden tener un origen natural o artificial, que se obtienen mediante un proceso de tratamiento de diversas fuentes, y cuyas medidas se encuentran en el rango establecido por el INACAL (2021a). Los agregados constituyen un elemento en constante cambio en la mezcla de concreto, así como también puede ocurrir variaciones en sus características durante las etapas de extracción, manipulación y traslado. Debido a que conforman la mayor proporción del volumen del material que varía entre el 65% y el 70% del total de la mezcla, por lo que son considerados como factores importantes para el diseño, propiedades y comportamiento del concreto, y que a su vez presente una influencia notable en el desempeño de las estructuras.

1.2.1 Tipos de agregados

Los agregados al tener un origen natural o artificial que pueden dividirse en distintos tipos de acuerdo con el lugar de procedencia y a los procesos que se utilizaron para la obtención del producto final a usarse en la mezcla de concreto. Por lo que se dividió en los siguientes tipos:

- a. Agregados naturales:** Son agregados que no se le realiza modificaciones, pues ya presentan las dimensiones requeridas y aplicando una correcta gradación pueden ser distribuidos aplicando las exigencias del cliente. Se origina mediante procesos naturales de erosión y encontrados mayormente en ríos y playas.
- b. Agregados triturados:** Son agregados obtenidos mediante trituración de fuentes rocosas encontradas mayormente en canteras o agregados naturales que superan los límites de dimensión. Posteriormente, se realiza en proceso de gradación para su distribución final.
- c. Agregados reciclados:** Son agregados obtenidos de las construcciones o demoliciones de estructuras civiles, donde mayormente se obtiene de concreto, ladrillos, cerámicos, etc. Estos agregados vienen siendo utilizados en rellenos no portantes o bases y sub-bases de estructuras viales, pero debido a que es una fuente reciclable, se estudia la posibilidad de usarse en diversas estructuras, para ello es fundamental considerar los factores de procedencia, tratamiento, propiedades, técnicas, etc.

1.2.2 Clasificación de los agregados

De acuerdo con el INACAL (2020a) los agregados al presentar diversas características pueden clasificarse en las siguientes formas: por su composición granulométrica (Tamaño y naturaleza), por su densidad (peso unitario), por su forma y por su origen pétreo.

1.2.2.1 Por su composición granulométrica

Los agregados al presentar diversos tamaños se clasifican en 2 formas, según su tamaño, en agregados finos y gruesos que mediante diferentes tamices se puede determinar su composición granulométrica. En la tabla 19 se puede observar la división de los agregados finos y gruesos asignados a diferentes tamices.

Tabla 19

Composición Granulométrica de los Agregados Finos y Gruesos por Tamiz

Agregados	Tamices normalizados
FINO	150 μm (N° 100)
	300 μm (N° 50)
	600 μm (N° 30)
	1,18 mm (N° 16)
	2,36 mm (N° 8)
	4,75 mm (N° 4)
GRUESO	9,50 mm (3/8)
	12,5 mm (1/2)
	19,0 mm (3/4)
	25,0 mm (1)
	37,5 mm (1 1/2)
	50,0 mm (2)
	63,0 mm (2 1/2)
	75,0 mm (3)
	90,0 mm (3 1/2)
	100,0 mm (4)

Nota. de “AGREGADOS. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos)” por INACAL, 2020a.

1.2.2.2 Por su densidad

Es una clasificación importante debido que mediante el peso por unidad de volumen de los agregados se puede determinar el volumen de porosidad que se genera en la mezcla. Estos se clasifican en lo siguiente:

- a. **Livianos:** Son agregados que mayormente se usan en rellenos, albañilería, concreto no estructural y estructural. El peso unitario esta entre 400-1040 kg/m³.
- b. **Normales:** Son agregados que mayormente se utilizan en elementos de concreto no estructural y estructural de diversas obras civiles. El peso unitario esta entre 1300-1600 kg/m³.
- c. **Pesados:** Son agregados que se usan mayormente en concretos para protección radioactiva (rayos gamma o X) y contrapesos. El peso unitario esta entre 3400-7500 kg/m³.

1.2.2.3 Por su forma

Los agregados obtenidos a través de la trituración y la clasificación de rocas naturales pueden presentar diversas formas, que abarcan desde estructuras cúbicas o poliédricas hasta fragmentos irregulares, angulares, alargados y láminas aplanadas. Por otro lado, los agregados extraídos de ríos o depósitos aluviales tienden a tener formas redondeadas o aplanadas (Ferreira-Cuéllar & Torres-López, 2014).

1.2.2.4 Por su origen pétreo

- a. **Agregados ígneos, metamórficos y sedimentarios:** Son agregados que, debido a sus propiedades particulares, son altamente adecuados para su utilización como agregados gruesos en las capas de rodadura. Entre estos materiales se encuentran el basalto, gabro, pórfido, granito, cuarcita, entre otros. Su capacidad para resistir el pulimento los hace excelentes para mantener la textura superficial requerida incluso en condiciones de tráfico muy intenso (Padilla, 2004).
- b. **Agregados calizos:** Son agregados que presentan una formación rocosa ampliamente difundida, disponible en abundancia y de bajo costo en los procedimientos de trituración. Usualmente se utiliza en todas las bases de las superficies de las vías, a excepción de ciertas situaciones en las que se incorpora como componente grueso en las capas de

desgaste. Esto se debe a su tendencia a adquirir un acabado pulido durante las condiciones de servicio. Su naturaleza es alcalina y por lo general presenta menos desafíos en términos de adherencia, es decir, su afinidad con los agentes aglutinantes asfálticos (Padilla, 2004).

- c. **Agregados silíceos:** Son agregados derivados de la trituración de gravas naturales y también son ampliamente utilizados en todas las capas de las superficies de las vías. Estos se obtienen de yacimientos granulares, donde las partículas más grandes se separan mediante cribado y, a través de procesos de trituración sucesivos, se obtienen fracciones más pequeñas. La angulosidad de estas partículas suele aumentar a medida que presentan más caras de fractura (Padilla, 2004).

1.2.3 Propiedades de los agregados

Los agregados deben cumplir ciertas consideraciones en sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas, debido a que presentan una gran influencia en las propiedades del concreto. A continuación, se detallará las propiedades que tienen los agregados:

a. Propiedades físicas y mecánicas

- **Forma y textura superficial:** Es la forma y la textura que presenta los agregados, y que revisa aspectos de rugosidad o irregularidades de la partícula, es una característica que influencia en la adhesión superficial del concreto.
- **Porosidad (Contenido de humedad):** Es la cantidad de agua retenida que tienen los agregados debido a los espacios vacíos que tiene en su interior (porosidad) que presenta la partícula, esta propiedad tiene una gran importancia debido a que tiene influencia en demás propiedades del agregado y en la adherencia con el mortero.
- **Absorción o humedad superficial:** Respecto a la absorción es la cantidad de agua que ingresara a los agregados aumentando su peso final, y la humedad superficial es el exceso de agua que esta adherido en la superficie de los agregados cuando estos están saturados.
- **Densidad y peso unitario:** Respecto a la densidad se destaca para usar la densidad relativa que es la masa de los agregados por unidad de volumen permeable. El peso unitario es el peso por unidad de volumen compactado y junto con la densidad puede medir el grado de porosidad de los agregados.

- **Durabilidad:** Es la capacidad de resistencia a acciones que puede sufrir en la intemperie como la erosión o al desgaste en general.
- **Resistencia a la abrasión:** Se refiere a la capacidad de resistir a impactos o fricciones, esto depende en su mayoría del tipo de roca y de su grado de cementación y consolidación.

b. Propiedades térmicas

Son los efectos térmicos que tiene los agregados causados mayormente por la dilatación o fisuración del concreto. Donde debido al deterioro físico y químico del concreto logra que suceda la descomposición mineralógica de los agregados producen cambios que alterar el coeficiente de expansión, la difusividad, etc.

c. Propiedades químicas

- **Reacción álcali-sílice (RAS):** La reacción álcali-sílice es un fenómeno que ocurre cuando la solución alcalina presente en el concreto reacciona con los minerales silíceos presentes en algunos agregados para formar un gel. Este gel, al absorber agua, aumenta su volumen, lo que provoca un aumento de presión dentro del concreto. Esta presión adicional conduce a la formación de fisuras y, a lo largo del tiempo, al deterioro del concreto. Las rocas que tienen el potencial de desencadenar esta reacción suelen contener minerales como el ópalo, la calcedonia, o pueden ser rocas volcánicas vítreas de composición riolítica. Cuando estos tipos de agregados se utilizan en la fabricación del concreto y están en contacto con soluciones alcalinas, existe el riesgo de que se produzca esta reacción química adversa, lo que puede comprometer la durabilidad y la integridad del concreto.
- **Reacción álcali-carbonato (RAC):** Es un proceso que ocurre cuando los álcalis presentes en el concreto reaccionan con las piedras calizas dolomíticas. Este tipo de reacción afecta principalmente a las piedras calizas arcillosas dolomíticas y las calizas magnesianas.

Las propiedades que presentan los agregados son factores importantes para la elección de los agregados para la elaboración de un concreto, por lo que analizar como los agregados influyen en las propiedades del concreto ayudara a entender su comportamiento y

proponer nuevos diseños de mezcla para distintos tipos de agregados. En la tabla 20 se observa que propiedades de los agregados afecta las propiedades del concreto.

Tabla 20

Propiedades del Agregado Influenciadas en las Propiedades del Concreto

Propiedades del agregado	Influencia en las propiedades del concreto
Forma y textura	La forma y textura superficial de los agregados gruesos influyen de manera directa en la manejabilidad y la aplicación del concreto en su estado fresco. Fragmentos con formas prolongadas, aplanadas, angulosas o ásperas pueden generar mezclas que complican el alisado y la terminación superficial del concreto.
Absorción	Es una de las propiedades del agregado que ejerce una mayor influencia sobre la consistencia del concreto. En otras palabras, las partículas del agregado absorben agua directamente en la mezcladora, lo que reduce la manejabilidad de la mezcla.
Granulometría	El tamaño máximo (TMA) y la distribución granulométrica de los agregados, especialmente en las gravas, influyen en las características físicas de los mismos, así como en las proporciones de agua y cemento, afectando la fluidez de la mezcla. El empleo de agregados más gruesos da lugar a mezclas más densas y menos flexibles.
Peso específico	En cuanto al peso específico, los agregados se clasifican en ligeros, normales y pesados. Estas diferencias hacen que cada tipo de agregado sea adecuado para la fabricación de concreto con determinadas variables en el peso unitario, una característica fundamental del material.
Resistencia al desgaste del agregado	En general, la dureza del agregado es esencial para resistir ralladuras, desgaste y procesos de pulido por fricción. Además, la dureza de los agregados está determinada por su resistencia al desgaste por abrasión o erosión, lo cual depende de los elementos que componen el agregado.
Resistencia del agregado grueso	La resistencia del agregado grueso tiene menor impacto en la resistencia final del concreto, ya que las partículas del agregado suelen ser significativamente más resistentes que la matriz y la zona de transición.

Nota. Elaborado a partir de Chan et al. (2003) y Guillén y Llerena (2020).

1.3 AGREGADOS RECICLADOS (AR)

El reciclaje se ha convertido en una piedra angular de la sostenibilidad ambiental en todo el mundo. A medida que la conciencia sobre los problemas medioambientales ha crecido, el reciclaje ha emergido como una herramienta esencial para abordar cuestiones como la contaminación, la escasez de recursos y el cambio climático. En la industria de la construcción tradicionalmente ha tenido un gran impacto ambiental debido a factores como la extracción de materias primas, el transporte de materiales y la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Este último, sería una fuente importante de reciclaje en la construcción, ya que se genera en grandes cantidades, siendo procesado como un tipo de agregado para reutilizarse en la producción de nuevos concretos.

El agregado reciclado es definido como el agregado procedente del procesamiento de material inorgánico utilizado anteriormente en la industria de la construcción. Tales materiales incluyen, por ejemplo, escombros de construcción (concreto, mampostería, cerámicos, etc.), escombros de demolición de carreteras y calles, o masas de tierra y rocas. El concreto es el material que mayormente se obtiene de estos lugares, que a su vez estos han sido utilizados en sub-bases de infraestructuras de transporte o en cimientos no estructurales (Courard et al., 2010).

1.3.1 Uso de agregados reciclados en el contexto internacional

La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en el mundo es un problema que ha ido en aumento, sobre todo en países donde la tecnología y sobrepoblación está en constante crecimiento, pues esto genera que la industria de la construcción produzca mayores infraestructuras civiles, que a su vez genere la demolición de construcciones antiguas otras estructuras han superado su límite de uso. Asimismo, el avance científico genera que los requerimientos y necesidades cambien generando aumento en las demoliciones.

El reciclaje y la reutilización de los residuos de construcción y demolición desempeñan un papel fundamental en la reducción del agotamiento de los recursos naturales utilizados como agregados, la disminución de la necesidad de espacio para vertederos y la reducción de la huella de carbono asociada a la industria de la construcción. El concreto, que representa más de 12 mil millones de toneladas consumidas anualmente en todo el mundo, contiene entre

un 60% y un 75% de agregados en volumen. De este porcentaje, aproximadamente entre un 60% y un 67% corresponde a agregados gruesos, mientras que entre un 33% y un 40% son agregados finos (Hosseinnezhad et al., 2023). En ese sentido, el consumo global de agregados para todos los propósitos fue de 50 mil millones de toneladas en el año 2017. Se ha reportado que China utiliza el 40% de esta cantidad, mientras que países europeos y Estados Unidos consumen el 8% y el 4.8%, respectivamente (Tam et al., 2021).

En diversos países de la UE y EE. UU ya se están aplicando el uso de agregados reciclados (AR) como medida para el reemplazar el uso de agregados naturales y la reducción de RCD, estableciendo regulaciones y normativa para el control del uso de estos agregados. Asimismo, en países como Brasil y Cuba vienen aprovechando el uso de agregados reciclados en concretos para estructuras simples como complejas. Se especificará el uso que se le está dando a los agregados reciclados en los países mencionados, y como se le está regulando para generar una sistematización en el uso de este recurso.

1. Polonia

Según informa Węglorz et al. (2019) en Polonia se identificaron 3 usos de aplicación para los agregados reciclados, teniendo en cuenta la calidad del material original. En primer lugar, tenemos a los agregados de baja calidad utilizados como materiales de relleno o subbase de carreteras (por ejemplo, adoquines, piedras para pisos de tierra). Seguidamente, tenemos a los agregados usados en concreto no estructural o utilizados como aditivo de agregados naturales en una medida limitada (20 - 40%), dando resultados satisfactorios con requisitos de resistencia relativamente bajos (cimientos, muros de concreto, nivelación de concreto, sub-losas de concreto, etc.).

El Comité Europeo de Normalización (CEN, 2010a) establece que la PN-EN 12620+A1:2010, norma principal para uso de agregados en concreto, incluye a los agregados reciclados mencionando que las propiedades están influenciadas por diversos factores, diferentes que los agregados naturales, por lo que el agregado reciclado debe estar determinado cualitativamente por su composición. Asimismo, el CEN (2010b) especifica en la norma PN-ES933-11:2009+AC:2010 un método sencillo para determinar los tipos de

agregados reciclados gruesos, con el fin de identificar y estimar las proporciones relativas de los materiales constituyentes. Esta clasificación de los agregados reciclados determinada de la calidad del agregado y su utilidad es la siguiente: concreto, productos de concreto, morteros y unidades de mampostería de concreto (Rc); agregados libres, piedra natural y agregados ligados hidráulicamente (Ru); unidades de mampostería de arcilla (es decir, ladrillos y tejas) y unidades de mampostería de silicato de calcio, hormigón celular no flotante (Rb); materiales bituminosos (Ra); material flotante (FL); vidrio (Rg), y un grupo de todos los demás materiales, incluidos compuestos cohesivos (es decir, arcilla y tierra), metales (ferrosos y no ferrosos), madera no flotante, plástico, caucho y yeso (X).

Actualmente, el CEN (2016) establece en la norma PN-EN 206+A1:2016-12, un amplio grupo de concretos premezclados como concretos producidos en plantas de prefabricados. Se trata, de un documento básico sobre la posibilidad de utilizar agregados de concretos reciclados entre todos. Esta norma divide al agregado reciclado en dos tipos: A (agregados de concreto) y B (agregados de mampostería). En la tabla 21 se puede ver los límites (%) que tiene los 2 tipos de agregados para reemplazar a los agregados naturales.

Tabla 21

Límites de Reemplazo de Agregados Naturales Gruesos (%) por Agregados Reciclados Gruesos

Tipo de agregado reciclado	Tipos de estructura de la norma PN-EN 206+A1:2016-12			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Todas las demás estructuras
Tipo A	50%	30%	30%	0%
Tipo B	50%	20%	0%	0%

- Se podrán utilizar agregados reciclados Tipo A para las mismas estructuras en el cual fue diseñado el concreto original con un porcentaje máximo de reemplazo del 30%.
- Los agregados reciclados tipo B se deben utilizar en concretos con clases de resistencia a la compresión mayores a C30/37.

Nota. Adaptado de “Assessment of recycled concrete aggregate properties required for structural concretes” por Węglorz et al., 2019. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201926206010>).

2. Reino Unido

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2010) menciona que, en 1995 se realizó en Londres la primera experiencia práctica del uso de concreto con agregados reciclados, durante la construcción de un bloque de oficinas. En este proyecto se utilizó concreto triturado proveniente de la demolición de una edificación de 12 niveles en Watford. El agregado grueso reciclado fue incorporado en la construcción de elementos estructurales como cimientos, columnas y losas. Este acontecimiento representó un avance clave en el uso de materiales reciclados en la construcción en el Reino Unido, demostrando la viabilidad y efectividad de los agregados reciclados en la producción de concreto para diversas aplicaciones estructurales. En la tabla 22 se muestra las características del concreto usado en diversas estructuras.

Tabla 22

Características del Concreto con Agregado Reciclado Utilizado en Diversas Estructuras

Características	Cimentaciones	Forjados	Concreto bombeado
Resistencia	25 MPa	35 MPa	-
Cemento	>330 kg/m ³ 50% de escorias de horno alto	>330 kg/m ³ 70% de escorias de horno alto	>340 kg/m ³
Relación a/c	< 0,50	< 0,50	-
Cantidad de agregado grueso reciclado	985 kg/m ³	985 kg/m ³	50 kg/m ³
Asentamiento	75 mm	75 mm	-

Nota. Características del concreto reciclado utilizado en un bloque de oficinas en Watford. Adaptado de “RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN” por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2014. (https://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICIONNOV2014.pdf).

También, CEDEX (2010) menciona que, en 1996 se llevó a cabo otra experiencia de aplicación de concreto con agregados reciclados obtenidos de escombros de concreto y ladrillos en Cardington. Este proceso se realizó durante la construcción de la losa del segundo piso de un edificio en dicha localidad. La losa, con un grosor de 0,5 metros, estaba fuertemente reforzada. Para el diseño del concreto, se decidió sustituir el 20% del agregado grueso natural con agregados reciclados. Se emplearon aproximadamente 100 toneladas de estos agregados, que contenían hasta un 50% de ladrillos reciclados. La dosificación del concreto fue la misma que se utilizó en la losa del primer piso del mismo edificio. Ambos tipos de concreto lograron resistencias similares, alcanzando los 60 N/mm² después de 91 días. Es importante mencionar, que la inclusión de agregados reciclados en la mezcla de concreto no tuvo un impacto negativo en la capacidad de bombeo ni en el proceso de puesta en obra del concreto, lo que demuestra que es posible utilizar materiales reciclados de manera efectiva en proyectos de construcción sin comprometer la calidad o la eficiencia del proceso.

Con respecto a la legislación, la British Standards Institution (BSI, 2006) establece en la BS 8500-2:2006, el uso de agregados de concretos reciclados en el concreto clasificándolo en 2 grupos: RCA (agregados de concreto reciclado) y RA (agregados reciclados) diferenciándose en la composición que tienen. La norma no contempla las disposiciones relativas al uso de una fracción fina y no contempla alguna limitación sobre los valores de densidad y absorción de agua. Los requisitos se centran en la composición de los agregados, donde el RA se limita a su uso en concreto con una clase de resistencia máxima de C16/20 y solo en las condiciones de exposición más leves, mientras que RCA se puede usar hasta la clase de resistencia C40/50 y en una gama más amplia de condiciones de exposición. Para los concretos designados RC25-RC50, la cantidad de RCA o RA está restringida al 20 % en peso de la fracción total de agregado grueso, a menos que el especificador dé permiso para usar proporciones más altas.

El Building Research Establishment (BRE, 1998) elaboró una guía acerca del uso de agregados reciclados en su acápito Digest 433, nos menciona la clasificación de 3 tipos de agregados reciclados: tipo I (escombros de mampostería), tipo II (escombros de concreto) y

tipo III (escombros de concreto y mampostería). Establecido mediante las recomendaciones de la The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, 1994), en el cual presenta especificaciones y requerimientos de calidad para cumplir con la norma BS-882 (Especificación para agregados de origen natural para concreto). En la tabla 23 se observa la clasificación de los agregados con las especificaciones de la BS-882.

Tabla 23

Clasificación de los Agregados Reciclados por BRE Digest 433

Clase	Origen	Contenido de ladrillo (por peso)	Descripción
Tipo I	Mampostería	0 - 100%	Material de la más baja calidad: -Baja resistencia -Alto nivel de impureza 10% multas (BS812-111) \approx 70 kN
Tipo II	Concreto	0 - 10%	Calidad relativamente alta con bajos niveles de impureza. Principalmente concreto triturado, pero puede contener cantidades significativas agregado natural. 10% fino (BS 812- 111) $>$ 100kN
Tipo III	Concreto y mampostería	0 - 50%	Material mezclado con niveles de impureza similares al tipo I, pero una gama más amplia de usos, por ejemplo, mezcla 80/20 de productos naturales agregado/tipo III puede ser aceptable en todos los grados del concreto.

Nota. Clases de agregados reciclados. Elaborado a partir de “Digest 433. Recycled Aggregates” por BRE, 1998. (<https://www.cpda.co.uk/wp-content/uploads/2015/03/BRE-Digest-433.pdf>).

De estos tipos de agregados RILEM propuso requisitos para que cumplan condiciones de uso para cada tipo de agregado reciclado, esto complementado con las normas especificadas en los países de aplicación o en normas del CEN. En la tabla 24 se puede observar los requisitos que se establecieron para los 3 tipos de agregados reciclados.

Tabla 24*Requisitos para diferentes tipos de Agregados Reciclados por RILEM*

Requisitos obligatorios	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Método de prueba
Mín. densidad de partículas secas (kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO 6783 y 7033
Máx. absorción de agua (% m/m)	20	10	3	ISO 6783 y 7033
Máx. contenido del material con SSD < 2200 kg/m ³ (% m/m)	--	10	10	ASTM C123
Máx. contenido del material con SSD < 1800 kg/m ³ (% m/m)	10	1	1	ASTM C123
Máx. contenido del material con SSD < 1000 kg·m ³ (% m/m y % v/v)	1	0,5	0,5	ASTM C123
Máx. contenido de materias extrañas (metales, vidrio, materiales blandos, bitumen) (% m/m)	5	1	1	Visual
Máx. contenido de metales (% m/m)	1	1	1	Visual
Máx. contenido de materia orgánica (% m/m)	1	0,5	0,5	NEN 5933
Máx. contenido de relleno (<0,063 mm) (% m/m)	3	2	2	prEN 933-1
Máx. contenido de arena (<4 mm) (% m/m) ^b	5	5	5	prEN 933-1
Máx. contenido de sulfato (% m/m)	1	1	1	BS 812, parte 118

Nota. Clasificación de agregados gruesos reciclados para concreto (RCAC). Adaptado de “Specifications for concrete with Recycled aggregates” por RILEM recommendation, 1994. (<https://doi.org/10.1007/BF02473217>).

3. Alemania

En el contexto de Alemania, CEDEX (2010) menciona que, en 1999, se utilizaron agregados reciclados para construir grandes bloques de concreto decorativos en el Centro de Exposiciones de Magdeburgo. Estos bloques, ubicados en áreas exteriores y en contacto con agua, fueron hechos exclusivamente con agregado grueso reciclado. Otro ejemplo notable ocurrió entre 1993 y 1994, durante la construcción de la sede de la Fundación Alemana para el Medioambiente (Deutsche Bundesstiftung Umwelt). En este proyecto, se emplearon agregados reciclados para fabricar los elementos estructurales de concreto. Se llevó a cabo una selección rigurosa de los agregados reciclados y se implementó un control de calidad exhaustivo a lo largo de todo el proceso. La mezcla de concreto utilizada incluía 290 kg/m^3 de cemento Portland CEM I 42,5 R, agregado grueso reciclado (con tamaños que variaban entre 4 y 32 mm) y arena natural como agregado fino. Además, se añadieron 70 kg/m^3 de cenizas volantes y un plastificante. Con un contenido de agua de 201 kg/m^3 , se logró una resistencia cúbica de 35 N/mm^2 .

En cuanto a la legislación de los agregados reciclados en Alemania, La Deutsches Institut für Normung (DIN, 2018) establece en la norma DIN 4226-100, los requisitos específicos para agregados reciclados con una densidad de partículas igual o superior a 1500 kg/m^3 , destinados a ser utilizados en mortero y concreto. Esta norma clasifica los áridos reciclados en cuatro grupos en función de la composición del material original: escombros de concreto (1), escombros de demolición (2), escombros de mampostería (3) y escombros mixtos (4). La densidad mínima de partículas de los tipos 1 y 2 debe ser de 2000 kg/m^3 , y para los tipos 3 y 4 tiene que ser de 1800 y 1500 kg/m^3 respectivamente. El otro requisito es que después de un tiempo de 10 minutos la absorción de agua no debe exceder el 10, 15 y 20% para los tipos 1, 2 y 3 respectivamente.

La directriz "Concreto con agregados reciclados derivados de escombros de concreto", publicada por el Comité Alemán de Concreto Armado en 1998, fue establecida para regular el uso de agregados reciclados derivados de escombros de concreto. Inicialmente, se podían utilizar fracciones gruesas y finas como agregados reciclados, pero el DAfStb revisado en 2004 ya no permite el uso de arena reciclada en el concreto (Solyman, 2005).

También, DIN (2018) menciona que, los agregados de tipo 1 y 2 que consisten principalmente en partículas de concreto, pueden utilizarse como agregados reciclados en elementos estructurales de concreto reciclado. En los tipos 3 y 4 debido a que contienen materiales diferentes al concreto, solo deben emplearse en elementos no estructurales. Asimismo, En situaciones donde la demanda de resistencia no es tan alta, el 35 y el 25% de los agregados gruesos naturales pueden sustituirse por agregados reciclados para producir un concreto con agregados reciclados con una clase de hormigón de hasta C25/30 y C30/37 respectivamente. A pesar de que el porcentaje de reemplazo es relativamente bajo, esta directriz no se considera conservadora, ya que no requiere el uso de coeficientes correctivos. Esto quiere decir, que no hay cambios significativos en las propiedades del concreto cuando se utilizan agregados reciclados en comparación con el concreto convencional.

4. Bélgica

En Bélgica, CEDEX (2010) menciona que, en 1987, durante la ampliación del puerto de Antwerp, se demolieron varios muros portuarios para dar lugar a la construcción de una compuerta de mayor tamaño. La demolición, realizada mediante el uso de explosivos, generó aproximadamente 80,000 metros cúbicos de escombros de concreto. Consideraciones ambientales y económicas llevaron a la decisión de reutilizar estos escombros en la producción de concreto reciclado. El concreto reciclado obtenido cumplió con las especificaciones necesarias, logrando una resistencia a la compresión de 35 N/mm² y una retracción controlada por debajo de los 150 micrómetros por metro. Para mejorar la trabajabilidad, los agregados reciclados fueron humedecidos previamente, lo que permitió un ajuste preciso de la cantidad de agua en la mezcla. Tras casi 15 años en servicio, la estructura construida con este concreto reciclado ha demostrado una excelente durabilidad, sin presentar fallas significativas. Este caso evidencia la viabilidad técnica y económica de emplear materiales reciclados en la construcción, promoviendo la sostenibilidad ambiental y optimizando los recursos dentro del sector.

En 1990, se definieron disposiciones para el uso de agregados reciclados en el concreto con agregados reciclados, de forma similar a la actual recomendación de RILEM. Asimismo, La Association de la Normalisation et de l'Environnement (ANE, 2003), establece la norma

PTV 406 que regula la composición de los agregados reciclados que pueden ser utilizados en la producción de concreto, estableciendo tres clases de agregados reciclados: agregados reciclados de concreto, agregados reciclados de albañilería y mezcla de agregados de concreto y albañilería.

5. España

CEDEX (2010), indica que en España se implementó un modelo eficiente para reutilizar residuos inertes, específicamente concreto derivado de la demolición de varios componentes de una antigua fábrica de Cementos Pórtland ubicada en el sureste de Madrid. La iniciativa buscó aprovechar el concreto resultante mediante un enfoque alternativo y sostenible. Con este objetivo, se instaló una planta de machaqueo en el lugar de la demolición para procesar los desechos de concreto y convertirlos en agregados reciclados. Estos materiales fueron destinados a la producción de zahorra artificial, utilizada en la construcción de subbases para calzadas y aceras dentro del proyecto de urbanización que se desarrollaba en el área, así como para la elaboración de concreto no estructural. En total, de los 58,991 metros cúbicos de concreto demolido, se lograron fabricar aproximadamente 2,050 metros cúbicos de concreto con una resistencia característica de 12,5 N/mm². Este caso ejemplifica cómo es posible gestionar eficazmente los residuos de demolición, transformándolos en insumos útiles para nuevas infraestructuras y materiales de construcción. Así, se promueve no solo la sostenibilidad ambiental, sino también el aprovechamiento responsable y eficiente de los recursos existentes.

Otra experiencia documentada en este contexto se relaciona con la construcción de la Ciudad Olímpica de Barcelona. En este proyecto, se llevó a cabo la demolición de las edificaciones ubicadas en la zona destinada a la construcción de la Ciudad Olímpica. Esta demolición generó aproximadamente 1,5 millones de toneladas de escombros. Para gestionar estos residuos de manera eficiente, se implementaron procedimientos selectivos de demolición. En este proceso, se realizó una primera eliminación de impurezas in situ. Esta operación permitió separar y eliminar materiales no inertes, como madera, plásticos o acero, así como otros materiales mezclados o contaminados. Los materiales identificados como inertes y adecuados para su reaprovechamiento, tales como concreto, piedra, cerámica y ladrillos

provenientes de la demolición de edificaciones, fueron sometidos a un proceso de clasificación y reciclaje. Una vez procesados, estos recursos reciclados fueron utilizados en distintos proyectos de infraestructura, incluyendo la construcción de vías urbanas, carreteras y estructuras de escollera destinadas a reforzar la costa de la Ciudad Olímpica.

Acerca de las legislaciones, CEDEX (2010) menciona que, en noviembre de 2002, se estableció el Grupo de Trabajo "Hormigón Reciclado" por iniciativa de la Comisión Permanente del Hormigón y de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Este grupo crea una normativa que sirviera como complemento a la reglamentación vigente en ese momento relacionada con el concreto estructural, llamada "La Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08)". Esta normativa incluye en su Anejo nº15 el cual es "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados" directrices específicas sobre el uso de agregados reciclados en la fabricación de concreto. Estas recomendaciones se dividen en dos categorías: aplicaciones estructurales y aplicaciones no estructurales. Para aplicaciones estructurales, se sugiere utilizar agregado grueso reciclado, proveniente de residuos de concreto, como sustituto del agregado grueso natural, en una proporción de hasta un 20%. Esto significa que hasta un 20% del agregado grueso utilizado en la fabricación de concretos estructurales puede ser agregado reciclado de concreto, siempre que cumpla con las especificaciones establecidas en el Anejo nº15. En contraste, en el caso de concretos no estructurales, se permite el uso de hasta un 100% de estos agregados, siempre y cuando cumpla con las mismas especificaciones detalladas en el Anejo nº15. Sin embargo, es importante destacar que no se admite el empleo de agregados reciclados mixtos en esta categoría, lo que significa que el agregado reciclado debe provenir exclusivamente de residuos de concreto (Geraldés et al., 2012).

Las regulaciones de la normativa española sobre el uso de agregados reciclados se presentan en el estudio de Geraldés et al. (2012), que recopiló 8 tipos de agregados reciclados de diversas procedencias, procesadas en 3 plantas de tratamiento (N, S y V). Estos agregados presentaron diferentes composiciones y propiedades. En la tabla 25 se puede observar las propiedades que presentan estos agregados y los requisitos de normativa que deben presentar sus propiedades.

Tabla 25*Requisitos para los Agregados Reciclados en Base a la Normativa Española*

Propiedades	AGREGADOS RECICLADOS									Requisito	Norma de ensayo
	N1	N2	N3	N4	N5	S1	S2	V1			
Composición (%)											
Asfalto	4,5	4,5	4,0	2,8	0,6	2,6	0,4	2,3		≤1	
Cerámicos	14,8	14,5	22,2	30,1	9,4	40,5	41,2	32,6		-	
Concreto y mortero	46,6	39,4	35,2	24,5	54,7	35,2	43,6	28,8		-	UNE-EN 933-11
Agregados naturales	31,8	39,4	35,2	40,6	31,9	21,1	12,6	29,1		-	
Materiales no deseados	2,2	2,2	3,4	2,1	3,4	0,6	1,9	6,3		≤0,5-3,5	
Absorción (%)	7,0	8,1	8,8	7,2	8,9	10,4	9,7	11,6		≤7-15	
Densidad saturada con superficie seca (kg/dm ³)	2,26	2,29	2,27	2,23	2,26	2,18	2,23	2,29		-	UNE-EN 1097-6
Densidad de partícula seca (kg/dm ³)	2,15	2,12	2,09	2,08	2,08	1,98	2,04	2,05		≥2-2,2	
Contenido de compuestos totales de azufre (S)(%)	0,30	0,26	0,50	0,27	0,53	0,38	0,60	1,36		≤1	UNE-EN 1744-1
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO ₃)(%)	0,76	0,87	1,00	0,67	1,00	0,71	-	2,78		≤0,8-1	
Índice de lajas	-	13	16	15	12	23	20	21		≤35	UNE-EN 933-3
Coefficiente de Los Ángeles	-	42	45	47	53	40	38	49		≤50	UNE-EN 1097-2
Desclasificados inferiores	-	2	3	5	3	4	7	12		-	UNE-EN 933-1
Contenido de finos	-	3,2	4,3	8,4	2,1	2,2	2,6	5,3		≤3-10	
Partículas de peso específico inferior a 1	-	-	-	-	0,80	0,46	0,11	0,05		≤0,1-1	UNE-EN 1744-1

Nota. Propiedades de los áridos reciclados mixtos ARM(N), ARM(S), ARM(V). Adaptado de “Estudio sobre las propiedades del árido reciclado mixto para la fabricación de hormigón no estructural” por Geraldés et al., 2012. (<https://oa.upm.es/19911/>).

6. Estados Unidos

En Mississippi, el uso de agregado de concreto reciclado en caminos y puentes se rige por una Provisión especial de especificaciones para ese estado, concretamente la Provisión No. 907-703-10, con fecha de junio de 2012. En esta provisión, define al agregado de concreto reciclado como residuos provenientes de pavimentos, estructuras de concreto u otras fuentes. Este material puede ser desglosado o procesado de manera que cumpla con los requisitos de granulometría para un tamaño especificado, que se conoce como “825B”. Sin embargo, es importante destacar que en ningún caso se permite el uso del desperdicio resultante de la producción de concreto (conocido como “agregado lavado”) como material granular de base en aplicaciones de construcción (Pérez et al., 2018).

Además, Pérez et al. (2018) menciona se realizó una investigación para determinar especificaciones para utilizar el agregado de concreto reciclado en capas no ligadas de pavimentos. Estas especificaciones posteriormente se adoptaron como la norma AASHTO M319-02, que se refiere a “Agregado de concreto reciclado para capas de base suelo-agregado”. Donde se menciona que el contenido de agua óptimo para el agregado de concreto reciclado es mayor en comparación con el agregado natural, debido a su mayor capacidad de absorción de agua. Esta norma enfatiza la importancia de asegurarse de que el agregado de concreto reciclado no contenga materiales peligrosos, lo cual es más común en productos de demolición de construcciones.

7. Hong Kong

Magalhães (2007), menciona que en Hong Kong se presentó dos enfoques distintos para la utilización de agregados reciclados en la producción de concreto. Estos enfoques establecen requisitos específicos en cuanto al tipo de agregado reciclado y los niveles de contenido permitidos, y se aplican según la resistencia deseada del concreto. Donde, para resistencias de 35 Mpa (concreto estructural) se puede reemplazar los agregados naturales hasta un 20% por agregados reciclados, mientras que para resistencias de 20 Mpa (concreto no estructural) se puede usar el 100% de agregados reciclados.

8. Brasil

El Comité Brasileño de Cemento, Concreto y Áridos (2021), presentó la nueva versión de la norma ABNT NBR 15116:2021, presentando importantes cambios en cuanto al uso de agregados reciclados en el sector constructivo en Brasil. Esta norma regula los criterios para la producción, recepción y aprovechamiento de agregados reciclados obtenidos del procesamiento de residuos de la construcción civil (RCC). La principal novedad de la ABNT NBR 15116:2021 es que ahora permite el uso de agregados reciclados en concreto estructural, en contraste con la versión anterior que solo los recomendaba para concreto sin función estructural.

También, el Comité Brasileño de Cemento, Concreto y Áridos (2021) establece categorías para los residuos de la construcción civil, denominadas clases “A, B, C y D”. Sin embargo, la recomendación para su uso en concreto estructural se limita a la Clase A, específicamente al agregado grueso de residuos de concreto que pertenece a la subclase “ARCO”, que significa Agregado de Concreto Reciclado. Esta subclase ARCO establece que el agregado grueso reciclado debe estar compuesto en su fracción gruesa por al menos un 90% en masa de fragmentos a base de Cemento Portland y rocas. Además, la norma establece ciertos requisitos y restricciones para la inclusión de agregados reciclados en el concreto estructural. Entre ellos, que los agregados reciclados que son aceptados deben tener una resistencia máxima de 20 Mpa, y se debe presentar una sustitución máxima del 20% de los agregados convencionales por agregados reciclados.

En conclusión, las normativas y enfoques específicos adoptados en diferentes países para incorporar los agregados reciclados en la elaboración de concreto buscan equilibrar la sostenibilidad con la seguridad y la calidad, lo que implica un enfoque cuidadoso en la gestión de residuos reciclados en la industria de la construcción. Sin embargo, las regulaciones y recomendaciones varían significativamente de un lugar a otro, considerando aspectos como la resistencia del concreto, las propiedades de los agregados reciclados y los usos permitidos. Para complementar la información, se presenta un resumen de las regulaciones y especificaciones de diversos países en el mundo que se muestra en la tabla 26.

Tabla 26

Resumen de Características y Especificaciones de los Agregados Reciclados en Diversos Países

Especificaciones	Clasificación	Composición de agregados reciclados (%)		Máxima sustitución de agregados naturales por reciclados		Densidad mínima (kg/m ³)	Máxima absorción de agua (%)	Clases de Resistencia máxima	Máximo contenido de cloruro (%)	Máximo contenido de sulfato (%)
		Concreto	Mampostería	Agregado Grueso	Agregado Fino					
Brasil	ARB	> 90	-	100%	100%	n.a	7	15MPa	1a	1a
	ARM	< 90	-			n.a	12		1a	1a
Alemania	ARB	> 90	< 10	20 a 35% (según estructura)	0%	2000	10	C30/37 (20%) y C25/30 (35%)	0,04	0,8
	ARB	> 70	< 30			2000	15		0,04	0,8
	ARA	< 20	> 80	n.a	n.a	1800	20	n.a	0,04	0,8
	ARM	> 80				1500	n.a		0,15	n.a
Hong-Kong	ARB	< 100	-	20 o 100%	0%	2000	10	20MPa (100%) y 35MPa (20%)	0,05	1
Japón	ARM	n.d		100%	100% (según estructura)	2200	7	18MPa	n.a	n.a
RILEM	ARB+AP	-	< 100	100%	Sólo si se cumplen los requisitos de agregados naturales.	2400	3	Sin límite	a.i.	1a
	ARB	< 100	-			2000	10	C50/60	a.i.	1a
	ARA	< 20	< 10			1500	20	C16/20	a.i.	1a
Reino Unido	ARB	n.d		20%	0%	n.a	n.a	C40/50	n.a	1
	ARM	> 95	< 5	n.a	0%	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Países Bajos	ARB	> 95	< 5	100%	Sólo si se aplica con agregados gruesos naturales.	2000	n.a	C40/50	0,05 ^b	1
	ARA	-	> 65			2000	n.a	C20/25	0,05 ^b	1
Portugal	ARB	> 90	< 10	25%	0%	2200	7	C40/50	a.i.	0,8
	ARB	> 70	< 30	20%	0%	2200	7	C35/45	a.i.	0,8
	ARM	> 90		n.a	0%	2000	7	n.a	a.i.	0,8
Noruega	ARB	> 94	< 5	n.a	n.a	2000	10	n.a	n.a	n.a
	ARM	> 90				1500	20		n.a	n.a
Suiza	ARB	< 100	-	100%	100%	n.a	n.a	C30/37	0,03	1
	ARM	< 100	-			n.a	n.a	n.a	n.a	1
Dinamarca	ARB con pruebas	> 95	-	100%	20%	2200	n.a	40MPa	n.a	n.a
	ARB sin pruebas	> 95	-			2200	n.a		n.a	n.a
	ARM	> 95				1800	n.a	20 MPa	n.a	n.a
Bélgica	ARB	> 90	< 10	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
	ARM	> 40	> 10						n.a	n.a
	ARA	< 40	> 60						n.a	n.a
Rusia	ARM	n.a	n.a	100%		n.a	n.a	15MPa	n.a	n.a
				50%				20 MPa	n.a	n.a
España	ARB	n.a	n.a	20%	0%	2200	7	40MPa	1a	0.8

Nota. Descripción general de requisitos del agregado reciclado. Elaborado a partir de “Concrete with recycled aggregates commented analysis of exististing legislation” por Magalhães, 2007. (<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455646/RESUMO.pdf>).

1.4 AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO (ACR)

El concreto al ser uno de los materiales más usados y versátiles en el mundo, representa una parte importante de las estructuras de las edificaciones que existen, por lo que su uso representa una gran importancia en la industria de la construcción en el presente y a futuro (McGinnis et al., 2017). En ese sentido, el uso de los materiales para la elaboración del concreto se genera mediante distintos niveles de producción industrial (ubicación, producción, almacenamiento y transporte). Como el cemento y los agregados naturales, son los que generan un gran impacto ambiental. Una forma de reducir este impacto sería reduciendo la depredación de las canteras de los agregados naturales. No obstante, la importancia de reducir esto ha sido pasada por alto, a pesar de que los agregados naturales gruesos representan entre un 40% y un 50% del volumen total de la mezcla del concreto, mientras que el cemento representa alrededor del 10% (Mehta, 2001).

Por otro lado, en las últimas décadas el veloz avance de la industria de la construcción ha generado una considerable cantidad de residuos provenientes de construcciones y demoliciones (RCD). La mayoría son residuos derivados de la demolición de estructuras de concreto, que han incrementado en su mayoría debido a que numerosos edificios históricos y otras construcciones que han excedido su vida útil y requieren ser demolidos (Oikonomou, 2005). Estos residuos mayormente son depositados en vertederos o arrojados en áreas no permitidas, como aceras, canales, zonas urbanas, márgenes de ríos y carreteras, etc. Es por ello, que el reciclaje de los RCD especialmente los residuos de concreto se pueden optar para producir agregados de concretos reciclados (ACR), esto implicaría una sustitución total o parcial de los agregados naturales, siendo una necesidad para reducir el impacto ambiental que genera y disminuir la demanda de recursos naturales no renovables (Ahmed et al., 2023).

De acuerdo con el INACAL (2019) el agregado de concreto reciclado (ACR) se definen como, el residuo de concreto encontrado en construcciones y demoliciones (RCD) de estructuras civiles de concreto simple, armado, tensado y que se obtienen mediante una planta de reciclaje. Esta planta realizará la trituración hasta obtener un material granulado de concreto que mediante ensayos de aptitud se podrá dar uso como agregado. Otra fuente para la obtención de este agregado son las plantas de producción de concreto, donde se

generan desperdicios de concreto debido fallas en el sistema de control de volumen de despacho o exigencias técnicas. Este concreto al solidificarse pueden llevarse a plantas de reciclaje para procesarlos y recuperarlas como agregados. Asimismo, Katz (2003) menciona que se pueden obtener ACR en las plantas de concreto prefabricado o en las plantas de producción de ladrillos. En estos establecimientos, generalmente se elaboran múltiples productos utilizando el mismo tipo de concreto, lo que implica que la variabilidad en las características de los RCD no debería constituir un inconveniente significativo (Chakradhara Rao et al., 2011).

También, Martínez (2020) nos mencionan que el agregado de concreto reciclado es referente a la utilización del concreto encontrado en los escombros de la demolición de una obra que cumplió con su vida útil. dándole un uso a esto agregados en concretos para bases o sub-bases en la construcción de nuevas carreteras o en rehabilitar partes de estructuras en uso dañadas por sismos u otro tipo de desastre natural, etc. Obteniéndose un concreto sostenible al tener agregados de concreto reciclado, que se combinan con cemento, agregados naturales, agua y aditivos, con el propósito de tener un concreto que cuente con características y propiedades similares a las del concreto convencional.

Cómo fue mencionado anteriormente, el ACR tiene diferentes lugares de procedencia y diversas funciones en diversos tipos de estructuras. Es por ello, que los ACR presentan características dependiendo de su lugar de procedencia y al tratamiento que se realiza para su obtención. Una característica fundamental que se debe saber del ACR, es la presencia del mortero residual adherido. La presencia de este mortero es debido a que las estructuras de concreto que fue construida originalmente, de donde se obtiene los ACR, está conformada mayormente por mortero (Pani et al., 2020). Asimismo, la calidad y cantidad de este mortero es un factor importante por considerar, pues debido a este mortero las partículas de ACR presentan una mayor absorción de agua y una menor densidad que los agregados naturales, afectando las propiedades mecánicas del concreto (Jang et al., 2021). Por otro lado, debemos mencionar que estas consideraciones pueden verse ser compensadas con procesos de tratamiento de los ACR o tecnologías que puedan alterar los factores de diseño de mezcla.

Es por ello, que es necesario saber cómo se obtiene el ACR para tener controladas sus características y no afectar en las propiedades del concreto.

1.4.1 Procedimiento para la obtención de ACR

El proceso de obtención de los ACR depende mucho de las especificaciones y normativas de control de los RCD's, así como de otras fuentes. Este proceso abarca desde el lugar de procedencia de estos residuos hasta su producción final. Asimismo, un factor importante que se tiene que tomar en cuenta, es la calidad y función que tuvieron las estructuras en los que fueron usados los RCD's.

El proceso de obtención consta de transportar los residuos a una planta donde se trituran hasta alcanzar un tamaño de aproximadamente 19,05 mm (3/4 de pulgada), lo que les otorga el tamaño estándar de los agregados gruesos. Después de este proceso, se llevan al laboratorio para evaluar su capacidad de absorción, nivel de humedad, saturación y otras pruebas cruciales para lograr una mezcla de concreto óptima que brinde un rendimiento efectivo en la construcción (Cárdenas & Hernández, 2014).

El proceso de obtención del ACR se puede describir en las siguientes etapas:

1) Procedencia

Los agregados reciclados se obtienen principalmente a partir de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), lo que requiere utilizar técnicas de demolición que fragmenten los residuos en tamaños compatibles con el triturador empleado en las plantas de procesamiento. Asimismo, es fundamental realizar procesos de demolición selectiva para reducir al mínimo las impurezas presentes en los escombros, como el yeso, y así garantizar la calidad del material reciclado.

2) Manipulación y separación

Estos procedimientos se llevan a cabo en el sitio de la obra durante la demolición o la reparación. Implican la segregación de los residuos de concreto de otros materiales que surgen durante el curso de esta actividad.

3) Planta de transferencia

Esta instalación está destinada al almacenamiento temporal de residuos que requieren ser tratados o eliminados en centros ubicados a largas distancias. Su propósito principal es centralizar los desechos y optimizar los costos de transporte. En algunos casos, se realiza un proceso de separación y clasificación de los materiales, aunque de manera limitada. Este enfoque contribuye a mejorar la eficiencia en la gestión de residuos tanto en las plantas de tratamiento como en los vertederos.

4) Transporte

De la planta de transferencia de los residuos, se lleva a cabo el proceso de carga utilizando una retroexcavadora, que puede ser de oruga o de ruedas dependiendo del volumen de material y las condiciones de acceso al lugar. Posteriormente, se carga en volquetas para su envío a la planta de tratamiento encargada de producir los agregados reciclados.

5) Planta de tratamiento

El proceso continúa con la recepción y el pesaje de los camiones que ingresan a la planta, momento en el cual se realiza una inspección visual de los materiales transportados para decidir su destino en las zonas de almacenamiento. Estas se clasifican en dos tipos: una destinada a los residuos predominantemente de concreto, conocidos como "residuos limpios," y otra reservada para los materiales cerámicos o mezclados, denominados "residuos mixtos," que pueden incluir elementos contaminantes como plásticos, madera o papel. Cada categoría de residuos sigue un tratamiento diferenciado, para lo cual la planta cuenta con dos líneas de procesamiento independientes. Tras esta clasificación, los residuos limpios y mixtos son redirigidos a su respectiva línea de tratamiento, donde se les aplican procesos específicos que aseguran su adecuada gestión y aprovechamiento.

Las plantas de tratamiento de agregados reciclados tienen un diseño que guarda importantes similitudes con las instalaciones destinadas a la trituración de agregados naturales. Entre los equipos comunes se encuentran machacadoras, cribas y sistemas de transporte como cintas transportadoras y elevadores de cangilones. Asimismo, estas plantas incluyen dispositivos para la eliminación de contaminantes y electroimanes para separar materiales ferrosos, como

el acero. Los métodos de procesamiento utilizados varían en función del destino final del material reciclado (como su uso en rellenos, bases de carreteras o la fabricación de concreto) y del nivel de impurezas presente en los residuos.

En términos de diseño y capacidad tecnológica, las plantas de tratamiento de agregados reciclados se clasifican en tres generaciones:

- **Plantas de primera generación:** Estas carecen de mecanismos avanzados para la eliminación de contaminantes, con excepción de los sistemas para retirar el acero.
- **Plantas de segunda generación:** Incorporan, además de las funcionalidades básicas de las primeras, sistemas mecánicos o manuales para eliminar contaminantes antes de la trituración, así como equipos para la limpieza y clasificación del material triturado, que puede realizarse en seco o húmedo.
- **Plantas de tercera generación:** Están optimizadas para maximizar la reutilización de materiales secundarios considerados contaminantes en los agregados reciclados, logrando un nivel de aprovechamiento casi total.

El tamaño del material resultante tras el proceso de demolición debe ajustarse a los requisitos del equipo triturador en la planta. Generalmente, las trituradoras primarias en instalaciones fijas procesan material de hasta 1200 mm, mientras que, en plantas móviles, las medidas de alimentación varían entre 400 y 700 mm. Este ajuste no solo es crucial para la compatibilidad con el equipo, sino que también influye en características clave del agregado reciclado (ACR), como la distribución de partículas, su forma y la cantidad de mortero adherido (Martínez, s.f.). Podemos clasificar las trituradoras en las siguientes:

- **Trituradora de impacto:** Este tipo de trituradora trabaja mediante golpes repetidos, lo que permite procesar materiales con propiedades físicas variadas. Sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es el desgaste elevado de las partículas, que genera una alta proporción de partículas finas. Se estima que estas trituradoras pueden producir hasta un 40% de partículas finas debido a los impactos.
- **Trituradora de mandíbula:** Las trituradoras de mandíbula funcionan al ejercer presión entre una mandíbula móvil y otra fija, lo que resulta en la reducción del material. Estas

máquinas producen agregados con una distribución granulométrica adecuada para su uso en concreto, con un bajo contenido de partículas finas (menos del 10%). No obstante, las partículas generadas suelen tener una forma más angulosa.

- **Trituradora de cono:** El proceso en estas trituradoras se basa en un eje giratorio que crea impactos controlados. Son especialmente útiles para la trituración secundaria, con un tamaño máximo de alimentación de hasta 200 mm. Este método genera una cantidad moderada de partículas finas, generalmente inferior al 20%.

Una vez que los residuos llegan a la planta de reciclaje, se realiza la clasificación de los materiales según su tamaño. Primero, se utiliza una criba para separar las fracciones más finas, que generalmente son menores de 20 mm. A continuación, se selecciona el material con un tamaño superior a 80 o 60 mm para un procesamiento posterior. El residuo que no supera este tamaño, generalmente compuesto por arcillas y arenas, puede emplearse como relleno, dependiendo de su calidad.

El material seleccionado se somete a un primer proceso de trituración, comúnmente utilizando una trituradora de impacto o de mandíbulas. Este paso reduce los bloques grandes de hormigón a un tamaño aproximado de 150 mm. Después, se eliminan los metales ferrosos presentes en los escombros utilizando un separador magnético. Posteriormente, los elementos contaminantes de mayor tamaño, como plásticos y vidrios, son retirados manualmente. Finalmente, el material limpio pasa por una criba vibratoria para un tamizado, separando los materiales que tienen un tamaño inferior a 20 mm, los cuales se almacenan en montones distintos, mientras que el material de mayor tamaño sigue siendo procesado. Generalmente, las fracciones finas son descartadas debido a su menor calidad, atribuida a la alta contaminación contenida en ellas. Este enfoque garantiza que el material reciclado mantenga un estándar adecuado para su reutilización en la construcción, al tiempo que minimiza los residuos que no cumplen con las especificaciones necesarias.

En el siguiente paso del proceso de reciclaje, el material triturado se somete a una trituración secundaria, para la cual se puede emplear una machacadora de impactos, una machacadora de cono o giratoria, dependiendo de las características del material. El material resultante de esta trituración pasa por un tamiz, generalmente de 40 mm o 60 mm, para separar las

partículas según su tamaño. Los materiales que no superan el tamaño del tamiz son devueltos a la trituradora secundaria, mientras que la fracción que pasa el tamiz (0/40 mm o 0/60 mm) se utiliza para la producción de suelos para carretera. En algunos casos, se puede realizar un tamizado adicional para separar los agregados en grava y arena, adecuados para la fabricación de concreto. Para facilitar el proceso, se utilizan cintas transportadoras con capacidad de rotación, lo que permite separar las fracciones de material en diferentes montones. Este sistema es beneficioso, ya que permite obtener productos diferenciados según su tamaño o calidad.

Así como se usó la criba para la eliminación de las fracciones finas, existen diversos métodos para limpiar las impurezas que se pueden encontrar en los residuos dependiendo de la naturaleza de estas, algunas de estas técnicas son las siguientes:

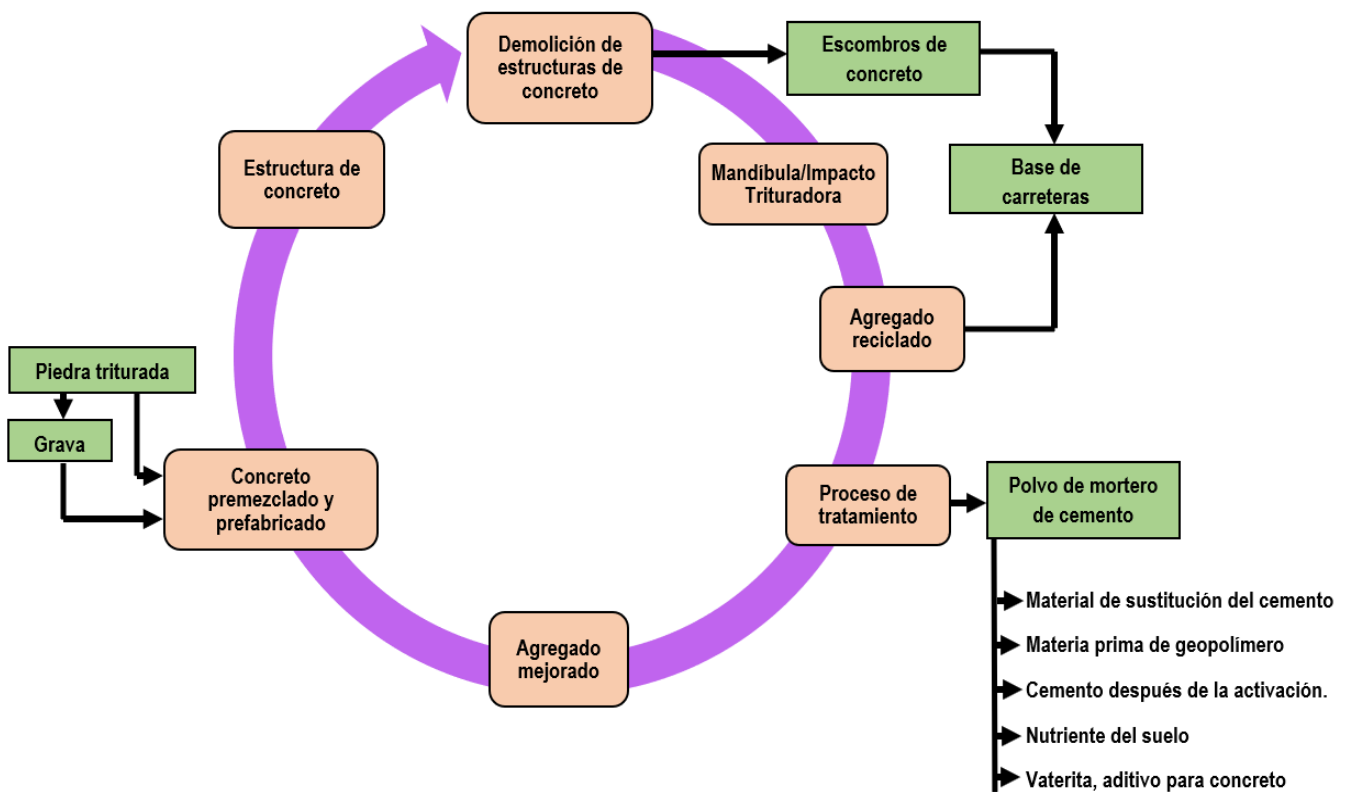
- **Pantallas:** Estos equipos permiten separar los materiales por tamaño utilizando una malla que, mediante vibración o inclinación, deja pasar los materiales más pequeños mientras retiene los más grandes.
- **Clasificación manual:** En este proceso, los operarios seleccionan manualmente los materiales no deseados, como la materia orgánica o el yeso, para eliminarlos del flujo de trabajo. Este método es efectivo para descartar contaminantes de gran tamaño.
- **Cribas:** Se utilizan para eliminar impurezas pequeñas como tierra, papel, plástico y otros contaminantes, dejando solo el material pétreo limpio. Este proceso puede realizarse en múltiples etapas para mejorar su eficacia.
- **Ventiladores:** Estos equipos utilizan aire a presión para eliminar materiales ligeros como papel, madera, plástico o cartón, separándolos de los residuos más pesados mediante medios neumáticos.
- **Ciclones:** Mediante la creación de un flujo de aire centrífugo, los ciclones separan elementos más ligeros, como papel y plástico, de los residuos más pesados. Esta técnica también utiliza la fuerza de la centrifugación para hacer la separación más eficiente.

En los últimos años, se han determinado mediante investigaciones mejorar la calidad de los ACR para su uso en concreto estructural y utilizar mortero reciclado de diversas formas para

lograr un proceso de reciclaje completo de los residuos de construcción y demolición. Este proceso es mediante la eliminación de mortero residual basándose en tratamientos que mejoren procesamiento y manipulación, rentabilidad y respeto al medio ambiente. Asimismo, plantear un sistema de reciclaje industrializado sobre los residuos de concreto que se pueda aplicar en el sector de la construcción, es una propuesta que puede ayudar automatizar los procesos para generar un ACR de calidad y poder producir concreto en masivamente con estos agregados. En la figura 13 se puede observar el esquema de un flujo circular de reciclaje de los residuos de concreto.

Figura 13

Flujo Circular del Sistema de Reciclaje del Concreto



Nota. Flujo esquemático del sistema de reciclaje del concreto. Adaptado de “Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted” por Tam et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123066>).

1.4.2 Propiedades mecánicas del ACR

Los agregados reciclados derivados del concreto exhiben cierta variabilidad en sus propiedades, primordialmente originada por los diversos tipos de concretos (según las diferentes funciones que tuvieron en la estructura original de donde se obtuvieron) que llegan al centro de tratamiento, los métodos de trituración aplicados, la naturaleza de los cribados que se realicen y la presencia de impurezas. Es por ello, que se tiene que considerar estos factores para aplicar el uso de los ACR en la elaboración de un nuevo concreto.

A continuación, se presentará las propiedades mecánicas que presentan los ACR, según diversos estudios de caracterización que se realizaron y como estos se comparan con los agregados naturales.

1.4.2.1 Granulometría

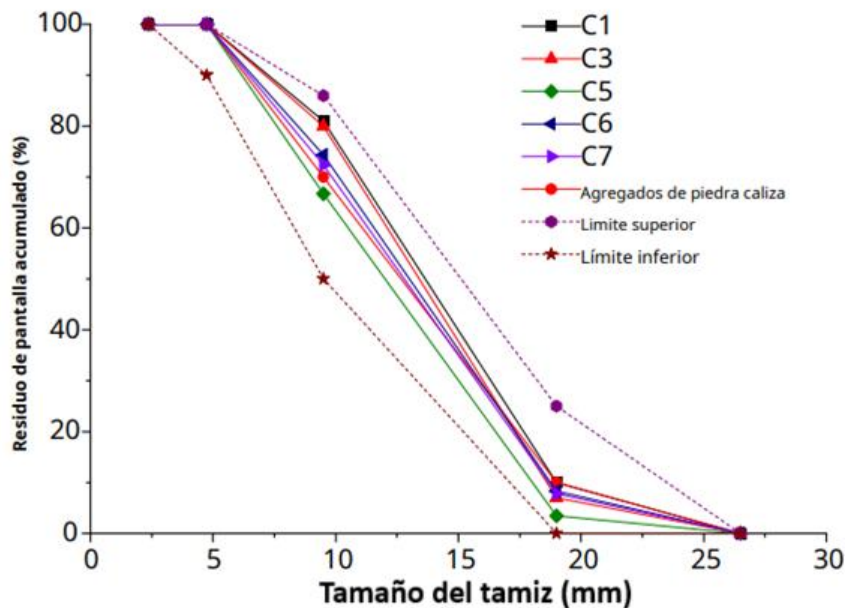
La granulometría de los agregados reciclados de concreto (ACR) se ve influenciada principalmente por el proceso de trituración. Este se puede ajustar mediante variaciones en la abertura de las trituradoras, lo que permite obtener diferentes proporciones de material grueso. Por lo general, el agregado grueso puede representar entre un 70% y un 90% del total del material procesado, dependiendo de la composición del concreto original y el tamaño máximo de los fragmentos reciclados. Es relevante señalar que, en algunos estudios, se ha observado que la fracción gruesa de los ACR presenta una distribución de tamaños que cumple con los límites establecidos por normativas internacionales para su uso en concreto estructural.

También, el módulo de fineza de los ACR, aunque tiende a mantenerse dentro de un rango relativamente constante cuando se mantiene el tamaño máximo del agregado, puede variar ligeramente dependiendo del sistema de trituración utilizado y la calidad del concreto original. El proceso de manipulación de los ACR también genera una cantidad significativa de finos, principalmente debido a la liberación de mortero adherido. Estos finos pueden afectar la adherencia del ACR con la pasta de cemento en nuevas mezclas de concreto y aumentar la necesidad de agua en la mezcla. A pesar de que la fracción gruesa puede ser adecuada para su reutilización en concreto, los porcentajes de finos tienden a variar entre un 0,5% y un 2%, lo que influye en la calidad del agregado reciclado (Salas, 2019).

En la investigación de Ding et al. (2020), se presentaron 5 muestras de agregados reciclados de concretos clasificados en C1, C3, C5, C6 y C7. Donde, se determinó que la curva granulométrica mostraba una distribución continua similar a la de los agregados naturales. En la figura 14 se puede observar la curva de distribución granulométrica de los diferentes ACR y un agregado natural de piedra caliza.

Figura 14

Curva de Distribución Granulométrica de Diferentes ACR



Nota. Curva granulométrica de diferentes ACR obtenido de diversas fuentes. Adaptado de “New Mix Design Method for Recycled Concrete Using Mixed Source Concrete Coarse Aggregate” por Ding et al., 2020. (<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01073-7>).

1.4.2.2 Forma y textura

La presencia de mortero residual en los ACR les confiere una textura más rugosa y porosa en comparación con los agregados naturales. Este aspecto está directamente relacionado con el proceso de trituración, que expone las superficies del mortero adherido. Sin embargo, en términos de su coeficiente de forma, el ACR tiende a ser similar a los agregados naturales, aunque depende del método de trituración empleado.

En España, la determinación de la forma de los agregados gruesos se realiza comúnmente mediante el método del índice de lajas. En los ACR, este índice presenta valores más bajos que en los agregados naturales, lo cual está relacionado con la acumulación de mortero en las superficies planas de partículas con forma de laja. Esto provoca un mayor espesor en las partículas y reduce el porcentaje de lajas, algo que cumple con los estándares de la EHE-08, que establece un máximo del 35% para el índice de lajas. El coeficiente de forma de los ACR también está influenciado por el sistema de trituración empleado. Las trituradoras de mandíbulas producen agregados con un coeficiente de forma más favorable en comparación con las trituradoras de impacto o de cono, debido a su modo de fracturar las partículas (Gomes & De Brito, 2009).

Las investigaciones que han aplicado el método del índice de partículas planas y alargadas según la American Society for Testing and Materials International (ASTM International, 2019a) para determinar la forma del agregado grueso han revelado discrepancias entre el agregado natural y el ACR. En este último caso, se observa un valor menor del índice. Otro enfoque para determinar los parámetros de forma y textura de los ACR implica el uso de una "Máquina del Sistema de Medición de Imágenes Agregadas 2 (AIMS2)". Este método cuantifica la angularidad y la distribución de partículas planas y alargadas. La angularidad del gradiente se evalúa mediante la medición de los cambios a lo largo del contorno de una partícula y está relacionada con la nitidez de las esquinas en las imágenes 2D de las partículas.

La variabilidad en los resultados obtenidos por diferentes estudios respecto a la forma y textura de los agregados reciclados de concreto (ACR) puede atribuirse en gran medida a la calidad del concreto original del que provienen. En particular, se ha observado que los ACR derivados de concretos con una relación agua/cemento elevada tienden a ser más redondeados, lo que también implica una menor resistencia mecánica. Este fenómeno ocurre porque una mayor relación agua/cemento genera una matriz de concreto menos densa y más propensa a desintegrarse durante el proceso de trituración, lo que afecta la forma final del agregado reciclado (Salas, 2019).

1.4.2.3 Densidad

Los agregados reciclados de concreto (ACR) tienen menor densidad que los naturales debido al mortero adherido, que es menos denso. Las trituradoras de impacto son más eficaces eliminando este mortero, lo que mejora la densidad del ACR frente a las trituradoras de mandíbulas o de cono. Con procesos combinados, como usar ambas trituradoras, el ACR puede alcanzar hasta un 90% de la densidad de los agregados naturales tras dos etapas de trituración, aumentando al 95% con cuatro etapas.

Según CEDEX (2010), la densidad de los agregados reciclados de concreto (ACR) es comparable a la del concreto original, aunque ligeramente menor que la densidad del agregado natural utilizado en su fabricación. Esta diferencia es de aproximadamente un 5-10% menos. A pesar de ello, los ACR son clasificados como agregados de densidad normal, con valores típicos que oscilan entre 2,07 y 2,65 kg/dm³ para la densidad real y entre 2,10 y 2,64 kg/dm³ para la densidad saturada con superficie seca. Esto los hace adecuados para varias aplicaciones en construcción, manteniendo propiedades aceptables dentro de los estándares establecidos

1.4.2.4 Absorción

La capacidad de absorción del ACR depende de factores como el tamaño de las partículas, los procesos de tratamiento aplicados y la relación agua/cemento del concreto original. Los ACR presentan niveles de absorción considerablemente superiores a los de los agregados naturales, debido a la cantidad de mortero residual adherido. Mientras que los agregados naturales tienen un rango de absorción de 0% a 4%, en el caso de los ACR los valores suelen oscilar entre 3.3% y 13%, superando a menudo el límite del 5% establecido por la normativa española EHE-08. El tamaño de las partículas del ACR tiene un papel importante en este aspecto. Las fracciones más finas muestran mayores niveles de absorción, ya que contienen una mayor proporción de mortero adherido en comparación con las fracciones gruesas. Este efecto se intensifica en los ACR de menor densidad, dado que su estructura interna retiene más agua debido a su alta porosidad (Sánchez de Juan & Alaejos, 2009).

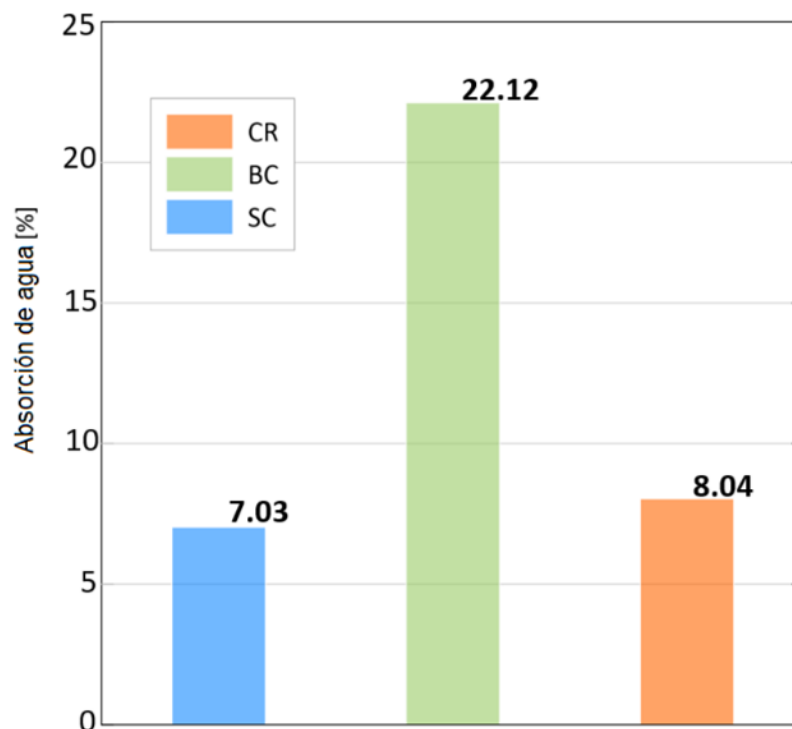
El proceso de trituración de los RCD reduce la absorción de agua del ACR al disminuir la cantidad de mortero adherido. Sin embargo, cuando se utilizan machacadores de mandíbulas

o molinos de impacto, los ACR tienden a tener una absorción algo mayor debido a que estos equipos dejan más mortero adherido en los agregados reciclados. Además, se determinó que en un ACR que se haya obtenido de un concreto original de alta resistencia, presenta una menor absorción que un ACR obtenido de un concreto original de baja resistencia.

Denisiewicz et al. (2019), realizó el estudio de 3 diferentes tipos de agregados: agregado natural (SC), agregado reciclado de mampostería (BC) y agregado reciclado de concreto (CR). Donde se encontró que la absorción del agregado reciclado de concreto fue del 8.04%, obteniendo un valor similar al del agregado natural de esa investigación. En la figura 15 se observa el porcentaje de absorción de agua de los 3 tipos de agregados.

Figura 15

Porcentaje de Absorción de Agua de Agregados Naturales y Reciclados



Nota. Absorción de agua de agregados naturales, agregados de residuos mampostería y agregados de residuos de concreto. Adaptado de “Experimental Investigation of Concrete with Recycled Aggregates for Suitability in Concrete Structures” por Denisiewicz et al., 2019. (<https://doi.org/10.3390/app9235010>).

La porosidad del ACR, al igual que la absorción, presenta desventajas en comparación con el agregado natural debido a su composición dual, que incluye tanto agregado original como mortero adherido. Sin embargo, estudios han evidenciado que mediante el uso de separadores de densidad industriales y la selección de ACR provenientes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) con densidades superiores a 2.2 kg/dm^3 , es posible obtener agregados con una baja porosidad, generalmente inferior al 17%. Esto posibilita que la producción de ACR que ofrezca un rendimiento satisfactorio para la elaboración de concreto (Martínez, s.f.).

1.4.2.5 Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión de los Agregados Reciclados de Concreto (ACR) se evalúa mediante el ensayo de Los Ángeles, el cual indica que los ACR suelen mostrar una mayor capacidad de desgaste que los agregados naturales. Esto ocurre porque, en este ensayo, no solo se pierde peso del agregado original, sino que también se elimina el mortero adherido, lo cual aumenta la abrasión. Las partículas más pequeñas de ACR presentan un mayor coeficiente de abrasión, ya que contienen más mortero adherido. En los estudios realizados, el desgaste de los ACR gruesos en el ensayo de Los Ángeles varía entre el 25% y el 45%, lo que supera a menudo el desgaste típico de los agregados naturales. De acuerdo con las normas internacionales, los límites máximos de pérdida en este ensayo son los siguientes: la norma ASTM International (2003) permite hasta un 50%, las normativas británicas BS882:1992 y BS1201:2005 no permiten más del 45% y la normativa española EHE-08 establece que la pérdida debe ser inferior al 40%.

Con una serie de trituraciones sucesivas, la calidad de los Agregados Reciclados de Concreto (ACR) mejora, lo que reduce su coeficiente de abrasión de Los Ángeles, acercándose al de los agregados naturales. La tabla 27 muestra una comparación de los valores de desgaste del coeficiente de Los Ángeles entre los ACR y los agregados naturales, revelando que ambos presentan valores similares en cuanto a la resistencia al desgaste. Esto sugiere que, con un adecuado procesamiento, los ACR pueden tener un desempeño comparable al de los agregados naturales en términos de abrasión.

Tabla 27*Coefficiente de los Ángeles de Agregados Naturales y ACR de Diferentes Estudios*

Autores	Tamaño de agregado	Agregado Natural	ACR
Barra, 1996.	6mm-12mm	20.4%	29.5%
González, 2002.	12mm-25mm	27.0%	34.0%
Sánchez, 2005.	4mm-16mm	35.8%	38.9%
Mattey et al., 2014.	4.75mm-12.5mm	16.39%	33.65%

Nota. Elaborado a partir de Castaño (2009) y Mattey et al. (2014)

1.4.3 Propiedades químicas del ACR

Las propiedades químicas del ACR están directamente influenciadas por la procedencia de RCD de los cuales se obtienen. En particular, los residuos de concreto mantienen adheridos algunos productos de la hidratación del cemento en las partículas del ACR. Este fenómeno es más evidente en las fracciones más finas, donde la acumulación de mortero residual y compuestos cementantes es mayor, lo que puede afectar las propiedades químicas y la reactividad del material. Asimismo, La composición química del ACR puede alterarse por contaminantes como arcillas, polímeros, sustancias bituminosas, yeso y metales, así como por daños sufridos en los residuos originales, como incendios o reacciones químicas. Estos factores influyen en su desempeño en concreto. Por ello, es crucial evaluar su calidad y controlar sus efectos para garantizar un uso adecuado según la función estructural que se requiera. A continuación, se destacan las propiedades químicas más relevantes para su uso en concreto.

1.4.3.1 Zona de transición interfacial (ZTI)

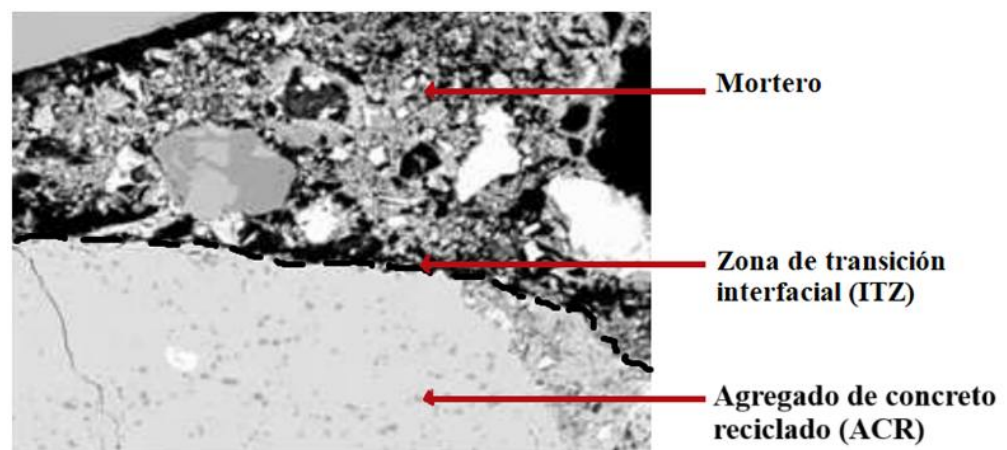
En la elaboración de la mezcla del concreto se genera una zona de transición interfacial (ZTI) entre los agregados y la pasta de cemento. Esta zona tiene una gran incidencia en la resistencia y la durabilidad del concreto debido a que eso el punto de interconexión del agregado y el cemento. En concreto que usa ACR existen dos tipos de ZTI, la primera se sitúa entre el mortero adherido y el agregado original del ACR, mientras que la segunda se encuentra entre el ACR y la pasta de cemento. Esta zona se considera una característica

frágil, debido a su alta porosidad, lo que provoca la extensión de grietas y la entrada de materiales no deseados (Güneyisi et al., 2014).

En el estudio de Arredondo (2011), se menciona que en el ZTI entre el ACR y la pasta de cemento presenta una mayor porosidad. Asimismo, mediante una imagen que se tomó a la mezcla de concreto con ACR que se muestra en la figura 16, se verifica que se genera un efecto visual de pared invisible y más pronunciado que un concreto con agregado natural. Asimismo, se observó que el mortero adherido y el agregado original del ACR presenta una ZTI (antigua ZTI). También, se observó que el ACR y la pasta de cemento generan una ZTI, que logran comportarse como un solo elemento y no influirá en la porosidad de esta nueva ZTI.

Figura 16

Zona de Transición Interfacial del ACR y la Pasta de Cemento



Nota. ZTI de la mezcla de un concreto con ACR. Adaptado de “Estudio Microestructural de Concretos Sustentables Aplicando Técnicas Avanzadas” por Arredondo, 2011. (<http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/774>).

1.4.3.2 Adherencia de mortero

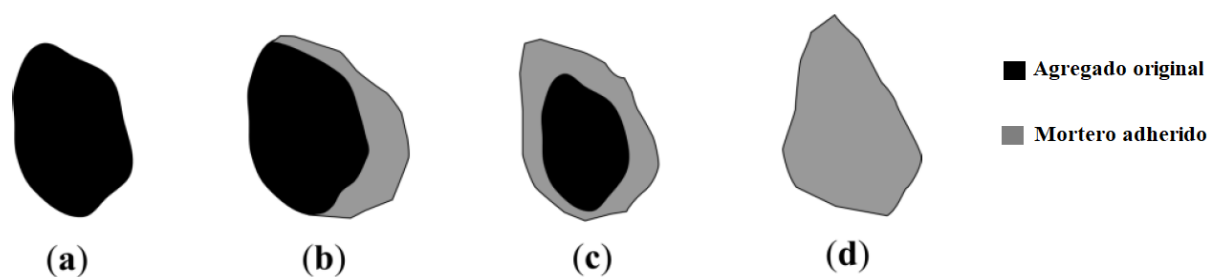
La principal característica que poseen los ACR, diferenciándose de los agregados naturales, radica en la cantidad de mortero residual que está adherido a su agregado original que se obtuvo de la estructura de concreto original. Esta presencia de mortero adherido conlleva a

que el ACR tengan una alta porosidad y generar diferencias sobre las propiedades de los agregados naturales. Esto podría causar un aumento en la absorción de agua, una menor densidad, y menor dureza y resistencia a la fragmentación en el concreto nuevo que se produzca.

Žurauskiene y Valentukevičiene (2020) clasificaron los ACR en 4 tipos considerando la trituración y el mortero adherido, estos agregados son: el agregado natural que se desprendió durante el proceso de trituración y no presentó partículas de mortero adherido (a), agregado natural cubierto parcialmente con mortero adherido (b), agregado natural cubierto totalmente con mortero adherido (c) y ACR que consisten únicamente de mortero adherido (d). En la figura 17 se observa los agregados que fueron clasificados.

Figura 17

Tipos de ACR Obtenido Mediante Trituración



Nota. Tipos de ACR preparada a partir de residuos de concreto triturados. Adaptado de “Experimental Research on Quality Parameters of Recycled Concrete” por Žurauskiene & Valentukevičiene, 2020. (<https://doi.org/10.3390/MA13112538>).

Para estimar el porcentaje de mortero adherido en los ACR, se elimina el mortero de la superficie del agregado original y se comparan los pesos antes y después del proceso. Esto permite determinar de forma aproximada la proporción de mortero residual, aunque no exista un método estandarizado para esta evaluación (González-Fonteboa et al., 2011).

Según el estudio realizado por Güneyisi et al. (2014) existen diferentes métodos para reducir el mortero residual adherido y mejorar la calidad de los ACR, las cuales son técnicas y métodos de tratamientos que se realizan mediante la inmersión en ácido, impregnación de

polímeros y tratamiento de carbonatación. En la mayoría de los casos, estas estrategias de mejoramiento en la calidad de los ACR han ayudado a promover el uso de estos agregados, pues al presentar las condiciones adecuadas conllevará a practicar más su uso en la elaboración de concreto. En la tabla 28 se puede observar las técnicas de tratamiento para mejorar la calidad de los ACR.

Tabla 28

Tratamientos para Mejorar la Calidad de los ACR

Proceso de tratamiento	Descripción del proceso	Efecto
Inmersión en ácido	El proceso consiste en realizar un remojo ácido que suministra agua interna a los agregados reciclados, lo que reduce la retracción del concreto y evita la absorción de agua en los agregados durante el mezclado, mejorando el estado de trabajabilidad del concreto. El agregado tratado con ácido se caracteriza por una mayor densidad y un mayor porcentaje de volumen de sólidos.	Disminuir la absorción de agua
Impregnación de polímeros	Este tratamiento consiste en realizar una inmersión de polímeros a los agregados reciclados. Aquí se introducen principalmente los métodos de impregnación de PVA y de impregnación de emulsión bituminosa, los cuales mejoran en gran medida las propiedades de la superficie y reducen la porosidad y la absorción de agua de los agregados reciclados de concreto.	Disminuye la absorción de agua y reduce la contracción del concreto
Tratamiento de carbonatación	El tratamiento de carbonatación es otro método ampliamente utilizado, pues es eficaz y respetuoso con el medio ambiente. El tratamiento consiste en la reacción del CO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el silicato de hidrato de calcio (C – S – H) para formar CaCO_3 . Este tratamiento logra reducir la porosidad de los ACR, disminuyendo la absorción de agua en las ZTI nuevas y antiguas alrededor del mortero adherido, mejorando efectivamente la resistencia a la penetración de cloruros.	Mejora las propiedades físicas y mecánicas del ACR y mejorar la durabilidad del concreto nuevo

Nota. Pretratamiento químico para los ACR. Elaborado a partir de “Concrete waste-derived aggregate for concrete manufacture” por Z. Liu et al., 2022. (<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130637>).

1.5 IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO

La impresión 3D tiene diversas formas de ser llamado, como fabricación aditiva o prototipado rápido. De acuerdo con ASTM International (2015a), esta tecnología se describe como un método de unión de materiales que permite crear objetos basados en un modelo digital en 3D, utilizando un proceso que suele construirse por capas, en contraste con los métodos tradicionales de fabricación por sustracción. En el 2009, ASTM International y la Society of Manufacturing Engineers (SME) crearon el comité “F42 para la tecnología de fabricación aditiva”, en el cual se estandarizó las actividades de la ASTM clasificando esta tecnología (ASTM International & SME, 2009).

En la industria de la construcción, esta tecnología se implementa en la producción de concreto mediante la fabricación aditiva por capas, conocida también como construcción sin encofrado. Este método permite crear formas geométricas complejas, ofreciendo una ventaja significativa frente a los métodos tradicionales al eliminar la necesidad de moldes. El proceso comienza con el diseño de los componentes mediante software de modelado 3D, que transforma las ideas en modelos volumétricos precisos listos para su impresión (Le et al., 2012)

1.5.1 Antecedentes de la impresión 3D en el sector constructivo

Desde hace algún tiempo, se han realizado varios intentos por implementar la impresión 3D en la industria de la construcción. En 1998, Hinczewski et al. (1998) utilizaron la estereolitografía (SLA) para crear piezas cerámicas en 3D, un paso importante en el uso de la impresión 3D en la construcción. Posteriormente, en 2001, Khoshnevis et al. (2001) demostraron la viabilidad de utilizar el método Contour Crafting, logrando producir una pieza de yeso mediante el uso de secado forzado por calentamiento. Sin embargo, fue hasta 2012 que Lim (2012) demostraron que era posible imprimir componentes de concreto prefabricado, empleando una impresora de 5,4 m de largo, 4,4 m de ancho y 5,4 m de altura.

En cuanto a los modelos arquitectónicos, Gibson et al. (2002) emplearon las tecnologías FDM y SLS para fabricar modelos en un tiempo significativamente reducido. Ese mismo año, se utilizó la tecnología de Modelado de Conceptos (Concept Modelling) en el estudio de Ryder para producir modelos arquitectónicos de baja precisión. Con el tiempo,

tecnologías como FDM, SLS y SLA mejoraron su precisión en la construcción, especialmente respecto al Modelado de Conceptos. Sin embargo, según los estudios realizados por Dimitrova (2006), replicar detalles y estructuras ornamentales con impresión 3D aún era un desafío considerable. Esto ha cambiado con el avance de la tecnología, ya que proyectos en ingeniería médica ahora logran precisiones micrométricas (Melchels et al., 2010).

Aunque en los primeros años parecía difícil concebir que las impresoras 3D comercializadas pudieran construir un edificio, en años recientes se han materializado proyectos que han superado esta expectativa. Por ejemplo, DUS Architects, una empresa holandesa, desarrolló en 2013 una impresora llamada KamerMaker, con la capacidad de imprimir hasta 6 metros de altura, utilizando polipropileno como material. En 2014, la empresa china Winsun imprimió varias casas completas en Shanghái en menos de 24 horas, utilizando concreto y fibras de vidrio de alta calidad. Este material innovador proporcionó a las estructuras una resistencia superior a la de los edificios convencionales de concreto reforzado (DUS Architects, 2013; Winsun, 2014).

1.5.2 Técnicas de impresión 3D

En la actualidad, La impresión 3D de concreto ha revolucionado el campo de la construcción, ofreciendo nuevas formas de diseñar y construir estructuras mediante técnicas aditivas avanzadas. Entre las principales técnicas se destacan el Contour Crafting, D-Shape y Concrete Printing, cada una con características y aplicaciones específicas que permiten abordar distintos desafíos arquitectónicos y de ingeniería.

En primer lugar, se tiene la investigación de Khoshnevis (2004) que define la técnica Contour Crafting, centrándose en la construcción rápida de grandes estructuras, como viviendas, utilizando impresoras que deposita capas de concreto de forma continua. El proceso funciona mediante la extrusión de concreto a través de una boquilla, que lo deposita capa por capa siguiendo las instrucciones de un diseño digital. Una característica clave de esta técnica es que no solo deposita el concreto, sino que también alisa los bordes de cada capa, lo que resulta en una superficie más lisa y un acabado de alta calidad sin necesidad de encofrados. Esto permite que las construcciones se completen mucho más rápido que con

métodos convencionales, haciendo posible construir una casa en menos de un día. Esta técnica es especialmente útil en situaciones que requieren construcciones rápidas, como proyectos de viviendas asequibles o edificaciones en zonas de desastre.

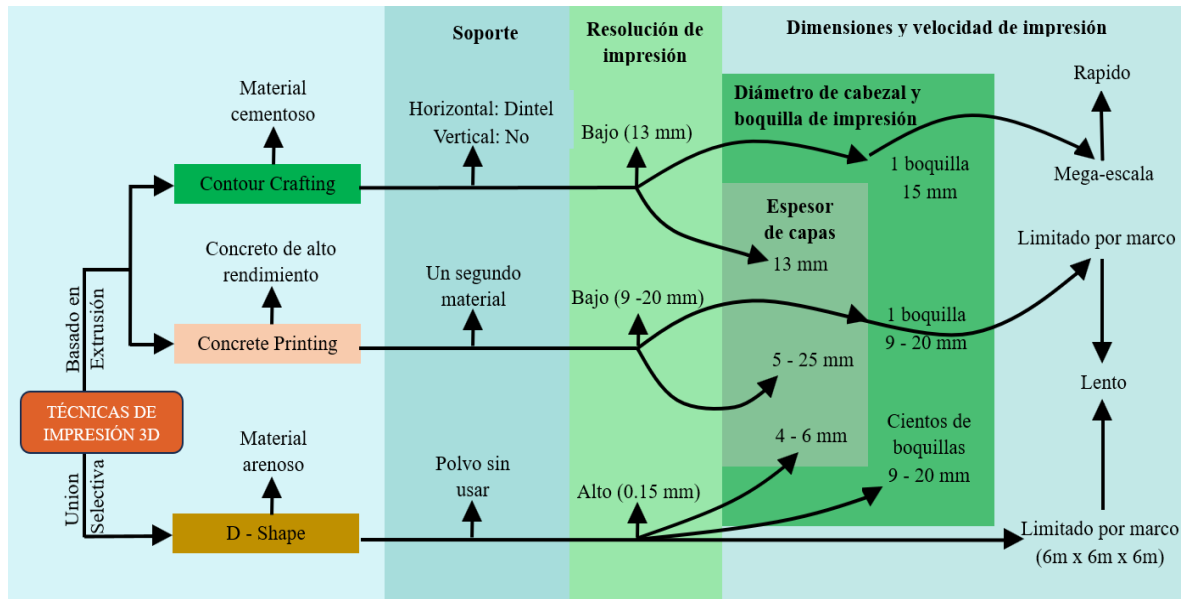
En segundo lugar, se tiene el estudio de Dini (2009), que definen la técnica D-Shape, que es la impresión de estructuras arquitectónicas con detalles complejos y formas orgánicas. A diferencia de Contour Crafting, que utiliza concreto tradicional, D-Shape emplea una mezcla de polvo (generalmente arena) y un aglutinante inorgánico que solidifica las capas impresas. El proceso comienza depositando una capa de polvo y luego un cabezal rocía el aglutinante en las áreas específicas que deben solidificarse, repitiendo este proceso hasta completar la estructura. Esta técnica ofrece una resolución alta en las impresiones, lo que lo hace especialmente útil en la creación de esculturas y elementos decorativos.

Finalmente, se tiene la investigación de Le et al. (2012) que definen la técnica Concrete Printing, desarrollado en la Universidad de Loughborough, que se enfoca en la impresión precisa de componentes estructurales individuales en lugar de edificios completos. Una de las ventajas de Concrete Printing es su capacidad para crear piezas personalizadas que luego pueden ensamblarse en estructuras más grandes, lo que lo hace adecuado para la fabricación de columnas, paneles estructurales y elementos decorativos. Además, se puede modificar la mezcla de concreto utilizada para optimizar las propiedades del material, ajustando la resistencia, el tiempo de secado y la durabilidad según los requisitos del proyecto.

Cada una de estas técnicas tiene aplicaciones y ventajas dependiendo del uso. El Contour Crafting es ideal para proyectos de construcción rápida a gran escala, como la construcción de viviendas, mientras que el D-Shape se destaca en la creación de estructuras complejas con formas detalladas y orgánicas, siendo una excelente opción para proyectos arquitectónicos de diseño avanzado o esculturas. Por otro lado, el Concrete Printing ofrece una alta precisión para la fabricación de componentes individuales, lo que es ideal para estructuras modulares o elementos personalizados dentro de un edificio. En general, estas técnicas ofrecen diseños más complejos, eficientes y sostenibles, mientras reducen los costos y tiempos de construcción. En la figura 18 se presenta un resumen de las características que presentan estas técnicas.

Figura 18

Técnicas de Impresión 3D de Concreto






Nota. Especificaciones de las técnicas de impresión 3D de concreto. Adaptado de “Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts” por Guamán-Rivera et al., 2022. (<https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020229>).

1.5.3 Tipos impresora 3D

La incorporación de estructuras robóticas en la industria de la construcción ha posibilitado la realización de aplicaciones de concreto impreso a gran escala mediante tecnología de impresión 3D. El uso de estas plataformas automatizadas en experiencias previas, son clasificadas en plataformas de articulación múltiple, robots móviles y sistemas personalizados de pórticos. La utilización de sistemas robóticos permite optimizar las topologías de diseño en tres dimensiones, generando estructuras más eficientes y reduciendo el desperdicio de material. Asimismo, la integración de robots en el proceso de construcción incrementa la capacidad para elaborar geometrías complejas en menos tiempo disminuyendo el costo de producción al mejorar la calidad y la fiabilidad del resultado final. En la tabla 29 se muestra un resumen acerca de estos tipos de impresoras 3D de concreto que se usan en la construcción.

Tabla 29

Tipos de Impresoras 3D de Concreto en la Construcción

Impresoras 3D de concreto	Descripción	Aplicaciones	Ventajas
<p>Sistema de Pórticos</p> 	<p>Este tipo de impresora se usa mayormente para proyectos de gran escala in situ. Es una plataforma que cuenta con un cabezal de impresión que se mueve a lo largo de un marco o pórtico en cualquier dirección especificada en los ejes X, Y y Z.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construcción de un puente de 25,1 metros ▪ Impresión de prueba de arcos de concreto sin encofrado ▪ Construcción de diseños personalizados mediante impresión 3D para modelar geometrías complejas ▪ Impresión 3D de estructuras de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso eficiente de espacio de trabajo ▪ Impresión a gran escala ▪ Impresión in situ
<p>Plataforma articulada</p> 	<p>El propósito de este sistema de impresión 3D es emular los movimientos y articulaciones del hombro y la mano de un humano, posibilitando hasta 7 grados de libertad en el movimiento. Esto se logra al combinar un cabezal con 5 ejes junto a un brazo robótico de 6 ejes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construcción de una casa ▪ Diseño de un concreto postensado (losa postensada) ▪ Construcción de estructuras complejas ▪ Construcción in situ de un molde de malla ▪ Columnas de concreto armado impresas ▪ Diseño e impresión de una fachada de doble curva 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fácil transporte ▪ Impresión de diseños complejos ▪ Impresión inferior detallada ▪ Impresión en fabrica
<p>Plataforma móvil</p> 	<p>Esta impresora se encuentra conectado a una plataforma móvil equipada con orugas de goma que facilitan la maniobrabilidad de la impresora en diversos tipos de terreno, y con patas hidráulicas que estabilizan la máquina durante el proceso de impresión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construcción de fachadas de concreto ▪ Construcción de concreto de geometrías complejas ▪ Construcción de muros prefabricados ▪ Construcción de vigas prefabricadas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impresión in situ ▪ Integración de un eje lineal o circular y un robot móvil ▪ Impresión personalizada diseños de espacio de trabajo

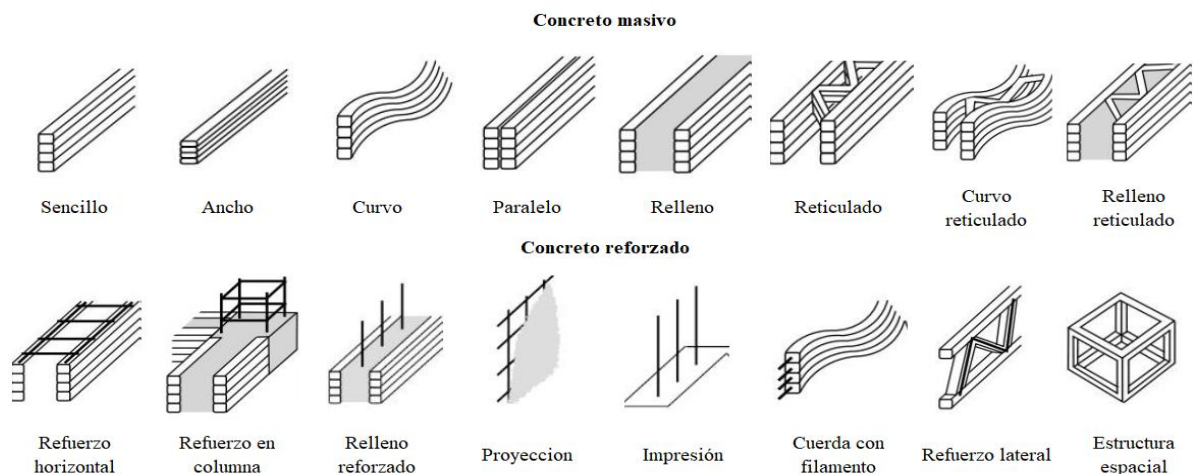
Nota. Plataformas automatizadas utilizadas en la impresión 3D de concreto. Adaptado de “Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts” por Guamán-Rivera et al., 2022. (<https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020229>).

1.5.4 Sistemas constructivos en la impresión 3D

En las últimas décadas se han observado una amplia gama de enfoques aplicativos de la impresión 3D de concreto en la construcción. En la mayoría de los casos, se utilizan elementos compuestos principalmente por muros que están conformados por cordones horizontales, siguiendo perfiles extruidos de secciones circulares o rectangulares. Por ello, se ha identificado 2 sistemas predominantes para el uso de la impresión 3D en la construcción: el concreto en masa y el concreto reforzado, como se puede observar en la figura 19. En el caso de los muros de concreto en masa, se espera principalmente que sean capaces de soportar cargas de compresión y, por lo tanto, son adecuados para dividir espacios y construir edificios de baja altura, especialmente en zonas con bajos riesgos naturales. En segundo lugar, el concreto reforzado es un sistema que considera la incorporación de refuerzos de acero para resistir cargas estructurales más significativas, lo que permite la creación de elementos con un mayor rendimiento y la construcción de edificaciones de mayor tamaño, como han señalado algunas iniciativas específicas.

Figura 19

Estructuras de Concreto Masivo y Reforzado Mediante la Impresión 3D



Nota. Diversos tipos de estructuras de concreto masivo y reforzado impresos en 3D. Adaptado de “Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts” por Guamán-Rivera et al., 2022. (<https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020229>).

1.6 IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO CON ACR

El uso del agregado de concreto reciclado (ACR) en la elaboración de un concreto reciclado mediante la impresión 3D es una propuesta que se ha estado planteando en los últimos años encontrando diversos avances y desafíos en esta área emergente. El uso de este concreto no solo puede disminuir los errores constructivos que se generan en un sistema tradicional, reduciendo así los costos de construcción. Sino también de reutilizar residuos sólidos generados en el sector de la construcción como los residuos de concreto, contribuyendo a la reducción de la contaminación que generan los RCD's promoviendo el desarrollo sostenible mediante el reciclaje, en la construcción de edificios de forma automatizada.

En diversas investigaciones donde se analizaron las propiedades que tiene un concreto con ACR para impresión 3D, se encontraron resultados positivos en comparación con un concreto elaborado con agregados naturales. Una de estas es la investigación de Wu et al. (2021), donde se examinaron la reología y la capacidad de construcción del concreto impreso en 3D utilizando diferentes proporciones de ACR, descubriendo que la capacidad de impresión del concreto mejoraba con mayores porcentajes de ACR, sugiriendo beneficios potenciales en sostenibilidad y reciclaje en la construcción. Paralelamente, Rahul et al. (2022) analizaron la sustitución de agregados naturales por ACR con menores niveles de aditivos, encontrando que las propiedades mecánicas del concreto no se deterioraban significativamente, lo que indica que el ACR pueden ser una alternativa viable sin comprometer la integridad estructural del concreto impreso en 3D.

La dosificación de los materiales que componen un concreto impreso en 3D es una de las actividades cruciales que tiene una relación directa con las propiedades que se pueden obtener de este. Para ello, se tiene que considerar los parámetros necesarios en la dosificación de la mezcla para obtener las características necesarias para poder producción este concreto y la función que tendrá en una estructura. Por ello, se detallará las consideraciones que debe tener un concreto con ACR impreso en 3D para su dosificación y las propiedades que debe tener para producirlo de forma exitosa.

1.6.1 Componentes del concreto impreso en 3D

La elección de los componentes que debe tener un concreto impreso en 3D está basado en las propiedades y función que se quiere obtener de este concreto. Para ello, se realizó la revisión de la literatura acerca de los materiales que se usaron en diversas investigaciones para elaborar un concreto con ACR impreso en 3D.

1.6.1.1 Cemento

El cemento Portland es uno de los componentes más importantes del concreto impreso en 3D, debido a que esta influencia directamente en sus propiedades. En diversas investigaciones se ha demostrado que el aumento de la cantidad de cemento mejora la edificabilidad, y dependiendo de las adiciones derivadas del cemento puede aumentar la resistencia a la compresión y flexión. Asimismo, el aumento del cemento permite lograr una superficie más suave en el concreto impreso mejorando la calidad arquitectónica. Por otro lado, una elevada cantidad de cemento, junto con una cantidad reducida o nula de agregados gruesos, incrementa la probabilidad de que se formen grietas por contracción plástica en el estado fresco, así como grietas por contracción por secado en el estado endurecido (Zhang et al., 2021).

Entonces, la proporción de cemento que se use en el concreto es una variable muy efectiva para controlar las propiedades del concreto impreso en 3D tanto en estado fresco como endurecido. Por ello, se ha demostrado que una optimización adecuada del cemento puede desarrollar un concreto impreso en 3D que tenga alta resistencia, buena imprimibilidad y excelente adherencia.

1.6.1.2 Adiciones del cemento

Las adiciones puzolánicas derivadas del cemento, como las cenizas volantes y el humo de sílice, tienen la capacidad de reducir significativamente las juntas frías y la variabilidad en la resistencia del concreto impreso en 3D. Esto debido a la formación de una microestructura más densa en la interfaz entre capas y a la disminución de los poros. Sin embargo, este efecto también está condicionado por la disponibilidad de la humedad necesaria para la reacción puzolánica posterior de estas adiciones. Además, las adiciones de curado interno son beneficiosos para mejorar la unión entre capas, facilitando la incorporación de productos de

hidratación, refinando la estructura de los poros, y mitigando la pérdida de la humedad y la contracción del concreto.

En algunas investigaciones realizadas, se considera al cemento y sus adiciones como un solo material llamado “pasta cementante” en la dosificación de la mezcla debido a que la influencia que tienen en el concreto es de manera conjunta. Por ejemplo, Nerella (2020) desarrollo diversas mezclas de concreto con un volumen de pasta cementante del 52,5% teniendo contenido de cemento relativamente bajo, logrando imprimir este concreto durante un tiempo de ejecución de 2 horas. En este periodo de tiempo las características de imprimibilidad no se vio afectada por ninguna circunstancia. Asimismo, se obtuvo una edificabilidad efectiva en todo el tiempo manteniendo la extrusión de las capas de concreto.

1.6.1.3 Agregado natural

En lo que respecta al agregado natural, generalmente se utiliza agregado fino en la mayoría de los casos de concretos impresos en 3D. Aunque algunos grupos de investigación y empresas están avanzando en el desarrollo y uso de un concreto impreso con agregados gruesos, en general, este concreto se encuentra principalmente en la escala de un mortero. La cantidad de agregados está relacionada de forma inversamente proporcional a la cantidad de cemento, esto quiere decir, que se tiene una cantidad reducida de agregados (Zhang et al., 2021). Esto debido a que el aumento de la cantidad de agregados incrementa las presiones de bombeo requeridas generando un aumento de la viscosidad del concreto. Además, se tiene que considerar que el uso de agregados gruesos influye significativamente en la capacidad de bombeo y extrusión pudiendo generar un atascamiento en el sistema de impresión. En cuanto al tamaño máximo del agregado es una característica que depende de las características de la bomba y cabezal de impresión (boquilla), especialmente del diámetro del cabezal. La mayoría de la maquinaria de bombeo y cabezales de impresión utilizados en empresas no se han visto adecuados para elaborar concreto con agregado grueso, por lo que se requieren modificar las características de nuevas impresoras para mejorar su producción.

1.6.1.4 Agregado de concreto reciclado (ACR)

De acuerdo con lo mencionado en el ítem 1.4.2 acerca de las propiedades mecánicas del ACR, se determina que la inclusión de estos agregados altera de manera significativa la porosidad y la densidad del concreto, debido a que los ACR suelen contener mortero adherido y son más porosos que los agregados naturales, aumentan la porosidad total del concreto. Esto puede ofrecer ventajas como una mayor facilidad de construcción y una reducción en el peso del material, pero también presenta retos en términos de durabilidad y resistencia a largo plazo. Por lo tanto, es crucial gestionar adecuadamente la interacción entre los ACR y la matriz de cemento para optimizar las propiedades del concreto impreso y asegurar que cumpla con los requisitos estructurales y de imprimibilidad.

Según lo indicado en el ítem 1.3.1 acerca de las regularizaciones del uso del ACR en Europa y otros países, tanto para agregados finos y gruesos, se concluye que se permite un uso promedio del 20% de reemplazo de los agregados naturales en la dosificación del concreto. No obstante, esta dosificación debe ser investigada a mayor profundidad, considerando la procedencia y características del ACR. Es por ello, que el uso del ACR en el concreto impreso en 3D introduce una serie de complejidades que afectan tanto las propiedades mecánicas como la estructura interna del concreto. Aunque existen desafíos significativos, como la anisotropía y la variabilidad en la distribución de los poros, también hay oportunidades para mejorar la sostenibilidad y reducir los costos de construcción mediante el uso de estos materiales reciclados. La clave está en desarrollar métodos de impresión y formulaciones de mezcla que mitiguen los efectos negativos y potencien las ventajas inherentes del ACR.

1.6.1.5 Aditivos

Los aditivos desempeñan un papel importante en las propiedades reológicas del estado fresco y del estado endurecido del concreto, y su uso es esencial para garantizar la edificabilidad en el proceso de impresión 3D. Marchon et al. (2018) analizaron varios tipos de aditivos en la aplicación de un concreto impreso en 3D, donde se clasificaron de según cada etapa en el proceso de impresión. Los resultados mostraron como más relevantes a los modificadores reológicos debido a que controlan la viscosidad y la tensión de fluencia del concreto fresco,

que son aspectos cruciales para garantizar la edificabilidad y la capacidad de impresión sin deformarse en el proceso.

El concreto impreso en 3D, por lo general, tiene un bajo contenido de agua. Esto se ve demostrado en que la mayoría de los diseños de mezcla tiene una relación de agua/cemento promedio de 0,35. Por lo tanto, el uso de superplastificantes, especialmente PCE, es necesario para mantener la cantidad de agua garantizado la capacidad de bombeo, extrusión y la consistencia del concreto. Asimismo, el uso de aceleradores de fraguado e hidratación aumenta el límite elástico estático y, por lo tanto, mejora la capacidad de construcción del concreto impreso. No obstante, la eficacia de los aceleradores y sus “efectos secundarios” varían significativamente según el tipo de acelerador utilizado. Estos aditivos permiten la manipulación precisa de las propiedades del concreto, asegurando que sea adecuado para su uso en la fabricación aditiva. La elección y combinación de estos aditivos deben ser cuidadosamente consideradas para evitar interacciones indeseadas y garantizar el rendimiento óptimo del concreto impreso en 3D.

1.6.2 Diseño de mezcla del concreto impreso en 3D

El diseño de la mezcla consiste en determinar la composición y proporciones óptimas para que el concreto tenga un rendimiento específico en su estado fresco y endurecido. En el caso del concreto impreso en 3D, los métodos de diseño de mezclas se guían mediante las características de imprimibilidad que debe tener este concreto para alcanzar las propiedades reológicas y mecánicas requeridas. Hasta el momento, no se han establecido métodos de diseños de mezclas estandarizados para el concreto impreso en 3D y la mayoría de los métodos utilizados son empíricos. Estos métodos varían considerablemente entre sí, debido a que existe variabilidad en la elección de materiales y parámetros de control de mezcla. Por ello, estos métodos ofrecen diversas opciones para que los investigadores elijan materiales y ajusten parámetros en la búsqueda de la mezcla óptima de un concreto imprimible (Zhang et al., 2021).

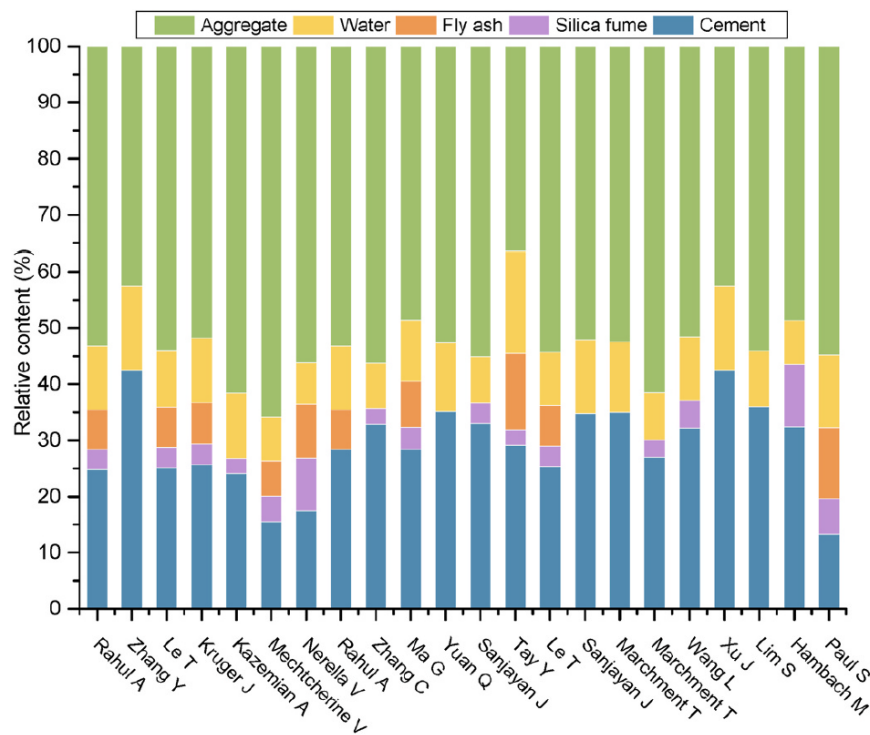
Investigaciones actuales han ilustrado que varios parámetros tienen un impacto significativo en las propiedades reológicas del concreto impreso y, por lo tanto, en su capacidad de impresión. Estos incluyen el contenido de agua, la granulometría, el tamaño máximo del

agregado, el contenido de aditivos, el contenido de la pasta cementante y la relación pasta cementante-agregado. Aunque múltiples factores pueden afectar simultáneamente la imprimibilidad del concreto, generalmente se puede inferir que aumentar la cantidad de agregados y reducir la cantidad de pasta cementante son beneficiosos para la extrusión en capas, pero pueden comprometer la capacidad de bombeo del concreto.

Zhang et al. (2021) recopilaron diversos diseños de mezcla encontrados en investigaciones anteriores, los cuales fueron desarrollados mediante métodos empíricos para determinar el diseño óptimo de cada estudio. La Figura 20 detalla los materiales y las mezclas utilizadas en cada caso.

Figura 20

Diseños De Mezcla Óptimos de Investigaciones Sobre Impresión 3D de Concreto



Nota: Contenido relativo de cemento, cenizas volantes, humo de sílice, agua y agregados de diseños de mezclas óptimos para concreto impreso en 3D. De “Mix design concepts for 3D printable concrete: A review” por Zhang et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>).

De la figura 20 se determinaron que las proporciones del agregado, el agua y el cemento en el concreto impreso en 3D son aproximadamente del $53\% \pm 13\%$, $11\% \pm 5\%$ y $36\% \pm 10\%$ respectivamente. Asumiendo una densidad de 2350 kg/m^3 , las dosis promedio de agregado, agua y cemento serían aproximadamente de $1220 \pm 300 \text{ kg/m}^3$, $250 \pm 115 \text{ kg/m}^3$ y $830 \pm 230 \text{ kg/m}^3$ respectivamente. Además, la relación promedio de agua/cemento se calcula en aproximadamente 0,35. Una de las principales diferencias que se tiene con el concreto convencional es que la cantidad de agregados tiene un promedio de 50% mientras que para el concreto convencional se usa un promedio de agregado del 75%. Las cenizas volantes Clase F y el humo de sílice son comúnmente utilizados como materiales cementantes en el concreto impreso para reemplazar parcialmente al cemento. Asimismo, el humo de sílice mejora la tixotropía y la edificabilidad del concreto impreso, mientras que las cenizas volantes favorecen la capacidad de bombeo y extrusión. Por lo tanto, es común utilizar ambos materiales en combinación. Las proporciones en masa de cenizas volantes y el humo de la sílice respecto al cemento suelen ser alrededor del 20% y 10% respectivamente, en la mayoría de los casos.

1.6.3 Propiedades del concreto impreso en 3D en estado fresco

1.6.3.1 Reología

La reología del concreto es el estudio del comportamiento del concreto frente a esfuerzos aplicados y deformaciones. Esto se determina mediante ensayos durante un periodo de tiempo, que para el concreto impreso en 3D es importante determinarlo desde su estado de reposo hasta el periodo inicial de endurecimiento. Los parámetros que se evalúan para esta propiedad son el esfuerzo cortante, la viscosidad y la velocidad de corte. Para relacionar estos parámetros y determinar el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos, como el concreto, se usa el modelo de Bingham el cual está representada por la ecuación 1 (Zhang et al., 2021).

$$\tau_y = \tau_{y0} + \mu\gamma \quad (1)$$

Donde:

τ_y = Esfuerzo cortante en Pa,

τ_{y0} = Esfuerzo de fluencia estática (limite elástico estático) en Pa,

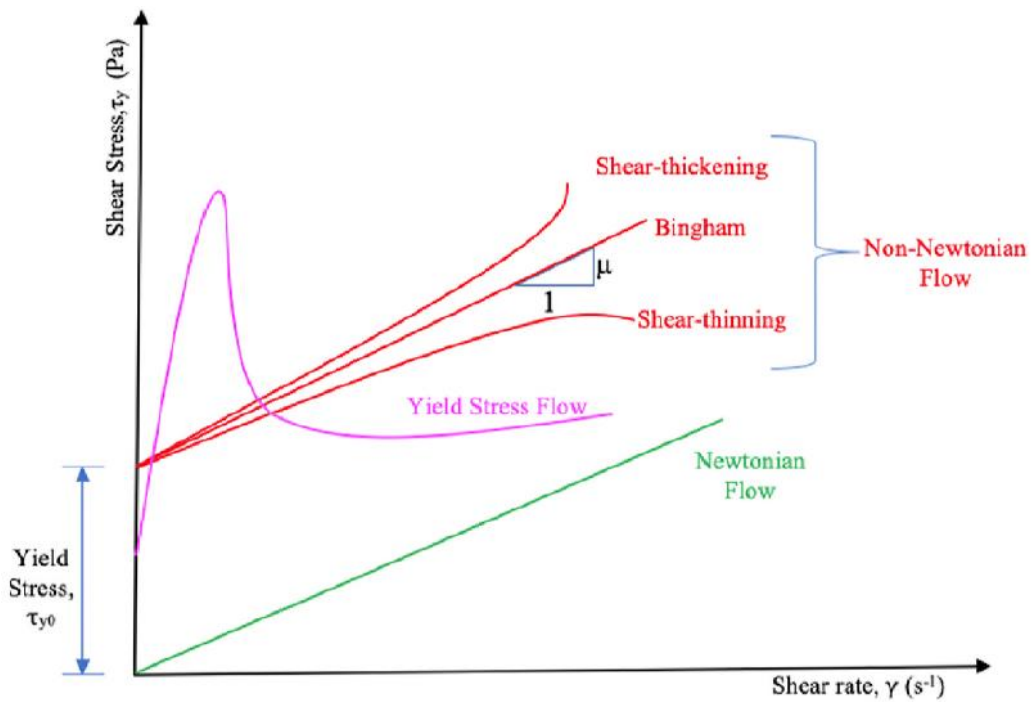
μ = Viscosidad plástica en Pa*s, y

γ = Velocidad de corte en s^{-1}

En la figura 21 se representa la curva de modelo de Bingham y su comparación con otros fluidos.

Figura 21

Modelo Reológico de Bingham



Nota. Curva de esfuerzo cortante y velocidad de corte para el flujo de diferentes fluidos. De "Mix design concepts for 3D printable concrete: A review" por Zhang et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>).

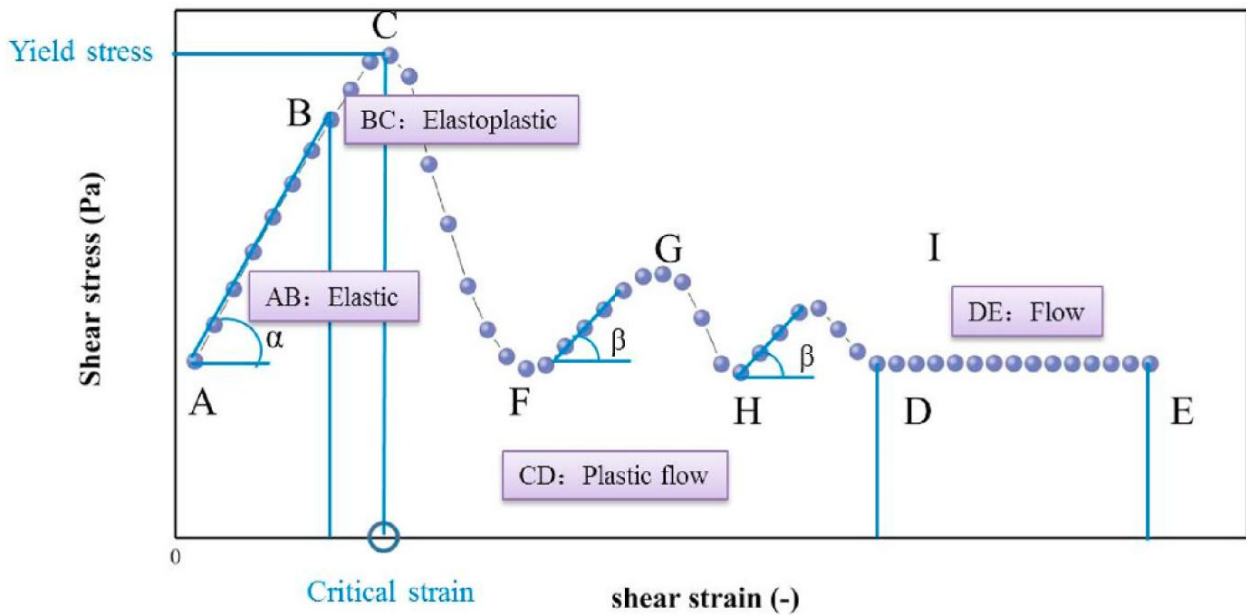
El esfuerzo de fluencia estática (límite elástico estático) es uno de los parámetros más importante de la reología del concreto, pues se refiere al esfuerzo máximo necesario para que el material comience a fluir desde su estado de reposo. Por debajo de este límite, el concreto exhibe un comportamiento elástico y no fluye. Asimismo, en el proceso de impresión, a medida que se depositan capas, una encima de otra, aumenta la tensión de compresión en la capa más inferior. Cada capa de la estructura impresa debe tener un límite elástico adecuado para soportar las capas de concreto que se depositan sobre ella sin sufrir deformaciones, por lo que diversos autores han determinado que un mayor límite elástico estático mejoran la edificabilidad. En el modelo de Bingham, para un concreto impreso, el τ_{y0} representa el límite elástico inicial, es decir, el límite elástico de la primera capa en el proceso de impresión.

El límite elástico del concreto no es una constante, sino que varía con el tiempo. Este valor aumenta en el concreto en su estado fresco, debido a la floculación y la hidratación que se genera para formar el hidrato de silicato de calcio. También, es importante mencionar al límite elástico dinámico que es el esfuerzo necesario para mantener el “estado de flujo” del concreto, presenta mayormente en etapa final del ensayo que mide el comportamiento reológico, teniendo una relación muy notable con el límite elástico estático. En resumen, el límite elástico estático se puede definir como el esfuerzo necesario para iniciar el flujo del concreto, mientras que el límite elástico dinámico es el esfuerzo necesario para mantener el flujo.

El comportamiento reológico del flujo del concreto se mide mediante el ensayo del reómetro, que se muestra mediante una curva de esfuerzos cortantes vs tiempo. En la figura 22 se representa la curva del comportamiento reológico del concreto con ACR impreso en 3D.

Figura 22

Comportamiento reológico de un Concreto con ACR Impreso en 3D



Nota. Presentación esquemática del comportamiento reológico del concreto impreso en 3D sometido a esfuerzos cortantes. De “Study on the rheology and buildability of 3D printed concrete with recycled coarse aggregates” por Wu et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103030>).

En la investigación de Wu et al. (2021) se determinó el comportamiento reológico de un concreto con ACR para ser impreso en 3D. Como se muestra en la figura 22, el segmento AB se define como el “segmento elástico”. En esta etapa, la relación esfuerzo-deformación de la pasta cementante es lineal, exhibiendo las características de un sólido elástico. El segmento BC se define como el “segmento elástico-plástico”. En esta etapa, la relación esfuerzo-deformación se desvía de la linealidad, y la pendiente de la recta tangente de la curva disminuye gradualmente hasta que llega a cero en el punto C. Aunque no se produce flujo macroscópico en esta etapa, comienzan a surgir desalineamientos internos entre los componentes a nivel microscópico. El concreto comienza a mostrar comportamientos plásticos mientras aún se produce la deformación elástica. El segmento CD se define como el “segmento de flujo plástico”, donde se denota una disminución de la curva en CD

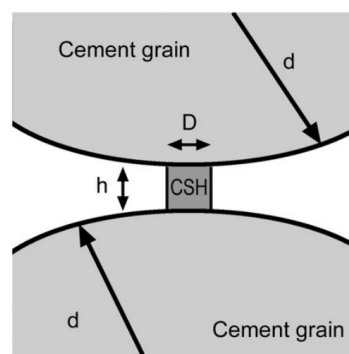
indicando que el concreto aún muestra cierta resistencia residual después del rendimiento. En el punto C, el material alcanza el límite elástico (τ_{y0}), teniendo la deformación crítica en todo el proceso. En los tramos FG y HI se presentan saltos debido al “efecto de autobloqueo” causado por el efecto de los agregados naturales y reciclados, indicando que presentan una resistencia residual mayor que la pasta cementante. Con el paso del tiempo los saltos que se tiene en el tramo CD disminuyen llegando al tramo DE que se define como el “segmento de flujo”, donde el concreto presenta un esfuerzo cortante constante, considerándose un flujo uniforme.

1.6.3.2 Fuerza de atracción coloidal

Durante la hidratación del cemento, las partículas se distribuyen de manera dispersa hasta que ocurre la floculación, un proceso en el cual las partículas interactúan para formar una red que contribuye al aumento del módulo de elasticidad del material. Según Roussel et al. (2012), este proceso se completa en pocos segundos después de detenerse la agitación. Paralelamente, se inicia la nucleación del silicato cálcico hidratado (CSH), el cual actúa como un puente entre las partículas, promoviendo el fraguado inicial del concreto. Durante esta fase, la formación de puentes de CSH se mantiene constante, lo que provoca que el esfuerzo de fluencia estática y el módulo de elasticidad del concreto aumenten de manera lineal con el tiempo, ya que el calor de hidratación permanece estable.

Figura 23

Puente de Unión de Partículas de Cemento en el Proceso de Floculación



Nota. De” The origins of thixotropy of fresh cement pastes” por Roussel et al., 2012. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.09.004>).

1.6.3.3 Tixotropía

En los materiales coloidales, la tixotropía se refiere a la reducción gradual de la viscosidad, durante un periodo tiempo, cuando el material está bajo la aplicación esfuerzos cortantes desde su estado de reposo, y la recuperación de la viscosidad cuando ya no se aplique esfuerzos cortantes al material.

En la tecnología del concreto, la tixotropía se describe como la capacidad de la pasta fresca para reconstruir su estructura. Esto se explica, cuando la estructura de la pasta cementante, formada por fuerza de atracción coloidal, son dañadas al aplicar esfuerzos cortantes durante un periodo de tiempo y se vuelven a reconstruir una vez que se eliminan estos esfuerzos. De esta manera, el comportamiento tixotrópico del concreto puede entenderse como un ciclo reversible en el que las partículas de cemento se agrupan (floculación), se dañan bajo esfuerzos cortantes (desfloculación) y luego vuelven a agruparse (refloculación) cuando el esfuerzo desaparece (Zhang et al., 2018).

También, el comportamiento tixotrópico se puede ver como una relación entre el límite elástico estático y el límite elástico dinámico, que es el esfuerzo necesario para mantener el flujo del concreto en el sistema de bombeo. Es de suma importancia tener en cuenta esta relación, pues un aumento de la tixotropía incrementara la edificabilidad del concreto en las primeras capas de impresión. Sin embargo, un aumento de la tixotropía es perjudicial para la resistencia de la capa intermedia del concreto impreso en 3D (Kruger & van Zijl, 2021).

1.6.3.4 Fluidez

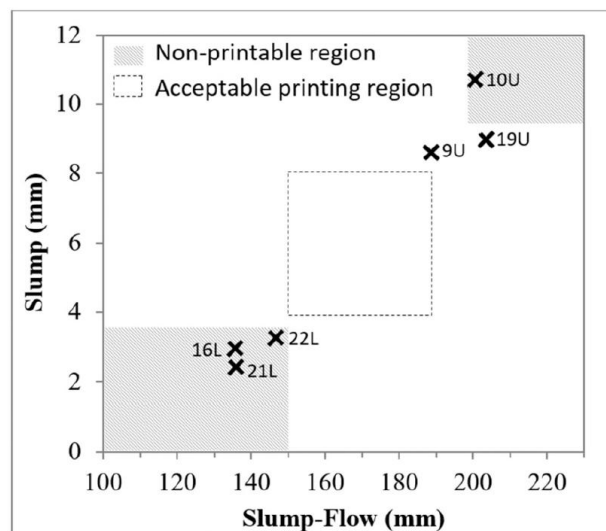
La fluidez del concreto, que está directamente relacionada con su reología, describe su capacidad para fluir. Aunque se usan reómetros en estudios para medir esta propiedad, los resultados pueden variar según el equipo y los procedimientos, lo que dificulta la estandarización. En lugar de métodos complejos, la prueba de asentamiento o slump es una alternativa práctica y accesible para evaluar la fluidez del concreto, especialmente cuando no se dispone de equipos especializados.

Tay et al. (2019) realizaron una extensa investigación estadística utilizando un diseño factorial de mezcla y análisis de varianza para evaluar la facilidad de imprimibilidad de las

mezclas antes del proceso de impresión, donde en base a la norma ASTM International (2015b) realizaron las pruebas de asentamiento y flujo de asentamiento. Los resultados mostraron que las mezclas con un bajo valor de asentamiento tienden a producir filamentos impresos con una textura superficial rugosa, presentar grandes grietas en la superficie y tener una baja bombeabilidad. Sin embargo, estas mezclas también tienen la ventaja de retener mejor su forma después de la impresión. Por otro lado, las mezclas con un mayor valor de asentamiento producen superficies más lisas y presentan menos grietas, además de tener una alta capacidad de bombeo. No obstante, estas mezclas tienen una menor retención de forma una vez impresas. Para lograr una buena imprimibilidad, los autores determinaron una región imprimible, como se observa en la figura 24, con un valor de asentamiento entre 4 mm y 8 mm y un flujo de asentamiento entre 150 mm y 190 mm, para garantizar una mejor calidad de acabado superficial y una edificabilidad mejorada. Esto significa que tales mezclas no solo se imprimen bien, sino que también mantienen una forma estable y proporcionan un acabado superficial de alta calidad.

Figura 24

Asentamiento y Flujo de Asentamiento para un Concreto Impreso en 3D



Nota. Región imprimible y no imprimible determinado por rangos de asentamiento vs flujo de asentamiento. De “Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test” por Tay et al., 2019. (<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.106968>).

1.6.3.5 Imprimibilidad

En un concreto convencional, la trabajabilidad es una propiedad esencial para analizar su comportamiento en estado fresco. Sin embargo, en el contexto de la impresión 3D, esta propiedad pasa a llamarse "imprimibilidad" y se desglosa en tres características principales: bombeabilidad, extrusión y edificabilidad. Es importante destacar que estas características superan los estándares comunes del concreto convencional, pues estas presentan requisitos que se contradicen entre sí, y para lograr una equivalencia entre ellas se necesitan evaluar las condiciones en cada etapa del proceso de impresión.

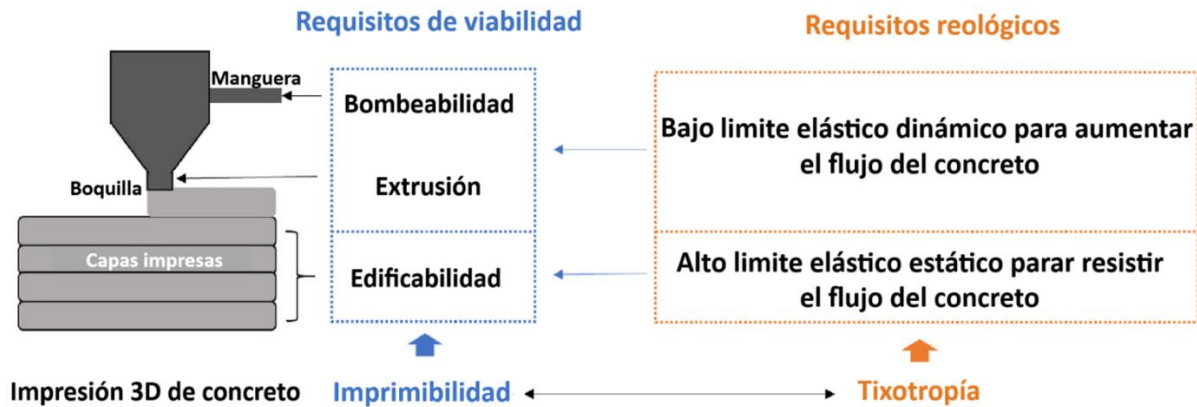
Para que el concreto pueda ser impreso, la mezcla primero debe ser transportada a través de una manguera hasta la boquilla de impresión, donde será extruida y depositada capa por capa. Para que este proceso funcione sin problemas, el concreto necesita tener ciertas propiedades específicas. En primer lugar, debe poseer una baja viscosidad plástica, lo que significa que el material debe fluir con facilidad. Además, es fundamental que tenga un límite elástico óptimo, particularmente un bajo límite elástico dinámico, que permita que el concreto se mueva a través de la manguera y salga de la boquilla sin dificultad. No obstante, una vez que el concreto es depositado, es esencial que posea un alto límite elástico estático. Esto es crucial para que el material pueda sostener las capas de concreto que se van colocando encima sin perder su forma ni deformarse, garantizando así la estabilidad y durabilidad de la estructura impresa. En resumen, es fundamental ajustar con precisión estos requisitos reológicos de la mezcla, para equilibrar las características de impresión. Esto se puede explicar mediante un esquema que se observa en la figura 25 (Zhang et al., 2021).

También, la velocidad de impresión es un factor clave. Imprimir a una velocidad alta puede ser ventajoso porque ayuda a que las capas se adhieran mejor entre sí y acelera el proceso, haciendo que sea más eficiente. Sin embargo, si la velocidad es demasiado alta, las capas pueden no tener tiempo suficiente para mantenerse frescas y unirse correctamente a la siguiente capa, lo que podría comprometer la estabilidad de la estructura. Además, la mezcla debe ser tixotrópica. Esto significa que cuando se le aplica presión (como al pasar por la boquilla), la mezcla se vuelve más fluida, pero una vez que esa presión cesa, recupera su viscosidad y firmeza, lo que es crucial para que cada capa mantenga su forma. La mezcla

también debe ser densa y compacta para asegurar que la estructura tenga la solidez necesaria, y debe tener un tiempo de fraguado apropiado para que la edificación sea estable y duradera.

Figura 25

Requisitos Reológicos Contradictorios Entorno a las Características de Imprimibilidad del Concreto



Nota. Relación que hay entre los requisitos reológicos y la imprimibilidad de un concreto impreso 3D. Adaptado de “Mix design concepts for 3D printable concrete: A review” por Zhang et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>).

1.6.3.5.1 Bombeabilidad

La bombeabilidad se refiere a la capacidad de la mezcla de concreto para ser lo suficientemente trabajable como para moverse bajo presión a través de un sistema de bombeo hasta el cabezal de impresión, manteniendo sus propiedades iniciales durante todo el proceso. Por lo tanto, la capacidad de bombeo depende de varios parámetros como la técnica de bombeo, la configuración de la bomba de impresión, la distancia de bombeo y el diámetro de la manguera. Para que una mezcla sea bombeable, debe tener una baja viscosidad plástica y un valor moderado de límite elástico (Mechtcherine et al., 2014).

Los requisitos de bombeabilidad también implican que el concreto fresco tenga una alta tasa de recuperación de la viscosidad para mantener la estabilidad de su forma después de la impresión, lo cual requiere presiones de bombeo relativamente altas. Además, mientras el concreto se desplaza por las tuberías, se forma una capa lubricante en las paredes, y los

agregados gruesos tienden a acumularse hacia el centro de la tubería. Para mejorar la bombeabilidad, la mezcla debe resistir la segregación bajo estas altas presiones. Sin embargo, Paul et al. (2018) nos mencionan que la segregación bajo bombeo a altas presiones puede provocar la pérdida de la capa de lubricación, lo que podría bloquear el material en la tubería. Por lo tanto, es esencial ajustar la velocidad de bombeo según la forma y el tamaño del objeto a imprimir. En las secciones de la trayectoria de impresión donde hay cambios de ángulo, es crucial controlar la velocidad de bombeo para evitar que el material se deposite en grandes cantidades, lo que podría afectar negativamente la calidad y precisión de la impresión.

1.6.3.5.2 Extrusión

La extrusión es el proceso que permite a la mezcla de concreto para salir suavemente como un filamento continuo desde la boquilla del cabezal de impresión hasta la superficie, asegurando un flujo de concreto sin interrupciones. Esta característica se ve influenciada principalmente por la composición de la mezcla, especialmente la proporción de sus componentes, y la distribución granulométrica de las partículas secas de la mezcla.

La boquilla es crucial en el proceso de extrusión, ya que determina la formación y apariencia de cada capa de concreto durante la impresión. Se emplean boquillas con diversas formas de orificios, como rectangulares, cuadradas, circulares y elípticas, dependiendo del uso y función que se le dará al concreto. Las boquillas circulares son útiles para imprimir en esquinas o cambios de ángulo debido a su facilidad de manejo en estas situaciones. Sin embargo, una menor área de contacto entre las capas extruidas puede comprometer la estabilidad de las capas. Por otro lado, un orificio cuadrado proporciona una mejor capacidad de acabado de la superficie y una mayor facilidad de construcción en comparación con un orificio circular o elíptico. Es esencial que la boquilla esté orientada perpendicularmente a la trayectoria de la superficie para evitar que la capa recién depositada se retuerza. La dimensión del orificio de extrusión debe ajustarse en función de la forma, tamaño y diseño arquitectónico del concreto a imprimir, asegurando así una extrusión adecuada y una construcción estable. Además, Perrot et al. (2012) nos mencionan que es fundamental considerar la conductividad hidráulica de los materiales al regular la velocidad de extrusión

para asegurar una impresión uniforme y evitar el bloqueo en la boquilla. Esto significa que la conductividad hidráulica de los materiales debe ser menor o igual a la velocidad de extrusión, de esta manera, se garantiza un flujo constante y sin interrupciones durante el proceso de impresión.

1.6.3.5.3 Edificabilidad

La edificabilidad se refiere a la capacidad del concreto para soportar el peso de las capas adicionales a medida que se van extruyendo desde la boquilla durante el proceso de impresión. Es esencial que cada capa extruida mantenga su forma y estabilidad, ya que esto es fundamental para lograr una estructura sólida y bien construida. La mezcla de concreto utilizada en la impresión debe tener suficiente resistencia inicial para que la primera capa pueda sostener el peso de las capas subsecuentes sin deformarse o colapsar. Además, es crucial que las capas se integren de manera uniforme para evitar la formación de juntas frías, que podrían debilitar la estructura (Kruger et al., 2020).

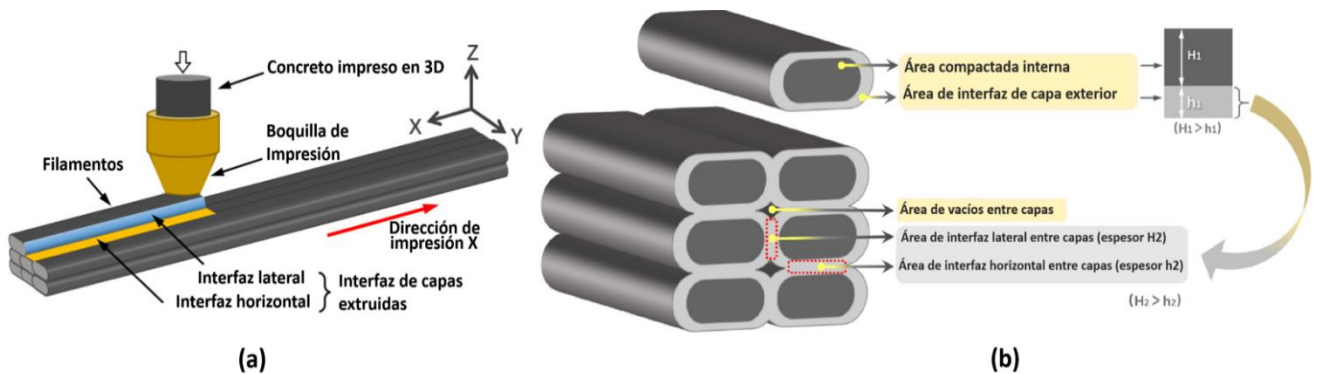
Un concreto impreso con buena capacidad de construcción debe poseer una alta viscosidad plástica y un adecuado límite elástico. Además, la edificabilidad depende de factores como el tiempo de fraguado, el intervalo entre cada capa impresa, la resistencia inicial y la capacidad de adhesión entre capas. En el contexto de la impresión 3D, la habilidad del concreto recién extruido para recuperar rápidamente su viscosidad y límite elástico antes de colocar la siguiente capa es esencial, ya que este método no requiere encofrados, y el concreto debe ser capaz de sostenerse por sí mismo. Según Paul et al. (2018), el control de las deformaciones es esencial para evitar que la estructura se vuelva inestable, ya que el concreto impreso debe ser autosuficiente para no colapsar o deformarse.

También, para lograr la edificabilidad en estructuras de concreto impreso, se debe considerar la tasa de acumulación estructural, la cual está influenciada por la floculación de las partículas y los mecanismos de hidratación del cemento. El método más común para evaluar la edificabilidad de una mezcla es medir la altura de impresión máxima estable que se puede lograr, para establecer una tasa de construcción vertical determinada. Una mayor tasa de construcción vertical generalmente conduce a una menor edificabilidad y viceversa. Los procedimientos para probar la edificabilidad varían según la aplicación deseada, y esta

propiedad está estrechamente relacionada con el límite elástico del concreto. En la figura 26 se muestra un esquema de impresión 3D de concreto y la interfaz de capas extruidas a considerar para mejorar edificabilidad.

Figura 26

Diagrama Esquemático de Interfaz Entra Capas Extruidas del Concreto Impreso en 3D



Nota. Diagrama esquemático del proceso de impresión (a) y modelo de interfaz de entre capas para analizar la edificabilidad del concreto impreso (b). Adaptado de “Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate” por H. Liu et al., 2022. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106868>).

1.6.4 Propiedades del concreto impreso en 3D en estado endurecido

Las propiedades endurecidas del concreto impreso en 3D difieren considerablemente de las del concreto convencional, principalmente debido a la anisotropía, es decir, la variación de las propiedades mecánicas en distintas partes o direcciones del material. Esta anisotropía en la estructura de capas extruidas impacta directamente en la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y la contracción en seco. Asimismo, Panda et al. (2017) descubrieron que la resistencia a la compresión varía notablemente en diferentes direcciones dentro de una estructura de concreto impreso, lo cual se atribuye a la interfaz débil entre las capas y a la baja calidad de impresión. Según ellos, el patrón de movimiento del concreto durante la impresión es una causa principal de esta anisotropía. También, Nerella et al. (2019) determinaron que la anisotropía en la resistencia a la

compresión del concreto impreso es debido a la compactación por el peso de las capas extruidas en el proceso de impresión. Además, Sanjayan et al. (2018) estudiaron el efecto del intervalo de tiempo de impresión sobre la resistencia del concreto impreso en 3D, revelando que tanto la resistencia a la compresión como a la flexión varían según la dirección de carga. Sin embargo, la anisotropía ortogonal en la resistencia a la compresión es más pronunciada que en la resistencia a la flexión.

En síntesis, se considera que las propiedades endurecidas anisotrópicas del concreto impreso en 3D, en comparación con el concreto convencional (que usa encofrados), se deben a una menor cohesión entre las capas extruidas. Según H. Liu et al. (2022), esta reducción en la cohesión es resultado del atrapamiento de aire entre las capas y de la evaporación del agua en la superficie de la capa durante la impresión. La migración de humedad entre los filamentos incrementa la porosidad en las interfaces, lo que disminuye las propiedades de unión entre ellos y finalmente conduce a propiedades endurecidas anisotrópicas. Por otro lado, Kruger et al. (2021) señalaron que, además de la porosidad, otros factores como la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de los poros probablemente tienen un impacto más significativo en las propiedades anisotrópicas del concreto endurecido. Asimismo, la incorporación de ACR en el concreto impreso en 3D puede aumentar la complejidad y la incertidumbre en las uniones de las capas extruidas.

1.6.4.1 Resistencia a la compresión

Como se menciona anteriormente, el concreto impreso presenta propiedades endurecidas anisotrópicas. Entonces, para determinar la resistencia a la compresión del concreto impreso se debe analizarlo por diversas direcciones de carga. Por ejemplo, H. Liu et al. (2022) investigaron la resistencia a la compresión del concreto impreso con ACR aplicando diferentes cargas en diferentes direcciones espaciales (x;y;z), donde se encontró características anisotrópicas significativas en este concreto. Asimismo, la resistencia a la compresión encontró una relación de disminución conforme aumentaba la tasa de reemplazo de ACR. No obstante, comparando con la resistencia a la compresión del concreto impreso de control de esa investigación, la resistencia del concreto con ACR presentaba una diferencia reducida.

1.6.4.2 Durabilidad

Un concreto se le considerara durable si es capaz de conservar forma, calidad y funcionalidad, frente a las condiciones ambientales a las que está sometido. Estas pueden ser la meteorización, los ataques químicos, la abrasión y otros procesos de degradación (American Concrete Institute [ACI], 2001).

Según ACI (2001), las estructuras de concreto impreso en 3D enfrentan desafíos particulares al cumplir estos requisitos generales de durabilidad. Uno de estos desafíos es las uniones débiles entre las capas extruidas de concreto, pues estas facilitan la penetración capilar de agua y otros fluidos dañinos en las profundidades de los elementos estructurales, lo que puede disminuir significativamente la durabilidad del concreto impreso y si lleva refuerzo de acero, comprometer la capacidad protectora del recubrimiento (Schröfl et al., 2019).

Zhang et al. (2021), identificaron varios desafíos en cuanto a la durabilidad del concreto impreso en 3D, que están relacionados con la mezcla y la falta de encofrado. Por un lado, el uso elevado de pasta cementante y la ausencia de agregados gruesos aumentan el riesgo de que se formen grietas por contracción plástica mientras el concreto aún está fresco, así como grietas por contracción durante el secado cuando el concreto ya está endurecido. Por otro lado, la ausencia de encofrado y las limitadas opciones para aplicar medidas de curado contribuyen a una mayor contracción y a la aparición de diversas formas de agrietamiento en el concreto impreso.

También, Lloret-Fritschi et al. (2019) determinaron que los requisitos de edificabilidad en estado fresco de concreto impreso se alcanzan mediante el uso de altas dosis de aceleradores, generando problemas de durabilidad debido a la cristalización de sales provocado por el uso excesivo de aceleradores a base de nitrato de calcio. Las implicaciones a largo plazo sobre la durabilidad derivadas del uso de nuevos componentes en el concreto impreso en 3D aún no están completamente comprendidas. A pesar de estos retos, asegurar la durabilidad del concreto impreso es esencial durante su vida útil en servicio.

CAPITULO II: METODOLOGÍA

En este capítulo se describirá el método de investigación que se optó para lograr los objetivos planteados. Para ello, se tuvo que definir el nivel y diseño de investigación. Asimismo, se presentarán las variables de estudio que permitirá evaluar la propuesta planteada. Finalmente, se explicará cada etapa del proceso para lograr el desarrollo de los objetivos de la investigación.

2.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

2.1.1 Nivel de investigación

Según Supo (2023), una investigación de nivel explicativo busca establecer relaciones de causalidad. En este contexto, la estadística por sí sola no es suficiente para alcanzar sus objetivos, lo que introduce el concepto de "criterios de causalidad". Las relaciones de causalidad pueden demostrarse mediante la experimentación, un procedimiento que implica manipulación y control de variables. El experimento más sencillo consiste en dividir un conjunto de unidades experimentales en dos grupos de manera aleatoria. A uno de los grupos se le aplica un tratamiento específico, denominándolo "grupo experimental", mientras que al otro grupo no se le aplica ningún tratamiento, siendo denominado "grupo control". Esta configuración permite comparar los resultados entre ambos grupos y determinar un tratamiento para el grupo experimental.

En base a este concepto se aplicará el nivel explicativo en esta investigación, pues se presentará un concreto con impresión 3D estándar como grupo control y a concretos impresos en 3D con diferentes tasas de reemplazo del agregado natural por el reciclado como grupo experimental. De esta manera, explicar la relación de causalidad de ambos grupos entorno a las variables de control establecidas.

2.1.2 Diseño de investigación

Como se mencionó anteriormente, para seguir una investigación de nivel explicativo este puede demostrarse mediante un diseño de tipo experimental. Esto se determinará mediante variables de estudio, en el cual se encuentran las variables que se manipularán para fabricar

un producto (variables independientes), y determinar los efectos que este genera en las propiedades de este producto (variables dependientes).

2.1.3 Variables de estudio

Según Pino Gotuzzo (2007), las variables de estudio por su dominio se dividen en variables independientes (que es la que se modifica para averiguar los cambios que se tienen en otras variables), las dependientes (que son las variables que tiene cambios y modificaciones en función a la variación de la variable independiente) y las variables intervinientes (es la que se mantiene constante y acompaña como condicional a la variable independiente sobre la variable dependiente). Asimismo, menciona que los indicadores son las expresiones de medición que se desprende de estas variables. En la tabla 30 se presentan las variables que se utilizaran en esta investigación.

Tabla 30

Variables de Estudio de la Investigación

Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Intervinientes	Componentes del concreto	Cemento, agua y otros	kg
Independientes	Aditivo Superplastificante	Cantidad de superplastificante	% de cemento
	Agregados naturales y reciclados	Cantidad de agregados naturales Cantidad de agregados reciclados de concreto	kg % de agregados naturales
Dependientes	Propiedad del concreto fresco	Esfuerzo de fluencia estática	Pa
	Propiedad del concreto endurecido	Resistencia a la compresión	Kg/cm ²

2.2 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

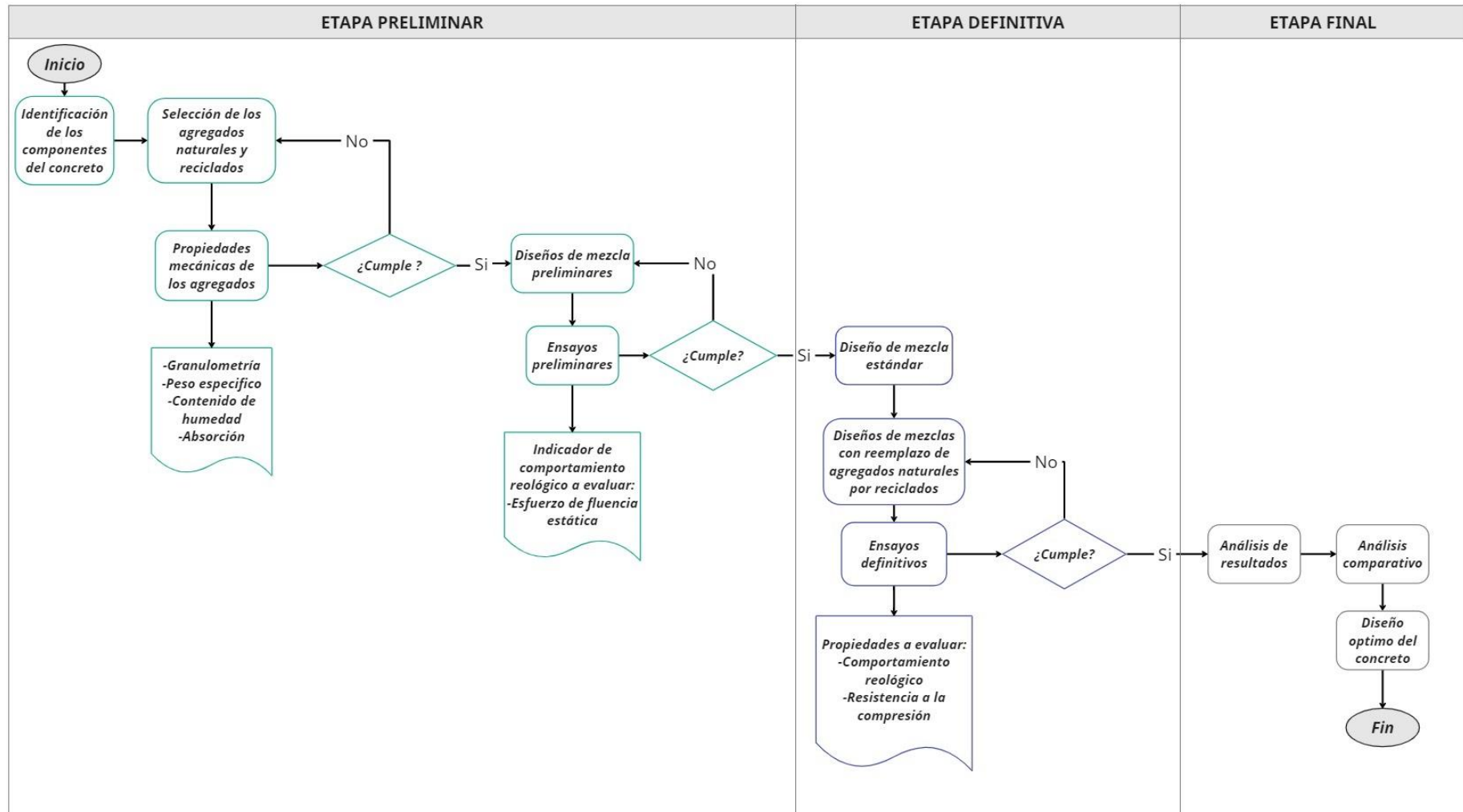
El procedimiento de la investigación se realizará en base a un nivel explicativo y diseño experimental definido anteriormente. Este procedimiento se dividió en 3 etapas las cuales son: etapa preliminar, etapa definitiva y etapa final.

- 1) **Etapa preliminar:** En esta primera etapa consiste en la identificación de los componentes de concreto y la condiciones para elaboración del concreto impreso en 3D. Asimismo, se determinará las propiedades mecánicas de los agregados naturales y reciclados. Seguidamente, se realizarán los diseños de mezcla preliminares con variaciones del superplastificante (variable independiente) en un 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5% y 2% del cemento, para evaluar su comportamiento reológico: esfuerzo de fluencia estática (variable dependiente) y así obtener el diseño estándar para usar en la etapa definitiva.
- 2) **Etapa definitiva:** Para esta segunda etapa se tomará al diseño de mezcla estándar determinando anteriormente, para establecer 6 diseños de mezclas con variación de la cantidad de agregados naturales en reemplazo de un 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de agregados reciclados (variables independientes), de esta manera determinar las propiedades en estado fresco: Esfuerzo de fluencia estática; y endurecido: Resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días (variables dependientes).
- 3) **Etapa final:** en esta última etapa, se recopilará los resultados de las propiedades en estado fresco y endurecido de los diseños evaluados y se realizará un análisis comparativo con el concreto del diseño estándar y otras investigaciones para determinar el diseño optimo que puede aplicarse en el sector de la impresión 3D de concreto.

En la figura 27 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento que se te tomara en la investigación clasificado en las 3 etapas.

Figura 27

Diagrama de Flujo de la Investigación



CAPÍTULO III: PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se realizará el programa experimental de la investigación, donde se detallará la identificación de los materiales del concreto y las condiciones de impresión 3D que se tendrán para realizar los ensayos del concreto. Asimismo, se describirá los procedimientos para realizar los ensayos y los resultados de las propiedades mecánicas del agregado natural y ACR. Así como las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, esto fue segmentado por cada objetivo específico.

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DEL CONCRETO

Los materiales que compondrán la mezcla de concreto en esta investigación fueron seleccionados, realizada la revisión de la literatura, para fabricar un concreto que cumpla con las condiciones de imprimibilidad y de durabilidad en todo el ciclo de vida de un concreto impreso en 3D. A continuación, se describirá las características de cada material usado en esta investigación.

3.1.1 Cemento

El cemento usado será el Portland tipo I de la marca cemento sol que cumple con los requisitos del INACAL (2023) para sus propiedades mecánicas y químicas.

3.1.2 Agregado natural

El agregado natural fue obtenido de la cantera Pampa Azul, y su selección fue en base a la granulometría que se usaron en las investigaciones sobre los agregados para concreto impreso en 3D, que en su mayoría fue el agregado fino. Por lo cual, se escogió una arena gruesa limpia y mal graduada. Este misma debe presentar un módulo de finura alto, es decir, entre 2.8 – 3.0 con el fin de aumentar la resistencia cortante a la fluencia y mantener su estabilidad. Asimismo, debe cumplir con los requisitos del INACAL (2021a)

3.1.3 Agregado de concreto reciclado (ACR)

El ACR se obtuvo de la demolición de una vivienda unifamiliar existente, ubicado en el distrito de Chorrillos, en la ciudad de Lima metropolitana. Estos agregados fueron obtenidos de los escombros de elementos de vigas y losas estructurales de la vivienda demolida. En la

figura 28 muestra la recolección de los escombros de concreto de la demolición de la vivienda.

Figura 28

Residuos de Concreto Usados en la Investigación



3.1.4 Aditivos y adiciones

Para mejorar y controlar la tixotropía de concreto impreso en 3D, de acuerdo con las investigaciones del marco teórico, es recomendable el uso de aditivos y adiciones. Para la selección de estos materiales, se tomó en cuenta las alternativas que se encuentran en el mercado y con un alcance para diversas zonas de Lima metropolitana. Por tanto, se escogieron los siguientes materiales:

- **CHEMAMENT 400:** Es un aditivo superplastificante de tipo A (reductor de agua) y tipo F (reductor de agua de alto rango) cumpliendo con la norma ASTM International (2024). El uso de este aditivo sirve para controlar el comportamiento reológico del concreto, aumentando la bombeabilidad y su fluidez. Asimismo, presenta características que mejoran la resistencia inicial, impermeabilización y colocación del concreto aumentando la edificabilidad para impresión 3D.
- **SikaFume:** Es un humo de sílice es una adición en polvo proveniente del dióxido de silicio reactivo. Esta adición tiene la capacidad de generar una mayor cohesividad y retención al de agua al concreto fresco, así como mejorar la bombeabilidad del concreto. Por otro lado, esta adición al interactuar con el cemento genera una matriz más densa aumentando el proceso de floculación, generando mayor resistencia inicial, uniformidad

y estabilidad al concreto fresco mejorando la edificabilidad de un concreto impreso en 3D. Asimismo, aumenta la durabilidad del concreto.

3.1.5 Agua

Respecto al uso del agua, este debe ser potable y contener el mínimo de sales, aceites y minerales que puedan dañar la reacción de hidratación y evitar una correcta floculación ya que son a través de estas, que se forman los puentes de silicato tricálcico entre las partículas del cemento.

En la tabla 31 se muestra un resumen de los materiales usados en esta investigación para el diseño de mezcla del concreto.

Tabla 31

Materiales Usados en la Mezcla del Concreto en la Investigación

Material	Tipo	Origen/marca	Referencia	
			ASTM	NTP
Cemento	Tipo I	Cemento SOL	C150	334.009
Agregados naturales	Arena gruesa	Cantera Pampa Azul	C33	400.037
Agregados reciclados de concreto	Residuos de demolición	Vigas y losas de una edificación unifamiliar	-	-
Aditivos y adiciones	Superplastificante (SP)	CHEMAMENT 400	C494	-
	Humo de silice (SF)	SikaFume	C1240	-
Agua	Agua potable	-	-	339.088

3.2 CONDICIONES DEL CONCRETO IMPRESO EN 3D PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Como ya fue descrito en capítulos anteriores, el concreto tiene que cumplir con las características de imprimibilidad que a su vez estos se dividen en bombeabilidad, extrusión y edificabilidad, para que se pueda imprimir correctamente una estructura. Por tanto, se tiene que definir las condiciones que se le darán según el proceso de impresión que se utilizara.

El concreto impreso en 3D tiene diferentes procesos de impresión, que dependen mayormente de la técnica de impresión, tipo de impresora y la uso que tendrá este. Es por ello, que para esta investigación se debe definir estos factores, de esta manera sectorizar el uso que se le puede dar a la propuesta. A continuación, se definir estos factores y las condiciones que presentan.

1. Técnica de impresión

La técnica de impresión ha sido usada en diversos proyectos de impresión 3D de concreto es el concrete Crafting. Por tanto, se decidió optar por las condiciones que esta presenta, descrito a continuación:

- Tiene una velocidad de impresión relativamente bajo.
- Tiene boquillas de impresión de un rango de 9 a 20 mm.
- Tiene espesores de capa de 5 a 25 mm.
- Ha logrado alturas de impresión de hasta 6 m.

2. Tipo de impresión

El tipo de impresora para que se quiere proponer la fabricación de este concreto es la de sistemas pórticos, pues la que se usa mayormente a escala industrial. Sin embargo, para determinar las condiciones de un tipo de impresora concretamente requiere un mayor análisis porque no se usará en esta investigación.

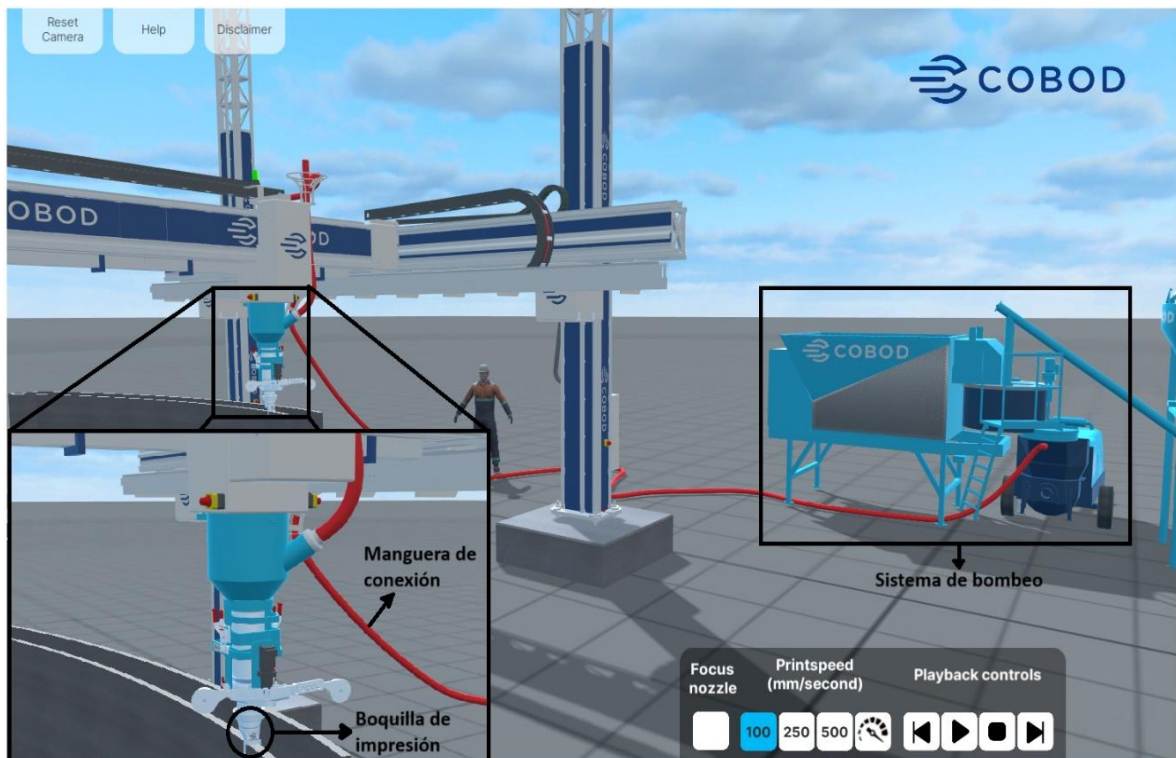
3. Uso del concreto impreso en 3D

El concreto impreso en 3D tiene diferentes tipos de uso, que desde la impresión in situ o prefabricado hasta una función estructural y no estructural. Para esta investigación, se quiere lograr un concreto con características estructurales que cumplan con los requisitos de viabilidad para la construcción de viviendas, que es lo que se está encontrando últimamente en el mercado.

En la figura 29 se presenta el sistema de impresión que se está usando para condicionar la elaboración de los ensayos del concreto, obtenido del simulador de impresión de la empresa COBOD.

Figura 29

Sistema de Impresión de Concreto de la Empresa COBOD



Nota. Simulación del sistema de impresión 3D para los ensayos de laboratorio del concreto. Elaborado a partir de “3D construction print configurator” por COBOD International, s.f. (<https://cobod.com/3d-construction-print-configurator/>).

3.3 OBJETIVO 1

El primer objetivo consiste en determinar las propiedades mecánicas (granulometría, peso unitario, contenido de humedad, peso específico y absorción) de los agregados naturales y los agregados de concreto reciclado (ACR).

3.3.1 Análisis granulométrico del agregado natural y ACR

Definición

Según las normas ASTM International (2019b) y el INACAL (2021b) este método de ensayo se utiliza para evaluar la gradación de materiales que se proponen o se emplean como agregados del concreto mediante el uso de mallas. Los resultados obtenidos permiten verificar que la distribución del tamaño de las partículas cumple con los requisitos específicos establecidos en la normativa aplicable. Además, estos datos son esenciales para el control de la producción de diversos productos de agregados y las mezclas que los contienen. Este análisis se ve reflejado en una curva granulométrica que debe cumplir con los usos que exige la norma ASTM International (2003) según el tipo de agregado.

El cálculo que resume este análisis a un valor cuantitativo es el módulo de fineza (MF) que se realiza mediante la suma de los porcentajes acumulados retenidos de los tamices de la serie Taylor (3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100), todo esto dividido entre 100. Este valor empírico adimensional refleja el tamaño relativo de las partículas del agregado. Un módulo de fineza elevado indica que las partículas de los agregados son más grandes, mientras que un módulo de fineza más bajo sugiere que las partículas son más pequeñas. El módulo de fineza para un agregado fino se determina con la ecuación 2.

$$MF = \sum \frac{\%Ret.Acumulado (3/8", N^{\circ} 4, N^{\circ} 8, N^{\circ} 16, N^{\circ} 30, N^{\circ} 50, N^{\circ} 100)}{100} \quad (2)$$

Equipos

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Horno con capacidad de mantener una temperatura constante de 110 °C ± 5 °C.
- Juego de tamices que cumpla con la norma NTP 350.001.
- Aparato cuarteador para dividir la muestra en partes representativas y similares.

- Bandejas y cucharones.

Muestra de agregados naturales

Las muestras para el ensayo se obtendrán a través de cuarteo, ya sea manual o mecánico. Estas muestras deben estar completamente secas y representar una fracción completa del proceso de cuarteo. la muestra de agregado fino para este ensayo debe tener un peso mínimo de 300 g después de ser secadas.

Muestra de agregados reciclados de concreto

Como se mencionó anteriormente, los agregados reciclados se obtuvieron de los residuos de vigas y losas de la demolición de una edificación. Para la obtención de los agregados se realizó la trituración de estos residuos hasta lograr los tamaños de partículas promedios que tiene los agregados para su uso en el concreto. Lo que se busca con esto es comparar los resultados de los agregados reciclados de concreto con los agregados naturales (basado en la normativa existente).

Procedimiento

- El procedimiento inicia con el secado de la muestra en un horno, a una temperatura precisa de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Luego, se pesa la cantidad exacta de agregado fino a utilizar.
- A continuación, se organiza el conjunto de tamices siguiendo la normativa ASTM International (2019b), desde el tamiz de 3/8" hasta el N°100 y el fondo.
- El material se coloca en la malla superior según el orden de los tamices y se agita de manera constante en diferentes direcciones: hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, arriba, abajo y en círculos.
- La agitación continúa hasta que, al final del proceso, menos del 1% del material pasa a través del tamiz durante un minuto. En ese momento, se pesa y verifica el material retenido en cada tamiz.
- Se efectúan los cálculos necesarios para determinar el porcentaje de material retenido, el porcentaje acumulado y el porcentaje que pasa por cada tamiz.

- Se comprueba que el peso total del material coincida con la suma de los materiales retenidos en los tamices, garantizando que no se ha perdido agregado; en caso de discrepancia, se ajustan los cálculos.
- Finalmente, se elabora la curva granulométrica, se calcula el módulo de fineza y se determinan tanto el tamaño máximo como el tamaño máximo nominal del agregado.

Este proceso se realizó para los agregados naturales y los reciclados y se muestran en las figuras 30 y 31.

Figura 30

Análisis Granulométrico del Agregado Natural Fino



Figura 31

Análisis Granulométrico del Agregado de Concreto Reciclado



Resultados

Agregado natural fino

De acuerdo con la norma ASTM International (2019b) y el INACAL (2021b), la muestra que se tomó para el agregado natural fino fue de 1 kg. A continuación, se muestran los resultados en la tabla 32 del análisis granulométrico del agregado fino natural. Además, en la figura 32 se muestra el gráfico de la curva granulométrica.

Tabla 32

Análisis Granulométrico del Agregado Natural Fino

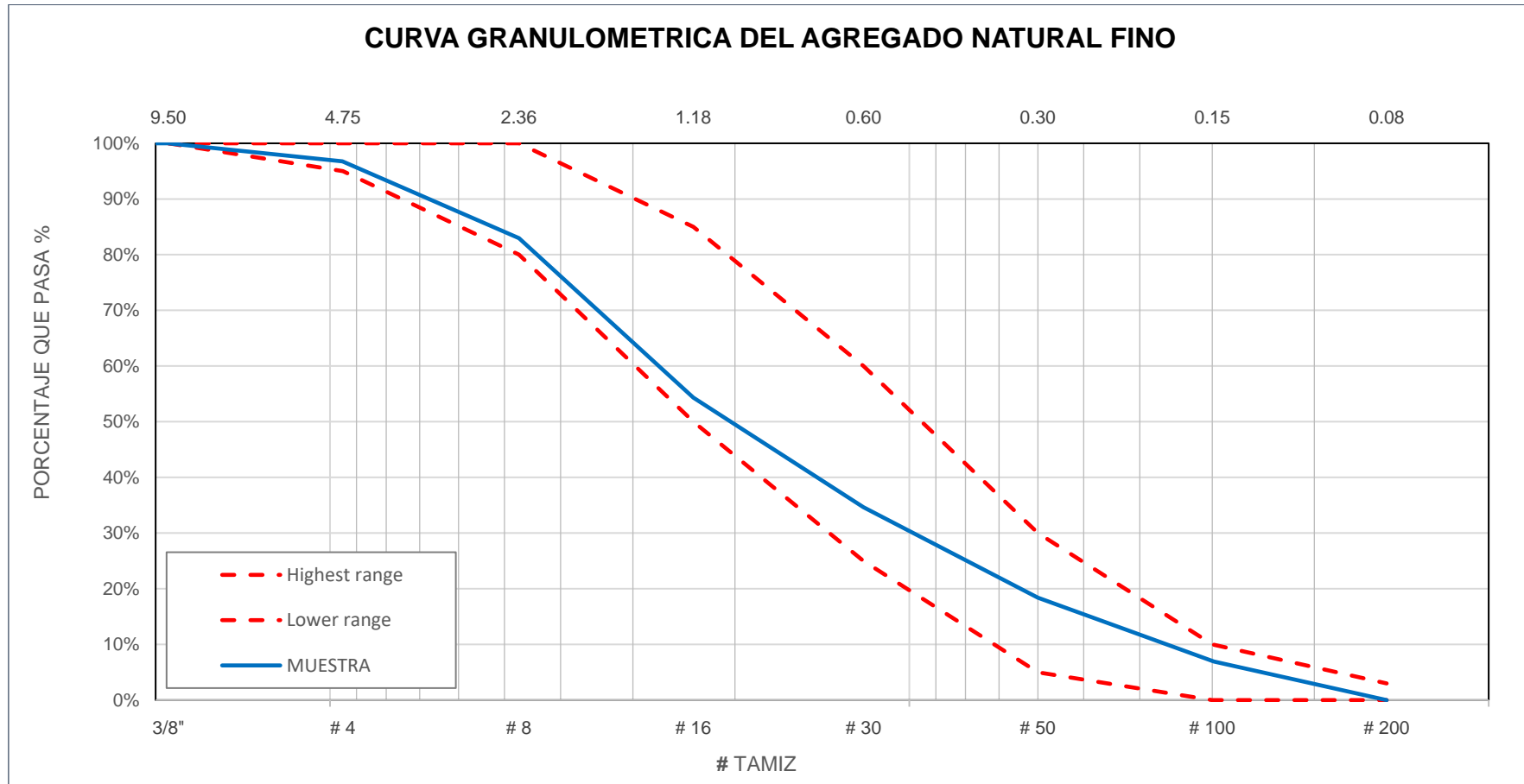
Malla (US estándar)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.800	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	100.00
# 4	4.760	32.00	3.23	3.23	96.77
# 8	2.360	137.00	13.82	17.04	82.96
# 16	1.180	284.00	28.64	45.68	54.32
# 30	0.600	195.00	19.67	65.35	34.65
# 50	0.300	161.30	16.27	81.62	18.38
# 100	0.149	113.60	11.46	93.07	6.93
Fondo	0.075	68.70	6.93	100.00	0.00
Total		991.60	100.00%		

Nota. Este análisis granulométrico fue realizado siguiendo la norma ASTM International (2019b) y representa la distribución del agregado natural fino

Del análisis granulométrico del agregado natural fino se calculó el módulo de fineza con la ecuación 2 determinando un valor de 3.06.

Figura 32

Curva de Distribución Granulométrica del Agregado Natural Fino



De la figura 32 se observa que se cumple con los límites granulométricos para un agregado fino de la normativa ASTM International (2019b)

Agregado de concreto reciclado (ACR)

En la tabla 33, se muestran los resultados del análisis granulométrico del agregado de concreto reciclado. Asimismo, en la figura 33 se muestra el gráfico de la curva granulométrica de este agregado.

Tabla 33

Análisis Granulométrico del Agregado de Concreto Reciclado

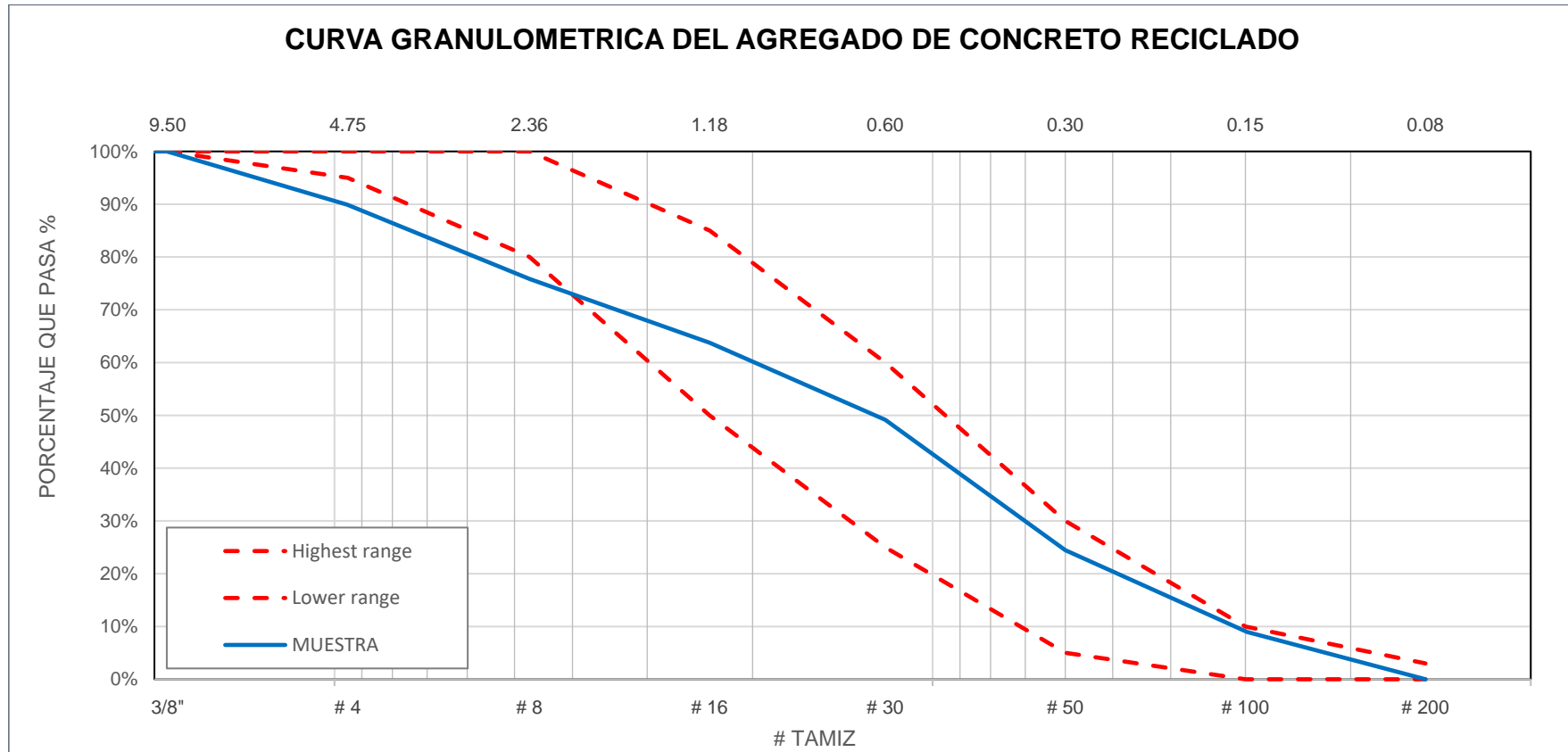
Malla (US estándar)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.800	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	100.00
# 4	4.760	56.00	10.10	10.10	89.90
# 8	2.360	78.00	14.06	24.16	75.84
# 16	1.180	67.00	12.08	36.24	63.76
# 30	0.600	81.00	14.60	50.84	49.16
# 50	0.300	137.00	24.70	75.54	24.46
# 100	0.149	86.00	15.50	91.04	8.96
Fondo	0.075	49.70	8.96	100.00	0.00
Total		991.60	100.00%		

Nota. Este análisis granulométrico fue realizado siguiendo la norma ASTM International (2019b) y representa la distribución del agregado de concreto reciclado

Del análisis granulométrico del ACR se calculó el módulo de fineza con la ecuación 2 determinando un valor de 2.88.

Figura 33

Curva de Distribución Granulométrica del Agregado de Concreto Reciclado



De la figura 33 se observa que se cumple con los límites granulométricos a partir de la malla N°8 para un agregado fino según normativa ASTM International (2019b)

3.3.2 Determinación del peso unitario del agregado natural y ACR

Definición

Según las normas ASTM International (2016) y el INACAL (2020b) este método de ensayo permite medir la densidad aparente de un agregado estando compactado y suelto. Este procedimiento es aplicable a agregados cuyo tamaño máximo nominal no supera las 5 pulgadas (125 mm).

Equipos

- Balanza con sensibilidad al 0.1% del peso de la muestra.
- Barra de acero redondeada, lisa de 16 mm de diámetro y 600 mm de largo.
- Recipiente cilíndrico de metal con capacidad de 1/10 pies cúbicos.
- Pala, badilejo y regla.

Muestras de ensayo

La muestra de ensayo debe tener un tamaño aproximado que oscile entre el 125% y el 200% de la cantidad requerida para ocupar todo el recipiente, y se debe manipular de manera que se evite cualquier segregación.

Procedimiento para el peso unitario suelto

- Primero, realiza la medición del recipiente, registrando las dimensiones del diámetro interno y la altura.
- A continuación, pesa el recipiente vacío y anota el valor obtenido.
- Luego, introduce el material en el recipiente, asegurándote de que no caiga desde una altura superior a los 50 mm sobre su borde superior.
- Completa el llenado del recipiente con cuidado, evitando que se segreguen las partículas del agregado. Si sobresale material, retíralo cuidadosamente con una regla.
- Pesa el recipiente lleno con el material, obteniendo el peso neto, y registra este dato.
- Finalmente, calcula el peso unitario suelto multiplicando el peso neto por el factor de calibración del recipiente, que debe haber sido previamente determinado.

Procedimiento para el peso unitario compactado

- Se coloca el agregado en el recipiente en tres capas de aproximadamente el mismo grosor, sin que el material sobrepase los 50 mm desde la parte superior del molde.
- Después de cada capa, compacta el material de manera uniforme usando una barra lisa y aplicando 25 golpes distribuidos por toda la capa. Elimina el exceso de material con una regla.
- Pesa nuevamente el recipiente con el material y registra el peso neto.
- Finalmente, calcula el peso unitario compactado multiplicando el peso neto por el factor de calibración del recipiente, que debe haberse determinado previamente.

El proceso de este ensayo para los agregados naturales y reciclados se muestra en las figuras 34 y 35.

Figura 34

Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado Natural



Figura 35

Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado de Concreto Reciclado



Resultados

Agregado natural fino

Los resultados del ensayo del peso unitario suelto y compactado del agregado natural fino se muestran en las tablas 34 y 35.

Tabla 34

Peso Unitario Suelto del Agregado Natural Fino

N° de Ensayo	Peso muestra + Molde (kg)	Peso del Molde (kg)	Peso de la Muestra Suelta (kg)	Volumen del Molde (m ³)	Peso Unitario Suelto Seco (kg/m ³)
1	6.302	1.972	4.331	0.002958	1464
2	6.306	1.972	4.334	0.002958	1465
3	6.305	1.972	4.333	0.002958	1465
Promedio					1465

De la tabla se obtuvo un peso unitario suelto de 1465 kg/m³ para el agregado natural fino.

Tabla 35

Peso Unitario Compactado del Agregado Natural Fino

N° de Ensayo	Peso muestra + Molde (kg)	Peso del Molde (kg)	Peso de la Muestra Compactada (kg)	Volumen del Molde (m ³)	Peso Unitario Compactado Seco (kg/m ³)
1	6.971	1.972	4.999	0.002958	1690
2	6.985	1.972	5.013	0.002958	1695
3	7.002	1.972	5.03	0.002958	1700
Promedio					1695

De la tabla se obtuvo un peso unitario compactado de 1695 kg/m³ para el agregado natural fino.

Agregado de concreto reciclado

Los resultados del ensayo del peso unitario suelto y compactado del agregado de concreto reciclado se muestran en las tablas 36 y 37.

Tabla 36

Peso Unitario Suelto del Agregado de Concreto Reciclado

N° de Ensayo	Peso muestra + Molde (kg)	Peso del Molde (kg)	Peso de la Muestra Suelta (kg)	Volumen del Molde (m ³)	Peso Unitario Suelto Seco (kg/m ³)
1	6.935	1.972	4.963	0.002958	1678
2	6.934	1.972	4.962	0.002958	1677
3	6.93	1.972	4.958	0.002958	1676
Promedio					1677

De la tabla se obtuvo un peso unitario suelto de 1677 kg/m³ para el agregado de concreto reciclado.

Tabla 37

Peso Unitario Compactado del Agregado de Concreto Reciclado

N° de Ensayo	Peso muestra + Molde (kg)	Peso del Molde (kg)	Peso de la Muestra Compactada (kg)	Volumen del Molde (m ³)	Peso Unitario Compactado Seco (kg/m ³)
1	7.395	1.972	5.423	0.002958	1833
2	7.398	1.972	5.426	0.002958	1834
3	7.397	1.972	5.425	0.002958	1834
Promedio					1834

De la tabla se obtuvo un peso unitario compactado de 1834 kg/m³ para el agregado de concreto reciclado.

3.3.3 Contenido de humedad del agregado natural y ACR

Definición

Esta prueba según la norma ASTM International (2019c) se usa para determinar el porcentaje de humedad evaporable que experimenta el agregado, el método la cual se emplea es por secado, tanto de la humedad contenida en la superficie de los agregados y en los poros.

Formas Física de los Agregados

Estado de saturación

El contenido de agua en los agregados puede clasificarse en cuatro estados diferentes, los cuales son esenciales para evaluar sus propiedades en la mezcla de concreto:

1. **Seco en laboratorio:** Se refiere al estado en el que la muestra ha sido secada en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante, determinado por dos pesadas sucesivas separadas por una hora de secado, sin que la diferencia en peso entre ellas sea mayor al 0,1 %.
2. **Seco al aire:** En este estado, los poros accesibles del agregado contienen agua, pero no están completamente saturados.
3. **Saturado superficialmente seco:** En este caso, los poros accesibles del agregado están completamente llenos de agua, pero no tienen humedad superficial.
4. **Húmedo:** Los poros accesibles del agregado están completamente llenos de agua y también contienen humedad superficial.

Equipos

- Una balanza con una sensibilidad mínima de 0.1 g para el agregado fino y de 1 g para el agregado reciclado.
- Un horno que pueda mantener una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Bandejas y badilejos para manipular las muestras durante el proceso.

Muestra de ensayo

La muestra para el ensayo debe mezclarse de manera uniforme en su estado natural, conforme a las normativas ASTM International (2019c) y el INACAL (2021c). Según estas normas, el peso recomendado de la muestra debe aproximarse al 0.1% del tamaño máximo nominal (TMN) de los agregados. Esto garantiza que la muestra sea representativa del material a analizar.

Procedimiento

- Se comienza, pesando en una bandeja y se coloca 500 g de agregado fino.
- La muestra de agregado fino se seca en un horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que dos pesadas sucesivas y separadas por una hora de secado en la estufa lo cual no difieren en más de 0,1%.

Este proceso se realizó para cada tipo de agregado y se muestran en la figura 36.

Figura 36

Secado del Agregado Natural Fino en El Horno a 100 °c



- Finalmente, se pesa la muestra seca del agregado.

El contenido de humedad se determinará con la ecuación 3 que se muestra a continuación.

$$h = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

h = Humedad del agregado en %.

Ph = Peso húmedo del agregado en g.

Ps = Peso seco del agregado en g.

Resultados

Agregado natural fino

En la tabla 38 se detallan los pesos obtenidos de la muestra tanto en su condición húmeda como seca, así como el cálculo del porcentaje de humedad del agregado fino natural mediante la ecuación 3 conforme la normativa ASTM International (2019c).

Tabla 38

Contenido de Humedad de Agregado Natural Fino

N° de Ensayo	Peso muestra húmeda + Masa recipiente (g)	Peso muestra seca (horno) + Masa recipiente (g)	Masa de agua (g)	Masa recipiente (g)	Peso muestra seca (horno) (g)	Contenido de humedad (%)
1	553.3	544.9	8.4	20.3	524.6	1.6
2	556.8	548.1	8.7	20.1	528	1.65
3	553.9	545.7	8.2	20.1	525.6	1.56
4	554.7	546.1	8.6	20.2	525.9	1.64
Promedio						1.6

De la tabla 38 se obtuvo un contenido de humedad promedio del 1.6 % para el agregado natural fino.

Agregado de concreto reciclado

En la tabla 39, se muestra los pesos de la muestra seca y húmeda del agregado de concreto reciclado, y el cálculo del porcentaje de humedad mediante la ecuación 3.

Tabla 39*Contenido de Humedad de Agregado de Concreto Reciclado*

N° de Ensayo	Peso muestra húmeda + Masa recipiente (g)	Peso muestra seca (horno) + Masa recipiente (g)	Masa de agua (g)	Masa recipiente (g)	Peso muestra seca (horno) (g)	Contenido de humedad (%)
1	543.3	540.02	3.28	20.3	519.72	0.63
2	546.1	542.02	4.08	20.2	521.82	0.78
3	542.9	539.3	3.6	20.1	519.2	0.69
4	544.7	540.02	4.68	20.2	519.82	0.9
Promedio						0.75

De la tabla se obtuvo un contenido de humedad promedio del 0.75 % para el agregado de concreto reciclado.

3.3.4 Peso específico y absorción del agregado natural y ACR

Definición

De acuerdo con la norma ASTM International (2022) y el INACAL (2013), este método de prueba se utiliza para determinar tanto la densidad relativa (o peso específico) como el porcentaje de absorción de los agregados. La densidad relativa se calcula mediante la relación entre el peso del agregado y su volumen, sin considerar los espacios vacíos. Es importante tener en cuenta la humedad y el estado de secado del agregado durante el proceso de medición, ya que estos factores influyen en los resultados obtenidos.

- Balanza con una sensibilidad de 0.1 g.
- Tamices N°6 que cumplan con el INACAL (2017).
- Horno con capacidad para mantener una temperatura constante de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- Termómetro con precisión de 0.5 °C.

- Molde cónico con las siguientes medidas: 40 mm de diámetro en la parte superior, 90 mm de diámetro en la parte inferior y 75 mm de altura.
- Recipiente adecuado para sumergir la cesta de alambre en agua, con un dispositivo para suspenderla en el centro.
- Bandejas y cucharones para manejo del material.

Muestra de ensayo

La muestra de ensayo debe tener una cantidad de peso aproximado de 1000 g de agregado, según la norma ASTM International (2022) es recomendado que el agregado esté libre de impurezas u otras sustancias inherentes las cuales tienes que se quitados previo a los ensayos.

- Comienza pesando aproximadamente 1000 g de material fino, obtenido a través del proceso de cuarteo del agregado.
- La muestra se coloca en un horno a una temperatura constante entre 100 °C y 105 °C durante una hora para asegurar que se seque adecuadamente.
- Tras el secado, la muestra se sumerge en un recipiente con agua durante 24 horas para garantizar que el agregado esté completamente saturado. Posteriormente, se deja secar a temperatura ambiente, removiéndolo constantemente sobre una superficie plana para asegurar un secado uniforme.
- Se coloca la muestra en un molde cónico, golpeando la superficie 25 veces con una barra de acero. Al levantar el molde, se verifica si el agregado mantiene la forma del cono (lo que indica humedad libre) o si se desmorona (lo que indica que se ha alcanzado la condición de superficie seca).
- A continuación, se pesa una fiola vacía y se llena con agua. Se mide el peso de la fiola con agua para conocer su capacidad exacta.
- Se pesan 500 g de agregado y se colocan en la fiola, llenándola con agua hasta la marca de 50 cm³. Para eliminar las burbujas de aire, se hace rodar la fiola sobre una superficie plana.
- Después de una hora, se llena la fiola hasta los 500 cm³ de agua y se pesa de nuevo el recipiente, ahora con el agregado superficialmente seco, para obtener el peso total.

Resultados

Agregado natural fino

Los resultados del peso específico y absorción del agregado natural fino se muestran en la tabla 40.

Tabla 40

Peso Específico y Absorción del Agregado Natural Fino

N° de Ensayo	Peso de la cápsula (g)	Peso cápsula + Peso Muestra (g)	Peso Muestra (g)	Peso Fiola + Agua (g)	Peso Fiola + Muestra + Agua (g)	Peso Bandeja (g)	Peso Muestra Seca + Bandeja (g)	Volumen Muestra + Vacíos (cm ³)	Peso Muestra Seca (g)	Volumen Muestra (cm ³)	Peso Específico (g/cm ³)	Absorción (%)
1	115.5	618.2	502.7	681.4	992.6	119	608.2	191.5	489.2	178	2.75	2.76
2	115.5	617.3	501.8	681.1	992.5	119	608.7	190.4	489.7	178.3	2.75	2.48
3	115.5	616.7	501.2	681.3	992.1	119	608.5	190.4	489.5	178.7	2.74	2.4
4	115.5	616.5	501	681.5	992.7	119	608.1	189.8	489.1	177.9	2.75	2.44
Promedio											2.75	2.52

De la tabla 40 se obtuvo un peso específico promedio de 2.75 g/cm³ y una absorción de 2.52 % para el agregado natural fino.

Agregado de concreto reciclado

Los resultados del peso específico y absorción del agregado reciclado se muestran en la tabla 41.

Tabla 41

Peso Específico y Absorción del Agregado de Concreto Reciclado

N° de Ensayo	Peso de la cápsula (g)	Peso cápsula + Peso Muestra (g)	Peso Muestra (g)	Peso Fiola + Agua (g)	Peso Fiola + Muestra + Agua (g)	Peso Bandeja (g)	Peso Muestra Seca + Bandeja (g)	Volumen Muestra + Vacíos (cm ³)	Peso Muestra Seca (g)	Volumen Muestra (cm ³)	Peso Específico (g/cm ³)	Absorción (%)
1	115.5	649.4	533.9	682.1	991.6	119	612.9	224.4	493.9	184.4	2.68	8.1
2	114.5	650.4	535.9	682.1	991.6	119	612.7	226.4	493.7	184.2	2.69	8.55
3	114.7	649.4	534.7	682.1	991.6	119	612.8	225.2	493.8	184.3	2.68	8.29
4	115.2	652.4	537.2	682.1	991.6	119	612.6	227.7	493.6	184.1	2.69	8.84
Promedio											2.69	8.45

De la tabla 41 se obtuvo un peso específico promedio de 2.69 g/cm³ y una absorción de 8.45 % para el agregado reciclado.

3.4 OBJETIVO 2

El segundo objetivo consiste en elaborar mezclas preliminares para determinar la mezcla estándar del concreto para impresión 3D.

3.4.1 Mezclas preliminares del concreto

3.4.1.1 Diseño de mezcla

Determinada las propiedades mecánicas de los agregados naturales y reciclados y estando identificado los materiales para la elaboración del concreto estándar para impresión 3D los cuales son: Cemento Portland tipo I, agregados naturales (arena gruesa), aditivo superplastificante, humo de sílice y agua potable.

Para elaborar el diseño de mezcla se consideró distintas investigaciones donde determinaron un diseño de mezcla óptimo de concreto para aplicarlo en la impresión 3D. de estas investigaciones se pudo hacer realizar una recopilación y determinar un rango de proporción de cada componente del concreto, el cual se establece en la tabla 42.

Tabla 42

Consideraciones para la Elaboración del Diseño de Mezcla

Materiales	Proporción (%)
Cemento	26 - 46
Agregados	40 - 66
Agua	6 - 16
Humo de sílice	3 - 5
Cenizas volantes	5 - 9

Nota. Rangos proporcionales de los materiales para el diseño de mezcla de un concreto imprimible en 3D. Elaborado a partir de “Mix design concepts for 3D printable concrete: A review” por Zhang et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>).

En los agregados, como se mencionó anteriormente, se está usando un agregado fino en el cual se clasificó en 2 tipos: arena gruesa y fina. la arena gruesa se considerará al agregado retenido en la malla °N 4, mientras que la arena fina será todo el agregado que pase esa malla. Asimismo, se considerará una relación de arena gruesa/arena fina de 0.43.

Para determinar el diseño de mezcla estándar del concreto para impresión 3D se usarán variaciones de proporción del aditivo superplastificante (variable dependiente) para evaluar al comportamiento reológico (variable dependiente) analizando sus indicadores de esfuerzo de fluencia estática y viscosidad. En la tabla 43 se detalla los niveles de variación del aditivo superplastificante en tasa de porcentaje del cemento.

Tabla 43

Niveles de Variación del Aditivo Superplastificante de los Diseños Preliminares del Concreto

Material	Nomenclatura	% del cemento
		0.50
		0.75
Aditivo Superplastificante (SP)	A	1.00
		1.50
		2.00

Definido las variables de análisis para determinar el diseño de mezcla del concreto estándar, se procede a realizar los cálculos (anexo 1) de las dosificaciones de los materiales en seco para 1 m³ de concreto, en base a las consideraciones definidas anteriormente. En la tabla 44 se puede ver las dosificaciones de los diseños preliminares del concreto estándar.

Tabla 44*Dosificación de los Diseños Preliminares para 1 m³ de Concreto*

Diseño	Cemento (Kg)	Arena gruesa (Kg)	Arena fina (Kg)	Agua (Kg)	SP (Kg)	SF (Kg)
A1	728.50	352.50	869.50	305.50	3.64	70.50
A2	728.50	352.50	869.50	305.50	5.46	70.50
A3	728.50	352.50	869.50	305.50	7.29	70.50
A4	728.50	352.50	869.50	305.50	10.93	70.50
A5	728.50	352.50	869.50	305.50	14.57	70.50

3.4.1.2 Ensayo del reómetro rotacional

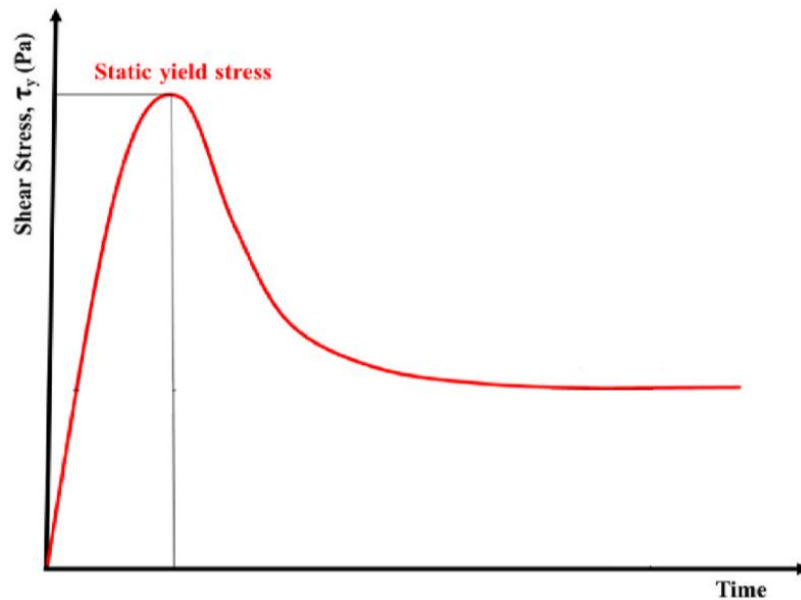
Como se definió anteriormente, se analizará el comportamiento reológico de los diseños preliminares para determinar el diseño estándar para un concreto impreso en 3D. Por tanto, se usará el ensayo del reómetro rotacional para evaluar este comportamiento mediante el indicador esfuerzo de fluencia estática. Como fue descrito en el marco teórico, el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos como el concreto es recomendable evaluarlo mediante el modelo de Bingham el cual se representa mediante la ecuación 1, especificado en el ítem 1.6.3.1.

El reómetro rotacional mide la viscosidad de una mezcla de concreto aplicando un esfuerzo cortante controlado, lo que permite determinar cómo responde el material a diferentes tasas de deformación. En este tipo de ensayo, se somete a la mezcla a un corte creciente, y se registra cómo varía su viscosidad en función del esfuerzo aplicado. Esto proporciona una curva de flujo, que es fundamental para caracterizar la reología del concreto. Esta curva muestra la relación entre el esfuerzo cortante (que resiste el concreto durante un periodo de tiempo) y la tasa de deformación resultante, lo que permite identificar puntos clave como el esfuerzo de fluencia estática. El esfuerzo de fluencia estática se determina obteniendo el

mayor esfuerzo cortante durante ese periodo de tiempo. En la figura 37 se puede ver la curva de corte de un concreto tixotrópico y cuál es su esfuerzo de fluencia estática.

Figura 37

Esfuerzo de Fluencia Estática del Concreto Tixotrópico



Nota. Comportamiento reológico de un concreto tixotrópico a una velocidad de corte constante y su límite elástico. Adaptado de “Mix design concepts for 3D printable concrete: A review” por C. Zhang et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>).

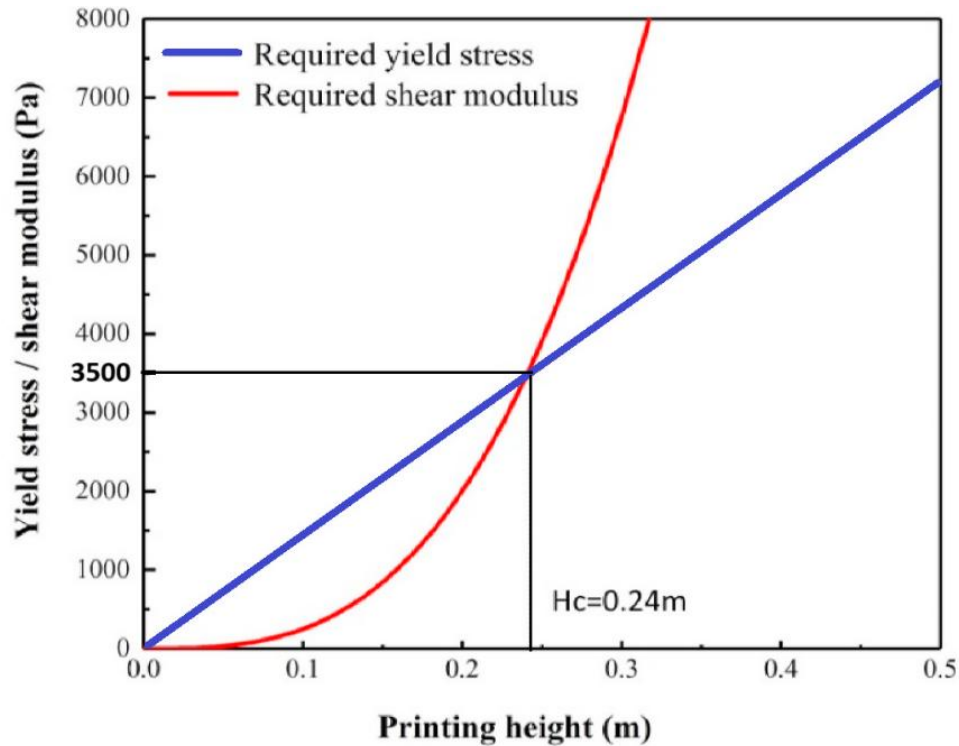
Las especificaciones que se usaran para determinar que un concreto impreso en 3D cumpla con las características de imprimibilidad (bombeabilidad, extrusión y edificabilidad), usando como parámetro el esfuerzo de fluencia estática, son necesarios para definir que el concreto sea impreso exitosamente. Uno de estos requisitos, se determinó de la investigación de gran relevancia de Rahul et al. (2019) estableciendo un rango entre 1500 Pa – 2500 Pa para que el concreto puede bombearse y extruirse durante el periodo inicial de impresión.

También, Wu et al. (2021) determinaron los esfuerzos de fluencia estática para cada la altura de impresión garantizando que la edificabilidad del concreto impreso en 3D sea exitosa. Asimismo, se determinó un esfuerzo de fluencia de 3500 Pa para lograr una altura crítica

(Hc), esto dentro periodos de tiempo entre 10 - 20 minutos despues de mezclar. En la figura 38 se muestra los esfuerzos de fluencia estática requerido para cada altura de impresión y el esfuerzo para la lograr la altura critica de impresión.

Figura 38

Esfuerzos de Fluencia Estática Requerido Según la Altura de Impresión del Concreto



Nota. Esfuerzo de fluencia estática y módulo de corte requeridos en función de la altura de impresión. Adaptado de “Study on the rheology and buildability of 3D printed concrete with recycled coarse aggregates” por Wu et al., 2021. (<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103030>).

Elaboración de la muestra

La muestra de ensayo será de 500 ml de concreto, por lo cual se realizó la mezcla de 5 kg de concreto por ensayo. De esta manera, se podrá un correcto proceso de mezclado simulando el sistema de mezclado de una impresora 3D de concreto. En la tabla 45 se puede apreciar el procedimiento de mezclado que se realizó a muestra de concreto.

Tabla 45

Procedimiento de Mezclado de la Muestra de Concreto para el Ensayo Reológico

Tiempo (min)	Procedimiento de mezcla del concreto
00:00	Comenzamos, mezclando los materiales secos (cemento, humo de sílice y agregados) a una velocidad baja de 130 ± 10 rpm.
01:30	Vaciamos el agua en el tazón de mezcla y seguimos mezclando a la misma velocidad.
02:30	Dejamos de mezclar para añadir el aditivo superplastificante.
02:45	Seguimos mezclando a la misma velocidad.
04:30	Subimos la velocidad de mezcla a 260 ± 10 rpm.
05:30	Finalmente, terminamos de mezclar y vaciamos al recipiente de ensayo reológico.

Antes de comenzar el ensayo se pesó la muestra para determinar 1 kg de concreto como se muestra en la figura 39.

Figura 39

Muestra de Concreto para el Ensayo Reológico



Equipos

- Se uso el reómetro rotacional de marca AMETEK Brookfield modelo RSX-SST
- Husillo de paleta del reómetro
- Laptop con el software Rheo3000
- Recipiente de ensayo de 100 mm de diámetro y de capacidad 600 ml.
- Cucharon o badilejo.

En la figura 40 se puede observar el reómetro rotacional usado en esta investigación.

Figura 40

Reómetro Rotacional AMETEK Brookfield Modelo RSX-SST



Parámetros iniciales de control

- Se uso una velocidad de corte angular constante de 5 rpm. Este parámetro fue considerado de acuerdo con la capacidad de bombeo que se puede dar en un sistema de impresión 3D de concreto
- Se uso el husillo de paleta VT 10-5 que es una paleta de 4 palas que tiene un diámetro y altura de 12,67 mm y 25,35 mm respectivamente. Este parámetro se consideró

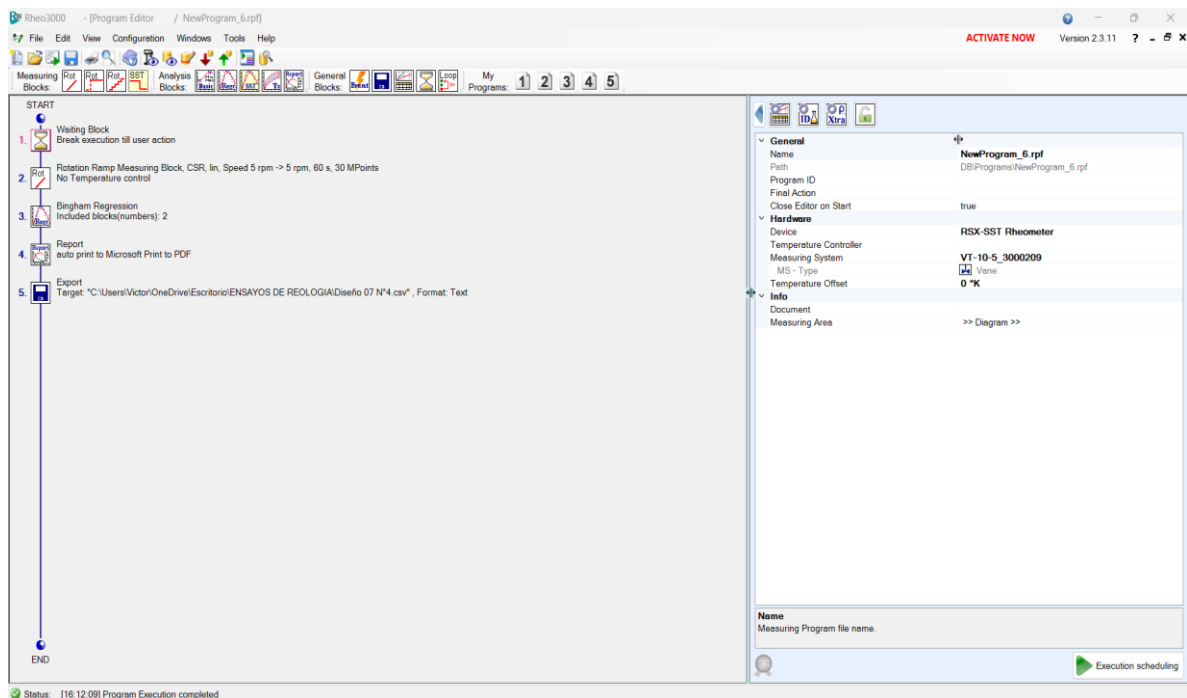
simulando diámetro de boquilla de la técnica de impresión propuesta que es de 9 a 20 mm, debido a que el giro del husillo de paleta, que genera un cizallamiento, simulara a la tensión de salida que se presenta en la boquilla de impresión.

- Se programo un tiempo recolección de datos de 60 s con una temperatura ambiental de 22.5 C°.
- Se opto por medir 4 muestras del mismo ensayo (para un diseño de mezcla) durante los tiempos: 0, 10, 20 y 30 minutos. Esto para ver la variación de los resultados conforme pase el tiempo y considerando el periodo de impresión 3D que usa para producir concreto.

En la figura 41 se muestra la configuración de los parámetros iniciales de control en el software Rheo3000.

Figura 41

Configuración de Parámetros Iniciales de Control del Reómetro en el Software Rheo3000



Procedimiento

- Se comenzó, seleccionando la primera muestra que será ensayada (se realizara lo mismo para las muestras que ensayaran en los tiempos 10, 20 y 30 minutos).
- Estando la muestra en el recipiente de ensayo, introducimos el recipiente en el centro de la plataforma horizontal del reómetro.
- Ajustamos los tornillos laterales para centrar el recipiente en el centro de la plataforma.
- Realizamos la conexión del reómetro con la laptop que tiene el software Rheo3000 y designamos los parámetros iniciales de control.
- Bajamos el reómetro, mediante el software Rheo3000, conectado con el husillo de paleta hasta que la paleta ingrese completamente en la muestra de ensayo.
- Realizamos la ejecución del software y se procede a realizar el ensayo reológico.
- Se recolecta los resultados obtenidos generando gráficos de esfuerzo cortante (Pa) vs tiempo (s) y viscosidad (Pa*s) vs tiempo (s).

En las figuras 42 y 43 muestra la interconexión del reómetro con software Rheo3000 y el ensayo de reómetro rotacional respectivamente.

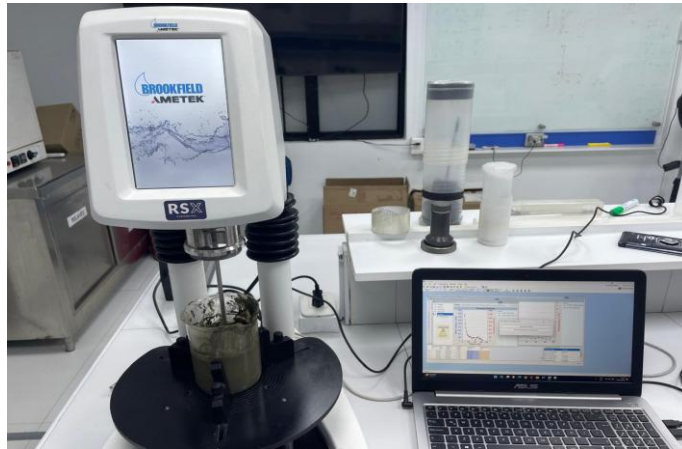
Figura 42

Interconexión del Reómetro con el Software Rheo3000



Figura 43

Ensayo de Reómetro Rotacional de las Muestras de Mezclas Preliminares

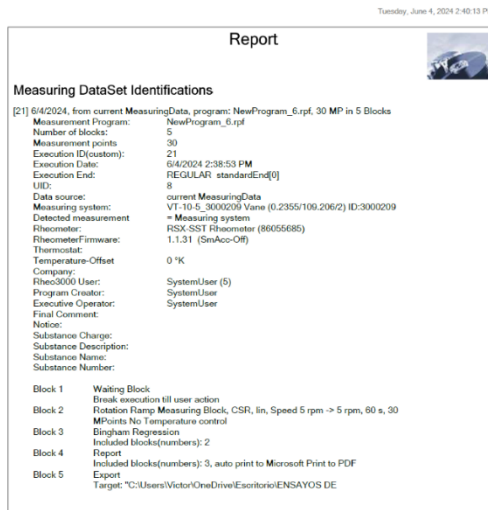


3.4.2 Comportamiento reológico de los diseños preliminares del concreto

Realizado los ensayos de reómetro rotacional para 4 muestras a 0, 10, 20 y 30 minutos después de elaborada las mezclas de cada diseño de mezcla preliminar. Los resultados se obtuvieron con el uso de la ecuación 1 que fue realizado por software Rheo3000 mediante el reómetro rotacional, durante los 60 s de periodo de tiempo que se realiza el ensayo (anexo 3). En la figura 44 se muestra el reporte de resultados que nos ofreció el software Rheo3000.

Figura 44

Reporte de Resultados del Software Rheo3000



Los resultados de la curva esfuerzo cortante (Pa) vs tiempo (s) de los diseños preliminares se muestran en las figuras 45, 46, 47, 48 y 49.

Figura 45

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño A1

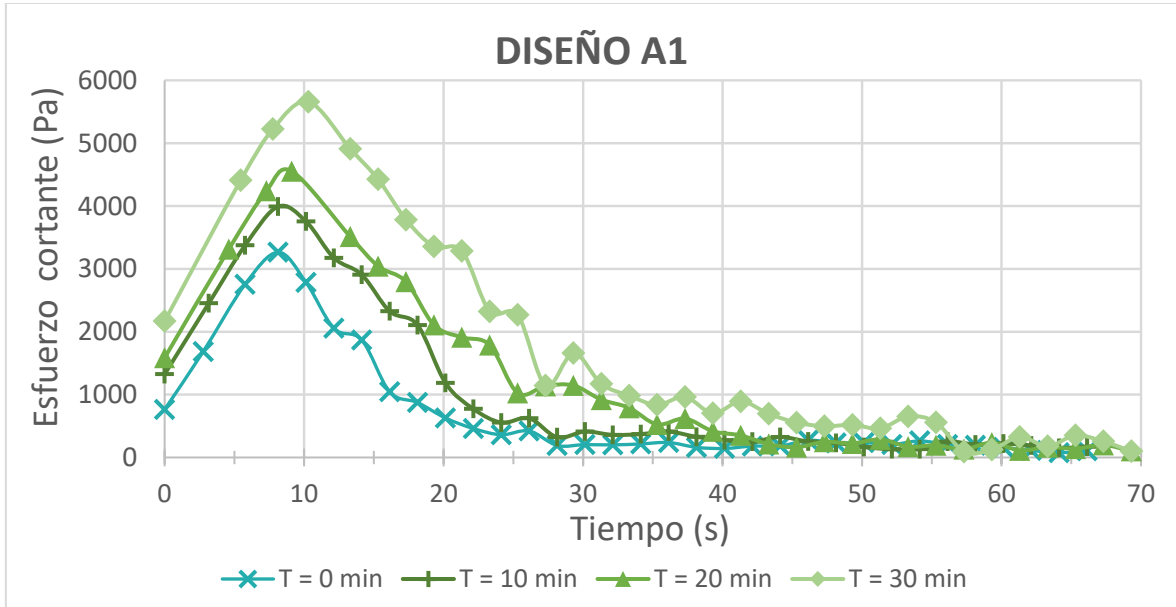


Figura 46

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A2

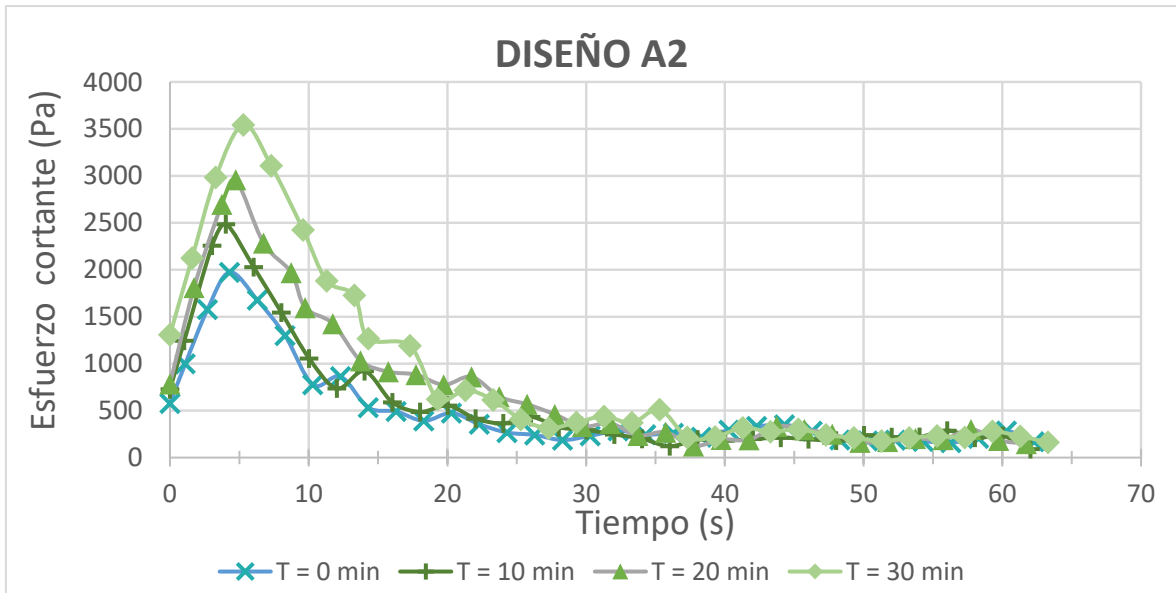


Figura 47

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A3

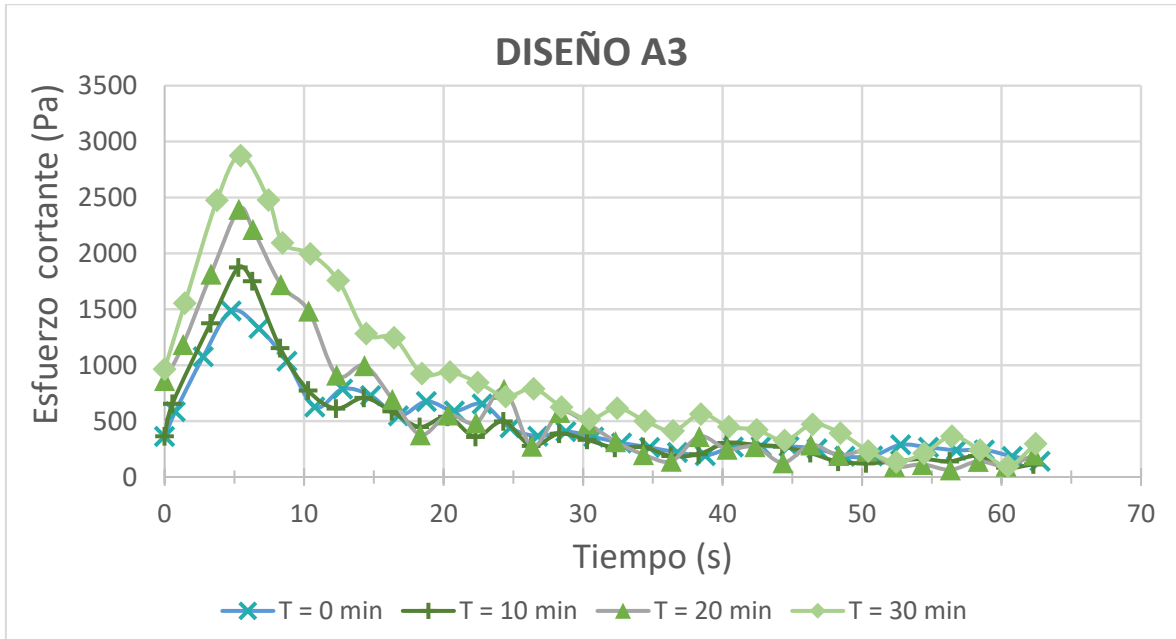


Figura 48

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A4

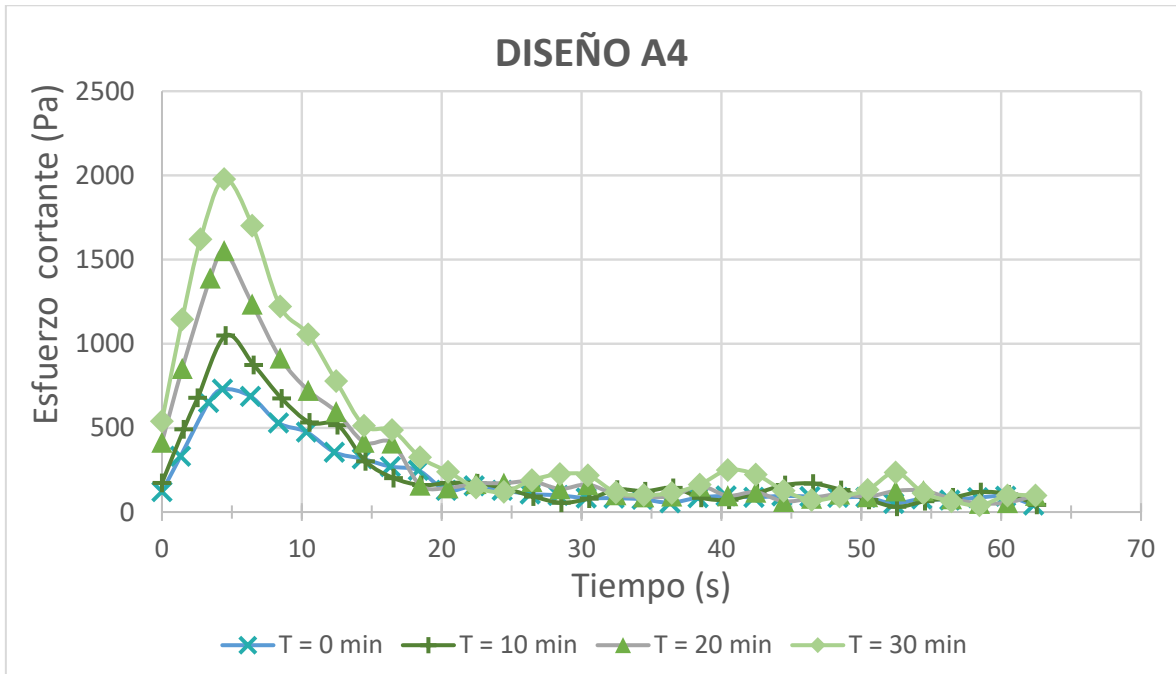
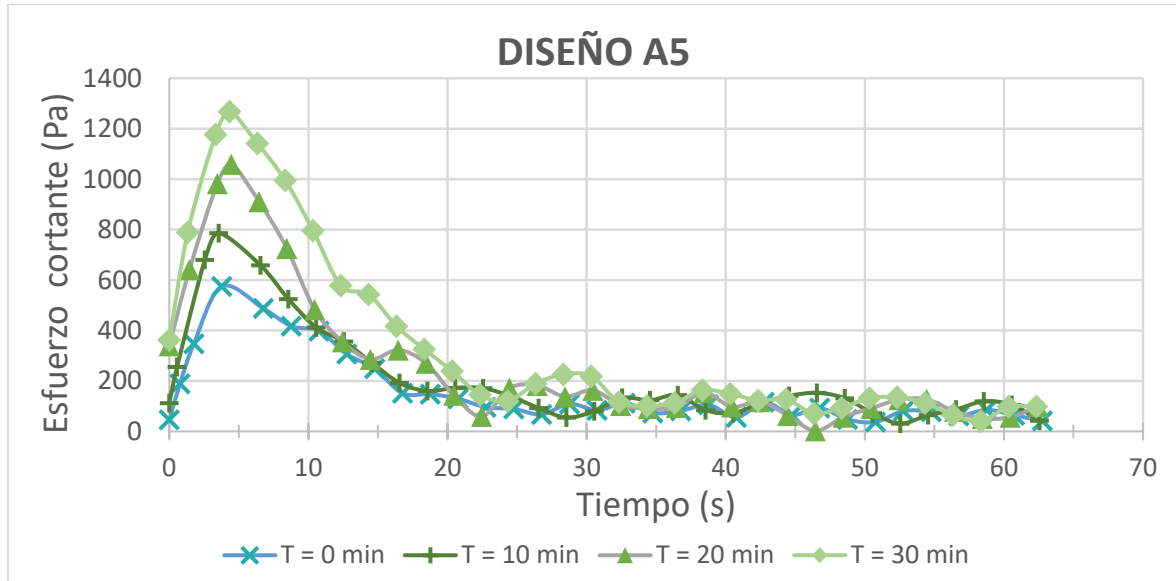


Figura 49

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para el Diseño A5



De las curvas de esfuerzo cortante para los tiempos 0, 10, 20 y 30 minutos de los diseños preliminares se determinó el esfuerzo de fluencia estática. En la tabla 46 se muestra el resumen de cada valor para los diseños preliminares.

Tabla 46

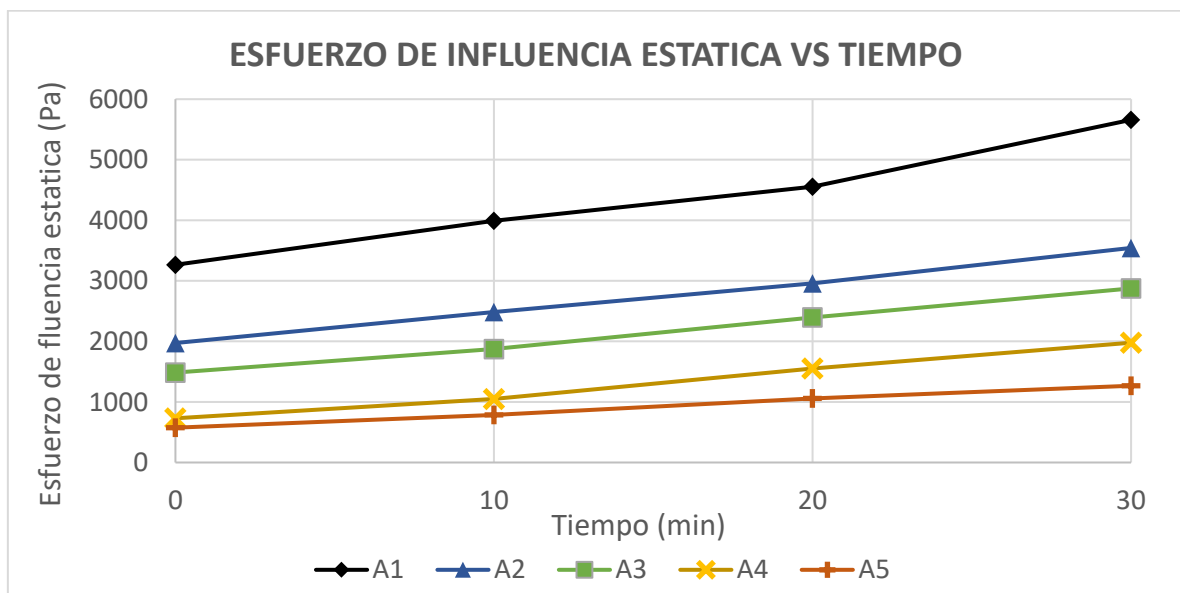
Esfuerzo de Fluencia Estática de los Ensayos Preliminares

Diseño	Esfuerzo de fluencia estática (Pa)			
	Tiempo (min)			
	0	10	20	30
A1	3265.3	3992.8	4554.2	5658.9
A2	1973.0	2485.4	2958.1	3543.5
A3	1485.1	1874.4	2395.4	2874.8
A4	729.9	1048.5	1552.7	1978.3
A5	574.8	785.7	1058.9	1267.5

De acuerdo con resultados, se puede inferir que el esfuerzo de fluencia estática aumenta según este avanzando el tiempo después de mezclar el concreto. Además, se muestra una tendencia de reducción del esfuerzo de fluencia estática del diseño A1 hacia el diseño A5, esto nos indica que conforme aumente el aditivo superplastificante disminuye el esfuerzo de fluencia estática. Por tanto, se tiene al diseño A1 como el que tiene el mayor valor de esfuerzo de fluencia estática de 3265.3 y 5658.9 Pa para tiempos de 0 y 35 min respectivamente. Asimismo, se tiene al diseño A5 como el que tiene el menor valor de esfuerzo de fluencia estática de 574.8 y 1267.5 Pa para tiempos de 0 y 35 min respectivamente. En la figura 50 se puede apreciar los valores de esfuerzo de fluencia para los diferentes tiempos de cada diseño preliminar.

Figura 50

Esfuerzo de Fluencia Estática de Diferentes Tiempos de los Ensayos Preliminares



3.4.3 Selección del diseño estándar del concreto impreso en 3D

La selección del diseño de concreto estándar se realizó utilizando lo especificado en el ítem 3.4.1.2, pues aquí se mencionó las consideraciones que debe tener el concreto para su aplicación en el sistema de impresión 3D. Estos requisitos se presentan como rangos que establecen límites máximos y mínimos de esfuerzo de fluencia estática (indicador) clasificándose respecto a las propiedades de imprimibilidad. El primer requisito se estableció

para un esfuerzo de fluencia estática que no ofrezca mucha resistencia y dejar que el sistema de bombeo pueda mover el concreto por la manguera de la impresora. Asimismo, este concreto debe fluir de manera uniforme hasta llegar a la boquilla de impresión y poder extruirse de forma correcta a lo largo del área de impresión, para ello se estableció los límites de esfuerzo de influencia estática entre 1500 hasta 2500 Pa para que el concreto pueda tener buena bombeabilidad y extrusión en los periodos iniciales de impresión. Es por ello, estos límites se usarán para los tiempos 0 y 10 min realizados en el ensayo del reómetro rotacional.

El segundo requisito se estableció para lograr una buena edificabilidad del concreto impreso en 3D, para ello el concreto debe tener una capacidad de recuperación estructural cuando este nuevamente en reposo, después de ser extruido, para poder evitar que el concreto siga fluyendo y resistir las deformaciones que se generan por el peso de otras capas de concreto manteniendo su forma extruida. Asimismo, la especificación toma en consideración una altura de impresión crítica para que el concreto puede tener resistencia y mantener su forma, quiere decir que superior a esa altura el concreto puede sufrir colapso, esto se puede solucionar realizando la impresión por bloques o por ensamblaje prefabricado. Entonces, para lograr la edificabilidad se estableció los límites de esfuerzo de fluencia estática entre 2500 hasta 3500 Pa, como estos límites se relacionan con la altura de impresión quiere decir que es cuando haya pasado un tiempo prologando. Es por ello, estos límites se usarán para los tiempos 20 y 30 min realizados en el ensayo del reómetro rotacional. En la tabla 47 se muestra los límites de esfuerzo de fluencia estática respecto a las propiedades de imprimibilidad y el tiempo de ensayo del reómetro rotacional.

Tabla 47

Requisitos de Imprimibilidad para un Concreto Impreso en 3D

Propiedad	Parámetro	Rango		Unidad
		Min	Max	
Bombeabilidad y extrusión	Esfuerzo de fluencia estática de 0 y 10 min	1500	2500	Pa
Edificabilidad	Esfuerzo de fluencia estática de 20 y 30 min	2500	3500	Pa

Los resultados de esfuerzo de fluencia estática de los ensayos del reómetro rotacional, evaluados con los límites requeridos para cada tiempo de ensayo se muestran en las figuras 51, 52, 53 y 54.

Figura 51

Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 0 min

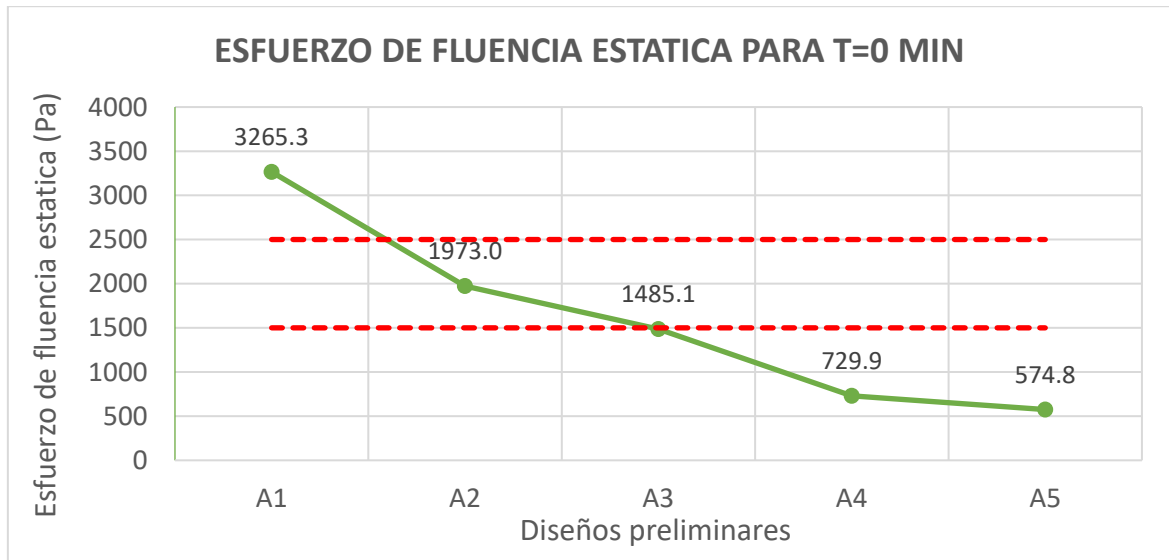


Figura 52

Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 10 min

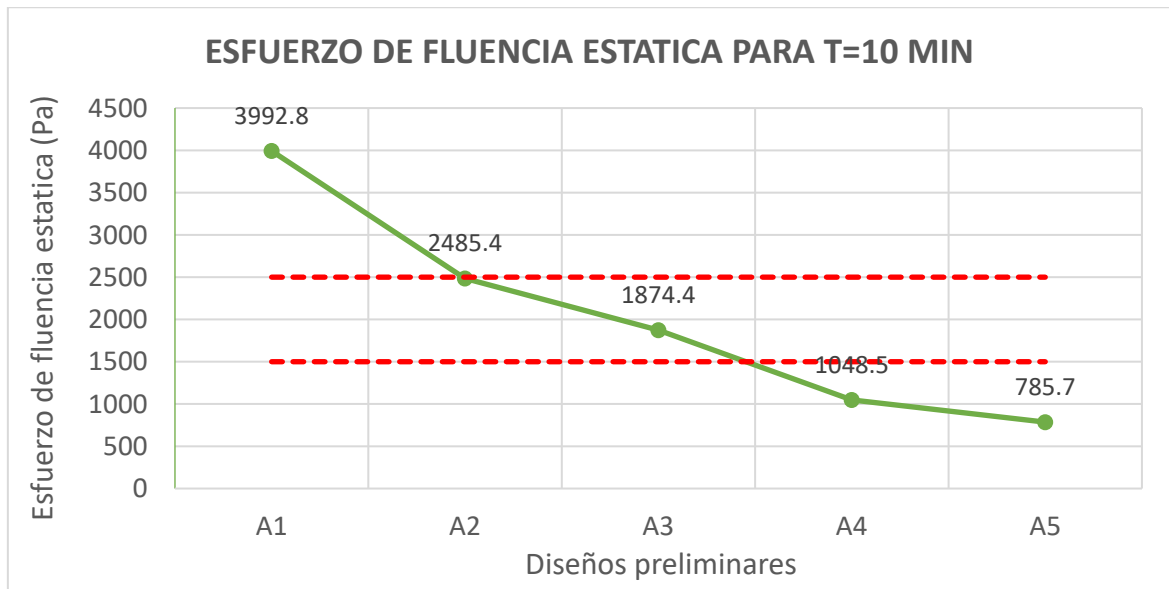


Figura 53

Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 20 min

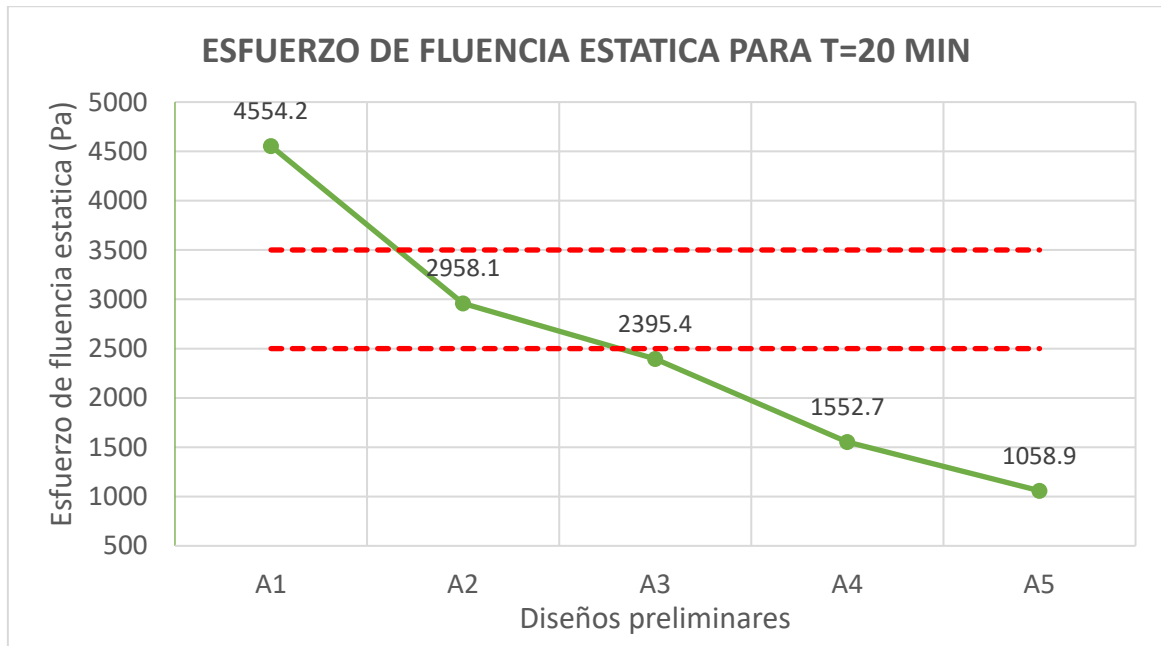
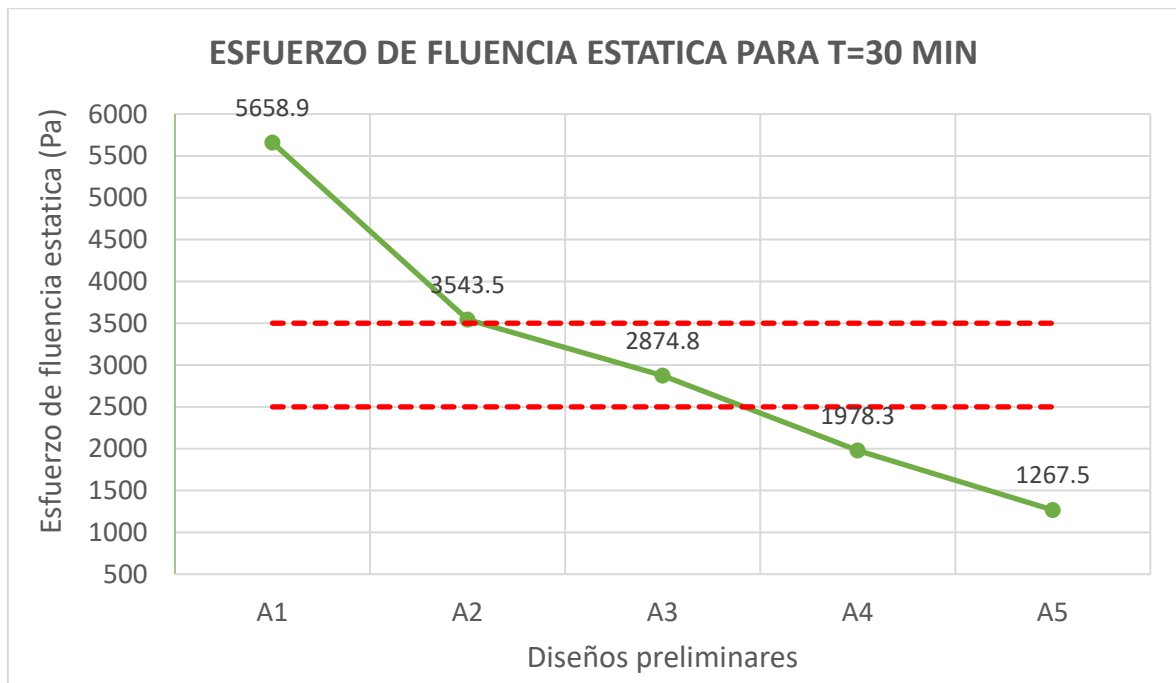


Figura 54

Requisitos del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T= 30 min



Para el análisis de la evaluación del esfuerzo de fluencia estática en los tiempos 0, 10, 20 y 30 minutos, se realizó la tabla 48 para validar los resultados con los requisitos para producir un concreto imprimible.

Tabla 48

Validación de Resultados de Esfuerzos de Fluencia Estática de los Ensayos Preliminares

Propiedad	Diseño	Esfuerzo de Fluencia estática (Pa)					
		Min.	Max.	Valor t=0 min	Validación	Valor t=10 min	Validación
Bombeabilidad y extrusión	A1	1500	2500	3265.3	No cumple	3992.8	No cumple
	A2	1500	2500	1973.0	Cumple	2485.4	Cumple
	A3	1500	2500	1485.1	No cumple	1874.4	Cumple
	A4	1500	2500	729.9	No cumple	1048.5	No cumple
	A5	1500	2500	574.8	No cumple	785.7	No cumple
Propiedad	Diseño	Esfuerzo de Fluencia estática (Pa)					
		Min.	Max.	Valor t=20 min	Validación	Valor t=30 min	Validación
Edificabilidad	A1	2500	3500	4554.2	No cumple	5658.9	No cumple
	A2	2500	3500	2958.1	Cumple	3543.5	No cumple
	A3	2500	3500	2395.4	No cumple	2874.8	Cumple
	A4	2500	3500	1552.7	No cumple	1978.3	No cumple
	A5	2500	3500	1058.9	No cumple	1267.5	No cumple

De la validación realizada, se determinó que los diseño A2 y A3 son los que cumple con los límites máximos y mínimos establecidos para lograr las propiedades de imprimibilidad. Cabe menciona, que estos límites se están restringiendo para cada tiempo de ensayo realizado, de esta manera simular el proceso que se sigue en un sistema de impresión y las propiedades que están involucradas en cada una de estas.

De los 2 diseños que cumplen con los requisitos, se verifica que el diseño A2 cumple con los límites establecidos para un tiempo de ensayo de 0, 10 y 20 min con los valores de esfuerzo de fluencia estática de 1973, 2485.4 y 2958.1 Pa respectivamente. Asimismo, para el diseño A3 se verifica que solo cumple con los limites en los tiempos de ensayo de 10 y 30 min con los esfuerzos de fluencia estática de 1874.4 y 2874.8 Pa respectivamente. En consecuencia, se puede concluir que el diseño A2 cumple que la mayoría de los requisitos establecidos para un esfuerzo de fluencia estática que puede garantizar las propiedades de imprimibilidad del concreto, seleccionándolo como el diseño de concreto estándar para impresión 3D y usarse como diseño base en la etapa definitiva.

3.5 OBJETIVO 3

El tercer objetivo consiste en elaborar mezclas de concreto con una relación de sustitución del agregado natural con el agregado de concreto reciclado tomando como base al diseño de concreto estándar y determinar la propiedad en estado fresco: comportamiento reológico, y la propiedad en estado endurecido: Resistencia a la compresión.

3.5.1 Diseños de mezcla definitivos

Los diseños de concreto con una tasa de sustitución del agregado natural por el ACR se definieron como “diseños definitivos” y fueron realizados tomando como base al diseño de concreto estándar, determinado anteriormente. La relación de sustitución se determinó mediante un análisis recopilatorio sobre la regulación de agregados reciclados en diversos países en la actualidad, descrito en el marco teorico. Asimismo, como el agregado natural fue clasificado en arena gruesa y fina, se comenzará reemplazando la arena gruesa y luego

un porcentaje de la arena fina. En la tabla se muestra la tasa de sustitución porcentual del agregado natural con el ACR.

Tabla 49

Tasa de Sustitución del Agregado Natural por el Agregado de Concreto Reciclado

Material	Nomenclatura	Tasa de reemplazo del agregado natural
		5%
		10%
Agregado de Concreto Reciclado (ACR)	R	15%
		20%
		25%
		30%

Con la relación de sustitución establecida se realiza los cálculos de dosificación (anexo 2) de los diseños de mezcla definitivos. En la tabla 50 se presentan los diseños de mezclas definitivos.

Tabla 50

Dosificación de los Diseños Definitivos Para 1 m³ de Concreto

Diseño	Cemento (Kg)	A. gruesa (Kg)	A. fina (Kg)	ACR (Kg)	Agua (Kg)	SP (Kg)	SF (Kg)
R1	728.50	291.40	869.50	61.10	305.50	5.46	70.50
R2	728.50	230.30	869.50	122.20	305.50	5.46	70.50
R3	728.50	169.20	869.50	183.30	305.50	5.46	70.50
R4	728.50	108.10	869.50	244.40	305.50	5.46	70.50
R5	728.50	47.00	869.50	305.50	305.50	5.46	70.50
R6	728.50	0.00	855.40	366.60	305.50	5.46	70.50

3.5.2 Ensayo en estado fresco de los diseños definitivos

El ensayo realizado a los diseños definitivos en estado fresco fue del reómetro rotacional de acuerdo con lo especificado en el ítem 3.4.1.2 y fue realizado durante los tiempos de 0, 10, 20 y 30 minutos después de elaborada la mezcla para cada diseño definitivo. Los resultados se obtuvieron del uso de la ecuación 1 que fue realizado por software Rheo3000 mediante el reómetro rotacional durante un periodo de tiempo de 60 s (anexo 4). Como en los diseños preliminares con este ensayo se busca obtener el indicador reológico: esfuerzo de fluencia estática.

Resultados

Los resultados de los ensayos del reómetro rotacional se expresaron en gráficas de las curvas de esfuerzos cortantes (Pa) vs tiempo (s) que se muestran en las figuras 55, 56, 57, 58, 59 y 60. Estos ensayos fueron realizados en los tiempos de 0, 10, 20 y 30 min para cada diseño definitivo.

Figura 55

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R1

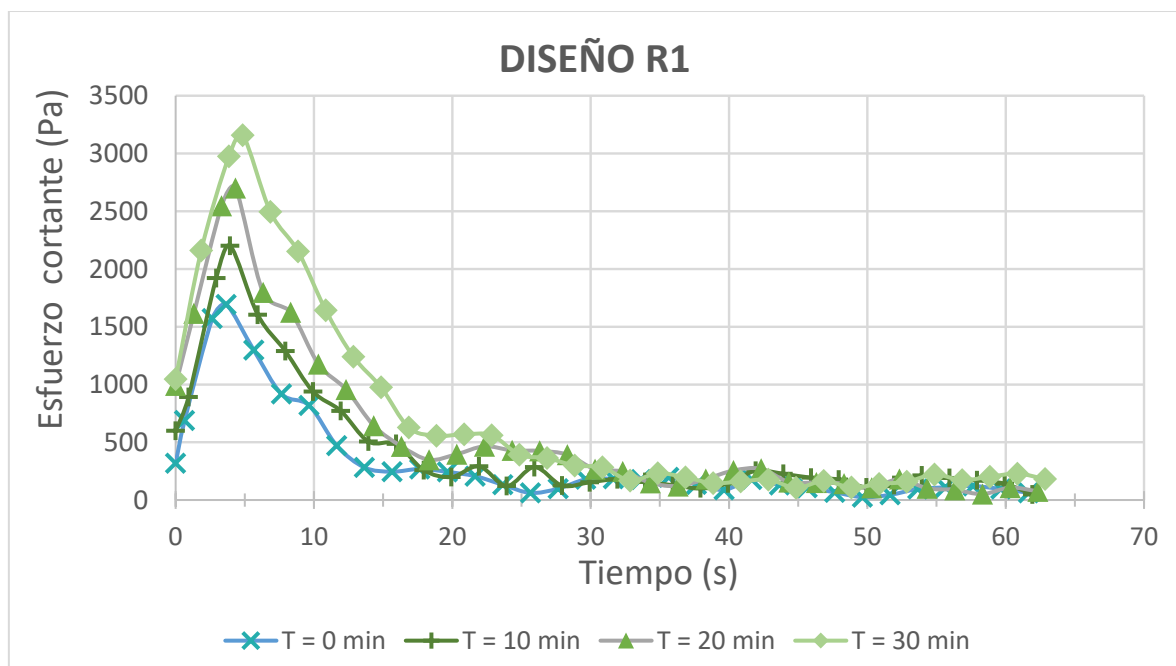


Figura 56

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R2

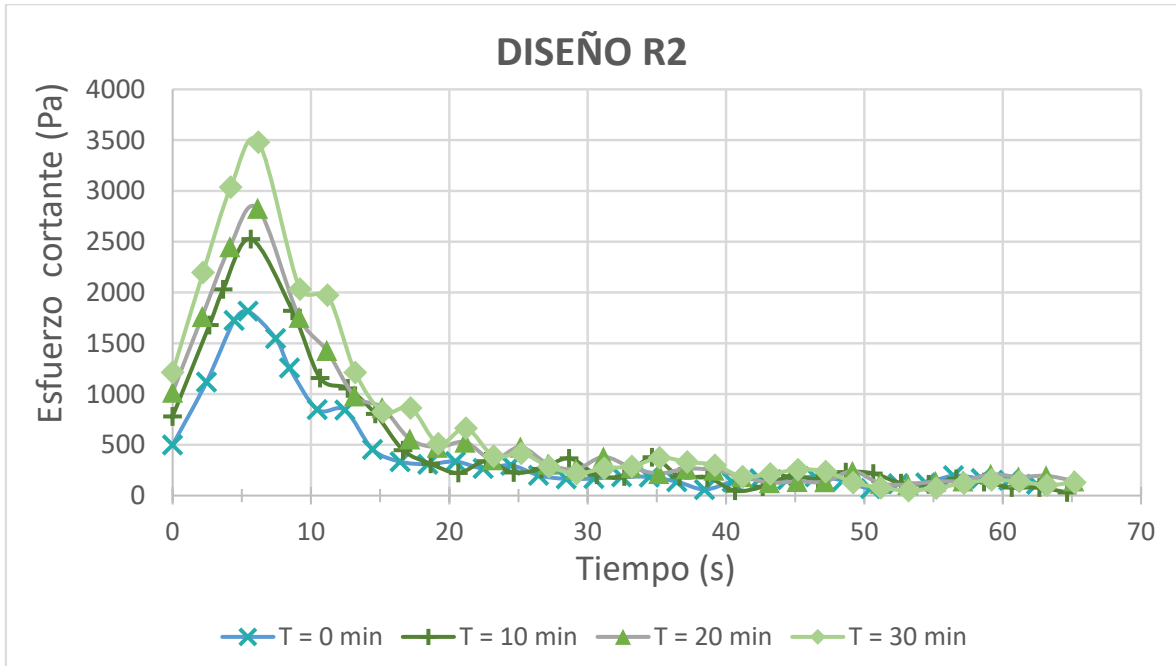


Figura 57

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R3

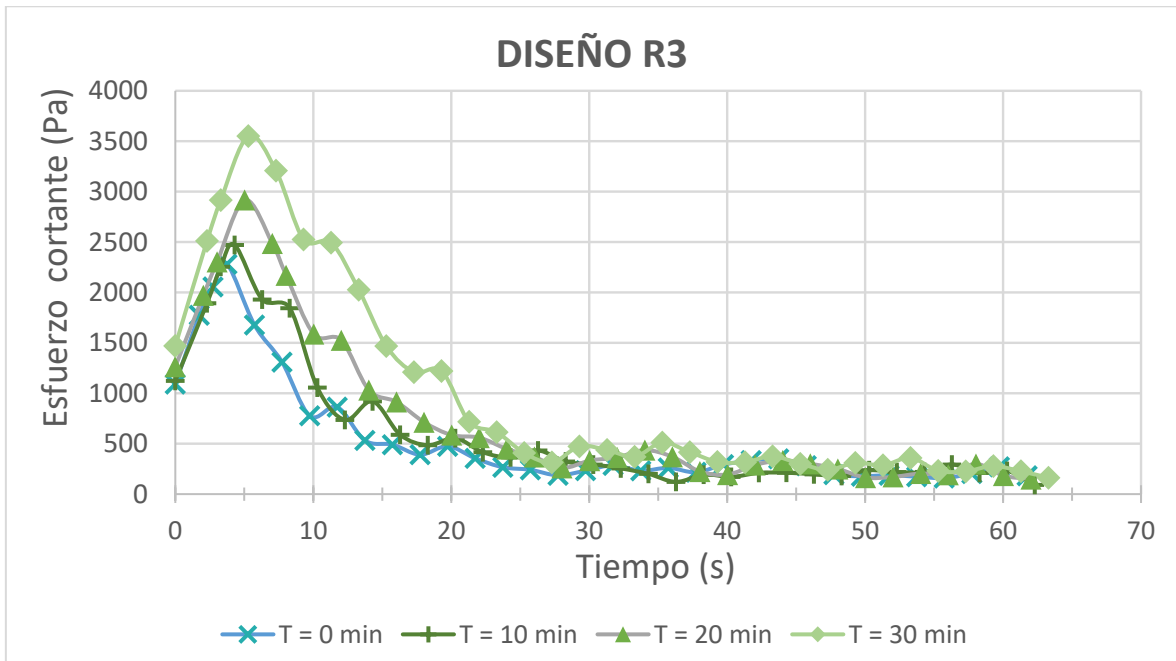


Figura 58

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R4

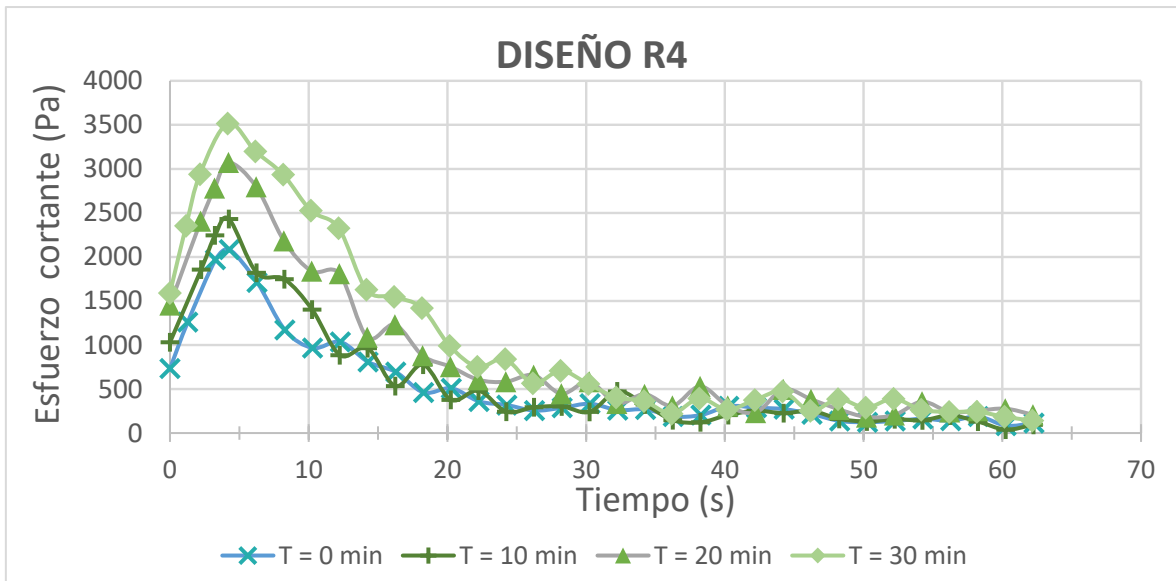


Figura 59

Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R5

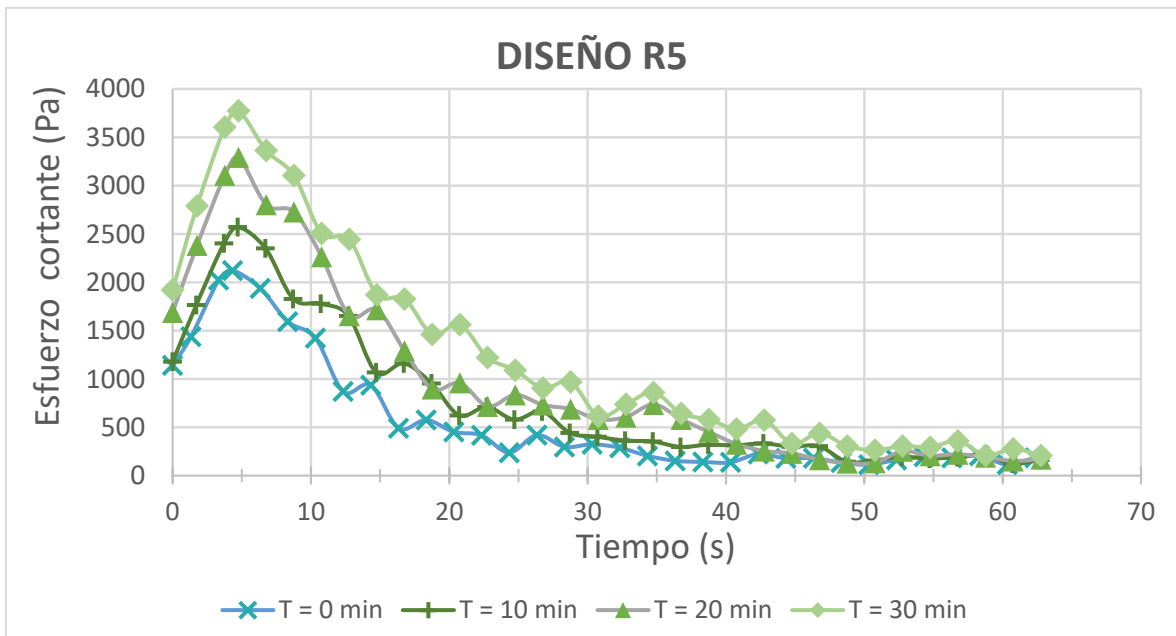
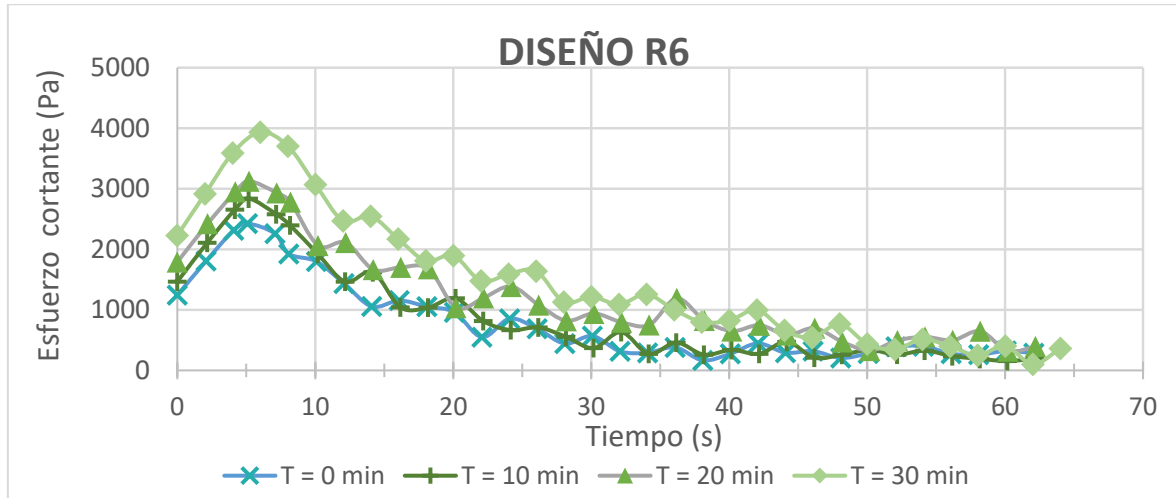


Figura 60*Curva de Esfuerzos Cortantes en Diferentes Tiempos para El Diseño R6*

De las gráficas de la curva de esfuerzo cortante (Pa) vs tiempo (s) en los lapsos de tiempo de 0, 10, 20 y 30 minutos de cada diseño definitivo, se obtiene el esfuerzo de fluencia estática del mayor valor de la curva de esfuerzos cortantes. En la tabla 51 se muestra los esfuerzos de fluencia estática para cada diseño definitivo y el esfuerzo de fluencia estática del concreto estándar (diseño A2).

Tabla 51*Esfuerzos de Fluencia Estática de los Ensayos Definitivos*

Diseño	Esfuerzo de Fluencia estática (Pa)			
	Tiempo (min)			
	0	10	20	30
A2	1973.0	2485.4	2958.1	3543.5
R1	1693.2	2201.1	2701.3	3157.7
R2	1816.4	2526.4	2829.4	3479.5
R3	2281.0	2471.4	2917.1	3551.5
R4	2083.4	2431.2	3073.4	3515.1
R5	2120.8	2570.7	3292.8	3774.1
R6	2425.2	2839.1	3125.8	3933.4

3.5.3 Ensayo en estado endurecido de los diseños definitivos

El ensayo que se realizó a las mezclas de los diseños definitivos fue el de resistencia a la compresión, para ello se elaboró probetas cilíndricas de concreto para realizar estos ensayos.

3.5.3.1 Elaboración de probetas cilíndricas de concreto

La elaboración de las probetas se realizó considerando la norma ASTM International (2021) que nos menciona el procedimiento de preparación y curación de probetas cilíndricas de concreto fresco para proyectos constructivos.

Equipos

- Molde de acero para las probetas, de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.
- Varilla de compactación de 5/8” de diámetro y 50 cm de largo con extremos redondeados.
- Mazo con cabeza de goma.
- Cucharón, plancha metálica y un contenedor de mezcla.

Procedimiento de muestreo y molde

- Se comienza, realizando la mezcla de concreto para el diseño de mezcla estándar y los diseños definitivos.
- Seguimos llevando la mezcla de cada diseño a los moldes de acero y colocamos el concreto uniformemente dentro de los moldes para generar una segregación de minina del concreto, se realizaron 3 llenados de capas de igual volumen.
- Para cada capa se compacto 25 veces con la varilla de compactación en forma de espiral en toda el área del molde. Para la primera capa se compacto hasta el fondo del molde, mientras que para la segunda y tercera capa se penetra hasta en 1” de profundidad aproximadamente.
- Asimismo, concluido cada varillado de capa se golpea exteriormente el molde con el mazo de 10 a 15 veces para liberar las burbujas de aire atrapadas en la mezcla, que se pueden haber generado por el varillado.
- En la última capa se debe colocar la cantidad e concreto que llene el molde despues de su compactación.

- Luego, se debe nivelar la superficie del molde con la misma varilla de compactación y usar la plancha metálica para tener un acabado liso. Asimismo, se coloca el etiquetado del tipo de diseño y número de muestra.
- Finalmente, se debe almacenar las probetas y 24 horas después desmoldarlos para realizar su proceso de curación.

En la figura 61 muestra la elaboración de las probetas cilíndricas de concreto en el laboratorio.

Figura 61

Elaboración de Probetas Cilíndricas de Concreto de los Diseños Definitivos



3.5.3.2 Resistencia a la compresión del concreto

El ensayo de resistencia a la compresión del concreto se realizó considerando la norma ASTM International (2017) que permite determinar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto para concretos de una densidad mayor a 800 kg/cm^3 .

Equipos

- Máquina de ensayo con precisión de $\pm 1.0\%$ de la carga.
- Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm.
- Balanza con precisión de 0.1 g

Procedimiento

- Se comienza, manteniendo las probetas cilíndricas en condición humedad para realizar el ensayo
- Colocar la probeta dentro de la placa inferior de superficie plana de la máquina de ensayo y centrarla en el eje del bloque empuje esférico.
- Verificar el indicador de carga y la alineación de la probeta en el centro de carga.
- Aplicamos la carga con una velocidad a una tasa de compresión de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s hasta que el indicador de carga disminuya constantemente y la probeta muestre una fractura definida.
- Finalmente, recolectamos el resultado de carga máxima final de la máquina de ensayo y calculamos la resistencia a la compresión determinada por la ecuación 4.

$$f'c = P/A \quad (4)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto en kgf/ cm²,

P = Carga máxima total en kgf, y

A = Área de sección transversal de la probeta en cm²

En la figura 62 se muestra la obtención de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto de ensayos definitivos.

Figura 62

Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto de Diseños Definitivos



Resultados

Para el ensayo de resistencia a compresión del concreto se realizó 3 probetas para el diseño estándar y los diseños definitivos. Asimismo, se elaboró el ensayo de resistencia la compresión a las edades de 3, 7 y 28 días. Obtenidas las cargas se realizó el cálculo de la resistencia a la compresión mediante la ecuación 4 para cada diseño (anexo 5) y se elaboró la tabla 52 que resume los resultados de resistencias a la compresión promedio obtenidas para cada diseño.

Tabla 52

Resultados de Resistencia a la Compresión de Diseños Definitivos

Diseño	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)		
	Edades (días)		
	3	7	28
A2	321.5	378.8	481.4
R1	295.1	345.8	423.4
R2	317.4	314.2	398.7
R3	194.7	259.9	356.8
R4	204.1	242.5	318.2
R5	195.1	275.7	335.0
R6	253.9	322.9	349.5

3.6 OBJETIVO 4

El cuarto objetivo consta de realizar el análisis comparativo de los resultados del diseño estándar de concreto con los diseños definitivos para determinar el diseño de mezcla óptimo para producirse en un sistema de impresión 3D a gran escala. Este objetivo tendrá su desarrollo en el capítulo 4 de análisis de resultados.

3.7 OBJETIVO 5

El quinto objetivo consta en determinar la reducción de residuos de construcción y demolición (RCD) al producir el concreto reciclado propuesto. Para ello, se recopilaron los casos de estudio de una obra de construcción y demolición. De esta manera, analizar los casos donde se generan RCD's en Lima metropolitana y estimar las cantidades que se podrían reducir en estos casos.

3.7.1 Caso de obra de construcción

Edificio multifamiliar “Andrés”

El edificio multifamiliar “Andrés”, ubicado en el distrito de Chorrillos, en la ciudad de Lima se construyó en un lapso de 10 meses, durante el periodo comprendido entre Julio del 2023 a mayo del 2024. El proyecto tiene la siguiente descripción:

- Dirección de Obra: Av. Republica de Francia 4580, Chorrillos
- Tipo de construcción: Edificio multifamiliar de 6 pisos y 1 sótano
- Superficie construida: 4250 m²

3.7.2 Caso de obra de demolición

Edificio “MAPFRE”

El edificio “MAPFRE”, ubicado en el distrito de Miraflores, en la ciudad de Lima. Se programa la demolición de toda el área construida en un plazo de 60 días. El proyecto tiene la siguiente descripción:

- Dirección de Obra: Av. Armendáriz 345, Miraflores 15074
- Tipo de construcción: Edificio multifamiliar de 5 pisos y 1 azotea
- Superficie construida: 2077 m²

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el cuarto capítulo se realiza el análisis de resultados que se desarrolló en el programa experimental. Como el capítulo anterior, esto se elabora en base a los objetivos específicos planteados comenzando con el análisis de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del agregado natural y reciclado. Asimismo, se realizó el análisis de los ensayos para determinar las propiedades en estado fresco y endurecido de los diseños definitivos y compararlos con las propiedades del concreto estándar en base a los requisitos para producir un concreto impreso en 3D. Finalmente, se realizó el análisis de reducción de RCD mediante el uso del concreto con agregados reciclados de concreto.

4.1 OBJETIVO 1

4.1.1 Análisis de resultados de la granulometría del agregado natural y ACR

4.1.1.1 Análisis de resultados del agregado natural

De acuerdo con las normas ASTM International (2019b) y el INACAL (2021b), el ensayo granulométrico del agregado fino natural determina que el módulo de fineza debe situarse dentro del rango de 2.3 a 3.1 para considerarlo apto en aplicaciones de concreto. Además, se comprobó que el agregado fino cumple con los parámetros definidos en el Huso Granulométrico 9, establecido por la norma ASTM International (2003). Esta norma proporciona los límites superior e inferior que debe respetar la curva granulométrica del agregado fino, asegurando que sea adecuado para su uso en la producción de concreto. Esto confirma que el material está dentro de las especificaciones requeridas para garantizar su calidad y desempeño en mezclas de concreto. El Módulo de Fineza (MF) se calculó usando la ecuación 2, determinándose que cumple con el rango establecido.

$$M F = 3.06$$

4.1.1.2 Análisis de resultados del ACR

Al realizar el ensayo de granulometría del ACR, se confirmó que cumple con los parámetros establecidos por el Huso Granulométrico 9, según lo indicado en la norma ASTM International (2003). Esta especificación define los límites superior e inferior que la curva

granulométrica debe respetar para garantizar la idoneidad del material en la producción de concreto. Además, se calculó el Módulo de Fineza del ACR mediante la ecuación 2, determinado que se encuentra dentro del rango recomendado por las normas ASTM International (2019b) e INACAL (2021b), asegurando que este tipo de agregado es apto para su uso en mezclas de concreto. Esto respalda su calidad y viabilidad como alternativa sostenible en la construcción.

$$\text{Modulo de Fineza} = 2.88$$

4.1.2 Análisis de resultados del peso unitario del agregado natural y ACR

4.1.2.1 Análisis de resultados del agregado natural

Los resultados obtenidos muestran que los valores del peso unitario suelto y compactado del agregado fino natural son de 1465 y 1695 kg/m³, respectivamente. Esto confirma que el peso unitario compactado supera al peso unitario suelto, lo cual se explica porque en un mismo volumen entra una mayor cantidad de material al compactarse. De acuerdo con la norma del INACAL (2020b), que establece una desviación estándar de 14 kg/m³ y que permite una diferencia máxima de 40 kg/m³ entre dos ensayos realizados correctamente por el mismo operador, se puede concluir que los valores obtenidos cumplen con los parámetros establecidos. Esto respalda la calidad del agregado fino natural para su uso en concreto.

4.1.2.2 Análisis de resultados del ACR

Los resultados obtenidos de los cuatro ensayos realizados al ACR indican un valor promedio de peso específico de 2.69 g/cm³ y un porcentaje de absorción de 8.45 %. Este alto porcentaje de absorción era un comportamiento esperado, como se explicó en el marco teórico, debido a la presencia de mortero adherido (pasta cementosa residual). Este mortero, por su naturaleza porosa, incrementa significativamente la capacidad de absorción de los agregados reciclados. Estos resultados destacan una de las características principales de los ACR, lo que es crucial considerar al diseñar mezclas de concreto que utilicen este tipo de material.

4.1.3 Análisis de resultados del contenido de humedad del agregado natural y ACR

4.1.3.1 Análisis de resultados del agregado natural

Los resultados de los cuatro (04) ensayos realizados al agregado natural fino muestran un promedio de contenido de humedad de 1.6 %. Este valor es congruente con las características del material, ya que las partículas finas tienden a adsorber y retener mayor cantidad de agua debido a su mayor cohesión superficial. Además, el reducido espacio de vacíos entre las partículas que conforman el agregado natural fino contribuye a esta retención de humedad, lo que lo hace un material adecuado para aplicaciones donde estas propiedades son relevantes.

4.1.3.2 Análisis de resultados del ACR

Los resultados de los cuatro (04) ensayos realizados al ACR arrojan un promedio de contenido de humedad de 0.75 %. Este valor es menor en comparación con el contenido de humedad del agregado fino natural. Esta diferencia puede atribuirse a las macropartículas que se generan durante el proceso de trituración, las cuales poseen una estructura que limita la capacidad de adsorber y retener agua. Este comportamiento refleja las características distintivas del ACR frente al agregado natural.

4.1.4 Análisis de resultados del peso específico y absorción del agregado natural y ACR

4.1.4.1 Análisis de resultados del agregado natural

De acuerdo con los resultados de los cuatro (04) ensayos realizados al agregado natural fino, se obtuvo un promedio de peso específico de 2.75 g/cm³ y un porcentaje de absorción del 2.52 %. Estos valores, determinados mediante la relación entre el peso del agregado y su volumen sin considerar los espacios vacíos, cumplen con los parámetros establecidos por la norma ASTM International (2022). Esto confirma que el agregado natural fino es apto para su uso en la producción de concreto, dado que se encuentra dentro de los rangos aceptables especificados para este tipo de material.

4.1.4.2 Análisis de resultados del ACR

De los cuatro (04) ensayos realizados al ACR, se obtuvo un promedio de peso específico de 2.69 g/cm³ y un porcentaje de absorción del 8.45 %. Tal como se detalla en el marco teórico,

estos resultados eran previsibles debido a la presencia de mortero adherido o pasta cementosa residual en el material reciclado. Este mortero aumenta significativamente la capacidad de absorción del ACR en comparación con los agregados naturales, dado que su estructura porosa retiene más agua. Estos valores reflejan las características típicas del ACR y deben ser considerados al diseñar mezclas de concreto con este tipo de agregado.

4.1.5 Análisis comparativo del agregado natural y ACR

En base en los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados al agregado natural fino y al ACR, se elaboró la tabla 53, revelando tanto similitudes como diferencias clave que impactan la producción de concreto. En cuanto al módulo de fineza, los valores obtenidos fueron 3.06 para el agregado natural fino y 2.88 para el ACR. Ambos valores están dentro de los rangos recomendados para una adecuada resistencia al corte y estabilidad, aunque el agregado natural fino tiene un módulo de fineza ligeramente superior, lo que sugiere una mayor cohesión en la mezcla.

En cuanto a la humedad natural, el agregado natural fino presentó un valor de 1.6 %, mientras que el ACR mostró un 0.75 %. Estos valores son relativamente bajos, lo que indica que el contenido de agua natural en ambos agregados no influirá significativamente en las propiedades finales del concreto. Sin embargo, el ACR tiene una humedad más baja, lo que podría facilitar su manejo en términos de control de agua en la mezcla.

El peso unitario de los agregados mostró diferencias notables entre los dos tipos de material. El agregado natural fino tiene un peso unitario suelto de 1465 kg/m³ y un peso unitario compactado de 1695 kg/m³, mientras que el ACR tiene valores de 1677 kg/m³ para el suelto y 1834 kg/m³ para el compactado. Estas diferencias se deben a las características de cada material, donde el ACR, por su origen reciclado y su estructura más densa, presenta un mayor peso unitario.

En cuanto al peso específico, el agregado natural fino tiene un valor de 2.75 g/cm³, mientras que el ACR tiene 2.69 g/cm³. Esta diferencia es pequeña y dentro de los márgenes aceptables, indicando que ambos materiales tienen densidades similares que los hacen aptos para su uso en concreto.

Finalmente, la absorción de agua mostró una diferencia significativa entre los dos tipos de agregados. El agregado natural fino presentó un valor de 2.52 %, mientras que el ACR alcanzó un 8.45 %. Esta alta absorción del ACR es esperada debido a la presencia de mortero adherido (pasta cementosa vieja), lo que aumenta su capacidad de retención de agua. Este factor debe ser considerado en el diseño de la mezcla, ya que la mayor absorción puede requerir ajustes en la dosificación de agua.

En resumen, los resultados de los ensayos indican que ambos agregados son adecuados para la producción de concreto, pero el ACR, debido a su mayor absorción de agua, requiere ajustes específicos en la mezcla. Sin embargo, su uso en concreto reciclado ofrece ventajas ambientales, lo que hace de este material una opción viable y sostenible en la construcción.

Tabla 53

Tabla comparativa de las propiedades mecánicas del agregado Natural y el ACR

PROPIEDADES MECANICAS	UNIDAD	AGREGADO NATURAL FINO	ACR
Módulo de fineza	-	3.06	2.88
Humedad natural	%	1.6	0.75
Peso Unitario muestra Suelta Seca	kg/m ³	1465	1677
Peso Unitario muestra Compactado-Seca	kg/m ³	1695	1834
Peso Especifico	g/cm ³	2.75	2.69
Absorción	%	2.52	8.45

4.2 OBJETIVO 2

4.2.1 Análisis de resultados de los diseños de mezcla preliminares del concreto

Para lograr el objetivo 2 se realizaron diseños de mezcla preliminares de concreto, calculado en el anexo 1, y en base a ello se realizó el ensayo del reómetro rotacional para determinar su comportamiento reológico (variable dependiente) variando la dosificación del aditivo superplastificante (variable independiente). Esto en base a las especificaciones que requiere un concreto para ser imprimible exitosamente. De esta manera, se determinó al diseño “A2”

como el diseño de mezcla estándar para realizar los diseños definitivos de concreto. El análisis fue realizado en el capítulo experimental, específicamente en el ítem 3.4.3.

4.3 OBJETIVO 3

4.3.1 Análisis de resultados del concreto en estado fresco

Para el concreto en estado fresco se realizó el ensayo del reómetro rotacional que determino el comportamiento reológico de los ensayos definitivos evaluado mediante el esfuerzo de fluencia estática. El análisis de resultados se realizó a este indicador, que se calculó el mayor esfuerzo cortante de la gráfica de esfuerzo cortante (Pa) vs tiempo (s). Esto se realizó para ensayos en los tiempos de 0, 10, 20 y 30 minutos.

4.3.1.1 Esfuerzo de fluencia estática de diseños definitivos

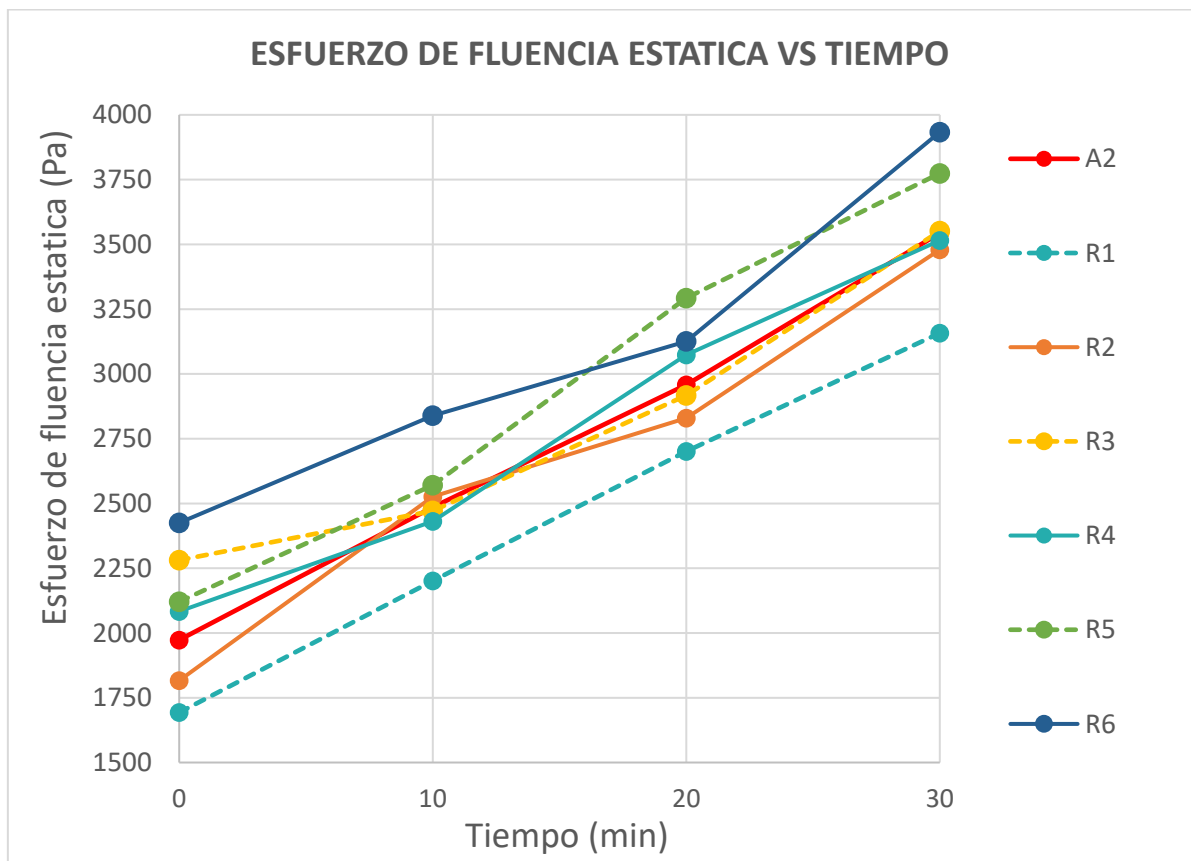
Los resultados del esfuerzo de fluencia estática de los diseños definitivos de muestra en la tabla 51. Estos resultados fueron plasmados en una grafico de esfuerzo de fluencia estática (Pa) vs tiempo (min) que se muestra en la figura 63. De la gráfica se observa que todos los diseños tienen una tendencia acumulativa del esfuerzo de fluencia estática conforma avanza en el tiempo de ensayo. Además, se observa que los diseños de R1 y R2 tienen resultados menores al diseño de mezcla estándar A2. Por otro, se tiene a los diseños R3, R4, R5 y R6 con resultados por encima del diseño de mezcla estándar. Cabe señalar que en los diseños R5 y R6 se encuentra la mayor dispersión de resultados del diseño de mezcla estándar con los valores del diseño R6 de 2425.2 Pa y 3933.4 Pa para los tiempos de ensayo de 0 min y 30 min respectivamente; y para el diseño R5 con el valor de 3292.8 Pa en el tiempo de ensayo de 20 min. En términos porcentuales el diseño R6 tiene dispersiones respecto al diseño de mezcla estándar de 122.91% y 111.01% en los tiempos de ensayo a los 0 min y 30 min respectivamente. Mientras que el diseño R5 tiene una dispersión respecto al diseño de mezcla estándar de 112.31 % en el tiempo de ensayo los 20 min.

También, se puede observar que los diseños R1, R4 y R5 lo que tienen una tendencia lineal a lo largo de los lapsos de tiempo de cada ensayo realizado. Para los diseños que tiene cambios relativamente continuos, se tiene al diseño R3 con solo un aumento del 8.34 % del esfuerzo de fluencia estática en el lapso 0 min a 10 min. Asimismo, el diseño R5 solo aumento solo un 14.61% del esfuerzo de fluencia estática en el lapso de 20 min a 30 min.

En relación con cada diseño definitivo se puede analizar que el esfuerzo de fluencia estática aumenta conforme aumenta el reemplazando de ACR en cada diseño (los reemplazos fueron de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% del agregado natural). Esto se alinea con la investigación de Wu et al. (2021), que determinaron esfuerzos de fluencia estática de 2680 Pa hasta 3884 Pa para obtener concretos impresos de forma exitosa con reemplazos del agregado natural de un 0%, 50% y 100% por agregados gruesos reciclados de concreto, llegando a la conclusión que el esfuerzo de fluencia estática aumenta conforme aumenta la tasa de reemplazo del ACR. Este aumento fue de forma exponencial y determinado que esto puede ser atribuido a una superficie más rugosa y aumento de la absorción de los ACR respecto al agregado natural.

Figura 63

Esfuerzo de Fluencia Estática en Diferentes Tiempos de los Ensayos Definitivos



4.3.2 Análisis de resultados del concreto en estado endurecido

los resultados del concreto en estado endurecido fueron de los ensayos de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas que fueron realizados en los 3, 7 y 28 días después de realizada la mezcla de los diseños definitivos.

4.3.2.1 Resistencia a la compresión de diseños definitivos

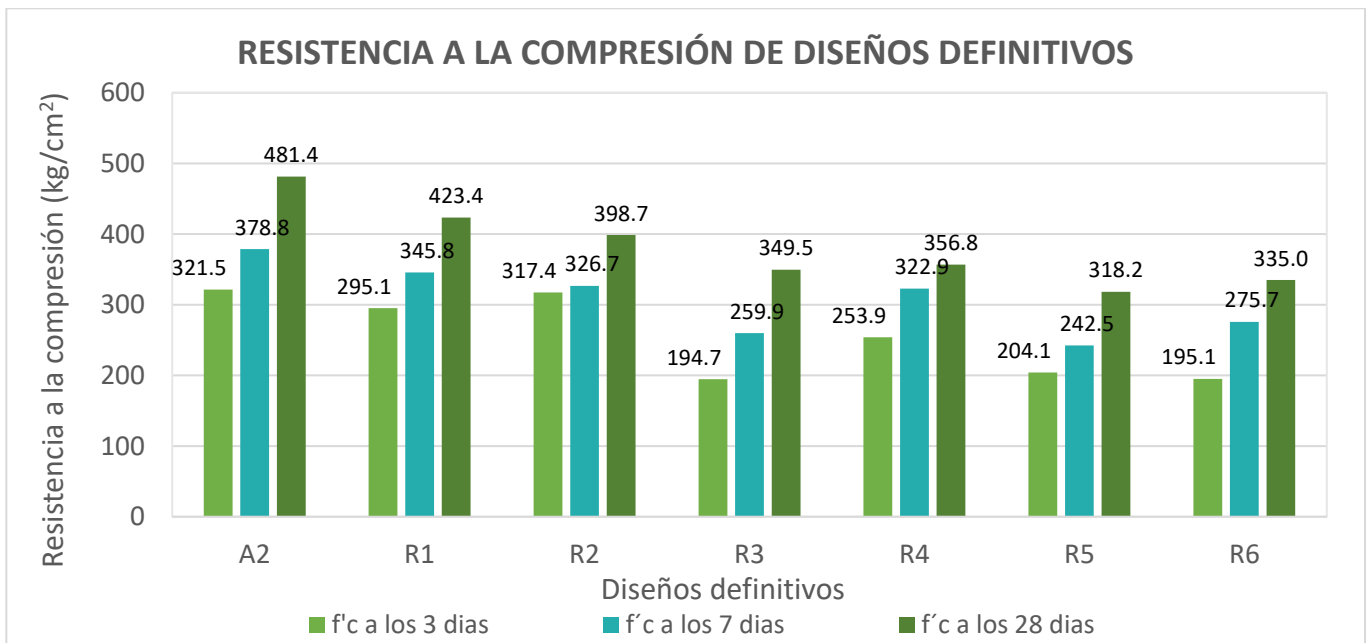
los resultados de la resistencia a la compresión de los diseños de mezcla definitivos se muestran en la tabla 52. El análisis de resultados se realizó de la gráfica de resistencia a la compresión de los ensayos a los 3, 7 y 28 días que se muestra en la figura 64. De la gráfica se observa que la resistencia del diseño de mezcla estándar del concreto aumenta conforme avanza el tiempo, obteniendo los valores de 321.5, 378.8 y 481.4 kg/cm² para los 3, 7 y 28 días respectivamente. Asimismo, para los diseños definitivos se observa que la resistencia a la compresión aumenta conforme pasen los días, teniendo al diseño R1 (5% de reemplazo del agregado natural por ACR) como el diseño con mayor resistencia a la compresión respecto a los demás. El diseño R1 tiene una resistencia a la compresión de 295.1, 345.3 y 481.4 kg/cm² a los 3, 7 y 28 días respectivamente, teniendo una reducción de la resistencia a la compresión del 8.2, 8.7 y 12% respecto al diseño estándar. También, se observa en los diseños definitivos una reducción de la resistencia a la compresión conforme aumenta la cantidad de reemplazo del agregado natural por ACR (diseños R1, R2, R3, R4, R5 y R6). De estos, se tiene al diseño R5 (25% de reemplazo del agregado natural por ACR) como el diseño con mayor reducción con valores de 204.2, 242.5 y 318.2 kg/cm² a los 3, 7 y 28 días respectivamente, teniendo una reducción de la resistencia a la compresión del 36.5, 36 y 34% respecto al diseño estándar.

En la investigación de H. Liu et al. (2022) se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de concretos con diferentes reemplazos de ACR considerando diferentes edades y formas de impresión 3D. Los resultados dieron una tendencia de reducción de la resistencia conforme aumentaba la tasa de reemplazo del ACR y para diferentes direcciones de análisis de las muestras (x;y;z). Para el diseño con un reemplazo del 100% de ACR las resistencias a la compresión estaban entre los 20 y 30 MPa a los 7 días, mientras que a los 28 días estaban entre 35 y 47 MPa. Asimismo, Para el diseño con un reemplazo del 50% de ACR las

resistencias a la compresión estaban entre los 25 y 35 MPa a los 7 días, mientras que a los 28 días estaban entre 35 y 50 MPa. Estos resultados cumplieron con los estándares que manejaba el autor estando dentro de sus rangos aceptables para una mezcla imprimible. Cabe resaltar que la muestras se obtuvieron de concretos impresos (por ello se realizaron los ensayos en diferentes direcciones), donde se consideró la unión de cada capa impresa y las características anisotrópicas que presentan (propiedades que varían según la dirección de análisis). No obstante, en base a fiabilidad que tiene esta investigación, se utilizará los rangos obtenidos de esta para la comparación de resultados para lograr un concreto imprimible.

Figura 64

Resistencia a la Compresión de los Diseños Definitivos



4.4 OBJETIVO 4

4.4.1 Validación de diseños definitivos

Realizado el análisis de resultados de los ensayos definitivos, se procederá a seleccionar los diseños definitivos que cumplan con los requerimientos especificados en el ítem 3.4.1.2. Estos fueron definidos de acuerdo con el comportamiento reológico, específicamente cuales son los rangos que debe tener el esfuerzo de fluencia estática para que un concreto sea imprimible. Para ello, se realizaron las gráficas de esfuerzo de fluencia estática (Pa) vs

tiempo (s) para los ensayos realizados en los tiempos 0, 10, 20 y 30 min y los límites que le corresponde a cada grafica. Esto se muestra en las figuras 65, 66, 67 y 68.

Figura 65

Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=0 Min

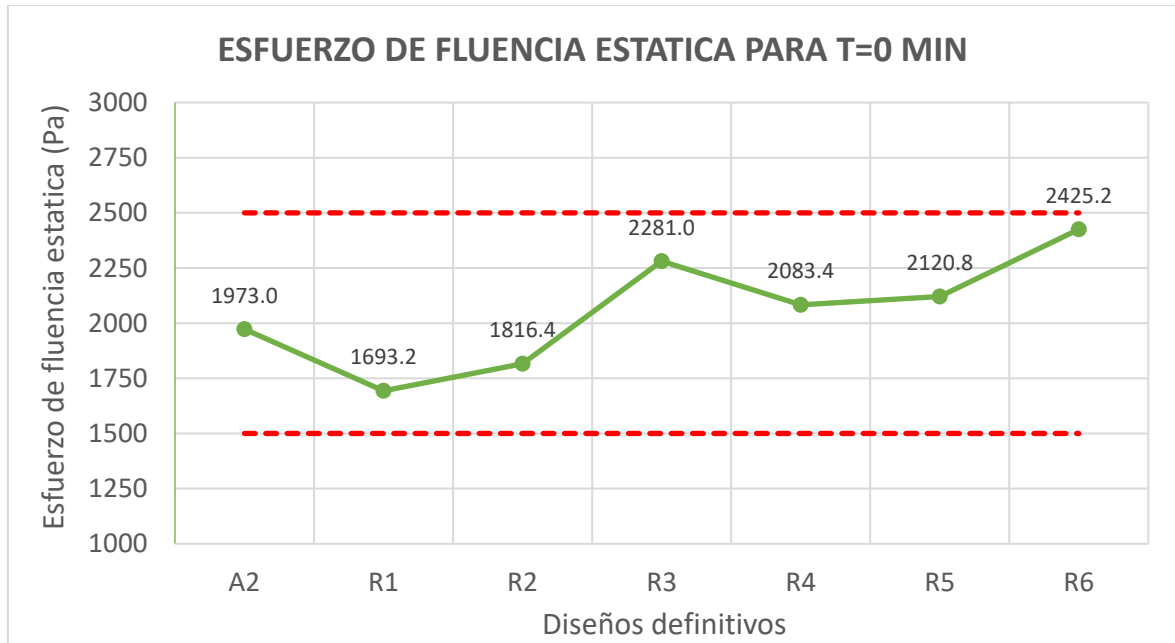


Figura 66

Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=10 Min

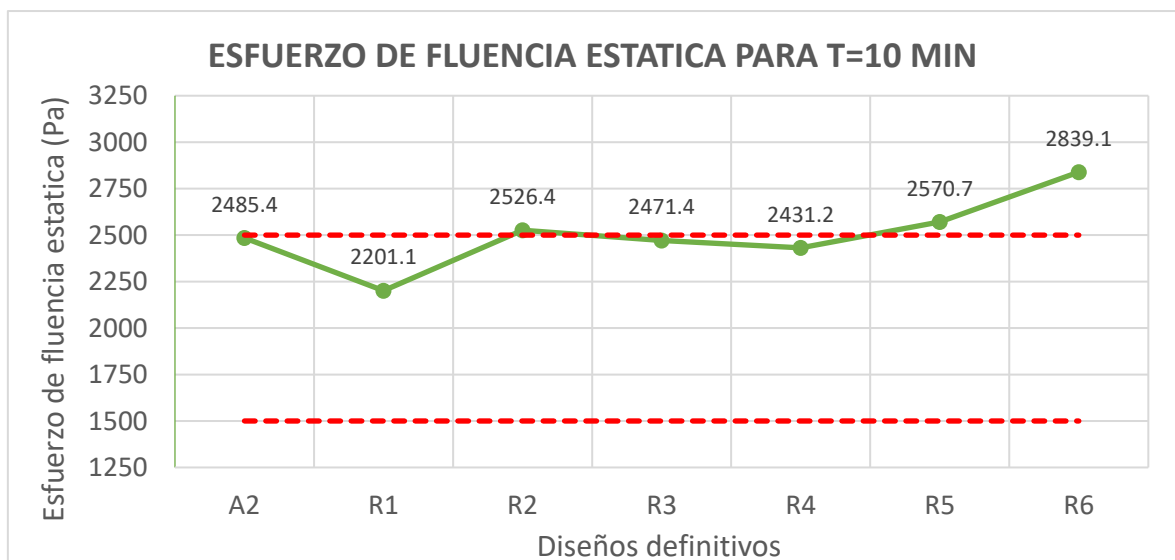


Figura 67

Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=20 Min

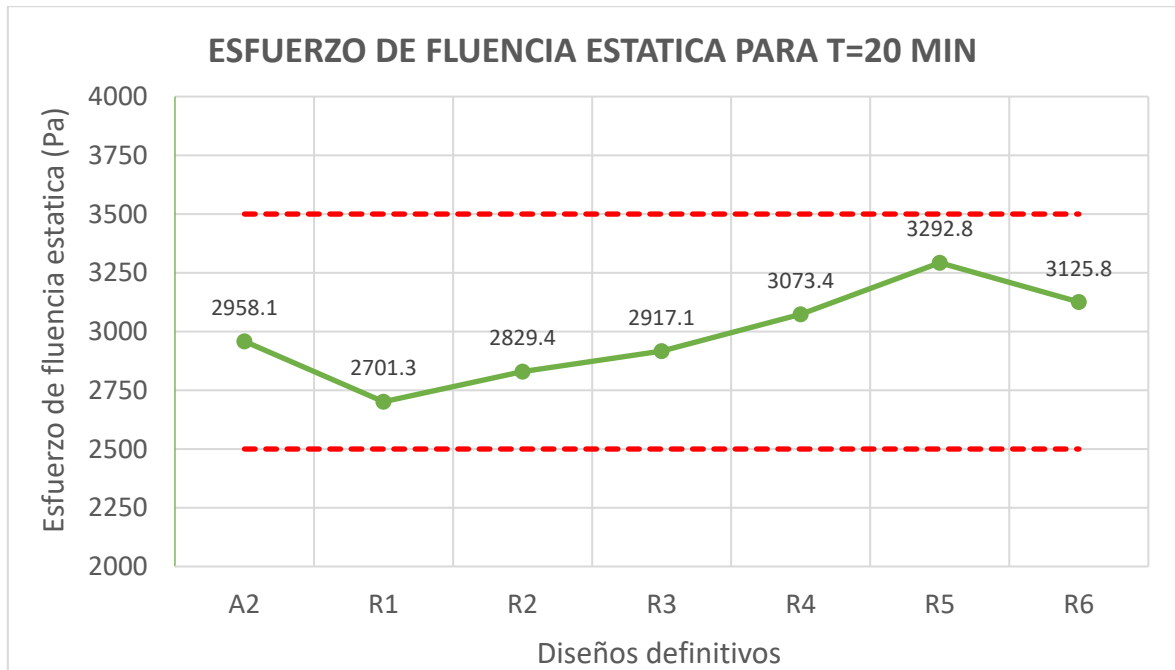
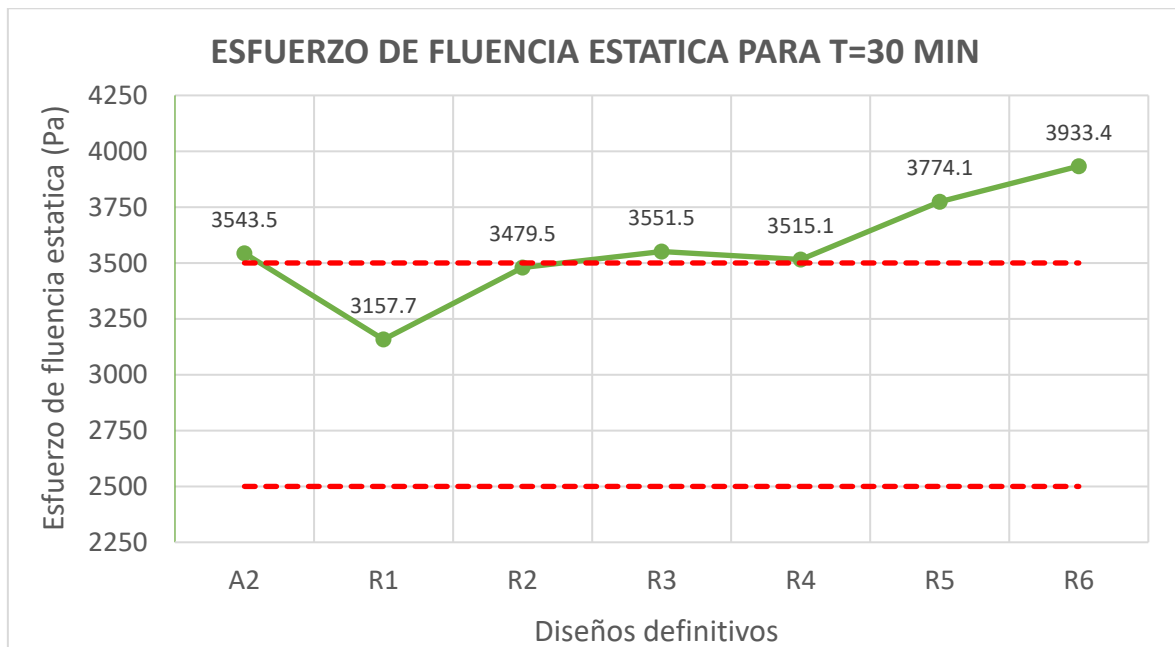


Figura 68

Validación del Esfuerzo de Fluencia Estática Para T=30 Min



De las gráficas se realizó la tabla 54 para validar los resultados mediante las características de imprimibilidad (bombeabilidad, extrusión y edificabilidad) que debe tener un concreto para ser imprimible.

Tabla 54

Validación de Diseños de Mezcla Definitivos

Propiedad	Diseño	Esfuerzo de Fluencia estática (Pa)					
		Min.	Max.	Valor t=0 min	Validación	Valor t=10 min	Validación
Bombeabilidad y extrusión	A2	1500	2500	1973.0	Cumple	2485.4	Cumple
	R1	1500	2500	1693.2	Cumple	2201.1	Cumple
	R2	1500	2500	1816.4	Cumple	2526.4	No cumple
	R3	1500	2500	2281.0	Cumple	2471.4	Cumple
	R4	1500	2500	2083.4	Cumple	2431.2	Cumple
	R5	1500	2500	2120.8	Cumple	2570.7	No cumple
	R6	1500	2500	2425.2	Cumple	2839.1	No cumple
Propiedad	Diseño	Esfuerzo de Fluencia estática (Pa)					
		Min.	Max.	Valor t=20 min	Validación	Valor t=30 min	Validación
Edificabilidad	A2	2500	3500	2958.1	Cumple	3543.5	No cumple
	R1	2500	3500	2701.3	Cumple	3157.7	Cumple
	R2	2500	3500	2829.4	Cumple	3479.5	Cumple
	R3	2500	3500	2917.1	Cumple	3551.5	No cumple
	R4	2500	3500	3073.4	Cumple	3515.1	No cumple
	R5	2500	3500	3292.8	Cumple	3774.1	No cumple
	R6	2500	3500	3125.8	Cumple	3933.4	No cumple

Realizando el análisis de validación de los diseños definitivos podemos encontrar que todos los diseños cumplen con los requisitos para los ensayos realizados en los tiempos 0 y 20 min, mientras que solo los diseños R1, R3 y R4 cumplen con los requisitos para el ensayo realizado a los 10 min. Asimismo, solo los diseños R1 y R2 cumplen con los requisitos del ensayo realizado a los 30 min. En consecuencia, se seleccionarán solo los diseños que cumplan con más de 2 requisitos para que se tenga un rango de aceptabilidad más crítico. De esta manera, los diseños elegibles son el R1, R2, R3 y R4 para realizar análisis comparativo de los diseños de mezcla estándar y definitivos.

4.4.2 Análisis comparativo de los diseños estándar y definitivos

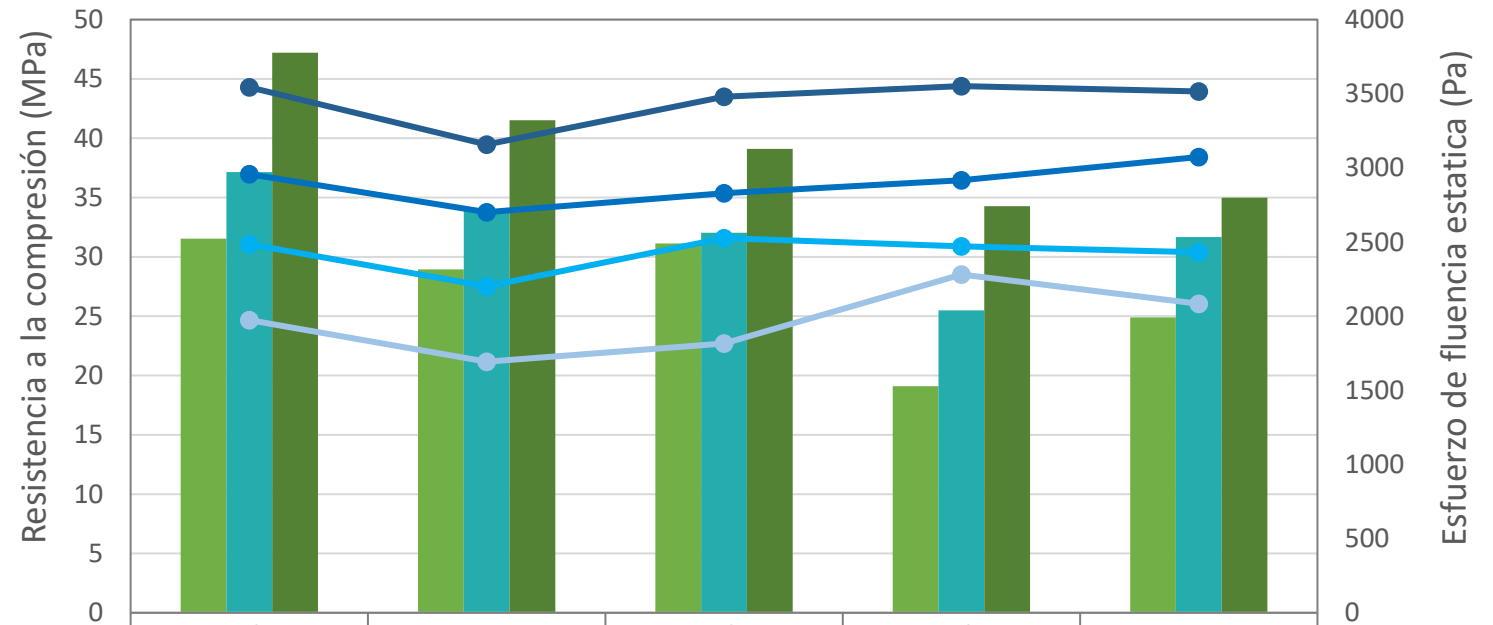
Seleccionado los diseños elegibles para un concreto reciclado con impresión 3D, se procede a realizar un gráfico comparativo de los resultados de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido los cuales son el esfuerzo de fluencia estática y la resistencia a la compresión. Esta grafica fue realizado para el diseño de mezcla estándar y los diseños definitivos elegibles que se puede observar en la figura 69.

Respecto al esfuerzo de influencia estática, comenzaremos con el análisis comparativo de los resultados obtenidos para los requisitos de bombeabilidad y extrusión. El diseño A2 (diseño estándar) obtuvo un esfuerzo de fluencia estática de 1973 Pa para el ensayo a los 0 min, y realizando la comparación con los diseños definitivos se tiene al diseño R4 con un esfuerzo de fluencia estática de 2083.4 Pa como el valor más cercano con una dispersión de 5.6% del diseño estándar. Asimismo, se tiene al diseño R1 con un esfuerzo de fluencia estática de 1693.2 Pa con una dispersión de 14.2% del diseño estándar, como el más lejano.

También, de la figura 69 se observa que el diseño estándar tiene un esfuerzo de fluencia estática de 2485.4 Pa para el ensayo a los 10 min. Realizando el análisis comparativo se tiene al diseño R3 con un esfuerzo de fluencia estática de 2471.4 Pa como el valor más cercano al diseño estándar con una dispersión de 0.6%. Asimismo, se tiene al diseño R1 con un esfuerzo de fluencia estática de 1693.2 Pa con una dispersión de 14.2% del diseño estándar, como el más lejano.

Figura 69

Grafica Comparativa de Diseños Elegibles Para el Concreto Reciclado impreso en 3D



■ Resistencia a la compresión (MPa) a los 3 días	31.5	28.9	31.1	19.1	24.9
■ Resistencia a la compresión (MPa) a los 7 días	37.1	33.9	32.0	25.5	31.7
■ Resistencia a la compresión (MPa) a los 28 días	47.2	41.5	39.1	34.3	35.0
—● Esfuerzo de Fluencia estatica (Pa) T=0 min	1973.0	1693.2	1816.4	2281.0	2083.4
—● Esfuerzo de Fluencia estatica (Pa) T=10 min	2485.4	2201.1	2526.4	2471.4	2431.2
—● Esfuerzo de Fluencia estatica (Pa) T=20 min	2958.1	2701.3	2829.4	2917.1	3073.4
—● Esfuerzo de Fluencia estatica (Pa) T=30 min	3543.5	3157.7	3479.5	3551.5	3515.1

Respecto a la edificabilidad del concreto impreso en 3D, se tiene a los resultados obtenidos de los ensayos en los tiempos de 20 y 30 min. Para el ensayo realizado a los 20 min el diseño estándar obtuvo un esfuerzo de fluencia estática de 2958.1 Pa y se encontró al diseño R3 con un esfuerzo de fluencia estática de 2917.1 Pa como el valor más cercano con una dispersión de 1.4%. Asimismo, se tiene al diseño R1 con un esfuerzo de fluencia estática de 2701.3 Pa con una dispersión de 8.7% como el valor más lejano al estándar. Además, para el ensayo realizado a los 30 min el diseño estándar obtuvo un esfuerzo de fluencia estática de 3543.5 Pa y se encontró al diseño R4 con un esfuerzo de fluencia estática de 3515.1 Pa como el valor más cercano con una dispersión de 0.8 %, y se tiene al diseño R1 con un esfuerzo de fluencia estática de 3157.7 Pa con una dispersión de 8.7% como el valor más lejano al estándar.

En cuanto a la propiedad del concreto en estado endurecido, tiene a los resultados de la resistencia a la compresión. El diseño estándar obtuvo una resistencia máxima de 47.2 MPa a los 28 días teniendo al diseño R1 con el valor más cercano con una resistencia a la compresión de 41.5 MPa y una dispersión del 12 %. Asimismo, se tiene al diseño R3 con una resistencia de 34.5 MPa como el valor más lejano con una dispersión de 27.4 %. También, el diseño estándar obtuvo una resistencia a la compresión de 31.5 MPa a los 3 días y se encontró que el diseño R2 con una resistencia a la compresión de 31.1 MPa era el valor más cercano al estándar con una dispersión de 1.3 %, y el diseño R3 con una resistencia a la compresión de 19.1 MPa como el valor más lejano al estándar con una dispersión de 39.4%.

En conclusión, respecto al comportamiento reológico del concreto en estado fresco se tiene a los diseños R3 Y R4 con los valores de esfuerzo de fluencia estática más cercanos al diseño de mezcla estándar, por ende, son los diseños que más aceptabilidad pueden tener para cumplir los requisitos de un concreto imprimible. Por otro lado, respecto a la resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido, se tiene a los diseños R1 y R2 como los valores más cercanos al diseño de mezcla estándar. No obstante, se puede mencionar que todos los diseños cumplen con una resistencia a la compresión mínima de 17 MPa para un concreto estructural, según lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE E.060) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [VIVIENDA], 2009).

4.4.3 Selección del diseño de mezcla óptimo

Del análisis comparativo de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido de los diseños definitivos se puede seleccionar el diseño óptimo en base a los requerimientos que fueron planteados anteriormente para producir un concreto impreso en 3D. En primer lugar, tenemos el comportamiento reológico medido mediante el indicador de esfuerzo de fluencia estática, donde se tiene a los diseños R3 y R4 como los que más se asemejan al diseño de mezcla estándar. Asimismo, se puede observar en la figura 69 que estos diseños presentan un comportamiento reológico similar cumpliendo en los rangos de los ensayos elaborados en los tiempos de 0, 10 y 20 min, no cumpliendo en ambos casos con los rangos planteados para el ensayo realizado a los 30 min. No obstante, se podría decir que el diseño R4 como el que está más cercano al límite superior de 3500 Pa con solo una dispersión del 0.4 %, siendo este el diseño que más se acerca a los requerimientos establecidos para cumplir con el comportamiento reológico de un concreto impreso en 3D.

En segundo lugar, tenemos a la resistencia a la compresión de los diseños definitivos, donde se obtuvo que los diseños R1 Y R2 son los que se acercaban más a los resultados del diseño estándar. No obstante, para poder determinar cuál es resistencia a la compresión adecuada que necesitaría un concreto imprimible se usaran los rangos planteados en la investigación de H. Liu et al. (2022) que establece los rangos de resistencia a la compresión de 25 a 35 MPa a los 7 días, y los rangos de resistencia a la compresión de 35 a 50 MPa a los 28 días para un concreto impreso con reemplazo de agregados naturales por ACR hasta en un 50%. Por lo cual, de la figura 69 se determina que todos los diseños elegibles están dentro de rango de una resistencia a la compresión aceptable para producir un concreto imprimible.

En conclusión, realizado la evaluación de las propiedades analizadas en esta investigación se puede determinar al diseño R4 (20% de reemplazo de agregado natural por ACR) como el diseño óptimo como el que se más se asemeja al diseño de mezcla estándar y con el que cumple en la mayoría de los requerimientos planteados para que se puede producir un concreto imprimible de forma exitosa. Este diseño servirá para analizar cuanto se reduciría la generación de RCD's si se aplicara la propuesta.

4.5 OBJETIVO 5

4.5.1 Análisis de reducción de RCD para una obra de construcción en Lima metropolitana

Para el análisis de reducción de RCD's usando el diseño de mezcla óptimo para un concreto reciclado impreso en 3D, se usará el caso de estudio especificado en el ítem 3.7.1 que describe una obra de construcción de la edificación multifamiliar "Andrés" ubicado en el distrito de chorrillos con una superficie construida de 4250 m². Para determinar la cantidad de RCD generado por superficie construida, se usará la guía de ratios nacionales de generación de residuos de construcción y demolición del CGATE y el CSCAE especificado en el ítem 1.1.5. El cálculo de la cantidad de RCD generado para el caso de la obra de construcción se muestra en la tabla 55.

Tabla 55

Cantidad de RCD Para el Caso de una Obra de Construcción en Lima Metropolitana

Uso	Superficie construida (m ²)	Ratio peso (Tn/m ²)	Peso (Tn)	Ratio volumen (m ³ /m ²)	Volumen (m ³)
Edificación multifamiliar	4250	0.134	569.5	0.110	467.5

De la tabla 55 se puede observar que para el caso de estudio de la edificación multifamiliar "Andrés" se obtuvo una cantidad de RCD de 569.5 Tn en peso o 467.5 m³ en volumen. Determinada la cantidad de RCD generado para una obra de construcción en Lima metropolitana, se usa guía de ratios nacionales de generación de residuos de construcción y demolición del CGATE y el CSCAE para cuantificar la cantidad de materiales que se generan en esta obra. De esta manera, obtener la cantidad de residuos de concreto que se podrían generar en esta obra. En la tabla 56 se muestra la cuantificación de los RCD's que se generaran en esta obra de construcción.

Tabla 56

Cuantificación de RCD's Generados en Tn para una Obra de Construcción en Lima Metropolitana

Código LER	Tipos de RCD	Porcentaje peso (%)	Peso (Tn)
1. Naturaleza pétreo			
17 01 01	Concreto	13.46	76.7
17 01 03	Tejas y Materiales Cerámicos	53.84	306.6
01 04 08	Residuos de grava y rocas trituradas	4.49	25.6
17 09 04	RCD's mezclados distintos de los códigos 17 09 01, 02 y 03	8.10	46.1
2. Naturaleza no pétreo			
17 03 02	Mezclas Bituminosas distintas a las del código 17 03 01	3.74	21.3
17 02 01	Madera	1.79	10.2
17 04 07	Metales mezclados	2.8	15.9
20 01 01	Papel	1.26	7.2
17 02 03	Plástico	0.84	4.8
17 02 02	Vidrio	3.05	17.4
17 08 02	Materiales de Construcción a partir de Yeso distintos de los 17 08 01	1.12	6.4
3. Potencialmente peligrosos y otros			
20 03 01	Mezclas de residuos municipales	4.01	22.8
17 09 03	Otros residuos de construcción y demolición que contienen SP's	1.50	8.5

De la tabla 56 se determinó que para el caso de estudio de una obra de construcción en Lima metropolitana se genera 76.7 Tn de residuos de concreto, esto equivale al 13.46 % de RCD's generados en este caso de estudio. Finalmente, se determinará la cantidad de concreto reciclado se debe producir para reducir el total de residuos de concreto generado en esta obra de construcción. Para ello, se usará un porcentaje de reciclabilidad del 97 % determinado en la investigación de Bazán (2018) para RCD's generados en Lima metropolitana. El cálculo de la cantidad de concreto que se debe producir para reducir todo el residuo de concreto generado en la obra de construcción se especifica en la tabla 57.

Tabla 57

Cantidad de Concreto Reciclado en m³ Para Reducir los Residuos de Concreto en una Obra de Construcción en Lima Metropolitana

Residuos de concreto (Tn)	Porcentaje de reciclabilidad (%)	ACR Total (Tn)	ACR por m³ de concreto reciclado (Tn)	Concreto reciclado Total (m³)
76.7	97	74.4	0.24	304

De la tabla 57 se puede determinar que para reducir el 13.46 % (residuos de concreto) de RCD de una obra de construcción se necesitaría producir 304 m³ de concreto reciclado propuesto.

4.5.2 Análisis de reducción de RCD para una obra de demolición en Lima metropolitana

Para el análisis de reducción de RCD's usando el diseño de mezcla óptimo para un concreto reciclado impreso en 3D, se usará el caso de estudio especificado en el ítem 3.7.2 que describe una obra de demolición del edificio "MAPFRE" ubicado en el distrito de Miraflores con una superficie construida de 2077 m². Para determinar la cantidad de RCD generado por superficie construida, se usará la guía de ratios nacionales de generación de residuos de construcción y demolición del CGATE y el CSCAE especificado en el ítem 1.1.5. El cálculo de la cantidad de RCD generado para el caso de la obra de demolición se muestra en la tabla 58.

Tabla 58

Cantidad de RCD para el Caso de una Obra de Demolición en Lima Metropolitana

Uso	Superficie construida (m²)	Ratio peso (Tn/m²)	Peso (Tn)	Ratio volumen (m³/m²)	Volumen (m³)
Edificación comercial	2077	0.665	1381.2	0.811	1684.4

De la tabla 58 se puede observar que para el caso de estudio del edificio “MAPFRE” se obtuvo una cantidad de RCD de 1381.2 Tn en peso o 1684.4 m³ en volumen. Determinada la cantidad de RCD generado para una obra de demolición en Lima metropolitana, se usa guía de ratios nacionales de generación de residuos de construcción y demolición del CGATE y el CSCAE para cuantificar la cantidad de materiales que se generan en esta demolición. De esta manera, obtener la cantidad de residuos de concreto. En la tabla 59 se muestra la cuantificación de los RCD’s que se generaran en esta obra de demolición.

Tabla 59

Cuantificación de RCD’s Generados en Tn Para una Obra de Demolición en Lima Metropolitana

Código LER	Tipos de RCD	Porcentaje peso (%)	Peso (Tn)
1. Naturaleza pétreo			
17 01 01	Concreto	28.47	393.2
17 01 07	Mezcla de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	59.31	819.2
17 09 04	RCD’s mezclados distintos de los códigos 17 09 01, 02 y 03	5.40	74.6
2. Naturaleza no pétreo			
17 02 01	Madera	5.23	72.2
17 04 07	Metales mezclados	1.10	15.2
20 01 01	Papel	0.16	2.2
17 02 02	Vidrio	0.15	2.1
3. Potencialmente peligrosos y otros			
20 03 01	Mezclas de residuos municipales	0.10	1.4
17 09 03	Otros residuos de construcción y demolición que contienen SP’s	0.08	1.1

De la tabla 59 se determinó que para el caso de estudio de una obra de demolición en Lima metropolitana se genera 393.2 Tn de residuos de concreto, esto equivale al 28.47 % del total de RCD generado en este caso de estudio. Finalmente, se determinará la cantidad de concreto reciclado que se debe producir para reducir el total de residuos de concreto generado en esta obra de demolición. Para ello, se usará un porcentaje de reciclabilidad del 97 % determinado en la investigación de Bazán (2018) para RCD's generados en Lima metropolitana. El cálculo de la cantidad de concreto que se debe producir para reducir todo el residuo de concreto generado en la obra de construcción se especifica en la tabla

Tabla 60

Cantidad de Concreto Reciclado en m³ para Reducir los Residuos de Concreto en una Obra de Demolición en Lima Metropolitana

Residuos de concreto (Tn)	Porcentaje de reciclabilidad (%)	ACR Total (Tn)	ACR por m³ de concreto reciclado (Tn)	Concreto reciclado Total (m³)
393.2	97%	381.4	0.24	1561

De la tabla 60 se puede determinar que para reducir el 28.47 % (residuos de concreto) de RCD de una obra de demolición se necesitaría producir 1561 m³ de concreto reciclado propuesto.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En este capítulo abordará las conclusiones que se pueden obtener de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación, clasificado por cada objetivo específico planteado.

OBJETIVO 1:

- Según la investigación realizada a los agregados naturales y reciclados, se concluye que esto si tiene un efecto significativo en las propiedades del concreto. Estos se deben controlar mediante parámetros que relaciones los efectos de las características de los agregados en el concreto.
- Respecto a las propiedades mecánicas evaluadas a los ACR, se pudo verificar que los ACR presentan un mayor peso unitario suelto y compactado. Esto puede ser debido a que ACR presento un menor tamaño de partículas ocupando un mayor volumen en el recipiente de ensayo. Por otro lado, se obtuvo un menor peso específico en comparación que el agregado natural, esto puede ser debido a que el mortero adherido de los ACR presente una menor densidad que el agregado natural. Finalmente, se obtuvo una absorción del ACR relativamente alto de un 8.45 %, estos son debido al mortero adherido y a las partículas finas que posee producto de la trituración que se realizó. Esto genera tiene una gran significancia en la mezcla de concreto, pues esto quiere decir que el agregado presenta una mayor porosidad reteniendo más agua que el agregado natural.

OBJETIVO 2:

- En este objetivo se desarrollaron 5 diseños de mezcla preliminares donde se varió el aditivo superplastificante en un 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2% del cemento, donde se analizó el comportamiento reológico mediante el esfuerzo de fluencia estática. En el cual, se obtuvo al diseño A2 (0.75% de superplastificante) como el diseño de mezcla estándar para un concreto impreso en 3D.
- También, de los diseños preliminares se concluye que conforme aumento la variación del aditivo superplastificante, disminuyo el esfuerzo de fluencia estática del concreto.

Esto puede ser debido que al aumentar el aditivo superplastificante aumenta la fluidez del concreto generando una pérdida del esfuerzo de fluencia estática.

OBJETIVO 3:

- Para este objetivo se desarrollaron 6 diseños de mezcla con las tasas de sustitución del 5, 10, 15, 20, 25 y 30% agregados naturales por ACR (diseños definitivos), teniendo como base el diseño de mezcla estándar, en el cual se evaluaron propiedades del concreto en estado fresco y endurecido para obtener el diseño óptimo para producir un concreto reciclado con impresión 3D.
- Respecto al concreto en estado fresco se evaluó el comportamiento reológico mediante el esfuerzo de fluencia estática, en el cual se concluye que conforme aumenta la tasa de reemplazo de agregados naturales por ACR, aumenta el esfuerzo de fluencia estática. Esto se puede atribuir que los ACR presentan una mayor rugosidad y absorción que los agregados naturales.
- Respecto al concreto en estado endurecido se evaluó la resistencia a la compresión, donde se concluye que conforme aumenta la tasa de reemplazo de agregados naturales por ACR, disminuye la resistencia a la compresión del concreto reciclado. esto puede atribuirse que los ACR presentan una menor durabilidad, debido al mortero viejo adherido que presentan, en comparación con los agregados naturales.
- También, se pudo concluir que el uso del humo de sílice como adición del cemento ayudo a mejorar el proceso de floculación de la pasta cementante aumentando la resistencia a la compresión de los diseños hasta un valor de 47 MPa. Asimismo, se determinado que esta adición es muy influyente para producir concreto impreso en 3D, debido al aumento de la resistencia inicial para mejorar su edificabilidad.

OBJETIVO 4:

- Acerca del comportamiento reológico se evaluó los 6 diseños de mezcla definitivos según los requerimientos planteados para lograr las propiedades de bombeabilidad, extrusión y edificabilidad que se tiene que cumplir para producir un concreto impreso exitosamente. Estos requerimientos se establecieron mediante los rangos de esfuerzo

de fluencia estática de 1500 a 2500 Pa para ensayos realizados a los 0 y 10 min, mientras que para los ensayos realizados a los 20 y 30 min se establecieron los rangos de 2500 a 3500 Pa. De esta manera, se concluyó que los diseños R1, R2, R3 y R4 cumplían en más de 2 ensayos de diferentes tiempos realizados.

- Sobre la resistencia a la compresión se establecieron los requerimientos en rangos de resistencia a la compresión de 25 a 35 MPa a la edad de 7 días, mientras que a la edad de 28 días se establecieron los rangos de 35 a 50 MPa. En consecuencia, se concluyó que todos los diseños elegibles (R1, R2, R3 y R4) cumplían con estas condiciones para producir un concreto impreso en 3D, en base a su resistencia a la compresión.
- En este objetivo se realizó el análisis comparativo de los diseños, concluyendo que los diseños R3 (15% de agregado natural por ACR) y R4 (20% de agregado natural por ACR) fueron los diseños que se asemejan al mismo comportamiento reológico que presenta al diseño de mezcla estándar. Asimismo, se determinó que los diseños R1 (5% de agregado natural por ACR) y R2 (10% de agregado natural por ACR) presentan mayor similitud en la resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido.
- Finalmente, en base a los requerimientos planteados para lograr que las propiedades del concreto en estado fresco (comportamiento reológico) y estado endurecido (resistencia a la compresión) cumplan con las condiciones de bombeabilidad, extrusión y edificabilidad que requiere un concreto para sea impreso en 3D satisfactoriamente. Se determinó al diseño R4 (20% de agregado natural por ACR) como el diseño óptimo que presenta las condiciones para producir un concreto reciclado mediante la impresión 3D, concluyendo con la aceptación de la hipótesis planteada para esta investigación.

OBJETIVO 5:

- En este objetivo se plantearon los casos de estudio de un proyecto de construcción y demolición en Lima metropolitana, para el cual se halló la cantidad de RCD que generaban por cada proyecto mediante el uso de ratios de superficie construida por

toneladas de RCD generado. De esta manera, se puede cuantificar los RCD's que se generaban en cada caso de estudio. En el cual, para el proyecto de construcción se obtuvo una cantidad de RCD de 569.3 Tn, mientras que para el proyecto de demolición se obtuvo una cantidad de RCD de 1381.2 Tn.

- Mediante el análisis cuantificación de RCD's se determinó que los residuos de concreto componían un 13.46% y 28.47% de la cantidad en toneladas de RCD's generados por el proyecto de construcción y demolición respectivamente. De manera, que se determinó que para reducir esas cantidades de RCD se necesitaría producir 304 m³ y 1531 m³ de concreto reciclado para los proyectos de construcción y demolición respectivamente. Concluyendo que el uso del concreto reciclado propuesto si aportara en la reducción de los RCD's que se generan en Lima metropolitana.
- Finalmente, se concluye que, mediante las técnicas, metodologías y ensayos realizados, se pudo obtener un diseño óptimo para la producción de un concreto reciclado con impresión 3D y su producción aportará a la reducción de RCD's que se generan en Lima metropolitana, siendo esta una alternativa sostenible que se necesitará promulgar mediante leyes y normativas para un uso a escala industrial. esta alternativa renovable ayudará a depender de los recursos naturales, así como mejorar la calidad en el proceso constructivo de un concreto, debido al uso de la impresión 3D.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron diversos ensayos para medir las propiedades que tiene la producción de un nuevo concreto reciclado con impresión 3D con la finalidad de fomentar la sostenibilidad en el sector de la construcción. Para ello se planteó el uso de diseños preliminares y definitivos con una tasa de sustitución de agregados naturales por ACR. El uso de cada técnica, metodología y ensayos nos llevó a tomar ciertos criterios durante cada avance de la tesis, generando diversas pautas para seguir con esta línea de investigación que se mencionaran a continuación, clasificado de acuerdo con cada objetivo específico.

OBJETIVO 1:

- Como primer punto, se recomienda en optar por una correcta elección de los materiales que compondrán el concreto para realizar los ensayos. Verificando que los distribuidores garanticen los estándares de calidad según la normativa existente, de esta manera, se tendrá contemplado los efectos que tendrán estos materiales en los ensayos del concreto y no modificar los resultados que se obtendrán.
- Respecto al agregado reciclado de concreto (ACR) se recomienda tener en cuenta el origen y producción de estos agregados, debido que dependiendo de estos factores pueden presentar diferentes propiedades mecánicas. Asimismo, se debe tener en cuenta la función y tiempo que tuvo estos agregados en las estructuras que pertenecieron (concreto viejo), de forma que se pueda tener una correlación y poder caracterizarlos para su producción en escala industrial. Además, durante la realización de esta investigación se comprendió que se debe seleccionar agregados de elementos estructurales con una alta resistencia a la compresión pues esto influye directamente con sus propiedades mecánicas.

OBJETIVO 2:

- Respecto al ensayo del reómetro rotacional, se recomienda realizar las mezclas de concreto para cada muestra con una mezcladora manual y para un diseño en peso

mayor a 5 kg. Debido que para este ensayo se necesitara una mezcla bien distribuida en todo el recipiente de ensayo. Asimismo, se debe tener en cuenta el tipo de impresora, específicamente el ancho de la boquilla y el sistema de bombeo. Pues, estos datos servirán para determinar los datos de entrada que necesita el reómetro rotacional y simular el comportamiento reológico del concreto con la impresora 3D que se quiera investigar. Estos datos de entrada del reómetro rotación son el diámetro de la paleta que hara el cizallamiento y la velocidad de corte rotacional.

OBJETIVO 3:

- Para realizar las mezclas de concreto con ACR, se recomienda tener evaluada la absorción de este agregado, para poder tener controlada la dosificación de agua para cada diseño. Esto es debido a que los ACR presentan altas tasas de absorción que pueden afectar en al diseño propuesto. Por ello, es se debe tener en cuenta agregar los ACR al final de la mezcla o alternativas como aditivos reductores de agua, retardadores, etc.
- Respecto a la impresión 3D, esta al ser un sistema constructivo basado en la extrusión de capas de concreto uno encima del otro, es recomendable verificar estas características mediante el uso de una impresora 3D para que se puede obtener una correlación con los resultados obtenidos del comportamiento reológico del concreto reciclado. Además, con esta impresora se puede realizar muestras cubicas de concreto endurecidas para que se puedan realizar ensayos de resistencia a la compresión en diferentes direcciones de análisis y determinar las características anisotrópicas que presente un concreto con ACR. Asimismo, con el uso de muestras obtenidas de una impresora 3D se puede evaluar el comportamiento endurecido del concreto respecto a la altura de impresión y unión de capas. Estas características ayudaran a determinar un mejor uso del concreto reciclado para el sistema de impresión 3D.

OBJETIVO 4:

- Para tener un mayor control de las propiedades del concreto en estado fresco, se recomienda realizar otros ensayos para medir la fluidez y resistencia inicial que son de suma importancia para garantizar la bombeabilidad y extrusión del concreto impreso en 3D. De esta manera, tener correlacionadas estas propiedades y estimar diversos diseños óptimos con ACR según el sistema constructivo y la función que se le puede dar a este concreto reciclado.
- También, se recomienda evaluar otras propiedades del concreto reciclado en estado endurecido como la durabilidad, resistencia a la flexión y a la tracción. Esto para tener una mayor consideración para este concreto reciclado pueda tener una función estructural en un sistema constructivo. Cabe recalcar, que la obtención de los resultados propiedades sería mejor realizarlas de ensayos realizados a muestras de concreto realizado por una impresora 3D.

OBJETIVO 5:

- Para estimar la reducción de RCD en Lima metropolitana mediante el uso de ACR se recomienda tomar diversos casos de estudio y mediante un análisis estadístico se pueda caracterizar los tipos de edificaciones y sistemas constructivos que existen en Lima metropolitana. Asimismo, esto se pueda clasificar por proyectos de construcción y demolición y obtener mayor precisión al momento de obtener los porcentajes de ACR que corresponde a los RCD que se generan en Lima metropolitana.
- Finalmente, se recomienda seguir líneas de investigación que promulguen la sostenibilidad en el sector de la construcción mediante la impresión 3D de concreto, debido a que es un sistema constructivo que presentan muchos beneficios para el sector. Dentro de esta línea de investigación, se puede revisar el uso de otros agregados reciclados como los provenientes de residuos de ladrillos, cerámicos, mixtos entre otros. Asimismo, se puede profundizar el uso de agregados gruesos reciclados dentro de impresión 3D, que es una alternativa que ya viene siendo usada en diversos proyectos de impresión 3D de concreto.

REFERENCIAS

- Agudelo, M., & Rodríguez, J. P. (2014, junio). *Estimación de generación y composición de residuos de construcción en la ciudad de Villavicencio* [Sesión de congreso]. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Tunja, Colombia. https://www.researchgate.net/publication/324686282_ESTIMACION_DE_GENERACION_Y_COMPOSICION_DE_RESIDUOS_DE_CONSTRUCCION_EN_LA_CIUDAD_DE_VILLAVICENCIO
- Ahmed, S., El-Zohairy, A., Eisa, A. S., Mohamed, M. A. E. A. B., & Abdo, A. (2023). Experimental Investigation of Self-Compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregate. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 856, 13(4), 856. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13040856>
- American Concrete Intitute. (2001). *Guía para la durabilidad el hormigón*. (Norma ACI 201.2R-01). <https://www.inti.gov.ar/publicaciones/descargac/2>
- American Society for Testing and Materials International. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. (Norma ASTM C33). <https://www.astm.org/c0033-03.html>.
- American Society for Testing and Materials International. (2015a). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. (Norma ASTM F2792-12a). <https://www.astm.org/f2792-12a.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2015b). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. (Norma ASTM C1437-15). <https://www.astm.org/c1437-15.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2016). *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. (Norma ASTM C29/C29M-16). https://www.astm.org/c0029_c0029m-16.html

- American Society for Testing and Materials International. (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. (Norma ASTM C39/C39M-17). https://www.astm.org/c0039_c0039m-17.html
- American Society for Testing and Materials International. (2019a). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. (Norma ASTM D4791-19). <https://www.astm.org/d4791-19r23.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2019b). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. (Norma ASTM C136/C136M-19). https://www.astm.org/c0136_c0136m-19.html
- American Society for Testing and Materials International. (2019c). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. (Norma ASTM C566-19). <https://www.astm.org/c0566-19.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2020a). *Standard Specification for Portland Cement*. (Norma ASTM C150/C150M). https://www.astm.org/c0150_c0150m-20.html
- American Society for Testing and Materials International. (2020b). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. (Norma ASTM C1240). <https://www.astm.org/c1240-20.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2021). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. (Norma ASTM C31/C31M-21). https://www.astm.org/c0031_c0031m-21.html
- American Society for Testing and Materials International. (2022). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. (Norma ASTM C128-22). <https://www.astm.org/c0128-22.html>
- American Society for Testing and Materials International. (2024). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. (Norma ASTM C494/C494M). https://www.astm.org/c0494_c0494m-24.html

- American Society for Testing and Materials International & Society of Manufacturing Engineers. (2009). *Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies*. ASTM International. <https://www.astm.org/committee-f42>.
- Arce, L. A., & Tapia, E. L. I. (2014). *Planteamiento de un manual para la gestión de los residuos de construcción y demolición en edificaciones urbanas* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio Institucional USMP. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/1161>
- Association de la Normalisation et de l'Environnement. (2003). *PTV 406: Granulats de débris de démolition et de construction recyclés* (Édition 1.1, 24-11-2002). Bruxelles, Belgique.
- Arredondo, S. P. (2011). *Estudio microestructural de concretos sustentables aplicando técnicas avanzadas* [Tesis doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. Repositorio CIMAV. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/774>
- Bazán, L. A. (2018). *Caracterización de residuos de construcción de lima y callao (estudio de caso)* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>
- Blanca, V., Castilla, N., Cortés, J. M., Martínez, A., & Pastor, R. M. (2010). *Cálculo de residuos* [Artículo docente, Universitat Politècnica de València]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura - Escola Tècnica Superior d'Arquitectura. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/7557>
- British Standards Institution. (2006). *BS 8500-2:2006: Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete*. <https://www.bsigroup.com/>
- Building Research Establishment. (1998). *Digest 433. Recycled Aggregates* [PDF]. <https://www.cpda.co.uk/wp-content/uploads/2015/03/BRE-Digest-433.pdf>
- Cajas Ecológicas S.A.C. (2022). *Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición* [PDF]. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS).

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3423941/Presentacio%CC%81n%20Residuos%20Construccio%CC%81n%20-%20Renzo%20Avalo/MVCS.pdf>

Cámara Peruana de la Construcción. (2017). Informe económico de la construcción. Lima: Comité.

Carbajal, M. A. (2018). *Situación de la gestión y manejo de los residuos sólidos de las actividades de construcción civil del sector vivienda en la ciudad de Lima y Callao* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3215>

Cárdenas, W. H., & Hernández, J. G. (2014). *Caracterización de los agregados de concreto reciclado: Propiedades técnicas y uso* [Tesis de licenciatura, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. Repositorio Institucional UNIMINUTO. <https://repository.uniminuto.edu/items/b2aa53a3-52c2-4308-abdd-8629c7069713>

Carrasco, R. B. (2018). *Aplicación del uso de los residuos de construcción para la fabricación de bloques de hormigón en la ciudad de Riobamba, análisis de costo e impacto ambiental* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio PUCE. <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c30ffc79-5170-49d9-8292-9677ad088716/content>

Castaño, J. O. (2009). *FLUENCIA Y RETRACCIÓN DE HORMIGÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS - Influencia del Contenido de Áridos Reciclados en las Deformaciones Diferidas del Hormigón estructural* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/12902>

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2010). *RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN* [PDF]. Ministerio de Medio Ambiente. https://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCION Y DEMOLICIONNOV2014.pdf

- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*, 25(1), 69-80. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.06.055>
- Chan, J. L., Solís, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39-46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770203>
- COBOD International. (s.f.). *3D construction print configurator*. COBOD. Recuperado el 5 de mayo de 2024, de <https://cobod.com/3d-construction-print-configurator/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2016). *La gestión de los residuos de construcción y demolición en América Latina y el Caribe*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39834/S1600796_es.pdf
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2010, noviembre). *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile* (Reporte N°1). http://www.hidronor.cl/pdf/1_Primer_Reporte_del_Manejo_de_Residuos_S%C3%B3lidos_en_Chile_Conama_2010.pdf
- Comité Brasileño de Cemento, Concreto y Áridos. (2021). *ABNT NBR 15116:2021 - Agregados reciclados para uso en morteros y concretos de cemento Portland: Requisitos y métodos de ensayos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Comité Europeo de Normalización. (2010a). *PN-EN 12620+A1:2010: Agregados para concreto*. Polski Komitet Normalizacyjny.
- Comité Europeo de Normalización. (2010b). *PN-ES933-11:2009+AC:2010: Métodos de ensayo para agregados reciclados gruesos*. Polski Komitet Normalizacyjny.
- Comité Europeo de Normalización. (2016). *PN-EN 206+A1:2016-12: Concreto – Especificación, desempeño, producción y conformidad* [Norma europea]. Polski Komitet Normalizacyjny.

- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.08.040>
- Decreto Supremo 003-2013-VIVIENDA. (2013). *Decreto Supremo que Aprueba el Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición*. Presidencia de la República. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/4773414-003-2013-vivienda>
- Denisiewicz, A., Śliwa, M., Kula, K., & Socha, T. (2019). Experimental Investigation of Concrete with Recycled Aggregates for Suitability in Concrete Structures. *Applied Sciences 2019*, Vol. 9, Page 5010, 9(23), 5010. <https://doi.org/10.3390/APP9235010>
- Deutsches Institut für Normung . (2018). *DIN 4226-100: Agregados para mortero y concreto - Agregados reciclados*. Beuth Verlag GmbH.
- Ding, X., Hao, J., Chen, Z., Qi, J., & Marco, M. (2020). New Mix Design Method for Recycled Concrete Using Mixed Source Concrete Coarse Aggregate. *Waste and Biomass Valorization*, 11(10), 5431-5443. <https://doi.org/10.1007/S12649-020-01073-7/METRICS>
- Dimitrova, A. (2006). Challenges in 3D printing for architecture. *Journal of Emerging Technologies in Construction*, 10(2), 42-58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8676.2006.00456.x>
- Dini, E. (2009). *D-SHAPE: The 21st century revolution in building technology has a name*. (pp. 1–16). http://www.cadblog.pl/podcasty/luty_2012/d_shape_presentation.pdf
- Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., & Tam, V. W. Y. (2019). Construction debris becomes growing concerns of growing cities. *Waste Management*, 83, 1-5. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.10.044>
- DUS Architects. (2013, 15 de enero). *KamerMaker: 3D printing for construction*. DUS Architects. Recuperado el 20 de abril de 2024, de <https://www.dusarchitects.com/kamermaker>

- Ferreira-Cuéllar, D. A., & Torres-López, K. M. (2014). *Caracterización física de agregados pétreos para concretos caso: Vista Hermosa (Mosquera) y mina Cemex (Apulo)* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/1655>
- García, J. (2016, febrero). *Gestión de residuos de la construcción y demolición en Chile* [PDF]. (Boletín N°4) Fundación de la Industria de la Construcción. Recuperado de https://www.cmic.org.mx/sectores/medioambiente/MaterialApoyo/Fichas/chile_bp.pdf
- Geraldes, V. L., Sánchez de Juan, M., & Alaejos, M. P. (2012, 4-6 de octubre). *Estudio sobre las propiedades del árido reciclado mixto para la fabricación de hormigón no estructural* [Sesión de Congreso]. III Congreso Nacional de Áridos, Cáceres, España. <https://oa.upm.es/19911/>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2002). Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(4), 314-319. <https://doi.org/10.1115/1.1514574>
- Gobierno de España. (2008, 1 de febrero). *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición* (BOE-A-2008-2486). Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2008-2486>
- Gomes, M., & De Brito, J. (2009). Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: Durability performance. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(5), 663-675. <https://doi.org/10.1617/S11527-008-9411-9/METRICS>
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., & Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(10), 1759-1771. <https://doi.org/10.1617/S11527-011-9736-7/METRICS>

- González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., De Brito, J., González-Taboada, I., Martínez-Abella, F., & Vasco-Silva, R. (2018). Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. *Materiales de Construcción*, 68(330). <https://doi.org/10.3989/MC.2018.13317>
- Granados, H., López-Asiain, J., & Fernández, J. (2020). *Ratios nacionales. Generación de residuos de construcción y demolición*. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE) y Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE). <https://www.cscae.com/index.php/conoce-cscae/area-tecnica/seguimiento-de-normativas/reglamentos-regulaciones-y-otros/6306-guia-ratios-nacionales-generacion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion>
- Guamán-Rivera, R., Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Muñoz-Sanguinetti, C., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2022). Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 229, 12(2), 229. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12020229>
- Guillén, L.F., & Llerena, I. M. (2020). *Influencia de forma, tamaño y textura de los agregados gruesos en las propiedades mecánicas del concreto* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3711>
- Güneysi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z., & Yazici, H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 172-183. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.090>
- Hack, N., Dressler, I., Brohmann, L., Gantner, S., Lowke, D., & Kloft, H. (s. f.). *materials Injection 3D Concrete Printing (I3DCP): Basic Principles and Case Studies*. <https://doi.org/10.3390/ma13051093>
- Hinczewski, C., Corbel, S., & Chartier, T. (1998). Ceramic suspensions suitable for stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(6), 583–590. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(97\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(97)00135-1)

- Hosseinezhad, H., Sürmelioglu, S., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. (2023). A novel method for characterization of recycled concrete aggregates: Computerized microtomography. *Journal of Building Engineering*, 76, 107321. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107321>
- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *AGREGADOS. Determinación de la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. Método de ensayo.* (Norma Técnica Peruana 400.022:2013). <https://pdfcoffee.com/ntp-4000222013-agregados-metodo-peso-especifico-y-absorcion-del-agregado-fino-7-pdf-free.html>
- Instituto Nacional de Calidad. (2019). *MANEJO DE RESIDUOS DE LA ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN. Reciclaje de concreto de demolición.* (Norma Técnica Peruana 400.053:1999 - revisada el 2019). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=31535>
- Instituto Nacional de Calidad. (2020a). *AGREGADOS. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos).* (Norma Técnica Peruana 400.011:2020 - revisada el 2018). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=31761>
- Instituto Nacional de Calidad. (2020b). *AGREGADOS. Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.* (Norma Técnica Peruana 400.017:2020). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=31763>
- Instituto Nacional de Calidad. (2021a). *AGREGADOS. Agregados para concreto. Especificaciones.* (Norma Técnica Peruana 400.037:2021). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=33406>
- Instituto Nacional de Calidad. (2021b). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo.* (Norma Técnica Peruana 400.012:2021). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=33404>

- Instituto Nacional de Calidad. (2021c). *AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo.* (Norma Técnica Peruana 339.185:2021). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=33401>
- Instituto Nacional de Calidad. (2023). *CEMENTOS. Cementos Portland. Requisitos.* (NTP 334.009:2023). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=37303>
- Instituto Nacional de Calidad. (2024). *CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Requisitos.* (Norma Técnica Peruana 339.088). <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=37720>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.* https://www.censos2017.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1538/libro.pdf
- Jang, H., Kim, J., & Sicakova, A. (2021). Effect of Aggregate Size on Recycled Aggregate Concrete under Equivalent Mortar Volume Mix Design. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 11274, 11(23), 11274. <https://doi.org/10.3390/APP112311274>
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703-711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- Khoshnevis, B., Russell, R., Kwon, H., & Bukkapatnam, S. (2001). Contour crafting: A novel rapid prototyping and construction technique. *Journal of Architectural Science*, 15(1), 10-17. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2001.933125>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>

- Kruger, J., du Plessis, A., & van Zijl, G. (2021). An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. *Additive Manufacturing*, 37, 101740. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101740>
- Kruger, J., & van Zijl, G. (2021). A compendious review on lack-of-fusion in digital concrete fabrication. *Additive Manufacturing*, 37, 101654. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101654>
- Kruger, J., Zeranka, S., & van Zijl, G. (2020). A rheology-based quasi-static shape retention model for digitally fabricated concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119241. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119241>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(8), 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/S11527-012-9828-Z/METRICS>
- Lim, P. (2012). 3D printing for concrete prefabrication. *Concrete Technology Journal*, 25(7), 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.conctech.2012.09.010>
- Liu, H., Liu, C., Wu, Y., Bai, G., He, C., Zhang, R., & Wang, Y. (2022). Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 159, 106868. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106868>
- Liu, Z., Yuan, X., Zhao, Y., Chew, J. W., & Wang, H. (2022). Concrete waste-derived aggregate for concrete manufacture. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130637. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130637>
- Lloret-Fritschi, E., Scotto, F., Gramazio, F., Kohler, M., Graser, K., Wangler, T., Reiter, L., Flatt, R. J., & Mata-Falcón, J. (2019). Challenges of Real-Scale Production with Smart Dynamic Casting. *RILEM Bookseries*, 19, 299-310. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_28

- Lu, W., & Yuan, H. (2011). A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Management*, 31(6), 1252-1260. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.01.018>
- Magalhães, P. C. (2007). *Concrete with recycled aggregates: Commented analysis of existing legislation* [Tesis de master, Instituto Superior Técnico, Universidad Técnica de Lisboa]. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455646/RESUMO.pdf>
- Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S., & Ng, S. (2018). Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*, 112, 96-110. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.014>
- Martínez, L. (s.f.). *Aridos de hormigón reciclado, normativas para su uso*. monografías. Recuperado el 15 de abril de 2024, de <https://www.monografias.com/docs115/aridos-hormigon-reciclado-normativas-su-uso/aridos-hormigon-reciclado-normativas-su-uso>
- Martínez, P. (2020). *El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana* [Tesis de licenciatura, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/04c2702f-5ba2-44a3-a710-811050301588>.
- Mattey, P. E., Robayo, R. A., Silva, Y. F., Álvarez, N. A., & Delvasto, S. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 78(2), 121–127. <https://doi.org/10.23850/22565035.95>
- McGinnis, M. J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 154, 258-269. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.015>

- Mechtcherine, V., Nerella, V. N., & Kasten, K. (2014). Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. *Construction and Building Materials*, 53, 312-323. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.037>
- Mehta, K. P. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, 23(10), 61-66.
- Melchels, F. P. W., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121–6130. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2010.04.050>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN* [PDF]. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialtrujillo/archivos/public/docs/6649.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Guía informativa: Manejo de residuos de construcción y demolición en obras menores* [PDF]. Red de Residuos Sólidos. <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20160622094218.pdf>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2020). *Guía para el cumplimiento de la Meta 3: Implementación de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales 2020*. (Guía técnica). Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal. https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publ/migl/metad/Meta3_guia_2020.pdf
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)* (Real Decreto 1247/2008). <https://www.transportes.gob.es/ministerio/normativa-y-estudios-tecnicos/publicaciones/instruccion-ehe-08>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Concreto armado*. (Reglamento Nacional de Edificaciones E.060). https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/02_E/RNE2009_E_060.pdf

- Monier, V., Mudgal, S., Hestin, M., Trarieux, M. & Mimid, S. (2011, febrero). *SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE – SRI*. (European Commission - Final Report Task 2). https://environment.ec.europa.eu/document/download/22239ead-82d4-42fb-86dc-d202d5f40507_en
- Monroy, A. (2018). *Impacto ambiental durante el proceso de construcción*. Colegio Mexicano de Ingenieros Civiles A.C. (CMICAC). <https://cmicac.com/2018/12/13/impacto-ambiental-durante-el-proceso-de-construccion/>
- Municipalidad Distrital de Ate. (2013). *Plan de gestión de residuos de construcción y demolición* Plan de gestión de residuos sólidos de la construcción y demolición depositados en espacios públicos y de obras menores* [PDF]. Gerencia de Gestión Ambiental. <https://www.muniate.gob.pe/ate/files/transparencia/GERENCIA%20DE%20GESTION%20AMBIENTAL/SUB%20GERENCIA%20DE%20GESTION%20Y%20MANEJO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS/PLAN%20DE%20GESTION%20DE%20RCD%20MDA.pdf>
- Nerella, V. N. (2020). *Development and characterisation of cement-based materials for extrusion-based 3D-printing*.
- Nerella, V. N., Hempel, S., & Mechtcherine, V. (2019). Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*, 205, 586-601. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.235>
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315-318. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.02.020>
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. [Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña]. UPCCommons. <http://hdl.handle.net/2099.1/3334>

- Panda, B., Chandra Paul, S., & Jen Tan, M. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, 209, 146-149. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2017.07.123>
- Pani, L., Francesconi, L., Rombi, J., Mistretta, F., Sassu, M., & Stochino, F. (2020). Effect of Parent Concrete on the Performance of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9399, 12(22), 9399. <https://doi.org/10.3390/SU12229399>
- Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., & Gibson, I. (2018). A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 784-798. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0154/FULL/XML>
- Pérez, N., Garnica, P., & Rivera, A. (2018). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado*. (Publicación técnica N° 514). Instituto Mexicano del Transporte (IMT). <https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lcy9QdWJsaWNhY2lublRlRY25pY2EvcHQ1MTQucGRm>
- Perrot, A., Mélinge, Y., Rangeard, D., Micaelli, F., Estellé, P., & Lanos, C. (2012). Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheologica Acta*, 51(8), 743-754. <https://doi.org/10.1007/S00397-012-0638-6/METRICS>
- Pino Gotuzzo, R. (2007). *Metodología de la investigación*. 516. http://catalogovirtual.bibliotecaep.mil.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=734&shelfbrowse_itemnumber=881
- Rahul, A. V., Mohan, M. K., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2022). 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104311. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104311>

- Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13-23. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.12.014>
- RILEM Recommendation. (1994). Specifications for concrete with Recycled aggregates. *Materials and Structures* 27(9), 557-559. <https://doi.org/10.1007/BF02473217>
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., & Brumaud, C. (2012). The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 148-157. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.09.004>
- Salas, V. H. (2019). *Sostenibilidad de los agregados reciclados de residuos de concreto para obras civiles en la elaboración de concretos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/3856>
- Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., & Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 468-475. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.232>
- Sánchez de Juan, M., & Alaejos, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-877. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.04.012>
- Schröfl, C., Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). Capillary Water Intake by 3D-Printed Concrete Visualised and Quantified by Neutron Radiography. *RILEM Bookseries*, 19, 217-224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_20
- Solyman, M. (2005). *Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures*. [Tesis doctoral, Universität Kassel]. Repositorio Institucional KOBRA. <https://urn.fi/urn:nbn:de:hebis:34-2818>
- Supo, J. (2023). *Niveles de investigación*. Bioestadístico. Recuperado el 28 de abril de 2024, de <https://bioestadistico.com/niveles-de-investigacion>

- Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2021). Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted. *Construction and Building Materials*, 288, 123066. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123066>
- Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.106968>
- Węglorz, M., Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2019). Assessment of recycled concrete aggregate properties required for structural concretes. *MATEC Web of Conferences*, 262, 06010. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201926206010>
- Winsun. (2014, 2 de abril). *Winsun 3D prints entire buildings in less than 24 hours*. Winsun. Recuperado el 20 de abril de 2024, de <https://www.winsun.com/3dprintingbuildings>
- Wu, Y., Liu, C., Liu, H., Zhang, Z., He, C., Liu, S., Zhang, R., Wang, Y., & Bai, G. (2021). Study on the rheology and buildability of 3D printed concrete with recycled coarse aggregates. *Journal of Building Engineering*, 42, 103030. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103030>
- Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104155>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M., & Pang, B. (2018). Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*, 174, 263-271. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.115>
- Žurauskiene, R., & Valentukevičienė, M. (2020). Experimental Research on Quality Parameters of Recycled Concrete. *Materials 2020, Vol. 13, Page 2538, 13(11)*, 2538. <https://doi.org/10.3390/MA13112538>

ANEXOS

ANEXO 1. CALCULOS DE DISEÑOS DE MEZCLA PRELIMINARES

DISEÑOS DE MEZCLA PRELIMINARES											
MATERIALES		DISEÑO A1 (SP 0.5% DEL CEMENTO)		DISEÑO A2 (SP 0.75% DEL CEMENTO)		DISEÑO A3 (SP 1.0% DEL CEMENTO)		DISEÑO A4 (SP 1.5% DEL CEMENTO)		DISEÑO A5 (SP 2.0% DEL CEMENTO)	
CEMENTO		31%	728.50 kg	31%	728.50 kg	31%	728.50 kg	31%	728.50 kg	31%	728.50 kg
AGREGADOS NATURALES	ARENA GRUESA (RETENIDA EN #N°4)	15%	352.50 kg	15%	352.50 kg	15%	352.50 kg	15%	352.50 kg	15%	352.50 kg
	ARENA FINA	37%	869.50 kg	37%	869.50 kg	37%	869.50 kg	37%	869.50 kg	37%	869.50 kg
HUMO DE SILICE (SF)		3%	70.50 kg	3%	70.50 kg	3%	70.50 kg	3%	70.50 kg	3%	70.50 kg
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (SP)		0.16%	3.64 kg	0.23%	5.46 kg	0.31%	7.29 kg	0.47%	10.93 kg	0.62%	14.57 kg
AGUA		14%	329.00 kg	14%	329.00 kg	14%	329.00 kg	14%	329.00 kg	14%	329.00 kg
CONCRETO		100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg

ANEXO 2. CALCULOS DE DISEÑOS DE MEZCLA DEFINITIVAS

DISEÑOS DE MEZCLA DEFINITIVOS													
MATERIALES		DISEÑO R1 (5% DE AN POR ACR)		DISEÑO R2 (10% DE AN POR ACR)		DISEÑO R3 (15% DE AN POR ACR)		DISEÑO R4 (20% DE AN POR ACR)		DISEÑO R5 (25% DE AN POR ACR)		DISEÑO R6 (30% DE AN POR ACR)	
CEMENTO		31.0%	728.50 kg	31.0%	728.50 kg	31.0%	728.50 kg	31.0%	728.50 kg	31.0%	728.50 kg	31.0%	728.50 kg
AGREGADOS NATURALES (AN)	ARENA GRUESA (RETENIDA EN #N°4)	12.4%	291.40 kg	9.8%	230.30 kg	7.2%	169.20 kg	4.6%	108.10 kg	2.0%	47.00 kg	0.0%	-
	ARENA FINA	37.0%	869.50 kg	37.0%	869.50 kg	37.0%	869.50 kg	37.0%	869.50 kg	37.0%	869.50 kg	36.4%	855.40 kg
AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO (ACR)		2.6%	61.10 kg	5.2%	122.20 kg	7.8%	183.30 kg	10.4%	244.40 kg	13.0%	305.50 kg	15.6%	366.60 kg
HUMO DE SILICE (SF)		3.0%	70.50 kg	3.0%	70.50 kg	3.0%	70.50 kg	3.0%	70.50 kg	3.0%	70.50 kg	3.0%	70.50 kg
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (SP)		0.23%	5.46 kg	0.23%	5.46 kg	0.23%	5.46 kg	0.23%	5.46 kg	0.23%	5.46 kg	0.23%	5.46 kg
AGUA		14.0%	329.00 kg	14.0%	329.00 kg	14.0%	329.00 kg	14.0%	329.00 kg	14.0%	329.00 kg	14.0%	329.00 kg
CONCRETO		100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg	100%	2350 kg

ANEXO 3. VALORES DE ESFUERZOS CORTANTES DE LOS DISEÑOS PRELIMINARES

Puntos de control	DISEÑO A1								DISEÑO A2							
	T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min	
	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s
1	763.22548	0.000000	1325.2537	0.000000	1586.2546	0.000000	2168.7558	0.000000	577.03286	0.000000	729.10433	0.000000	785.38441	0.000000	1308.1333	0.000000
2	1685.3876	2.769049	2454.6746	3.169049	3313.7619	4.599103	4410.6464	5.454156	998.54779	1.10426	1244.0265	1.034911	1810.6795	1.742841	2125.533	1.599103
3	2755.6455	5.769049	3374.7583	5.769049	4243.249	7.299103	5225.3605	7.754156	1576.7932	2.704267	2256.2251	3.034911	2697.3293	3.742841	2983.6888	3.299103
4	3265.2579	8.136427	3992.8472	8.136427	4554.1575	9.108335	5658.8545	10.308335	1973.0315	4.300426	2485.3536	4.034911	2958.0923	4.742841	3543.4818	5.299103
5	2785.3876	10.136427	3754.6746	10.136427	3513.7619	13.308335	4910.6464	13.308335	1677.0329	6.300426	2029.1043	6.034911	2285.3844	6.742841	3108.1333	7.299103
6	2055.6455	12.136427	3174.7583	12.136427	3043.249	15.308335	4425.3605	15.308335	1298.5478	8.300426	1544.0265	8.034911	1970.6795	8.742841	2425.533	9.599103
7	1867.8025	14.136427	2906.7812	14.136427	2796.02	17.308335	3782.8456	17.308335	776.7932	10.300426	1056.2251	10.034911	1597.3293	9.742841	1883.6888	11.299103
8	1045.001	16.136427	2325.5939	16.136427	2108.0863	19.308335	3355.8	19.308335	862.99168	12.300426	736.04844	12.034911	1426.4537	11.742841	1727.5496	13.299103
9	873.97477	18.136427	2105.4634	18.136427	1912.8948	21.308335	3285.7077	21.308335	532.59111	14.300426	920.22436	14.034911	1031.628	13.742841	1267.8447	14.299103
10	627.7926	20.136427	1185.5183	20.136427	1787.0173	23.308335	2322.7195	23.308335	490.72371	16.300426	588.85186	16.034911	914.34947	15.742841	1190.1663	17.299103
11	460.49986	22.136427	773.05078	22.136427	1025.6064	25.308335	2270.5787	25.308335	391.21739	18.300426	486.94268	18.034911	883.43433	17.742841	620.95624	19.299103
12	361.7558	24.136427	555.41654	24.136427	1139.2791	27.308335	1143.9226	27.308335	474.58525	20.300426	554.30345	20.034911	775.28757	19.742841	717.39169	21.299103
13	421.53734	26.136427	623.70793	26.136427	1145.4842	29.308335	1659.6439	29.308335	354.67706	22.300426	415.15098	22.034911	860.30124	21.742841	614.18328	23.299103
14	191.2481	28.136427	322.02905	28.136427	920.29041	31.308335	1171.733	31.308335	266.65484	24.300426	364.45537	24.034911	648.70979	23.742841	407.68129	25.299103
15	204.5625	30.136427	412.0973	30.136427	789.32171	33.308335	982.32815	33.308335	241.14432	26.300426	432.74406	26.034911	568.14229	25.742841	313.88644	27.299103
16	200.35588	32.136427	358.87601	32.136427	526.24862	35.308335	838.0211	35.308335	186.28141	28.300426	322.6251	28.034911	460.32314	27.742841	373.59373	29.299103
17	215.80198	34.136427	372.12272	34.136427	618.55834	37.308335	963.14284	37.308335	232.61533	30.300426	293.84932	30.034911	332.06712	29.742841	438.3376	31.299103
18	237.98608	36.136427	411.10217	36.136427	416.54464	39.308335	703.30014	39.308335	285.9581	32.300426	246.18166	32.034911	364.09287	31.742841	370.916	33.299103
19	160.49569	38.136427	328.30861	38.136427	351.11165	41.308335	891.1062	41.308335	243.42717	34.300426	200.70097	34.034911	236.31523	33.742841	511.02511	35.299103
20	143.58842	40.136427	275.47442	40.136427	213.25099	43.308335	695.29316	43.308335	260.37987	36.300426	121.05922	36.034911	270.11667	35.742841	216.66252	37.299103
21	180.79053	42.136427	252.16102	42.136427	163.02709	45.308335	554.36923	45.308335	216.56205	38.300426	193.90617	38.034911	123.99031	37.742841	220.00204	39.299103
22	182.40023	44.136427	325.65229	44.136427	249.34569	47.308335	497.50567	47.308335	292.81405	40.300426	181.16293	40.034911	194.11367	39.742841	316.61222	41.299103
23	274.31237	46.136427	254.56355	46.136427	222.95715	49.308335	518.1041	49.308335	332.09108	42.300426	197.49893	42.034911	189.84808	41.742841	275.1882	43.299103
24	232.14793	48.136427	230.68894	48.136427	287.18786	51.308335	463.7086	51.308335	349.93971	44.300426	212.31831	44.034911	333.917	43.742841	300.72275	45.299103
25	236.53801	50.136427	164.65862	50.136427	171.52556	53.308335	652.56853	53.308335	281.93495	46.300426	195.75612	46.034911	300.20729	45.742841	240.86694	47.299103
26	205.89262	52.136427	130.46186	52.136427	193.08938	55.308335	556.94656	55.308335	187.49086	48.300426	180.369	48.034911	249.87643	47.742841	210.27397	49.299103
27	263.44855	54.136427	132.92773	54.136427	132.03661	57.308335	91.634755	57.308335	178.04509	50.300426	237.72399	50.034911	163.54691	49.742841	177.45614	51.299103
28	205.60869	56.136427	252.60658	56.136427	235.19915	59.308335	125.68082	59.308335	186.9847	52.300426	218.79204	52.034911	171.06902	51.742841	209.47458	53.299103
29	193.04781	58.136427	205.82929	58.136427	112.7552	61.308335	327.02624	61.308335	172.52146	54.300426	219.89065	54.034911	204.32443	53.742841	231.16071	55.299103
30	159.48007	60.136427	221.32125	60.136427	164.65214	63.308335	179.33379	63.308335	159.77493	56.300426	287.31858	56.034911	192.88182	55.742841	215.2792	57.299103
31	110.29588	62.136427	191.27213	62.136427	140.36254	65.308335	351.51902	65.308335	204.68699	58.300426	211.24809	58.034911	299.4778	57.742841	278.36173	59.299103
32	76.588352	64.136427	151.99728	64.136427	198.02331	67.308335	256.51411	67.308335	283.56911	60.300426	229.78471	60.034911	183.62771	59.742841	226.51945	61.299103
33	107.37571	66.136427	170.879	66.136427	104.30724	69.308335	99.499771	69.308335	168.84765	62.300426	91.385765	62.034911	149.25184	61.742841	162.97903	63.299103

Puntos de control	DISEÑO A3								DISEÑO A4								DISEÑO A5							
	T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min	
	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s
1	363.22548	0.000000	365.2537	0.000000	863.22548	0.000000	965.2537	0.000000	121.7558	0.000000	172.80539	0.000000	414.70767	0.000000	539.27908	0.000000	46.031283	0.000000	112.37517	0.000000	339.64395	0.000000	362.29041	0.000000
2	585.38764	0.769049	654.67458	0.5585095	1185.3876	1.33146	1554.6746	1.454156	331.53734	1.33146	491.46653	1.558007	853.71946	1.454156	1145.4842	1.454156	189.10539	0.769049	255.36526	0.558007	641.73299	1.454156	789.32171	1.33146
3	1075.6455	2.769049	1374.7583	3.285095	1815.6455	3.33146	2474.7583	3.754156	651.2481	3.33146	679.12189	2.558007	1390.5787	3.454156	1620.2904	2.754156	347.46086	1.769049	680.16157	2.558007	982.32815	3.454156	1176.2486	3.33146
4	1485.1335	4.769049	1874.3671	5.285095	2395.3918	5.33146	2874.7893	5.454156	729.8783	4.33146	1048.5174	4.558007	1552.7345	4.454156	1978.2619	4.454156	574.7683	3.769049	785.7384	3.558007	1058.8545	4.454156	1267.5319	4.33146
5	1329.1406	6.769049	1751.719	6.285095	2215.4529	6.33146	2478.1364	7.454156	687.51948	6.33146	874.2115	6.558007	1235.6464	6.454156	1701.7619	6.454156	487.51948	6.769049	658.2115	6.558007	910.64636	6.454156	1141.7619	6.33146
6	1035.5065	8.769049	1154.0161	8.285095	1721.249	8.33146	2095.1754	8.454156	529.7037	8.33146	674.8451	8.558007	915.36052	8.454156	1221.249	8.454156	417.7037	8.769049	524.8451	8.558007	725.36052	8.454156	995.24897	8.33146
7	625.89864	10.769049	774.44921	10.285095	1485.02	10.33146	1996.0276	10.454156	475.83238	10.33146	532.35748	10.558007	722.84563	10.454156	1056.02	10.454156	397.83238	10.769049	412.35748	10.558007	482.84563	10.454156	796.02001	10.33146
8	787.52382	12.769049	612.89748	12.285095	912.08633	12.33146	1758.0124	12.454156	355.73418	12.33146	516.39374	12.558007	596.8	12.454156	778.08633	12.454156	306.73418	12.769049	356.39374	12.558007	355.8	12.454156	578.08633	12.33146
9	728.04582	14.769049	708.08933	14.285095	996.89478	14.33146	1282.7543	14.454156	316.41783	14.33146	301.5287	14.558007	414.70767	14.454156	512.89478	14.454156	248.41783	14.769049	272.5287	14.558007	285.70767	14.454156	542.89478	14.33146
10	547.43439	16.769049	587.65441	16.285095	695.01726	16.33146	1245.0143	16.454156	270.31543	16.33146	202.00708	16.558007	410.71946	16.454156	487.01726	16.454156	151.31543	16.769049	192.00708	16.558007	322.71946	16.454156	417.01726	16.33146
11	675.70037	18.769049	447.97818	18.285095	378.60643	18.33146	925.60643	18.454156	247.93257	18.33146	160.23141	18.558007	160.57869	18.454156	325.60643	18.454156	147.93257	18.769049	160.23141	18.558007	270.57869	18.454156	325.60643	18.33146
12	590.77825	20.769049	539.72305	20.285095	556.27908	20.33146	939.27908	20.454156	129.47238	20.33146	172.80539	20.558007	143.92259	20.454156	239.27908	20.454156	129.47238	20.769049	172.80539	20.558007	143.92259	20.454156	239.27908	20.33146
13	653.12607	22.769049	359.43189	22.285095	485.48423	22.33146	845.48423	22.454156	156.03128	22.33146	171.46653	22.558007	169.64395	22.454156	145.48423	22.454156	96.031283	22.769049	171.46653	22.558007	59.643949	22.454156	145.48423	22.33146
14	439.83372	24.769049	497.95982	24.285095	785.29041	24.33146	720.29041	24.454156	129.10539	24.33146	139.12189	24.558007	171.73299	24.454156	120.29041	24.454156	89.105386	24.769049	139.12189	24.558007	171.73299	24.454156	120.29041	24.33146
15	365.03198	26.769049	278.86715	26.285095	276.32171	26.33146	789.32171	26.454156	107.46086	26.33146	92.375171	26.558007	182.32815	26.454156	189.32171	26.454156	67.460862	26.769049	92.375171	26.558007	182.32815	26.454156	189.32171	26.33146
16	406.63073	28.769049	387.48043	28.285095	578.24862	28.33146	626.24862	28.454156	99.327199	28.33146	55.365258	28.558007	138.0211	28.454156	226.24862	28.454156	109.3272	28.769049	55.365258	28.558007	138.0211	28.454156	226.24862	28.33146
17	357.72391	30.769049	332.66987	30.285095	475.55834	30.33146	518.55834	30.454156	83.398372	30.33146	80.161572	30.558007	163.14284	30.454156	218.55834	30.454156	83.398372	30.769049	80.161572	30.558007	163.14284	30.454156	218.55834	30.33146
18	305.02328	32.769049	261.13557	32.285095	316.54464	32.33146	616.54464	32.454156	82.489778	32.33146	132.92336	32.558007	103.30014	32.454156	116.54464	32.454156	112.48978	32.769049	132.92336	32.558007	103.30014	32.454156	116.54464	32.33146
19	264.40738	34.769049	268.73631	34.285095	201.11165	34.33146	501.11165	34.454156	76.045604	34.33146	123.7304	34.558007	91.106198	34.454156	101.11165	34.454156	73.045604	34.769049	123.7304	34.558007	91.106198	34.454156	101.11165	34.33146
20	220.4476	36.769049	188.86304	36.285095	142.25099	36.33146	413.25099	36.454156	55.565896	36.33146	143.75004	36.558007	95.293156	36.454156	113.25099	36.454156	81.565896	36.769049	143.75004	36.558007	95.293156	36.454156	113.25099	36.33146
21	191.88368	38.769049	204.53192	38.285095	363.02709	38.33146	563.02709	38.454156	85.622945	38.33146	84.269902	38.558007	154.36923	38.454156	163.02709	38.454156	105.62295	38.769049	84.269902	38.558007	154.36923	38.454156	163.02709	38.33146
22	268.03739	40.769049	305.07788	40.285095	249.34569	40.33146	449.34569	40.454156	95.705981	40.33146	72.912478	40.558007	97.505669	40.454156	249.34569	40.454156	55.705981	40.769049	72.912478	40.558007	97.505669	40.454156	149.34569	40.33146
23	274.07211	42.769049	288.22521	42.285095	272.95715	42.33146	422.95715	42.454156	87.740887	42.33146	113.65068	42.558007	118.1041	42.454156	222.95715	42.454156	115.74089	42.769049	113.65068	42.558007	118.1041	42.454156	122.95715	42.33146
24	273.24652	44.769049	270.92698	44.285095	127.18786	44.33146	327.18786	44.454156	95.587946	44.33146	161.05046	44.558007	63.708596	44.454156	127.18786	44.454156	65.587946	44.769049	141.05046	44.558007	63.708596	44.454156	127.18786	44.33146
25	252.30517	46.769049	214.36701	46.285095	287.52556	46.33146	471.52556	46.454156	92.307398	46.33146	168.79535	46.558007	82.568525	46.454156	71.525562	46.454156	92.307398	46.769049	152.79535	46.558007	2.5685251	46.454156	71.525562	46.33146
26	185.04957	48.769049	136.64947	48.285095	193.08938	48.33146	393.08938	48.454156	87.466329	48.33146	131.54081	48.558007	106.94656	48.454156	93.089379	48.454156	47.466329	48.769049	131.54081	48.558007	56.946561	48.454156	93.089379	48.33146
27	188.82591	50.769049	123.33944	50.285095	232.03661	50.33146	232.03661	50.454156	87.352754	50.33146	72.340239	50.558007	91.634755	50.454156	132.03661	50.454156	37.352754	50.769049	72.340239	50.558007	91.634755	50.454156	132.03661	50.33146
28	288.18153	52.769049	137.98833	52.285095	95.199146	52.33146	135.19915	52.454156	51.099619	52.33146	31.053818	52.558007	125.68082	52.454156	235.19915	52.454156	81.099619	52.769049	31.053818	52.558007	125.68082	52.454156	135.19915	52.33146
29	265.17183	54.769049	161.56591	54.285095	112.7552	54.33146	212.7552	54.454156	78.127045	54.33146	64.8771	54.558007	127.02624	54.454156	112.7552	54.454156	78.127045	54.769049	64.8771	54.558007	127.02624	54.454156	112.7552	54.33146
30	239.51934	56.769049	140.41052	56.285095	64.652136	56.33146	364.65214	56.454156	71.173892	56.33146	87.170413	56.558007	79.333791	56.454156	64.652136	56.454156	61.173892	56.769049	87.170413	56.558007	79.333791	56.454156	64.652136	56.33146
31	241.99176	58.769049	188.03526	58.285095	140.36254	58.33146	240.36254	58.454156	85.402348	58.33146	119.2879	58.558007	51.519023	58.454156	40.362538	58.454156	85.402348	58.769049	119.2879	58.558007	51.519023	58.454156	40.362538	58.33146
32	184.79184	60.769049	83.682374	60.285095	98.023306	60.33146	98.023306	60.454156	93.823243	60.33146	104.94697	60.558007	56.514105	60.454156	98.023306	60.454156	63.823243	60.769049	104.94697	60.558007	56.514105	60.454156	98.023306	60.33146
33	141.74284	62.769049	113.37112	62.285095	198.30724	62.33146	298.30724	62.454156	41.880501	62.33146	42.721387	62.558007	99.499771	62.454156	98.307241	62.454156	41.880501	62.769049	42.721387	62.558007	99.499771	62.454156	98.307241	62.33146

ANEXO 4. VALORES DE ESFUERZOS CORTANTES DE LOS DISEÑOS DEFINITIVOS

Puntos de control	DISEÑO R1 (REEMPLAZO DE AN POR 5% DE ACR)								DISEÑO R2 (REEMPLAZO DE AN POR 10% DE ACR)								DISEÑO R3 (REEMPLAZO DE AN POR 15% DE ACR)							
	T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min	
	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s
1	318.80263	0.000000	599.24198	0.000000	992.76388	0.000000	1046.2487	0.000000	498.86749	0.000000	780.49356	0.000000	1017.9883	0.000000	1213.3558	0.000000	1091.2174	0.000000	1122.6251	0.000000	1263.5469	0.000000	1470.916	0.000000
2	687.90727	0.650305	891.68492	0.934119	1616.1679	1.325337	2160.6683	1.854492	1118.4492	2.4522	1679.4714	2.658197	1764.6127	2.141422	2196.6887	2.205455	1774.5853	1.742841	1893.8493	2.300426	1971.069	2.034911	2511.0251	2.299103
3	1570.2149	2.650305	1921.8106	2.934119	2546.8864	3.325337	2975.6841	3.854492	1725.2155	4.4522	2031.2351	3.658197	2451.2524	4.141422	3037.3723	4.205455	2054.6771	2.742841	2255.1817	3.300426	2304.3244	3.034911	2916.6625	3.299103
4	1693.2416	3.650305	2201.1197	3.934119	2701.3053	4.325337	3157.6729	4.854492	1816.439	5.4522	2526.4247	5.658197	2829.432	6.141422	3479.4888	6.205455	2281.0315	3.742841	2471.3536	4.300426	2917.0923	5.034911	3551.4818	5.299103
5	1297.4002	5.650305	1604.7629	5.934119	1796.7561	6.325337	2494.0717	6.854492	1546.6672	7.4522	1820.7703	6.658197	1756.7755	9.141422	2033.0553	9.205455	1677.0329	5.742841	1929.1043	6.300426	2485.3844	7.034911	3208.1333	7.299103
6	918.80263	7.650305	1288.9566	7.934119	1625.1192	8.325337	2152.1172	8.854492	1257.2102	8.4522	1158.4095	10.658197	1429.6793	11.141422	1973.2607	11.205455	1308.5478	7.742841	1844.0265	8.300426	2170.6795	8.034911	2525.533	9.299103
7	817.90727	9.650305	938.58645	9.934119	1176.8785	10.325337	1641.6682	10.854492	848.17044	10.4522	1055.2579	12.658197	981.92582	13.141422	1212.7481	13.205455	776.7932	9.742841	1056.2251	10.300426	1587.3293	10.034911	2493.6888	11.299103
8	470.21489	11.650305	771.73497	11.934119	956.78679	12.325337	1239.8207	12.854492	842.70789	12.4522	805.40325	14.658197	867.29029	15.141422	825.54494	15.205455	862.99168	11.742841	736.04844	12.300426	1526.4537	12.034911	2027.5496	13.299103
9	281.83885	13.650305	506.37525	13.934119	643.60576	14.325337	975.38265	14.854492	455.86297	14.4522	448.14654	16.658197	557.95324	17.141422	863.40024	17.205455	532.59111	13.742841	920.22436	14.300426	1031.628	14.034911	1467.8447	15.299103
10	245.33783	15.650305	486.30319	15.934119	464.76558	16.325337	627.65089	16.854492	334.58528	16.4522	313.02589	18.658197	477.29356	19.141422	511.52527	19.205455	490.72371	15.742841	588.85186	16.300426	914.34947	16.034911	1210.1663	17.299103
11	268.97656	17.650305	258.81604	17.934119	348.4917	18.325337	556.39391	18.854492	309.4395	18.4522	223.04233	20.658197	526.31832	21.141422	663.29335	21.205455	391.21739	17.742841	485.94268	18.300426	713.43433	18.034911	1220.9562	19.299103
12	243.60146	19.650305	199.24198	19.934119	397.11895	20.325337	569.10768	20.854492	335.43933	20.4522	339.17643	22.658197	354.18782	23.141422	387.94558	23.205455	474.58525	19.742841	554.30345	20.300426	585.28757	20.034911	717.39169	21.299103
13	206.53694	21.650305	291.68492	21.934119	465.30287	22.325337	560.06979	22.854492	267.17897	22.4522	228.00902	24.658197	477.94886	25.141422	416.99219	25.205455	354.67706	21.742841	415.15098	22.300426	560.30124	22.034911	614.18328	23.299103
14	132.22881	23.650305	121.81056	23.934119	429.38277	24.325337	391.78109	24.854492	298.66967	24.4522	263.16244	26.658197	311.15847	27.141422	285.46667	27.205455	266.65484	23.742841	364.45537	24.300426	447.70979	24.034911	407.68129	25.299103
15	61.644603	25.650305	284.92295	25.934119	425.316	26.325337	363.1713	26.854492	199.61546	26.4522	367.29267	28.658197	260.00638	29.141422	217.93149	29.205455	241.14432	25.742841	432.74406	26.300426	368.14229	26.034911	313.88644	27.299103
16	97.953414	27.650305	125.04742	27.934119	392.76388	28.325337	298.35092	28.854492	164.61057	28.4522	205.64807	30.658197	380.48469	31.141422	269.0814	31.205455	186.28141	27.742841	322.6251	28.300426	260.32314	28.034911	473.59373	29.299103
17	179.42764	29.650305	153.87125	29.934119	266.16785	30.325337	283.03144	30.854492	168.34323	30.4522	188.70578	32.658197	278.02537	33.141422	288.06796	33.205455	232.61533	29.742841	293.84932	30.300426	332.06712	30.034911	438.3376	31.299103
18	184.19558	31.650305	180.07196	31.934119	246.88644	32.325337	168.19035	32.854492	185.07359	32.4522	377.68035	34.658197	217.98828	35.141422	372.97999	35.205455	285.9581	31.742841	255.18166	32.300426	364.09287	32.034911	370.916	33.299103
19	176.89406	33.650305	156.65382	33.934119	149.17758	34.325337	231.6806	34.854492	182.54657	34.4522	187.73822	36.658197	264.61269	37.141422	332.30512	37.205455	231.42717	33.742841	200.70097	34.300426	436.31523	34.034911	511.02511	35.299103
20	195.95925	35.650305	128.52017	35.934119	121.32787	36.325337	196.13841	36.854492	137.1409	36.4522	179.84481	38.658197	251.25243	39.141422	298.7483	39.205455	260.37987	35.742841	121.05922	36.300426	370.11667	36.034911	416.66252	37.299103
21	135.96584	37.650305	101.57032	37.934119	181.74069	38.325337	146.24874	38.854492	60.266423	38.4522	48.000405	40.658197	187.65529	41.141422	186.54132	41.205455	216.56205	37.742841	193.90617	38.300426	223.99031	38.034911	320.00204	39.299103
22	88.417546	39.650305	144.14537	39.934119	255.53125	40.325337	160.6683	40.854492	135.96584	40.4522	87.517688	42.658197	128.00254	43.141422	213.35576	43.205455	292.81405	39.742841	171.16293	40.300426	194.11367	40.034911	316.61222	41.299103
23	176.89406	41.650305	253.40816	41.934119	270.76979	42.325337	175.68413	42.854492	166.19406	42.4522	192.47776	44.658197	138.58678	45.141422	256.6887	45.205455	332.09108	41.742841	210.49893	42.300426	289.84808	42.034911	375.1882	43.299103
24	130.38323	43.650305	227.03272	43.934119	156.217	44.325337	105.64807	44.854492	157.75899	44.4522	163.33505	46.658197	137.55806	47.141422	237.37235	47.205455	349.93971	43.742841	212.31831	44.300426	333.917	44.034911	300.72275	45.299103
25	105.78348	45.650305	192.98666	45.934119	151.21536	46.325337	164.98624	46.854492	186.49982	46.4522	231.86836	48.658197	239.25287	49.141422	128.12485	49.205455	281.93495	45.742841	195.75612	46.300426	300.20729	46.034911	240.86694	47.299103
26	66.663711	47.650305	177.33307	47.934119	141.89572	48.325337	108.10302	48.854492	148.7342	48.4522	218.08438	50.658197	120.8561	51.141422	77.730647	51.205455	192.49086	47.742841	180.369	48.300426	249.87643	48.034911	310.27397	49.299103
27	24.916441	49.650305	109.06403	49.934119	105.56944	50.325337	139.07172	50.854492	68.867488	50.4522	122.00713	52.658197	109.14703	53.141422	49.769542	53.205455	178.04509	49.742841	237.72399	50.300426	163.54691	50.034911	286.45614	51.299103
28	45.073684	51.650305	129.60131	51.934119	181.37813	52.325337	158.47108	52.854492	118.4492	52.4522	111.47749	54.658197	138.70473	55.141422	75.393638	55.205455	186.9847	51.742841	218.79204	52.300426	171.06902	52.034911	359.47458	53.299103
29	95.452596	53.650305	212.5804	53.934119	100.9544	54.325337	220.69666	54.854492	125.21553	54.4522	164.68265	56.658197	145.96256	57.141422	121.44799	57.205455	172.52146	53.742841	219.89065	54.300426	204.32443	54.034911	231.16071	55.299103
30	109.894	55.650305	191.41409	55.934119	87.891147	56.325337	171.89461	56.854492	196.03569	56.4522	134.28407	58.658197	209.80002	59.141422	155.12712	59.205455	159.77493	55.742841	293.31858	56.300426	192.88182	56.034911	226.2792	57.299103
31	121.03956	57.650305	170.82658	57.934119	51.390094	58.325337	201.90879	58.854492	168.64676	58.4522	80.493558	60.658197	183.99245	61.141422	139.11752	61.205455	204.68699	57.742841	211.24809	58.300426	299.4778	58.034911	278.36173	59.299103
32	95.491911	59.650305	141.26233	59.934119	107.55038	60.325337	228.01994	60.854492	151.24157	60.4522	79.47139	62.658197	194.32771	63.141422	103.38314	63.205455	271.56911	59.742841	229.78471	60.300426	183.62771	60.034911	226.51945	61.299103
33	62.463648	61.650305	47.967643	61.934119	75.472227	62.325337	182.10107	62.854492	112.08467	62.4522	31.2351	64.658197	145.35319	65.141422	129.45279	65.205455	181.84765	61.742841	91.385765	62.300426	149.25184	62.034911	162.97903	63.299103

Puntos de control	DISEÑO R4 (REEMPLAZO DE AN POR 20% DE ACR)								DISEÑO R5 (REEMPLAZO DE AN POR 25% DE ACR)								DISEÑO R6 (REEMPLAZO DE AN POR 30% DE ACR)							
	T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min		T = 0 min		T = 10 min		T = 20 min		T = 30 min	
	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s	τ_y en Pa	t en s
1	732.66987	0.000000	1030.962	0.000000	1453.6243	0.000000	1590.7783	0.000000	1141.6533	0.000000	1178.9317	0.000000	1688.876	0.000000	1921.5373	0.000000	1242.7692	0.000000	1465.8007	0.000000	1789.7344	0.000000	2229.9201	0.000000
2	1261.1356	1.285095	1857.0208	2.24918	2405.9274	2.218154	2353.1261	1.163034	1437.4554	1.33146	1764.2565	1.710142	2382.1227	1.769049	2791.2481	1.769049	1807.1047	2.091739	2109.2648	2.174749	2424.5646	2.204559	2916.5356	2.01889
3	1968.7363	3.285095	2245.3335	3.24918	2782.7736	3.218154	2939.8337	2.163034	2023.608	3.33146	2401.9218	3.710142	3106.1022	3.769049	3604.5625	3.769049	2314.8518	4.091739	2654.9151	4.174749	2950.2935	4.204559	3590.6802	4.01889
4	2083.3671	4.285095	2431.2015	4.24918	3073.3964	4.218154	3515.1335	4.163034	2120.8418	4.33146	2570.7161	4.710142	3292.8472	4.769049	3774.0746	4.769049	2425.2457	5.091739	2839.1276	5.174749	3125.7985	5.204559	3933.3936	6.01889
5	1710.719	6.285095	1819.8617	6.24918	2796.8694	6.218154	3199.1406	6.163034	1937.4434	6.33146	2351.684	6.710142	2802.7137	6.769049	3363.0256	6.769049	2258.3592	7.091739	2579.1038	7.174749	2933.0425	7.204559	3704.2776	8.01889
6	1171.0161	8.285095	1747.6549	8.24918	2183.5398	8.218154	2935.5065	8.163034	1593.3352	8.33146	1828.7814	8.710142	2727.9862	8.769049	3104.5115	8.769049	1922.9548	8.091739	2396.177	8.174749	2779.8726	8.204559	3069.4783	10.01889
7	966.44921	10.285095	1402.6532	10.24918	1839.0319	10.218154	2525.8986	10.163034	1422.6401	10.33146	1778.5185	10.710142	2264.8612	10.769049	2505.8025	10.769049	1798.8989	10.091739	1925.6694	10.174749	2062.6553	10.204559	2469.8212	12.01889
8	1034.8975	12.285095	884.69965	12.24918	1809.7188	12.218154	2327.5238	12.163034	870.67991	12.33146	1652.7154	12.710142	1654.5939	12.769049	2444.001	12.769049	1435.4393	12.091739	1464.7827	12.174749	2111.9991	12.204559	2546.187	14.01889
9	807.08933	14.285095	963.70397	14.24918	1088.4434	14.218154	1628.0458	14.163034	935.99615	14.33146	1067.6614	14.710142	1716.4634	14.769049	1870.9748	14.769049	1056.0247	14.091739	1622.614	14.174749	1666.9081	14.204559	2169.3998	16.01889
10	692.65441	16.285095	533.31842	16.24918	1229.8741	16.218154	1547.4344	16.163034	491.05352	16.33146	1161.594	16.710142	1290.5183	16.769049	1827.7926	16.769049	1153.8296	16.091739	1040.93	16.174749	1702.7012	16.204559	1811.0599	18.01889
11	460.97818	18.285095	776.44394	18.24918	879.3095	18.218154	1419.7004	18.163034	576.53997	18.33146	954.0348	18.710142	896.05078	18.769049	1460.4999	18.769049	1054.1201	18.091739	1037.6866	18.174749	1678.1037	18.204559	1895.0089	20.01889
12	508.72305	20.285095	377.41375	20.24918	753.62425	20.218154	990.77825	20.163034	451.97524	20.33146	623.47678	20.710142	959.41654	20.769049	1561.7558	20.769049	959.6503	20.091739	1190.1143	20.174749	1036.2823	20.204559	1476.8589	22.01889
13	359.43189	22.285095	482.65127	22.24918	605.92744	22.218154	753.12607	22.163034	417.3766	22.33146	711.1496	22.710142	715.70793	22.769049	1221.5373	22.769049	549.10756	22.091739	814.63328	22.174749	1198.9099	22.204559	1590.0926	24.01889
14	317.95982	24.285095	242.24512	24.24918	582.77358	24.218154	839.83372	24.163034	237.38108	24.33146	578.93172	24.710142	836.02905	24.769049	1091.2481	24.769049	853.81659	24.091739	665.80072	24.174749	1385.8401	24.204559	1640.2597	26.01889
15	254.86715	26.285095	293.01499	26.24918	657.53614	26.218154	565.03198	26.163034	419.12608	26.33146	664.25648	26.710142	731.0973	26.769049	904.5625	26.769049	688.92413	26.091739	709.26477	26.174749	1077.9336	26.204559	1129.9201	28.01889
16	287.48043	28.285095	302.33463	28.24918	446.54777	28.218154	706.63073	28.163034	297.31989	28.33146	441.9218	28.710142	688.87601	28.769049	970.35588	28.769049	442.76924	28.091739	554.91507	28.174749	821.02844	28.204559	1216.5356	30.01889
17	332.66987	30.285095	240.15492	30.24918	583.98584	30.218154	557.72391	30.163034	324.20204	30.33146	402.13362	30.710142	582.12272	30.769049	615.80198	30.769049	567.10471	30.091739	368.57899	30.174749	940.13949	30.204559	1090.6802	32.01889
18	261.13557	32.285095	473.23341	32.24918	336.92454	32.218154	405.02328	32.163034	287.95001	32.33146	362.00479	32.710142	606.10217	32.769049	737.98608	32.769049	314.85182	32.091739	633.11106	32.174749	794.68141	32.204559	1255.9788	34.01889
19	268.73631	34.285095	323.7893	34.24918	440.6703	34.218154	364.40738	34.163034	204.56686	34.33146	352.78998	34.710142	736.30861	34.769049	860.49569	34.769049	290.83305	34.091739	272.8774	34.174749	750.63207	34.204559	1001.9634	36.01889
20	188.86304	36.285095	146.05647	36.24918	309.30197	36.218154	220.4476	36.163034	153.10463	36.33146	297.23908	36.710142	582.47442	36.769049	643.58842	36.769049	379.93217	36.091739	458.19793	36.174749	1189.7344	36.204559	799.15243	38.01889
21	204.53192	38.285095	122.39153	38.24918	529.9834	38.218154	391.88368	38.163034	141.65329	38.33146	319.12177	38.710142	452.16102	38.769049	580.79053	38.769049	166.31637	38.091739	258.56486	38.174749	824.5646	38.204559	825.21772	40.01889
22	305.07788	40.285095	205.32475	40.24918	309.56843	40.218154	268.03739	40.163034	137.45541	40.33146	314.01967	40.710142	325.65229	40.769049	482.40023	40.769049	275.02227	40.091739	338.09311	40.174749	650.29353	40.204559	997.14734	42.01889
23	288.22521	42.285095	252.77258	42.24918	233.56543	42.218154	374.07211	42.163034	223.60802	42.33146	333.08485	42.710142	254.56355	42.769049	574.31237	42.769049	445.09539	42.091739	273.87773	42.174749	746.37092	42.204559	661.40203	44.01889
24	270.92698	44.285095	225.85985	44.24918	495.53546	44.218154	473.24652	44.163034	178.55836	44.33146	298.93395	44.710142	230.68894	44.769049	332.14793	44.769049	292.44718	44.091739	473.08708	44.174749	585.15216	44.204559	543.24763	46.01889
25	214.36701	46.285095	250.91389	46.24918	383.17771	46.218154	252.30517	46.163034	180.83858	46.33146	305.33779	46.710142	164.65862	46.769049	436.53801	46.769049	318.06698	46.091739	210.02935	46.174749	698.25257	46.204559	766.98253	48.01889
26	136.64947	48.285095	160.49787	48.24918	269.24091	48.218154	385.04957	48.163034	135.28439	48.33146	144.85302	48.710142	130.46186	48.769049	305.89262	48.769049	205.85556	48.091739	257.58426	48.174749	471.87496	48.204559	435.85226	50.01889
27	123.33944	50.285095	130.96202	50.24918	182.4592	50.218154	288.82591	50.163034	112.84038	50.33146	156.21918	50.710142	132.92773	50.769049	263.44855	50.769049	279.79239	50.091739	337.67812	50.174749	327.214	50.204559	346.89518	52.01889
28	137.98833	52.285095	157.02076	52.24918	205.36188	52.218154	388.18153	52.163034	163.12319	52.33146	195.35206	52.710142	252.60658	52.769049	305.60869	52.769049	390.92922	52.091739	260.54804	52.174749	495.38482	52.204559	513.54141	54.01889
29	161.56591	54.285095	145.33353	54.24918	356.32171	54.218154	265.17183	54.163034	194.8519	54.33146	174.99606	54.710142	205.82929	54.769049	293.04781	54.769049	399.25945	54.091739	327.10917	54.174749	551.71328	54.204559	397.08188	56.01889
30	140.41052	56.285095	199.88193	56.24918	239.3315	56.218154	239.51934	56.163034	183.61897	56.33146	192.64157	56.710142	221.32125	56.769049	359.48007	56.769049	275.71245	56.091739	235.3018	56.174749	497.64539	56.204559	249.01596	58.01889
31	188.03526	58.285095	130.4553	58.24918	254.45435	58.218154	241.99176	58.163034	206.30761	58.33146	211.98632	58.710142	191.27213	58.769049	210.29588	58.769049	260.2336	58.091739	190.11454	58.174749	647.15502	58.204559	402.48328	60.01889
32	83.682374	60.285095	39.174376	60.24918	276.81755	60.218154	184.79184	60.163034	113.84507	60.33146	123.96847	60.710142	151.99728	60.769049	276.58835	60.769049	320.90852	60.091739	154.14645	60.174749	317.44013	60.204559	102.03772	62.01889
33	113.37112	62.285095	93.965211	62.24918	208.45241	62.218154	141.74284	62.163034	184.47514	62.33146	162.66889	62.710142	170.879	62.769049	207.37571	62.769049	284.79839	62.091739	193.87123	62.174749	395.95269	62.204559	363.52288	64.01889

ANEXO 5. VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS DISEÑOS DEFINITIVOS

DISEÑO	FECHA	PROGRAMACIÓN DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS											
		3 DÍAS (24/05/2024)				7 DÍAS (28/05/2024)				28 DÍAS (18/06/2024)			
		Área (cm ²)	Carga (kgf)	R. compresión (kgf/cm ²)	R. promedio (kgf/cm ²)	Área (cm ²)	Carga (kgf)	R. compresión (kgf/cm ²)	R. promedio (kgf/cm ²)	Área (cm ²)	Carga (kgf)	R. compresión (kgf/cm ²)	R. promedio (kgf/cm ²)
A2	21/05/2024	80.12	25475	318.0	321.5	80.12	30875	385.4	378.8	80.12	38553	481.2	481.4
		80.12	25680	320.5		80.12	30153	376.3		80.12	38471	480.2	
		80.12	26121	326.0		80.12	30020	374.7		80.12	38685	482.8	
R1	21/05/2024	80.12	22925	286.1	295.1	80.12	27483	343.0	345.8	80.12	33542	418.6	423.4
		80.12	23273	290.5		80.12	27612	344.6		80.12	34205	426.9	
		80.12	24732	308.7		80.12	28021	349.7		80.12	34021	424.6	
R2	21/05/2024	80.12	24874	310.5	317.4	80.12	26247	327.6	326.7	80.12	31275	390.4	398.7
		80.12	25533	318.7		80.12	26134	326.2		80.12	32543	406.2	
		80.12	25883	323.1		80.12	26140	326.3		80.12	32014	399.6	
R3	21/05/2024	80.12	16103	201.0	194.7	80.12	20592	257.0	259.9	80.12	28094	350.6	349.5
		80.12	15650	195.3		80.12	20830	260.0		80.12	28041	350.0	
		80.12	15045	187.8		80.12	21048	262.7		80.12	27871	347.9	
R4	21/05/2024	80.12	20724	258.7	253.9	80.12	25784	321.8	322.9	80.12	28945	361.3	356.8
		80.12	20198	252.1		80.12	25803	322.1		80.12	28351	353.9	
		80.12	20105	250.9		80.12	26025	324.8		80.12	28464	355.3	
R5	21/05/2024	80.12	16702	208.5	204.1	80.12	18892	235.8	242.5	80.12	25234	315.0	318.2
		80.12	16360	204.2		80.12	19637	245.1		80.12	25192	314.4	
		80.12	15995	199.6		80.12	19758	246.6		80.12	26057	325.2	
R6	21/05/2024	80.12	15396	192.2	195.1	80.12	22578	281.8	275.7	80.12	27288	340.6	335.0
		80.12	15635	195.1		80.12	22094	275.8		80.12	26248	327.6	
		80.12	15863	198.0		80.12	21595	269.5		80.12	26985	336.8	