

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“REUTILIZACIÓN DEL CONCRETO PROVENIENTE DE  
MATERIAL DEMOLIDO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE  
CONCRETO PARA LA APLICACIÓN EN CANALES – TACNA,  
2024”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. JHAMIR MARCIAN RAMOS VILLANUEVA**

**Bach. OSCAR EDUARDO JIMENEZ LERMA**

**TACNA – PERÚ**

**2025**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**“REUTILIZACIÓN DEL CONCRETO PROVENIENTE DE  
MATERIAL DEMOLIDO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE  
CONCRETO PARA LA APLICACIÓN EN CANALES – TACNA,  
2024”**

Tesis sustentada y aprobada el 10 de junio del 2025; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE : Mtro. MILTON CESAR GORDILLO MOLINA**

**SECRETARIO : Mtra. ROSALÍ CRISTINA ALANIA COTRADO**

**VOCAL : Mtra. GLENDA MILAGROS LINAJA GARCIA**

**ASESOR : Mtra. DINA MARLENE COTRADO FLORES**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Jhamir Marcian Ramos Villanueva y Oscar Eduardo Jimenez Lerma, egresado(s), de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado(s) con DNI 76946144 y 71976084 respectivamente, así como Dina Marlene Cotrado Flores con DNI 00795268; declaramos en calidad de autor(es) y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulado: *Reutilización Del Concreto Proveniente de Material Demolido En El Diseño De Mezclas De Concreto Para La Aplicación En Canales – Tacna, 2024*, la cual presentamos para optar el Título de *Ingeniero Civil*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos asociados a la obra.

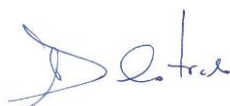
En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

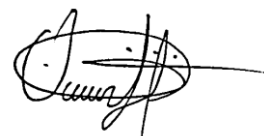
Tacna, 10 de junio del 2025



Jhamir Marcian Ramos Villanueva  
DNI: 76946144



Dina Marlene Cotrado Flores  
DNI: 00795268



Oscar Eduardo Jimenez Lerma  
DNI: 71976084

## DEDICATORIA

A Dios, por las bendiciones recibidas, por haberme otorgado el regalo de la vida, la salud y la fortaleza para alcanzar mis metas.

A mi madre, Teresa Villanueva Ramos por criarme con principios y valores, por su gran sacrificio durante toda su vida y haberme enseñado a no rendirme incluso en las situaciones más difíciles.

A mi padre, Amado Ramos Blas por sus consejos, lecciones de vida y su ejemplo, por ser mi amigo cuando lo necesito y enseñarme que la familia es siempre primero.

A mis hermanas, Reyna Ramos Villanueva, Fabiola Ramos Villanueva y Anyela Ramos Villanueva, por su apoyo incondicional, por no dejarme solo en los malos momentos y por darme el motivo de ser un profesional mejor día a día, mis sobrinas.

A mi enamorada, Linda Tapia Machicado, por estar a mi lado durante toda mi etapa académica, por ser mi amiga y confidente, por su apoyo incondicional en los momentos difíciles y su amor constante.

A toda mi familia, por no dejarme solo, enseñarme a trabajar y demostrarme que todo esfuerzo es bien recompensado.

A la familia de mi enamorada, por aceptarme como un hijo más, por sus consejos, y hacerme sentir cerca de mi familia pese a la distancia.

Mención especial a mi mejor amigo Oscar Jimenez Lerma, quien estuvo conmigo hombro a hombro durante toda mi etapa académica, por demostrarme lealtad y confianza en todo momento y ser el hermano que nunca tuve. Que dios lo acompañe y le deseo todo lo mejor en su vida y siempre recordaré la frase “seremos grandes, hermano” como una promesa y símbolo de nuestra amistad

Jhamir Marcian Ramos Villanueva

## DEDICATORIA

A Dios, por las bendiciones recibidas, por haberme otorgado el regalo de la vida, la salud y la fortaleza para alcanzar mis metas.

A mi madre, por sus consejos, su amor incondicional, su apoyo constante y su ejemplo de vida que me inspira a ser mejor cada día.

A mi padre, por su esfuerzo, sacrificio, sus sabios consejos y por enseñarme que todo en la vida es posible si se lucha con perseverancia y nunca se renuncia a los sueños.

A mis hermanas, Miriam Jimenez Lerma y Jessica Jimenez Lerma, por su apoyo, entrega y por ser un modelo de ejemplo y superación que siempre he admirado.

A mi cuñado, Martin Escalante, por enseñarme a mantener la alegría incluso ante los problemas y a tener siempre presente a Dios en cada momento de la vida.

A mi enamorada, Jhadira S.C., por su apoyo incondicional durante mi etapa académica, su compañía constante y su fortaleza en los momentos más complicados.

A toda mi familia, por estar siempre cerca de mí con su amor, sus consejos y su preocupación sincera, impulsándome a seguir adelante.

Mención especial a mi amigo, hermano y colega, Jhamir Ramos Villanueva, por su incondicional apoyo y profunda entrega en la elaboración de este trabajo de investigación, además de su sincera amistad que ayudó a fortalecer nuestros lazos dentro y fuera de la etapa académica universitaria. Que Dios lo bendiga siempre y le conceda grandes éxitos en su vida personal y profesional.

Oscar Eduardo Jimenez Lerma

## AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero y profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación.

En primer lugar, a nuestra Asesora Ingeniera Dina Marlene Cotrado Flores, por su dedicación constante a nuestra formación profesional, por brindarnos siempre su apoyo, sus valiosos consejos y, sobre todo, por su paciencia y compromiso durante el proceso de elaboración de esta tesis. Su guía ha sido fundamental para nuestro crecimiento académico y personal.

De igual manera, extendemos nuestro especial agradecimiento al Ingeniero Miguel Martínez Yanqui y al Técnico Isidro Barrios Mendoza, responsables del laboratorio de la Universidad, por su apoyo constante durante los ensayos realizados. Valoramos profundamente su disposición para explicarnos cada procedimiento, su capacidad para absolver nuestras dudas y su acompañamiento constante en cada etapa práctica del proyecto.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud a la Ingeniera Imelda Ticona Vargas, por su valioso respaldo al otorgarnos los permisos laborales necesarios durante el desarrollo de la tesis. Su comprensión y apoyo fueron fundamentales para que pudiéramos avanzar con responsabilidad y compromiso en nuestras actividades académicas, recordándonos que la verdadera grandeza profesional se manifiesta en la generosidad y disposición para apoyar a los demás en momentos clave.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron con su tiempo, conocimientos y apoyo en la realización de esta investigación.

Jhamir Marcian Ramos Villanueva

Oscar Eduardo Jimenez Lerma

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS .....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	3
1.1. Descripción del problema .....	3
1.2. Formulación del problema .....	4
1.2.1. Problema general .....	4
1.2.2. Problemas específicos.....	4
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general .....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Hipótesis.....	6
1.5.1. Hipótesis general.....	6
1.5.2. Hipótesis específicas .....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Antecedentes de la investigación .....	7
2.1.1. Antecedentes locales.....	7
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes Internacionales.....	9
2.2. Bases Teóricas.....	10
2.2.1. Enfoque conceptual y contextual de la reutilización del concreto demolido ...	10
2.2.2. Fundamento del reciclaje de concreto .....	11
2.2.3. Propiedades físicas del agregado reciclado .....	20
2.2.4. Propiedades mecánicas del concreto reciclado .....	21
2.2.5. Análisis ambiental de la reutilización del concreto .....	23
2.2.6. Análisis económico de la reutilización del concreto demolido.....	24

2.2.7.	Limitaciones técnicas y constructivas .....	25
2.2.8.	Estado del arte y revisiones científicas .....	27
2.2.9.	Fundamento general del diseño de mezclas .....	29
2.2.10.	Propiedades requeridas del concreto en canales de regadío .....	32
2.2.11.	Metodología de diseño con agregado reciclado (ACI 301) .....	35
2.2.12.	Criterios técnicos de aplicación en canales .....	50
2.3.	Definición de términos .....	52
2.3.1.	Concreto .....	52
2.3.2.	Agregados .....	52
2.3.3.	Granulometría.....	53
2.3.4.	Resistencia a la compresión .....	53
2.3.5.	Resistencia a la tracción .....	53
2.3.6.	Módulo de elasticidad .....	53
2.3.7.	Durabilidad .....	53
2.3.8.	Diseño de mezclas según el método ACI 211 .....	53
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....		54
3.1.	Diseño de investigación.....	54
3.2.	Acciones y actividades .....	54
3.3.	Materiales e instrumentos.....	54
3.3.1.	Materiales y equipos.....	54
3.3.2.	Instrumento.....	55
3.4.	Población y muestra de estudio.....	57
3.4.1.	Población.....	57
3.4.2.	Muestra .....	57
3.5.	Operacionalización de variables .....	58
3.6.	Técnicas de procesamiento y análisis estadístico .....	60
CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....		61
4.1.	Trabajos Preliminares.....	61
4.1.1.	En campo .....	61
4.1.2.	En Laboratorio .....	63
4.2.	Ensayo de Agregados .....	64
4.2.1.	En Laboratorio .....	64
4.2.2.	Cálculos en gabinete y resultados.....	84
4.3.	Diseño de Mezcla .....	93
4.3.1.	Proporcionamiento del agregado reciclado.....	93
4.3.2.	Diseño de mezcla por el método ACI.....	103
4.4.	Elaboración y curado del concreto en laboratorio.....	105

4.5.	Rotura de Probetas de concreto en laboratorio .....	109
4.6.	Análisis de Costos de Producción .....	112
4.6.1.	Escenario 1: Sin reciclar el material.....	113
4.6.2.	Escenario 2: reciclando el material .....	116
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....		119
5.1.	Contraste de la hipótesis .....	119
5.1.1.	Contrastación de Hipótesis general .....	119
5.1.2.	Contrastación de Hipótesis específicas .....	120
CONCLUSIONES .....		122
RECOMENDACIONES.....		123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		124
ANEXOS.....		128

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorías y Clases de Exposición.....	33
Tabla 2. Requisitos para el concreto según la clase de exposición .....	34
Tabla 3. F'cr si no hay datos disponibles de desviación estándar.....	36
Tabla 4. Contenido de aire atrapado.....	37
Tabla 5. Volumen Unitario de Agua .....	38
Tabla 6. Relación agua-cemento por resistencia .....	40
Tabla 7. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.....	43
Tabla 8. Operacionalización de variables de investigación .....	59
Tabla 9. Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso.....	81
Tabla 10. Contenido de humedad - resultado Ag. Fino .....	85
Tabla 11. Contenido de humedad – resultado Ag. Grueso .....	85
Tabla 12. Contenido de humedad – resultado Ag. Reciclado .....	86
Tabla 13. Peso unitario – resultado Ag. fino .....	87
Tabla 14. Peso unitario – resultado Ag. grueso .....	87
Tabla 15. Peso unitario – resultado Ag. reciclado .....	87
Tabla 16. Peso Específico y absorción – resultado ag. grueso.....	88
Tabla 17. Peso específico y absorción – resultado ag. reciclado.....	89
Tabla 18. Peso Específico y absorción – resultado ag. fino .....	90
Tabla 19. Granulometría – resultado ag. fino.....	91
Tabla 20. Granulometría – resultado ag. grueso.....	92
Tabla 21. Granulometría – resultado ag. reciclado .....	92
Tabla 22. Resumen de los ensayos para agregados .....	93
Tabla 23. Propiedades al 20 % de agregado reciclado .....	95
Tabla 24. Propiedades al 30 % de agregado reciclado.....	95
Tabla 25. Propiedades al 40 % de agregado reciclado.....	96

Tabla 26. Propiedades al 50 % de agregado reciclado .....	96
Tabla 27. Proporción en peso del agregado reciclado .....	96
Tabla 28. Proporción de las muestras para diseño .....	97
Tabla 29. Peso unitario – resultado 80 % AG + 20 % AR .....	102
Tabla 30. Peso unitario – resultado 70 % AG + 30 % AR .....	102
Tabla 31. Peso unitario – resultado 60 % AG + 40 % AR .....	102
Tabla 32. Peso unitario – resultado 50 % AG + 50 % AR .....	103
Tabla 33. Porcentaje de error .....	103
Tabla 34. Diseño de mezcla $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ – Estándar.....	104
Tabla 35. Diseño de mezcla $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ - 80 % AG + 20 % AR .....	104
Tabla 36. Diseño de mezcla $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ - 70 % AG + 30 % AR .....	104
Tabla 37. Diseño de mezcla $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ - 60 % AG + 40 % AR .....	104
Tabla 38. Diseño de mezcla $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ - 50 % AG + 50 % AR .....	105
Tabla 39. Rotura de briquetas – Estándar $175 \text{ Kg/cm}^2$ .....	111
Tabla 40. Rotura de briquetas – $175 \text{ Kg/cm}^2$ con 20 % de Agregado Reciclado.....	111
Tabla 41. Rotura de briquetas – $175 \text{ Kg/cm}^2$ con 30 % de Agregado Reciclado.....	111
Tabla 42. Rotura de briquetas – $175 \text{ Kg/cm}^2$ con 40 % de Agregado Reciclado.....	112
Tabla 43. Rotura de briquetas – $175 \text{ Kg/cm}^2$ con 50 % de Agregado Reciclado.....	112
Tabla 44. ACU concreto en canal de regadío .....	113
Tabla 45. ACU transporte de material excedente al DME.....	114
Tabla 46. Metrado de canal de concreto.....	114
Tabla 47. Metrado de agregado grueso .....	114
Tabla 48. Metrado de material demolido.....	115
Tabla 49. Metrado de transporte del material demolido .....	115
Tabla 50. Presupuesto sin reciclar el material .....	115
Tabla 51. ACU diseño de mezcla de concreto .....	116
Tabla 52. ACU trituración de concreto reciclado .....	116
Tabla 53. Nuevo metrado de agregado Grueso.....	117

Tabla 54. Nuevo metrado de Transporte de material excedente .....	117
Tabla 55. Metrado de diseño de mezcla de concreto.....	118
Tabla 56. Metrado de trituración de concreto reciclado .....	118
Tabla 57. Presupuesto reciclando el material .....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de ubicación del DME .....	61
Figura 2. Ubicación de residuos de construcción en el DME .....	62
Figura 3. Proceso de trituración .....	63
Figura 4. Humedad - peso del agregado en estado húmedo .....	64
Figura 5. Humedad - introducción de las muestras en el horno .....	65
Figura 6. Humedad – peso del agregado en estado seco.....	65
Figura 7. Peso Unitario – materiales y equipos calibrados.....	66
Figura 8. Peso Unitario – vertimiento del agregado en el molde.....	66
Figura 9. Peso Unitario – nivelación de superficie del agregado.....	67
Figura 10. Peso Unitario – limpieza de material excedente .....	67
Figura 11. Peso Unitario – masa de recipiente más muestra.....	68
Figura 12. Peso Unitario – masa de recipiente .....	68
Figura 13. Peso Unitario – apisonado por capas del agregado.....	69
Figura 14. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – muestreo de los agregados ....	69
Figura 15. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – secado de las muestras.....	70
Figura 16. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – muestras sumergidas .....	70
Figura 17. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – secado Superficial .....	71
Figura 18. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – recolección de muestras.....	71
Figura 19. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – peso sumergido .....	72
Figura 20. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – secado al horno del material...72	72
Figura 21. P. Específico y absorción del A.G. y A.R. – peso de las muestras secas ...73	73
Figura 22. P. Específico y absorción del A.F. – muestreo del material .....	73
Figura 23. P. Específico y absorción del A.F. – secado al horno .....	74
Figura 24. P. Específico y absorción del A.F. – saturación .....	74
Figura 25. P. Específico y absorción del A.F. – decantación del agregado.....	75

Figura 26. P. Específico y absorción del A.F. – Secado al sol .....	75
Figura 27. P. Específico y absorción del A.F. – Tamizado .....	76
Figura 28. P. Específico y absorción del A.F. – comprobación de la humedad .....	76
Figura 29. P. Específico y absorción del A.F. – muestra en estado SSS .....	77
Figura 30. P. Específico y absorción del A.F. – picnómetro + muestra .....	77
Figura 31. P. Específico y absorción del A.F. – picnómetro + muestra + agua .....	78
Figura 32. P. Específico y absorción del A.F. – Baño maría .....	78
Figura 33. P. Específico y absorción del A.F. – extracción de burbujas .....	79
Figura 34. P. Específico y absorción del A.F. – reposo de 24 h .....	79
Figura 35. P. Específico y absorción del A.F. – peso sumergido .....	80
Figura 36. P. Específico y absorción del A.F. – peso seco .....	80
Figura 37. P. Específico y absorción del A.F. – picnómetro con agua .....	81
Figura 38. Granulometría – tamices en orden .....	82
Figura 39. Granulometría – vertimiento de la muestra .....	83
Figura 40. Granulometría – tamizado manual .....	83
Figura 41. Granulometría – peso de cada retenido .....	84
Figura 42. Curva Granulométrica – resultado ag. fino .....	91
Figura 43. Curva Granulométrica – resultado ag. grueso .....	92
Figura 44. Curva Granulométrica – resultado ag. reciclado .....	93
Figura 45. Vertimiento de las mezclas de A.G. y A.R. en un recipiente .....	97
Figura 46. Proceso de batido manual del A.G. y A.R. ....	98
Figura 47. Muestras homogéneas con reemplazo parcial de A.R. ....	98
Figura 48. P.U. proporciones – vertimiento del agregado en el molde .....	99
Figura 49. P.U. proporciones – nivelación de superficie del agregado .....	99
Figura 50. P.U. proporciones – limpieza de material excedente .....	100
Figura 51. P.U. proporciones – masa de recipiente más muestra .....	100
Figura 52. P.U. proporciones – masa de recipiente .....	101
Figura 53. P.U. proporciones – apisonado por capas del agregado .....	101

Figura 54. Elaboración y curado del concreto – proporciones de los materiales.....	105
Figura 55. Elaboración y curado del concreto – humedecimiento de los equipos .....	106
Figura 56. Elaboración y curado del concreto – se introducen los materiales.....	106
Figura 57. Elaboración y curado del concreto – preparación de los moldes .....	107
Figura 58. Elaboración y curado del concreto – llenado de los moldes.....	107
Figura 59. Elaboración y curado del concreto – desmoldado a las 24h .....	108
Figura 60. Elaboración y curado del concreto – curado de los especímenes.....	108
Figura 61. Rotura de probetas – medidas de los especímenes a ensayar.....	109
Figura 62. Rotura de probetas – peso de los especímenes .....	109
Figura 63. Rotura de probetas – colocación de los bloques de rotura .....	110.

## RESUMEN

La presente investigación abordó el aprovechamiento del concreto proveniente de material demolido como sustituto parcial del agregado grueso natural en el diseño de mezclas de concreto para su aplicación en canales. El objetivo principal fue determinar de qué forma este tipo de concreto podía ser reutilizado, evaluando su comportamiento físico, mecánico, ambiental y económico. Se elaboraron cinco diseños de mezcla, uno estándar y cuatro con reemplazos de 20 %, 30 %, 40 % y 50 % de agregado grueso por agregado reciclado. La metodología empleada fue de tipo experimental, realizando ensayos de laboratorio para determinar propiedades como la resistencia a la compresión, peso unitario, peso específico, granulometría, humedad, y absorción. Los resultados mostraron que, hasta un 50 % de reemplazo, el concreto reciclado mantuvo propiedades dentro de rangos aceptables, comparables al concreto tradicional. El análisis económico reveló una reducción significativa en los costos de producción, mientras que en el aspecto ambiental se evidenció una disminución en el uso de materiales vírgenes y en la generación de residuos de construcción. Se concluyó que el concreto reciclado es una alternativa técnica y ambientalmente viable para la construcción de canales, alineada con los principios de sostenibilidad. Además, se destacó la necesidad de continuar investigando su desempeño a largo plazo y bajo condiciones variables para ampliar su aplicación en otros tipos de infraestructura.

**Palabras clave:** agregado reciclado; canales; concreto; demolición; sostenibilidad.

## ABSTRACT

This research addressed the use of concrete from demolished material as a partial replacement for natural coarse aggregate in concrete mix design for application in irrigation channels. The main objective was to determine how this type of concrete could be reused by evaluating its physical, mechanical, environmental, and economic performance. Five mix designs were developed: one standard and four with 20 %, 30 %, 40 %, and 50 % replacement of natural coarse aggregate with recycled aggregate. The methodology was experimental, with laboratory tests conducted to determine properties such as compressive strength, unit weight, specific gravity, gradation, moisture content, and absorption. The results showed that up to 50 % replacement, the recycled concrete maintained properties within acceptable ranges, comparable to traditional concrete. The economic analysis revealed a significant reduction in production costs, while the environmental aspect showed a decrease in the use of virgin materials and the generation of construction waste. It was concluded that recycled concrete is a technically and environmentally viable alternative for channel construction, aligned with sustainability principles. Furthermore, the need to continue investigating its long-term performance under variable conditions was highlighted to expand its application to other types of infrastructure.

**Keywords:** canals; concrete; demolition; recycled aggregate; sustainability.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda un problema actual y significativo en el campo de la ingeniería civil, la gestión y reutilización de los residuos de construcción, particularmente el concreto demolido.

Estos residuos contribuyen a la contaminación del suelo y del agua, la proliferación de plagas y la emisión de partículas contaminantes al aire. Además, la falta de una gestión adecuada de los desechos ha llevado a una creciente necesidad de explotar nuevos recursos naturales como arena y grava, exacerbando la degradación ambiental y aumentando los costos de los proyectos de construcción. Ante este contexto, la investigación propone una solución sostenible mediante la reutilización del concreto proveniente de material demolido en el diseño de mezclas de concreto para la construcción de canales.

El propósito de este estudio es determinar el porcentaje óptimo de material demolido que puede ser reutilizado en dichas mezclas. Se espera que, al emplear estos escombros, no solo se reduzca la demanda de materiales vírgenes, sino que también se mejoren las propiedades físicas y mecánicas del concreto. La investigación tiene como objetivo demostrar que la reutilización del concreto proveniente de este material ofrece una alternativa viable, tanto desde una perspectiva económica como ambiental, en el sector de la construcción. Asimismo, se busca contribuir a la disminución de los impactos ambientales asociados a la explotación de nuevos recursos y la disposición inadecuada de residuos.

En cuanto a la estructura de esta tesis, el documento se organiza en cinco capítulos. El primer capítulo expone el problema de investigación, formulando las preguntas clave, los objetivos y la justificación del estudio. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico, donde se analizan los antecedentes y fundamentos científicos que respaldan la reutilización del concreto proveniente de materiales de demolición en el concreto. En el tercer capítulo, se describe el marco metodológico, detallando el diseño experimental y los procedimientos utilizados para la recolección y análisis de los datos, en el cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos y el quinto capítulo corresponde a la discusión, donde se interpretan los resultados obtenidos en función de los objetivos e hipótesis planteados, comparándolos con investigaciones previas, ya sean similares o diferentes, y señalando la importancia de los hallazgos. Seguidamente, se presenta las conclusiones, mostrando cómo esta investigación

contribuye al estado actual del conocimiento en el área de estudio. Aquí, se justifica científicamente el trabajo realizado, destacando si las hipótesis fueron aceptadas o rechazadas, y sugiriendo futuras investigaciones sin presentar nuevos resultados, además de las recomendaciones orientadas a complementar los resultados obtenidos, señalando las implicancias metodológicas y sugiriendo líneas para futuras investigaciones. Finalizando con las referencias bibliográficas utilizadas, actualizadas conforme a la información incluida en el informe final.

Este trabajo espera proporcionar un aporte relevante en la búsqueda de soluciones sostenibles en la construcción, promoviendo el uso eficiente de los recursos y contribuyendo a la mejora del entorno urbano y rural.

## CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Descripción del problema

La presente investigación busca encontrar el porcentaje óptimo de un diseño de mezcla de concreto adicionando material demolido proveniente del concreto que se desecha.

Un artículo publicado en Colombia por Acevedo (2023) nos indica que los residuos que se generan durante las actividades de construcción y demolición suelen tener un impacto negativo tanto en el entorno natural como en el paisaje urbano y rural. Este problema no solo radica en la gran cantidad de desechos que se producen, sino también en la forma inadecuada en que suelen ser gestionados. La falta de conciencia y análisis sobre su aprovechamiento impide que estos materiales se reutilicen eficientemente, desaprovechando su potencial valor y utilidad en nuevos procesos productivos. En muchos casos, estos residuos terminan sin control en vertederos o depósitos ilegales, generando consecuencias sociales y ambientales importantes.

Así mismo el Ministerio de Salud a través de la DIGESA (2004) afirma que, en el Perú, uno de los mayores desafíos en la gestión de residuos sólidos es su disposición final. Aunque muchas ciudades cuentan con sistemas adecuados de recolección, es frecuente que los desechos terminen arrojándose en ríos, quebradas, zonas costeras u otros espacios públicos. Esta práctica, comúnmente conocida como el uso de botaderos, representa una seria amenaza tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas que habitan cerca de estos lugares.

Estudios realizados por INDECI (2007) indican lo que “en la Ciudad de Tacna, han existido muchos lugares donde anteriormente, se han estado utilizando como botadero de residuos, sin ningún tipo de control sanitario, ni autorización, esto lugares, representan aún un foco potencial para seguir activos, como el caso del que se encuentra ubicado en la Av. Manuel A. Odría (entre el óvalo Cristo Rey y el óvalo Tarapacá) sobre aproximadamente 15 000 m<sup>2</sup> con desmontes de construcción y otros” (p. 112).

En este contexto, la relevancia de la investigación radica en la búsqueda de soluciones sostenibles que permitan reducir el impacto ambiental, a través de la reutilización del concreto para su aplicación en canales. A continuación, se plantean las preguntas que guían la investigación y se establecen los objetivos de este estudio.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿De qué forma se puede reutilizar el concreto proveniente del material demolido, en el diseño de mezclas de concreto para su aplicación en canales – Tacna, 2024?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cómo influye el uso del concreto proveniente del material demolido en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto?
- b. ¿Qué tan factible es la implementación del concreto elaborado con material demolido en comparación con el concreto tradicional para la elaboración de canales?
- c. ¿Cuál es el impacto ambiental generado al producir mezclas de concreto con material demolido?
- d. ¿Cuál es el impacto económico tras la reutilización de material demolido en las mezclas de concreto?

## **1.3. Justificación e importancia**

A continuación, se justificará en los siguientes aspectos:

### **a. Justificación científica (académica)**

La investigación está alineada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 – Industria, Innovación e Infraestructura, ya que el estudio de la reutilización del concreto proveniente del material demolido en mezclas de concreto aporta significativamente al campo de la ingeniería civil y la ciencia de materiales. Evaluar el comportamiento del concreto con material reciclado contribuye al desarrollo de alternativas sostenibles y eficientes para la construcción. Este estudio experimental proporcionará datos empíricos sobre el impacto del uso de escombros en las propiedades mecánicas en el nuevo concreto, lo cual puede ser la base para futuras investigaciones en el campo de la construcción sostenible.

### **b. Justificación social**

La investigación está alineada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 – Ciudades y Comunidades Sostenibles, ya que busca promover el uso de materiales

de construcción reciclados y más accesibles para la sociedad. La reutilización de escombros puede reducir los costos de construcción, lo que beneficiaría particularmente a comunidades de bajos recursos que necesitan soluciones habitacionales económicas. Además, al contribuir a la gestión adecuada de los residuos de construcción, la investigación tiene el potencial de mejorar la calidad de vida al reducir la contaminación urbana.

### **c. Justificación económica**

Desde una perspectiva económica, esta investigación es crucial para evaluar la viabilidad económica de la reutilización del concreto proveniente del material demolido en la producción de concreto. Identificar los costos y beneficios económicos de este enfoque sostenible permitirá determinar su competitividad en el mercado de la construcción. La introducción de materiales reciclados en la industria de la construcción puede abrir nuevas oportunidades de negocio, reducir los costos de producción y promover un crecimiento económico más eficiente y responsable.

### **d. Justificación ambiental**

El uso de material demolido para diseñar una mezcla de concreto reduce el impacto ambiental de la industria de la construcción, contribuyendo a la disminución de la extracción de materiales vírgenes y la generación de desechos. Esta investigación promueve la conservación de recursos naturales, la reducción de emisiones de carbono y la disminución de la huella ecológica asociada con la producción de concreto elaborado de forma tradicional. Al fomentar la reutilización de residuos de construcción, este proyecto contribuye directamente a la sostenibilidad ambiental y al manejo responsable de los desechos de obra.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar de qué forma es posible reutilizar el concreto proveniente del material demolido en el diseño de mezclas de concreto para su aplicación en canales – Tacna, 2024.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Analizar la influencia del uso de material demolido en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto
- b. Comprobar la factibilidad del uso del concreto elaborado con material proveniente de demoliciones frente al concreto tradicional para la construcción de canales
- c. Determinar el impacto ambiental de la producción de mezclas de concreto con material demolido
- d. Explicar el impacto económico de la reutilización de material demolido en las mezclas de concreto

#### **1.5. Hipótesis**

##### **1.5.1. Hipótesis general**

El concreto elaborado con material proveniente de demoliciones representa una alternativa viable y sostenible para su aplicación en canales – Tacna, 2024.

##### **1.5.2. Hipótesis específicas**

- a. El uso de material demolido mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto, haciéndolo comparable o superior al concreto tradicional
- b. El concreto elaborado con material demolido presenta un comportamiento adecuado y similar al comportamiento del concreto convencional aplicado en la construcción de canales
- c. La producción de concreto con material demolido reduce el impacto ambiental en comparación con la producción de concreto tradicional
- d. La reutilización de material demolido en las mezclas de concreto genera ahorros económicos en comparación con el uso de materiales vírgenes

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1. Antecedentes locales

Carizaile y Anquise (2015), afirmaron en su tesis que “el estudio tuvo como objetivo analizar las propiedades del concreto elaborado con agregado reciclado y determinar si su utilización resultaba viable para la construcción de viviendas en la ciudad de Tacna. La investigación presentó un enfoque cuantitativo, carácter descriptivo y diseño experimental, ya que se enfocó en la fabricación de concreto reciclado. Se elaboraron 16 diseños de mezclas representativas, considerando porcentajes de sustitución de 10 %, 20 %, 50 % y 100 % para resistencias a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup> a 280 kg/cm<sup>2</sup>, con la inclusión de aditivos. Los resultados obtenidos indicaron que las propiedades del concreto reciclado fueron similares a las de un concreto convencional; sin embargo, su costo de producción resultó ser más elevado, debido a que el precio del agregado reciclado fue 20 soles mayor en comparación con el agregado convencional” (p. 6).

Machaca (2018), presentó su tesis que tiene por fin “determinar en qué medida la producción de agregado reciclado es una alternativa para mitigar los impactos ambientales de los residuos de construcción en la ciudad de Tacna”; con este fin se optó por una investigación aplicada con diseño en una primera parte descriptivo cualitativo y cuantitativo, se realizó una evaluación de los focos de depósitos con residuos de construcción, seguidamente se evaluó el impacto ambiental de los residuos sobre las componentes ambientales. En una segunda parte el diseño es experimental, se experimentó con el diseño de mezcla usando agregado reciclado para fabricar concreto estructural. Concluyéndose que el concreto con agregados reciclados, son factibles de ser usados como concreto estructural en obras civiles y es una alternativa para mitigar el impacto ambiental. A su vez los impactos en Cambio del Uso Actual del Suelo y afectación del Paisaje Visual son significativos” (p. 18).

Huillca y Quispe (2023), destacaron en su tesis “una propuesta para realizar la valoración de los RCD mediante el uso del agregado grueso reciclado (RCA) para la elaboración de un nuevo concreto, de esta forma se buscó reducir el volumen de extracción de material granular en canteras y la eliminación de los RCD. La investigación es de enfoque cuantitativo, carácter descriptivo y diseño experimental; siendo el objeto de estudio el RCA, pues este insumo fue utilizado en proporciones de 30 %, 50 % y 100 % en reemplazo del agregado grueso natural (NCA) para la elaboración del concreto

con agregado grueso reciclado (RCAC) en la construcción de veredas, con resistencia de diseño  $210 \text{ kgf/cm}^2$ . Como resultado se obtuvo que todos los diseños de mezcla cumplen con la resistencia, el costo para la construcción de veredas por  $\text{m}^2$  con RCAC al 100 % es 15,25 % más caro que un NAC y el impacto ambiental (IA) en los componentes suelo y paisajístico que se genera por el uso del RCAC es menor en comparación del NAC, debido a que el volumen de explotación de material granular y de eliminación de los RCD se reducen en un 50 %” (p. 3).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Guerra (2022), presentó su tesis, la cual indica que “el diseño de concreto reciclado para muros prefabricados en Villa María del Triunfo, se describe el procedimiento utilizado en Europa para triturar concreto demolido. La investigación, de enfoque aplicado y experimental, tuvo como propósito desarrollar un concreto con agregado grueso reciclado que lograra una resistencia a la compresión de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ . Para ello, se evaluaron 280 probetas y 10 vigas elaboradas con concreto natural y reciclado, aplicando técnicas de campo y análisis cuantitativo. Los resultados demostraron que, al reemplazar el agregado grueso natural en proporciones de 25 % a 100 %, el concreto reciclado alcanzó la resistencia mínima requerida a los 28 días” (p. 5).

Caycho y Espinoza (2019), destacaron en su tesis que en “su estudio realizado en el distrito de La Molina en 2019, se evaluó el uso de concreto con agregado grueso reciclado empleando cemento Portland Tipo HS, con el propósito de mejorar las propiedades del concreto destinado a cimentaciones. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, con una metodología explicativa y un diseño longitudinal prospectivo. El objetivo principal fue identificar una mezcla que optimizara el desempeño del concreto reciclado en dichas estructuras. Los resultados indicaron que la resistencia a la compresión, en todas las edades evaluadas y en todos los porcentajes de reemplazo, superó los  $280 \text{ kg/cm}^2$ . No obstante, se advirtió una disminución progresiva en dicha resistencia conforme aumentaba la proporción de agregado reciclado en la mezcla” (p. 13).

Chasquero y Hurtado (2019), presentaron su tesis titulada, la cual indica que “en una investigación desarrollada en la ciudad de Jaén, se examinó la viabilidad de emplear concreto reciclado en la producción de afirmado, con el objetivo de evaluar mezclas que cumplieran con las especificaciones técnicas del Manual de Carreteras del M.T.C. Para ello, se combinaron distintas proporciones de concreto reciclado con suelo natural, proveniente de una cantera local, mientras que el material reciclado fue recolectado en

tres botaderos informales. A las mezclas resultantes se les aplicaron diversos ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, entre ellos, análisis granulométrico, límites de Atterberg, Proctor Modificado y CBR. Los resultados mostraron que las proporciones de 70 % de concreto reciclado con 30 % de suelo natural, así como la mezcla 60 % - 40 %, lograron cumplir satisfactoriamente con los requisitos establecidos para materiales de afirmado según la normativa vigente” (p. 12).

### **2.1.3. Antecedentes internacionales**

Silva et al. (2022), presentaron su tesis el cual “tuvo como objetivo general diseñar mezclas de concreto a partir de materiales granulares y residuos de construcción y demolición (RCD) extraídos de la vereda Barzalosa, en el municipio de Girardot, Cundinamarca. Se llevó a cabo una investigación de tipo aplicada y experimental, elaborando nueve probetas cilíndricas bajo una metodología de investigación descriptiva. A partir de este estudio, se concluyó que, de acuerdo con los ensayos realizados y la resistencia a la compresión obtenida en los cilindros de concreto elaborados, se demostró la factibilidad del aprovechamiento de los residuos de construcción para la elaboración de nuevas mezclas de concreto” (p. 13).

Escobedo (2022), presentó su tesis el cual “tuvo como objetivo ofrecer una solución a la gestión de residuos de concreto en Guatemala, dado que, hasta ese momento, no existían lineamientos específicos ni un plan estratégico para la reutilización y gestión de residuos provenientes de la construcción, remodelación y demolición de estructuras, lo cual provocaba la disposición incontrolada de dichos materiales en distintos lugares. Por ello, se presentó una propuesta de reutilización de residuos de concreto como agregados gruesos en un diseño de mezcla de concreto no estructural. El comportamiento del concreto elaborado con agregados gruesos reciclados demostró ser similar al del concreto convencional que utiliza agregados naturales, lo que sugirió la factibilidad de reutilizar residuos de concreto provenientes de demoliciones, remodelaciones y construcciones como agregados gruesos en mezclas de concreto no estructural destinadas a la construcción de banquetas” (p. 23).

Téllez y Rangel (2020) presentaron su tesis, el cual “tiene por objetivo determinar el porcentaje de material árido reciclado óptimo para el diseño de una mezcla de concreto de 3 000 psi. Este proyecto realizó un diseño de mezclas de concreto con reciclaje de áridos. Para ello, se realizó una investigación aplicada tipo descriptiva ya que expresan características de un grupo y se analizan variables, componentes y fenómenos del objeto de estudio. De acuerdo al desarrollo de la investigación y los datos

obtenidos de esta se puede concluir que: El proceso de acopio y clasificación del material es un proceso tedioso puesto que no se encuentra un proceso establecido y los cilindros son acumulados conforme se van desechando, la única forma como se pueden diferenciar es por el número consecutivo que describe el tipo de mezcla de donde se tomó la muestra, este proceso se puede facilitar adecuando un espacio en la empresa donde los residuos estén independientes, marcados y separados, con el fin de que a medida que se va produciendo material se vaya clasificando por su tipo” (p. 104).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Enfoque conceptual y contextual de la reutilización del concreto demolido**

El artículo 6 del Decreto Supremo N°003 (2013) afirma que “Los residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos residuos generados en las actividades y procesos de construcción, rehabilitación, restauración, remodelación y demolición de edificaciones e infraestructura” (Ministerio de Energía y Minas, 2013, p. 5).

Según lo señalado por el MINAM y MVCS (2016). Los residuos provenientes de intervenciones menores en edificaciones surgen como resultado de actividades que buscan modificar una construcción ya existente, sin que ello implique cambios significativos en su estructura portante ni en su función original. Estas intervenciones pueden tomar la forma de remodelaciones, refacciones o adaptaciones puntuales de infraestructuras previamente construidas, siempre que no comprometan la integridad estructural del inmueble. Este tipo de actividades debe cumplir con ciertos criterios establecidos. Entre ellos se encuentra el cumplimiento estricto de los parámetros urbanísticos y edificatorios vigentes.

Además, la intervención debe limitarse a un área techada menor a los 30 metros cuadrados cuando no sea posible medirla con exactitud. Asimismo, el valor total de la obra no debe superar las seis (6) Unidades Impositivas Tributarias (UIT). Finalmente, estas intervenciones se ejecutan bajo la entera responsabilidad del propietario, quien asume los posibles efectos o implicancias del trabajo realizado (p. 10).

Además de ello, es importante brindan las siguientes definiciones para obras menores:

- *Obra de ampliación:* En una norma técnica, MVCS (2021) define que es una “Obra que se ejecuta incrementando la cantidad de metros cuadrados de área techada de un edificio preexistente, dentro de los límites de un lote” (p. 5).

- *Obra de remodelación:* En una norma técnica, MVCS (2021) define que “Es la obra que se ejecuta para modificar la distribución de los ambientes con el fin de adecuarlos a nuevas funciones o incorporar mejoras sustanciales, dentro de una edificación existente, sin modificar el área techada” (p. 22).
- *Obra de refacción:* En una norma técnica, MVCS (2021) define que “Es la obra de mejoramiento y/o renovación de instalaciones, equipamiento y/o elementos constructivos sin alterar el uso, el área techada ni los elementos estructurales de la edificación existente” (p. 22).

Estos residuos pueden variar, pudiendo tener restos como piedras, ladrillos, arena, entre otros.

En el contexto nacional, diversas ciudades del Perú enfrentan una creciente acumulación de RCD debido al dinamismo del sector construcción, siendo Tacna una de las más afectadas por la falta de plantas de procesamiento y la proliferación de botaderos informales. Estudios locales indican:

Se ha afirmado que “en Tacna, En la ciudad de Tacna, han existido muchos lugares donde anteriormente, se han estado utilizando como botaderos de residuos, sin ningún tipo de control sanitario, ni autorización respectiva, estos lugares, medianamente controlados, representan aún, un foco potencial para proseguir sirviendo de botaderos, (DME), sin un proceso sistemático de reciclaje, lo cual evidencia la necesidad de iniciativas como la presente investigación” (Machaca, 2018, p. 33).

### **2.2.2. Fundamento del reciclaje de concreto**

El concreto demolido destinado a ser reutilizado debe cumplir ciertos criterios técnicos que garanticen su viabilidad en nuevas mezclas. Entre estos se incluyen: que el material provenga de estructuras libres de contaminantes (como tierra, yeso o restos orgánicos), que tenga una resistencia mínima aceptable, y que no haya estado expuesto a agentes químicos agresivos, los elementos estructurales seleccionados para la recolección del concreto reciclado provinieron de veredas, canales, sardineles y losas de proyectos ejecutados en el distrito de Calana, en la ciudad de Tacna, y fueron sometidos a un proceso de caracterización previo mediante ensayos estandarizados.

El proceso de reciclaje del concreto demolido inicia con la recolección del material y continúa con su trituración mecánica hasta obtener fragmentos de tamaño similar al del agregado grueso natural. Posteriormente, el material es tamizado y clasificado según su granulometría, peso unitario y contenido de humedad, siguiendo las especificaciones técnicas de las normas peruanas y estándares internacionales (ACI

555R-01; INACAL, 2021). Donde se aplican procedimientos conforme a las normas NTP 400.012 (granulometría), NTP 400.017 (peso unitario), y NTP 339.185 (contenido de humedad), con el fin de asegurar que los agregados reciclados cumplieran las condiciones técnicas necesarias para su uso en el diseño de mezclas.

### **2.2.2.1. Instrumentos y Políticas en Gestión Ambiental**

En una guía informativa publicada. Ministerio del Ambiente y Ministerio de Vivienda, construcción y Saneamiento (2016), nos informa que:

El Ministerio del Ambiente es el organismo del Poder Ejecutivo, rector del sector ambiental, que desarrolla, dirige, supervisa y ejecuta la Política Nacional del Ambiente. Asimismo, cumple la función de promover la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales, la diversidad biológica y las áreas naturales protegidas. Tiene la función específica de promover y coordinar la adecuada gestión de residuos sólidos, la protección de la calidad del aire y el control del ruido y de las radiaciones no ionizantes; además, sanciona su incumplimiento. En ese sentido, con la finalidad de ordenar la gestión ambiental en el país y en cumplimiento a la Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, se aprobó la Política Nacional del Ambiente mediante el Decreto Supremo N°012-2009-MINAM, la cual fue formulada sobre la base del análisis de la situación ambiental del país, tomando en cuenta las políticas implícitas y lineamientos que sustentaron la elaboración de planes y estrategias nacionales en materias como diversidad biológica, bosques, cambio climático, residuos sólidos, saneamiento, sustancias químicas, entre otros. La Política Nacional del Ambiente - PNA es de cumplimiento obligatorio en los niveles del gobierno nacional, regional y local y de carácter orientador para el sector privado y la sociedad civil. Se estructura con base a cuatro ejes temáticos esenciales de la gestión ambiental, siendo el Eje de Política 2. Gestión Integral de la Calidad Ambiental, el que incorpora nueve lineamientos de política de residuos sólidos, los cuales están orientados a alcanzar el desarrollo sostenible del país.

Para asegurar la PNA es necesario la implementación de instrumentos de planificación ambiental nacional de largo plazo. Por ello, mediante el Decreto Supremo N°004-2011-MINAM, se aprobó el Plan Nacional de Acción Ambiental 2011-2021 - PLANAA. Este documento establece la Meta 2. Residuos sólidos, que tiene una meta prioritaria: 100 % de residuos sólidos del ámbito municipal son manejados, reaprovechados y dispuestos adecuadamente. Otro instrumento de planificación y gestión ambiental es la Agenda Nacional de Acción Ambiental - Agenda Ambiente 2015-

2016, la cual establece objetivos y cada uno de los cuales contiene actividades, indicadores y productos que son importantes oportunidades para lograr el desarrollo sostenible nacional.

En el frente ambiental: iii) Calidad ambiental, para los residuos sólidos se considera lo siguiente: Objetivo 10. Mejorar la gestión de los residuos sólidos. Producto 29.1. Los gobiernos locales diseñan e implementan sistemas de gestión integral de residuos sólidos municipales. Indicador de producto 29.1.1: noventa y un (91) gobiernos locales que implementan sistemas de gestión integral de residuos sólidos municipales. Actividades: c) Implementación del sistema de gestión integral de residuos sólidos municipales y d) Seguimiento y monitoreo de la implementación del sistema de gestión integral de residuos sólidos municipales. (pp 2-3)

#### **2.2.2.2. Tendencias actuales en reutilización de materiales en la construcción**

En las últimas décadas, la industria de la construcción ha comenzado a transitar desde un enfoque tradicional basado en el consumo intensivo de recursos naturales hacia un modelo más sostenible, impulsado por los principios de la economía circular, la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático. Esta transformación responde no solo a la escasez progresiva de materiales vírgenes como áridos, cemento o acero, sino también a las exigencias normativas y sociales en materia de sostenibilidad ambiental.

Una de las principales tendencias actuales es el incremento en el uso de materiales reutilizados y reciclados en diferentes etapas del proceso constructivo. Entre los materiales más empleados se encuentran los agregados reciclados (provenientes de concreto demolido), residuos cerámicos, plásticos postindustriales, fibras de vidrio, madera recuperada y subproductos industriales como cenizas volantes y escorias de alto horno. Estos materiales son incorporados como sustitutos parciales o totales de componentes tradicionales en la fabricación de concretos, morteros, elementos prefabricados, pavimentos y aislantes térmicos, entre otros.

Este cambio ha sido favorecido por una creciente conciencia ambiental en el sector y por la implementación de normativas y programas de certificación ecológica a nivel internacional, como LEED, BREEAM y EDGE, los cuales incentivan el uso de insumos reciclados al otorgar puntuaciones favorables en las evaluaciones de sostenibilidad de los proyectos. Asimismo, organismos como la Comisión Europea, el PNUMA y la Fundación Ellen MacArthur han promovido activamente la transición del

sector construcción hacia modelos circulares, fomentando la investigación, el desarrollo tecnológico y la formulación de políticas públicas que apoyen la reutilización de materiales.

En el contexto latinoamericano, y particularmente en el Perú, estas tendencias han empezado a consolidarse a través de proyectos piloto, normativas técnicas específicas y estudios universitarios que evidencian la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de materiales reciclados en obras civiles. Según Guerra y Niño (2022), el concreto reciclado se posiciona como uno de los materiales más prometedores debido a su alta disponibilidad, bajo costo relativo y aceptable desempeño físico-mecánico en aplicaciones no estructurales y semiestructurales, como veredas, sardineles, losas de pavimento y canales de conducción.

Además, el avance de las tecnologías de demolición selectiva, chancado controlado y clasificación automática ha permitido mejorar la calidad del material reciclado, reduciendo su variabilidad y permitiendo su inclusión progresiva en obras de mayor exigencia técnica.

### **2.2.2.3. Ventajas y desventajas del uso de material reciclado**

#### **a. Ventaja**

El uso de residuos de construcción y demolición (RCD) ofrece múltiples beneficios, como la minimización de escombros que terminan en vertederos, lo que reduce significativamente el impacto ambiental. Además, el concreto reciclado puede utilizarse en el mismo lugar donde se genera, disminuyendo la necesidad de transporte y reduciendo el consumo energético asociado a la extracción de nuevos materiales. Esto genera también un ahorro económico, ya que reciclar los escombros puede ser más barato que su disposición final en vertederos. (Guacaneme, 2015, p. 45)

#### **b. Desventaja**

A pesar de sus ventajas, el concreto reciclado presenta algunas limitaciones, como la calidad variable del material, que puede ser inferior a la del concreto convencional. Además, los agregados reciclados tienden a absorber más agua, lo que afecta su trabajabilidad y durabilidad. Debido a estas características, el uso del concreto reciclado puede no ser adecuado para aplicaciones

estructurales de alta demanda, lo que limita su empleo a proyectos con menores requisitos de resistencia. (Guacaneme, 2015, p. 46)

#### **2.2.2.4. Estudios previos sobre la reutilización de material de demolición**

Uno de los estudios más destacados es el de la Unión Europea, donde aproximadamente el 46 % de los residuos de construcción y demolición son reutilizados en diversos proyectos de construcción, incluyendo la producción de nuevas estructuras y la fabricación de elementos prefabricados. Este enfoque ha mostrado beneficios claros al reducir la necesidad de materias primas vírgenes y disminuir el impacto ambiental. (Guerra, 2022, p. 58)

Además, un estudio en Botsuana ha evaluado la utilización de agregados gruesos reciclados en lugar de naturales. Los resultados mostraron que los agregados reciclados pueden ser adecuados para aplicaciones no estructurales, como sub-bases y rellenos, pero su resistencia mecánica es inferior a la de los agregados vírgenes, lo que limita su uso en estructuras que requieren alta resistencia. (Guerra, 2022, p. 60)

#### **2.2.2.5. Responsabilidades de los gobiernos locales**

A través del Decreto Supremo N°057, PCM (2004) menciona que “Asegurar la erradicación de los lugares de disposición final inapropiada de residuos sólidos, así como la recuperación de las áreas degradadas por dicha causa, bajo los criterios que para cada caso establezca la Autoridad de Salud” (p. 3).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Implementar centros de recolección para el acopio de residuos provenientes de obras menores en condiciones de higiene y seguridad hasta su disposición final” (p. 17).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Formular estrategias para facilitar el acceso de los generadores de residuos de obras menores a los servicios de EPS-RS, a fin de garantizar su disposición adecuada” (p. 17).

Zonificación para la disposición final y ubicación de áreas para escombreras Las municipalidades provinciales en coordinación con las municipalidades distritales, en función de los criterios y parámetros establecidos para la localización de las escombreras, establecen, publican y actualizan la zonificación donde podrá localizarse dicha infraestructura. Para tal fin, realizarán la evaluación e

identificación de espacios geográficos en su jurisdicción que puedan ser utilizados para la ubicación de proyectos de infraestructura. (Decreto Supremo N°003, 2013, p. 27).

Para la ubicación de áreas para escombreras, las municipalidades y sectores involucrados podrán hacer uso de áreas abandonadas por labores mineras no metálicas (canteras-tajos abiertos) identificadas como pasivos ambientales mineros, a través de la ejecución del plan de cierre de minas, en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas, previa aprobación de Digesa. (Decreto Supremo N°003, 2013, p. 27).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Promover la implementación de infraestructuras y equipamiento para el manejo adecuado de los residuos en su jurisdicción, en coordinación con Digesa y el Ministerio de Viviendas, Construcción y Saneamiento” (p.32).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Implementar sistemas de recojo de residuos provenientes de obras menores, así como el equipamiento (envases y sacos de material resistente o recipientes) según corresponda, para el almacenamiento de los RCD de obras menores domiciliarias o de infraestructura” (p. 32).

#### **2.2.2.6. Responsabilidades de la comunidad**

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Contar con las autorizaciones de las autoridades competentes. Ejemplo: licencia de obra para remodelación, ampliación, modificación (obras menores)” (p. 11).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Brindar las facilidades necesarias a las autoridades municipales, de salud y sectoriales para que cumplan con sus funciones de supervisión y fiscalización en cumplimiento de la norma” (p. 24).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Recolectar y embalar los residuos sólidos considerados como peligrosos en lugares y envases seguros dentro de la obra, previa clasificación y descripción de las características por tipo de residuo, asegurando el etiquetado de cada envase para su traslado a un relleno de seguridad” (p. 24).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “El titular es responsable (Generador, EPS-RS, ECRS según corresponda) del manejo seguro,

sanitario y ambientalmente adecuado de los residuos, así como de cualquier daño que pudiera producirse por incumplimiento del Reglamento de los RCD, sea por acción u omisión” (p. 40).

A través del Decreto Supremo N°003, MINEM (2013) menciona que “Asumir el costo que genera el servicio del traslado o manejo de los RCD” (p. 24).

#### **2.2.2.7. Accionar del Estado frente a la gestión de los RCD**

De acuerdo con la guía informativa elaborada por el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Viviendas, Construcción y Saneamiento, MINAM y MVCS (2016), el accionar del Estado peruano frente a la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) se encuentra claramente regulado en concordancia con la legislación nacional vigente. El Ministerio de Viviendas, Construcción y Saneamiento (Vivienda) es la entidad competente para establecer normas, llevar a cabo la evaluación y supervisión, así como ejercer la fiscalización y aplicar sanciones relacionadas con la gestión y el manejo de los RCD. Esta atribución se realiza sin menoscabar las competencias que también poseen otras instituciones públicas involucradas en la gestión de residuos.

Como parte de su labor normativa, Vivienda aprobó el Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición, a través del Decreto Supremo N°003-2013-Vivienda, el cual fue promulgado el 7 de febrero de 2013. Este reglamento constituye el principal instrumento técnico-legal que define las responsabilidades, procesos y procedimientos que deben seguirse en el manejo de estos residuos, buscando promover una adecuada gestión ambiental en las actividades del sector construcción.

Complementariamente, en el marco del Plan de Incentivos a la Mejora de la Gestión y Modernización Municipal correspondiente al año 2013, el MVCS estableció metas específicas para fortalecer la gestión municipal de los RCD. En ese sentido, se implementó la Meta 9, referida a la identificación, cuantificación y clasificación de los residuos de construcción y demolición que se encontraban depositados en espacios públicos, y la Meta 32, que exigía la elaboración de un plan de gestión de dichos residuos, considerando tanto aquellos ubicados en áreas públicas como los generados en obras menores. Estas metas fueron formalizadas mediante el Decreto Supremo N°002-2013-EF, y representaron un avance significativo en la incorporación del manejo de RCD en la planificación municipal.

Asimismo, en el año 2014, se estableció la Meta 39, cuyo objetivo era mejorar la gestión de los residuos derivados de obras menores en el ámbito de los gobiernos locales. Para cumplir con esta meta, las municipalidades clasificadas como tipo B debían presentar un diagnóstico detallado de los residuos sólidos provenientes de actividades de construcción y demolición que hubiesen sido abandonados en espacios públicos o resultaran de obras de pequeña escala.

Cabe señalar que el desarrollo y supervisión de estas actividades estuvo a cargo de la Oficina de Medio Ambiente del MVCS, entidad responsable de orientar y apoyar a las municipalidades en el cumplimiento de las disposiciones establecidas. Estas acciones, además de contribuir al fortalecimiento de las capacidades municipales, tenían como propósito fundamental fomentar una cultura de gestión adecuada de los RCD, reduciendo su impacto ambiental y promoviendo prácticas sostenibles en el sector construcción.

#### **2.2.2.8. Recomendaciones para el manejo adecuado de los RCD**

De acuerdo con la guía elaborada por el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Viviendas, Construcción y Saneamiento (MINAM y MVCS, 2016), se presentan una serie de recomendaciones esenciales para asegurar el manejo adecuado de los residuos de construcción y demolición (RCD). Estas sugerencias están dirigidas tanto a los generadores de los residuos como a los gobiernos locales, buscando establecer una gestión integral y ambientalmente responsable.

Respecto a los generadores de RCD, se enfatiza la importancia de fomentar buenas prácticas ambientales durante todas las etapas de manejo de los residuos. Un aspecto fundamental consiste en realizar la segregación adecuada, diferenciando aquellos RCD que presentan características peligrosas de aquellos que no las poseen. Este proceso de separación inicial resulta clave para reducir riesgos y facilitar su posterior tratamiento y disposición.

Asimismo, se indica que el almacenamiento de residuos provenientes de obras menores, ya sea de carácter domiciliario o de infraestructuras, debe efectuarse en envases o sacos fabricados con materiales resistentes, o alternativamente, en recipientes adecuados que correspondan a la cantidad de residuos generados. Esta medida tiene por objetivo no solo optimizar el manejo, sino también garantizar condiciones de seguridad durante su manipulación y transporte. Es importante señalar que esta directriz se encuentra respaldada por lo establecido en el artículo 20 del

Decreto Supremo N°003-2013-Vivienda, donde se precisa la necesidad de contar con medios de almacenamiento seguros y apropiados.

Del mismo modo, los generadores tienen la responsabilidad de entregar los RCD al sistema de recolección de residuos provenientes de obras menores, el cual debe ser implementado y gestionado por la municipalidad correspondiente, asegurando de esta manera una adecuada disposición final de los materiales y evitando la proliferación de botaderos informales.

En cuanto a las funciones asignadas a los gobiernos locales, la guía resalta la necesidad de incorporar un plan específico de gestión de residuos de construcción y demolición en los espacios públicos, así como aquellos derivados de obras menores, integrándolo como componente dentro del Plan Distrital de Gestión de Residuos Sólidos. Adicionalmente, se recomienda desarrollar programas permanentes de educación y sensibilización dirigidos a la comunidad, orientados a la concientización sobre la importancia del manejo responsable de los RCD.

La capacitación técnica y la sensibilización de los operarios involucrados en las tareas de recolección y manejo de residuos también son consideradas acciones prioritarias. Para fortalecer esta labor, se sugiere implementar herramientas de gestión que permitan el control estadístico de los RCD, proporcionando así información relevante para la toma de decisiones y la formulación de políticas locales.

Asimismo, los municipios deben establecer centros de recolección en condiciones de higiene y seguridad, diseñados para el acopio temporal de residuos provenientes de obras menores, hasta su disposición final. También se debe poner en marcha sistemas de recojo específicos para estos residuos, complementados con la provisión de equipamiento adecuado, como envases resistentes y recipientes seguros para su almacenamiento.

La adquisición de equipos y materiales de apoyo —tales como volquetes, minicargadores, herramientas manuales (lampas, escobas), y equipo de protección personal para los operarios— resulta indispensable para garantizar un manejo eficiente y seguro de los RCD, cumpliendo de esta forma con las competencias asignadas por el marco normativo vigente.

Adicionalmente, se plantea la necesidad de instalar carteles en toda la jurisdicción municipal que informen y adviertan sobre la prohibición de depositar residuos en espacios públicos, con el fin de prevenir la generación de botaderos clandestinos. También se promueve la identificación y erradicación de botaderos

existentes, así como la aprobación de instrumentos legales municipales orientados al control, gestión y manejo adecuado de los residuos de construcción y demolición.

Finalmente, la guía propone definir áreas específicas para la ubicación de escombreras, establecer un régimen claro de infracciones y sanciones para quienes manejen inadecuadamente los RCD, y fomentar activamente prácticas de minimización, reutilización y reaprovechamiento de estos residuos en beneficio del medio ambiente y de la sostenibilidad urbana.

### **2.2.3. Propiedades físicas del agregado reciclado**

#### **2.2.3.1. Granulometría**

La granulometría representa la distribución del tamaño de las partículas en un agregado. En el caso de los agregados reciclados, esta propiedad suele ser más heterogénea que en los agregados naturales, debido a la presencia de partículas de mortero adherido. Según Neville (1995), esta condición puede ocasionar una mayor demanda de agua para lograr una mezcla homogénea, lo que debe corregirse con un diseño cuidadoso de proporciones. Para garantizar una distribución adecuada, se recomienda realizar análisis granulométricos conforme a normas técnicas como la NTP 400.012 o la ASTM C136. El cumplimiento de una curva granulométrica continua es fundamental para asegurar la trabajabilidad y la resistencia del concreto.

#### **2.2.3.2. Peso específico y peso unitario**

El peso específico (también llamado gravedad específica) y el peso unitario (densidad en masa por unidad de volumen) son parámetros que definen la densidad del agregado. Los agregados reciclados presentan valores menores en comparación con los naturales debido a su porosidad y a la naturaleza del mortero adherido. El ACI 555R-01 destaca que esta menor densidad puede influir en la dosificación volumétrica y afectar la resistencia del concreto. Neville (1995) también indica que esta característica debe ser tomada en cuenta para ajustar correctamente las proporciones de los materiales en el diseño de mezcla.

#### **2.2.3.3. Contenido de humedad y absorción**

Los agregados reciclados presentan un mayor contenido de humedad y una alta capacidad de absorción, como consecuencia de la porosidad del mortero que los

recubre. Esta propiedad puede afectar significativamente la cantidad de agua disponible en la mezcla, alterando la relación agua/cemento. Guerra (2022) señala que, por esta razón, se deben realizar ensayos de absorción y humedad antes del mezclado, conforme a normativas como la NTP 339.185, para ajustar la cantidad efectiva de agua y asegurar un comportamiento mecánico adecuado del concreto reciclado.

#### **2.2.3.4. Densidad y textura superficial**

La densidad del agregado reciclado es menor que la de los agregados vírgenes, debido a la presencia de vacíos internos y microfisuras en las partículas recicladas. En cuanto a su textura superficial, suele ser más rugosa y porosa, lo cual puede mejorar la adherencia con la pasta de cemento, pero también aumentar la fricción interna y reducir la trabajabilidad del concreto. Según Neville (1995), esta condición puede ser favorable para la resistencia mecánica, siempre que se compense con el uso de aditivos que mejoren la fluidez del concreto fresco.

#### **2.2.4. Propiedades mecánicas del concreto reciclado**

##### **2.2.4.1. Resistencia a la compresión y a la tracción**

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes del concreto, ya que determina su capacidad para soportar cargas verticales. En el caso del concreto reciclado, diversos estudios han reportado que su resistencia a la compresión puede ser hasta un 10 % – 30 % menor en comparación con el concreto convencional, dependiendo del porcentaje de agregado reciclado utilizado, su calidad, y la presencia de mortero adherido (American Concrete Institute, 2001).

La resistencia a la tracción, por otro lado, es naturalmente baja en cualquier tipo de concreto. En el concreto reciclado, esta propiedad puede verse afectada negativamente debido a una mayor porosidad y una menor cohesión interna entre las partículas recicladas, lo que genera una menor adherencia en la zona de transición interfacial (Guerra, 2022). Esta condición puede ser compensada mediante el uso de aditivos, fibras o mezclas optimizadas.

##### **2.2.4.2. Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad refleja la rigidez del concreto y su capacidad de deformarse elásticamente bajo cargas. Según Neville (1995), este parámetro guarda una relación

directa con la resistencia a la compresión. En el concreto reciclado, el módulo de elasticidad suele ser más bajo que en el concreto con agregados naturales, debido a la menor rigidez del mortero adherido y la mayor presencia de microfisuras internas. Esta reducción puede limitar el uso del concreto reciclado en elementos estructurales sometidos a deformaciones controladas.

#### **2.2.4.3. Durabilidad y trabajabilidad**

La durabilidad del concreto reciclado se ve influida por su mayor porosidad, lo cual puede facilitar el ingreso de agentes agresivos como cloruros, sulfatos o agua, reduciendo su vida útil en ambientes severos. Según el Committee 555 (2001), una adecuada selección y tratamiento del agregado reciclado, así como el uso de aditivos impermeabilizantes o selladores, puede mejorar esta condición.

En cuanto a la trabajabilidad, el concreto reciclado tiende a presentar menor fluidez que el concreto convencional, debido a la rugosidad y absorción del agregado reciclado. Esta menor trabajabilidad requiere ajustes en el diseño de la mezcla, como el incremento del contenido de agua o la incorporación de aditivos plastificantes, para mantener una consistencia adecuada durante el vaciado y la compactación (Neville, 1995).

#### **2.2.4.4. Influencia de la relación agua/cemento en el concreto reciclado**

La relación agua/cemento es un factor crítico en el diseño de cualquier mezcla de concreto, ya que determina la resistencia y durabilidad del material. En el caso del concreto reciclado, esta relación debe ser cuidadosamente controlada, ya que los agregados reciclados tienden a absorber más agua que los naturales. Si no se corrige adecuadamente, puede resultar en mezclas con una relación agua/cemento efectiva más alta de la prevista, lo cual disminuye la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto (American Concrete Institute, 2001). Por tanto, se recomienda realizar ensayos previos de absorción y contenido de humedad para ajustar correctamente la dosificación.

## **2.2.5. Análisis ambiental de la reutilización del concreto**

### **2.2.5.1. Disminución de residuos de demolición**

Uno de los impactos ambientales más relevantes que genera la reutilización del concreto es la reducción del volumen de residuos sólidos provenientes de actividades de demolición. Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan entre el 30 % y el 50 % de los desechos sólidos generados en entornos urbanos, constituyéndose como un problema crítico en muchas ciudades (Ministerio del Ambiente & Ministerio de Vivienda, construcción y Saneamiento, 2016). Mediante el reciclaje de concreto, se evita la disposición de estos materiales en vertederos y se promueve su reincorporación a nuevos procesos constructivos. Según Guerra (2022), el uso de agregado reciclado puede contribuir a disminuir hasta en un 40 % los residuos enviados a botaderos informales o legales.

### **2.2.5.2. Reducción de extracción de áridos naturales**

El concreto reciclado permite disminuir la demanda de agregados naturales como grava y arena, cuya extracción genera impactos significativos en el medio ambiente, tales como la alteración de cauces fluviales, pérdida de hábitats, erosión y aumento del CO<sub>2</sub> asociado al transporte. Al sustituir parcial o totalmente estos materiales por agregados reciclados, se reduce la presión sobre los ecosistemas y se fomenta una gestión más racional de los recursos minerales. El American Concrete Institute (ACI 555R-01) destaca que, además de disminuir los efectos ambientales negativos, esta práctica también reduce el consumo energético involucrado en la producción de nuevos materiales.

### **2.2.5.3. Comparativa de huella de carbono**

La huella de carbono del concreto reciclado es generalmente menor que la del concreto tradicional, principalmente debido a la reducción en los procesos de extracción, transporte y procesamiento de agregados naturales. Diversos estudios han demostrado que el uso de concreto reciclado puede reducir entre un 10 % y un 20 % las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su ciclo de vida (Silva et al., 2022). Esta diferencia se explica por el menor uso de maquinaria pesada para la extracción de nuevos materiales, así como por la reutilización de escombros locales, lo cual disminuye la distancia de transporte. Además, la energía incorporada en el proceso de reciclaje es inferior a la requerida para la fabricación de concreto desde materias primas vírgenes.

#### **2.2.5.4. Evaluación según certificaciones sostenibles**

Los sistemas de certificación ambiental como *LEED* (Leadership in Energy and Environmental Design) y *BREEAM* (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) reconocen el uso de materiales reciclados como un criterio clave en la evaluación de sostenibilidad. En particular, LEED otorga créditos por el uso de materiales con contenido reciclado, lo cual puede mejorar significativamente la puntuación general de un proyecto. BREEAM, por su parte, incentiva prácticas que minimicen el uso de recursos vírgenes y promuevan el reciclaje in situ. Aunque estos sistemas se aplican principalmente a edificaciones, sus principios también pueden extenderse a obras de infraestructura como canales, promoviendo el uso de concreto reciclado en proyectos hidráulicos alineados con estándares internacionales de eficiencia y sostenibilidad. (BRE Global, 2020).

#### **2.2.6. Análisis económico de la reutilización del concreto demolido**

##### **2.2.6.1. Costos de chancado y clasificación**

El procesamiento del concreto demolido implica principalmente tres etapas: transporte al centro de acopio, trituración o chancado, y clasificación granulométrica del material. Estos procesos requieren equipos especializados como trituradoras de impacto, zarandas vibratorias y sistemas de separación de impurezas. Según Guerra (2022), si bien estos procedimientos tienen un costo operativo inicial mayor respecto al uso directo de áridos naturales, este puede ser compensado cuando el reciclaje se realiza en el mismo sitio de la obra o en ubicaciones cercanas, reduciendo significativamente los gastos de transporte y disposición de residuos. Además, cuando se emplean plantas móviles de reciclaje, los costos por m<sup>3</sup> pueden disminuir considerablemente.

##### **2.2.6.2. Comparativa de precios por m<sup>3</sup>**

La comparación de precios entre el concreto elaborado con agregados reciclados y el concreto convencional varía según la región, la disponibilidad de materiales, y la escala del proyecto. En muchos casos, el concreto reciclado puede ser entre un 5 % y un 15 % más económico por metro cúbico, siempre que el procesamiento del material se realice de manera eficiente Guacaneme (2015). Sin embargo, cuando el reciclaje requiere transporte a largas distancias o tratamientos adicionales, el costo puede igualar o superar al del concreto tradicional. Por ello, es necesario realizar estudios de costos

específicos por proyecto, considerando factores como el volumen de material disponible, el tipo de estructura, y la logística del sitio.

### **2.2.6.3. Rentabilidad en obras medianas o grandes**

La reutilización de concreto demolido resulta particularmente rentable en proyectos de mediana y gran envergadura, ya que permite aprovechar economías de escala. A mayor volumen de material reciclado procesado, menores serán los costos unitarios asociados al chancado, tamizado y control de calidad. Además, en grandes obras urbanas donde se genera una cantidad significativa de RCD, el reciclaje in situ puede reducir no solo los costos de materiales, sino también los costos de disposición final, permisos ambientales y mitigación de impactos. Estudios como el de (Silva et al., 2022) destacan que la rentabilidad del concreto reciclado es más evidente cuando se planifica desde la etapa de diseño del proyecto, integrando criterios de sostenibilidad y economía circular.

### **2.2.6.4. Casos de estudio referenciales**

Diversas experiencias internacionales respaldan la viabilidad económica del uso de concreto reciclado. En Colombia, por ejemplo, el proyecto “Diseño de mezclas de concreto de bajo impacto ambiental” desarrollado por Silva et al. (2022), demostró que el empleo de RCD procesado localmente redujo en más de un 12 % los costos de producción en obras de pavimentación urbana. En España, se han utilizado plantas móviles de reciclaje en obras viales con ahorros del 15 % al 20 % en agregados. En el contexto peruano, investigaciones como las de Caycho y Espinoza (2019) concluyen que, si bien el concreto reciclado puede tener un costo inicial superior, este se compensa con la reducción en la extracción de recursos naturales y los beneficios ambientales asociados, lo cual puede valorizarse económicamente en proyectos públicos y privados con criterios de sostenibilidad.

## **2.2.7. Limitaciones técnicas y constructivas**

### **2.2.7.1. Variabilidad del material reciclado**

Una de las principales desventajas del agregado reciclado es su alta variabilidad en comparación con los agregados naturales. Esta variabilidad está influenciada por factores como el tipo de estructura de origen, las condiciones de demolición, la presencia de impurezas y el contenido de mortero adherido. Según Neville (1995), esta

heterogeneidad puede afectar significativamente la resistencia, la trabajabilidad y la durabilidad del concreto. Además, los agregados reciclados suelen contener partículas con fisuras internas, lo cual disminuye su integridad estructural y genera una mayor absorción de agua, influyendo negativamente en la relación agua/cemento de la mezcla.

#### **2.2.7.2. Preparación de material triturado**

Según Redacción 360 en Concreto (2022), en Europa se sigue un procedimiento específico para el procesamiento del concreto demolido, el cual busca aprovechar este material reciclado como agregado en nuevas aplicaciones. Este procedimiento varía dependiendo de la estructura de origen, ya que el concreto puede contener elementos adicionales como refuerzos metálicos, plásticos, vidrio, madera y otros residuos no deseados. La variabilidad de estos materiales hace necesario un tratamiento cuidadoso antes de su reutilización. El proceso de obtención de agregado de concreto reciclado (ACR) generalmente comprende varias etapas bien definidas.

La primera etapa consiste en la separación de los contaminantes, un paso esencial para garantizar la calidad del material reciclado. Este procedimiento se enfoca en eliminar cualquier elemento ajeno al concreto, como asfalto, ladrillos, selladores de juntas o incluso restos de otros materiales de construcción. Una correcta separación es crucial, especialmente si el agregado se destinará a la producción de nuevas mezclas de concreto estructural o a ser utilizado como material de base en la construcción de carreteras y rellenos.

Posteriormente, se realiza la ruptura del concreto y su transporte. Es indispensable fracturar el material demolido en tamaños manejables para facilitar su carga y traslado en vehículos adecuados. Esta preparación permite un transporte seguro hacia las plantas de trituración. Además, en algunos casos, se recurre al uso de plantas móviles de trituración instaladas directamente en el sitio de demolición, lo que representa una alternativa eficiente y económica al evitar los costos de transporte de grandes volúmenes de material.

Finalmente, el procedimiento contempla la trituración de los fragmentos. Este proceso inicia habitualmente con una trituradora primaria que reduce el tamaño de los trozos transportados a dimensiones de entre 8 y 10 centímetros de diámetro. Luego, el material pasa a una trituradora secundaria que ajusta el tamaño final de los agregados de acuerdo a las especificaciones requeridas para su uso posterior. Las trituradoras utilizadas pueden ser de varios tipos, tales como trituradoras de mandíbula, de impacto

o de cono, dependiendo de las necesidades específicas del proyecto y de las características del material reciclado.

### **2.2.7.3. Aplicaciones más apropiadas**

Dadas sus características, el concreto reciclado es más adecuado para aplicaciones no estructurales o de baja exigencia mecánica. Entre las aplicaciones recomendadas se incluyen: veredas, sardineles, losas de pavimento ligero, rellenos de zanjas, subbases para carreteras, y estructuras rurales o agrícolas. El ACI 555R-01 indica que, aunque existen avances en el uso estructural del concreto reciclado, su uso más seguro y común continúa siendo en elementos donde no se requiera una resistencia estructural elevada ni una durabilidad prolongada frente a agentes agresivos. En el contexto de obras hidráulicas, su aplicación puede ser viable en canales de baja presión o revestimientos de flujo moderado, siempre que se cumplan los estándares normativos.

### **2.2.7.4. Necesidad de controles de calidad y validación técnica**

El uso de agregado reciclado requiere un riguroso control de calidad para garantizar la homogeneidad y seguridad de la mezcla final. Deben realizarse ensayos normalizados que evalúen la resistencia a compresión, la granulometría, el contenido de humedad, la absorción y la presencia de contaminantes. La NTP 400.053:2019, en su revisión reciente, exige que el concreto reciclado pase por un proceso de trituración, clasificación y validación técnica previa a su uso. Además, el diseño de mezcla debe ser ajustado mediante métodos experimentales, como el del ACI 211, que permitan compensar las propiedades particulares del agregado reciclado. Guerra (2022) señala que estos controles son fundamentales para evitar fallas prematuras, reducir variaciones en el comportamiento del concreto y cumplir con los requisitos de seguridad estructural y funcionalidad.

## **2.2.8. Estado del arte y revisiones científicas**

### **2.2.8.1. Tesis previas y artículos recientes**

A nivel nacional, diversas investigaciones han explorado el uso de agregados reciclados en obras civiles. Por ejemplo, la tesis de Carizaile y Anquise (2015) evaluó la viabilidad del concreto reciclado en viviendas en Tacna, concluyendo que sus propiedades pueden asemejarse a las del concreto convencional, aunque con mayores costos de producción.

Huillca y Quispe (2023), en Arequipa, analizaron el empleo de agregado reciclado en veredas, encontrando que su uso reduce el impacto ambiental sin comprometer la resistencia mínima requerida. Asimismo, Guerra (2022) desarrolló un diseño de concreto reciclado para muros prefabricados en Lima, demostrando que hasta un 75 % de sustitución del agregado grueso natural es viable en mezclas no estructurales.

Así también otros autores indica en el resumen:

Los agregados para concreto vienen agotándose día a día, por ello se analiza nuevas fuentes de materia prima para el concreto. En esta investigación se emplearon los agregados reciclados con el fin de usarlos en la industria del premezclado. El concreto premezclado debe cumplir requisitos como: slump inicial, mantenimiento de la trabajabilidad superior a 2 horas, tiempo de fragua,  $f'c$  a los 28 días, etc. Como conclusión de la investigación se tuvo que los agregados reciclados no pueden ser empleados en un 100 % del diseño de mezcla, sino que deben emplearse en porcentajes de reemplazo parciales de hasta 50 %, así mismo es imprescindible el uso de aditivos especializados base polímeros para contrarrestar el efecto altamente absorbente de los agregados reciclados. (Davila et al., 2024, p. 15)

Estos trabajos coinciden en resaltar la necesidad de adaptar los diseños de mezcla a las características del agregado reciclado, empleando normas técnicas actualizadas y realizando ensayos de validación previos a su implementación.

#### **2.2.8.2. Conclusiones clave de investigaciones internacionales**

En el ámbito internacional, la reutilización del concreto demolido ha sido ampliamente estudiada. Investigadores como Silva et al. (2022), en Colombia, concluyeron que los residuos de construcción pueden ser procesados y reutilizados en nuevas mezclas con un impacto ambiental menor y costos competitivos, especialmente en obras viales. Por su parte, Téllez y Rangel (2020), en México, destacaron que el principal desafío en el uso de agregados reciclados es la estandarización del proceso de acopio, clasificación y trituración, recomendando la implementación de protocolos de separación desde la fuente de generación.

Estos estudios también resaltan que el concreto reciclado puede alcanzar resistencias aceptables para aplicaciones no estructurales, siempre que se controle adecuadamente su contenido de humedad, granulometría y composición.

### **2.2.8.3. Aportes a la mejora del manejo de RCD**

Las investigaciones revisadas proponen distintos enfoques para mejorar la gestión de los RCD. Entre ellos destacan: la creación de normativas específicas para la reutilización de agregados reciclados, el fomento de plantas móviles de reciclaje para el tratamiento in situ, y la integración de criterios de sostenibilidad en los pliegos técnicos de proyectos públicos. Además, muchos de estos estudios coinciden en señalar la necesidad de campañas de sensibilización y capacitación para promover el uso de concreto reciclado en el sector construcción.

De acuerdo con American Concrete Institute (2001), la mejora del manejo de RCD no solo depende de la tecnología, sino también de la planificación y la voluntad institucional para integrar procesos de reciclaje dentro de los sistemas productivos de la ingeniería civil. En ese sentido, la presente investigación se alinea con una tendencia global hacia una construcción más responsable, circular y sostenible.

### **2.2.9. Fundamento general del diseño de mezclas**

#### **2.2.9.1. Concepto y propósito del diseño de mezclas de concreto**

El diseño de mezclas de concreto es un proceso técnico y científico que busca determinar la proporción óptima de sus componentes cemento, agua, agregados (finos y gruesos) y aditivos, si los hubiera para alcanzar las propiedades deseadas en estado fresco y endurecido. Estas propiedades incluyen resistencia a la compresión, trabajabilidad, durabilidad, densidad y economía. Su objetivo principal es garantizar que el concreto satisfaga los requisitos estructurales, funcionales y de durabilidad durante su vida útil, considerando las condiciones específicas del proyecto y del entorno donde será aplicado.

En esencia, el diseño de mezclas establece una relación entre los materiales disponibles y las exigencias de desempeño del concreto. Esta relación debe traducirse en un concreto que sea no solo resistente, sino también trabajable, económico y durable. Como lo indica Kosmatka y Wilson (2011), definen:

El concreto de calidad posee requisitos principales bien definidos y aceptados.

Para el concreto recién mezclado, estos requisitos incluyen:

- *Consistencia*: La capacidad de fluir.
- *Estabilidad*: La resistencia a la segregación.

- *Uniformidad:* Mezcla homogénea, con los componentes distribuidos de manera uniforme.
- *Trabajabilidad:* Facilidad para colocar, compactar y terminar.
- *Acababilidad:* Facilidad para realizar operaciones de acabado y lograr las características superficiales especificadas.

Para el concreto endurecido, los requisitos incluyen:

- *Resistencia:* Capacidad de resistir deformaciones o rupturas inducidas por fuerzas externas (compresión, flexión, tracción, torsión y corte).
- *Durabilidad:* Capacidad de resistir la intemperie, ataques químicos, abrasión y otras condiciones de servicio.
- *Apariencia:* Cumple con las características estéticas deseadas.
- *Economía:* Cumple su función dentro de un presupuesto establecido.

Para diferentes aplicaciones, las propiedades del concreto deben controlarse dentro de ciertos rangos. Al comprender la naturaleza y las características básicas del concreto, es más fácil cumplir con las propiedades tanto en estado fresco como endurecido. (p. 153)

### **2.2.9.2. Componentes principales del concreto**

El concreto está compuesto fundamentalmente por cuatro elementos: cemento hidráulico, agua, agregados y aditivos. La calidad y proporción de estos materiales influye directamente en las propiedades finales del concreto.

- *Cemento Hidráulico:* “Un cemento que fragua y endurece por reacción química con el agua y es capaz de hacerlo bajo el agua” (INDECOPI, 2019, p. 9). El cemento Portland es el más comúnmente utilizado.
- *Agua:* Reacciona químicamente con el cemento para formar productos de hidratación, y también proporciona trabajabilidad.
- *Agregados:* “Representan entre el 60 % y 80 % del volumen del concreto. Su calidad, tamaño, forma y granulometría afectan la densidad, trabajabilidad y durabilidad del concreto” (Neville, 1995).
- *Aditivos:* “son materiales que al ser usados como un ingrediente de una mezcla de cemento modifican algunas de las propiedades de la mezcla

fresca, su fraguado o endurecimiento y que se añade antes o durante su mezclado” (CNB INDECOPI, 2019, p. 4).

### **2.2.9.3. Factores determinantes en el diseño de mezclas**

Varios factores inciden en la formulación de una mezcla adecuada. Entre ellos destacan:

- *Resistencia especificada*: Es el criterio principal para definir la relación agua/cemento. Generalmente, mientras menor sea esta relación, mayor será la resistencia del concreto (ACI Committee 211, 2022).
- *Condiciones de exposición*: Como la humedad ambiental, temperaturas extremas, ataque de agentes químicos o abrasivos, entre otros. Estos aspectos inciden en la selección de materiales y en la dosificación (ACI Committee 211, 2022).
- *Trabajabilidad del concreto*: “es la propiedad del concreto recién mezclado que afecta a la facilidad con la que puede ser mezclado, colocado y consolidado” (INDECOPI, 2019, p. 24). Se evalúa normalmente mediante el ensayo de asentamiento (slump). La trabajabilidad debe adaptarse al tipo de estructura y método de colocación.
- *Tamaño máximo del agregado*: “es el que corresponde a la abertura del tamiz más pequeño a través del cual se requiere que pase toda la cantidad de agregado” (INDECOPI, 2019). En canales, donde las secciones pueden ser estrechas, se tiende a usar agregados de tamaño medio para evitar problemas de segregación.
- *Durabilidad*: “capacidad del concreto, mortero, grout o revoque de cemento Pórtland de resistir a la acción de la intemperie y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación-deshielo y abrasión” (INDECOPI, 2019).

### **2.2.9.4. Normas técnicas y metodologías aplicadas**

El método más reconocido para el diseño de mezclas es el propuesto por el Comité del Instituto Americano del Concreto, ACI 211.1-22, titulado “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”. Este método proporciona procedimientos sistemáticos para seleccionar y ajustar proporciones de mezcla con base en las características de los materiales disponibles y los requisitos de resistencia

y trabajabilidad. Se basa en la estimación del contenido de agua, la relación agua/cemento, y la selección de volúmenes relativos de agregados finos y gruesos (ACI Committee 211, 2022).

En el contexto peruano, la Norma Técnica Peruana (NTP 339.034) regula los métodos de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto, lo cual es fundamental para validar los diseños de mezcla propuestos. Otras normas complementarias como la NTP 339.036 (Muestro de mezclas de concreto fresco), y la NTP 339.183 (Elaboración y curado de probetas en laboratorio) también son fundamentales en este proceso.

#### **2.2.9.5. Importancia del diseño de mezclas en canales de regadío**

En infraestructuras como los canales de regadío, el concreto debe cumplir requisitos mínimos debido a su exposición. Por ello, el diseño de mezclas en este tipo de obras sugiere una resistencia mínima a la compresión no menor a 175 kg/cm<sup>2</sup> según lo indica la norma técnica E.060.

#### **2.2.10. Propiedades requeridas del concreto en canales de regadío**

Los canales de regadío son estructuras hidráulicas fundamentales para la conducción, distribución y regulación del agua destinada a la agricultura. Para asegurar su funcionalidad y durabilidad, es indispensable que el concreto empleado en su revestimiento o construcción posea propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas específicas, que le permitan resistir los efectos del agua en movimiento, las cargas ambientales y los agentes de deterioro propios de entornos agrícolas.

A continuación, se detallan las propiedades clave que debe reunir el concreto destinado a este tipo de estructuras, sustentadas en fundamentos técnicos y normativos.

##### **2.2.10.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes del concreto, ya que refleja su capacidad para soportar cargas sin colapsar. En el caso de los canales de regadío, esta propiedad garantiza que el revestimiento o estructura pueda resistir el peso del agua, las cargas del terreno circundante y posibles sobrecargas externas (como tránsito ligero o maquinaria de mantenimiento).

Según la norma del Comité ACI 318 (2019), nos detalla en la Tabla 1 los distintos tipos de exposición del concreto.

**Tabla 1**  
*Categorías y Clases de Exposición*

Categoría	Clase	Condición	
Congelamiento y deshielo (F)	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto frecuente con la humedad	
	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
Sulfato (S)		Sulfatos solubles en agua ( $SO_4^{2-}$ ) en el suelo, % en masa	Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) disueltos en agua, ppm
	S0	$SO_4^{2-} < 0,10$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0,1 \leq SO_4^{2-} < 0,20$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1\,500$ o agua marina
	S2	$0,20 \leq SO_4^{2-} \leq 2,00$	$1\,500 \leq SO_4^{2-} \leq 10\,000$
	S3	$SO_4^{2-} > 2,00$	$SO_4^{2-} > 10\,000$
En contacto con el agua (W)	W0	Concreto seco en servicio	
	W1	Concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	W2	Concreto en contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	
Protección del refuerzo para la corrosión (C)	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

*Nota.* Adaptado de ACI 318S-19.

Se puede apreciar las distintas condiciones que se toman en cuenta al momento de realizar la dosificación del concreto, para el caso de canales de regadío, se interpreta como un canal seco en servicio W0, debido a que no se encuentra en constante exposición de agua.

Identificada la exposición del concreto, el ACI 318S (2019), nos indica en la

Tabla 2 donde se especifican los requisitos mínimos del concreto que se tomarán en cuenta.

**Tabla 2**  
*Requisitos para el concreto según la clase de exposición*

Clase de Exposición	Relación a/mc máxima	f'c Mínimo Mpa	Requisitos mínimos adicionales			Límites en los Materiales cementantes
			Contenido de aire			
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0,55	24	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F2	0,45	31	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F3	0,4	35	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			26.4.2. (b)
Tipos de material cementante						Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150M	ASTM C595M	ASTM C1157M	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Son restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0,5	28	II	Tipos con designación (MS)	MS	Sin restricción
S2	0,45	31	V	Tipos con designación (HS)	HS	No se permite
S3	Opción 1	0,45	V más puzolanas o cemento de escoria	Tipos con designación (HS) más puzolanas o cemento de escoria	HS más puzolanas o cemento de escoria	No se permite
	Opción 2	0,4	V	Tipos con designación (HS)	HS	No se permite
W0	N/A	17	Ninguna			
W1	N/A	17	26.4.2.2 (d)			
W2	0,5	28	26.4.2.2 (d)			
Contenido máximo de iones de cloruro (Cl) soluble en agua en el concreto, porcentaje por masa de materiales cementantes						Requisitos adicionales
			Concreto no preesforzado	Concreto preesforzado		
C0	N/A	17	1	0,06	Ninguno	
C1	N/A	17	0,3	0,06		
C2	0,4	35	0,15	0,06	Recubrimiento de concreto	

Nota. Adaptado de ACI 318S-19.

Según la normativa se aprecia que la única condición para el concreto es una resistencia mínima a la compresión de 17 MPa (175 kg/cm<sup>2</sup>) a los 28 días. Este requerimiento es muy importante al momento de realizar el diseño de mezclas del concreto.

### **2.2.11. Metodología de diseño con agregado reciclado (ACI 301)**

El diseño de mezclas de concreto con agregado reciclado representa una adaptación técnica al proceso tradicional de dosificación, fundamentado en el método del American Concrete Institute (ACI). La versión más reciente del procedimiento, ACI 301-20, actualiza criterios técnicos, recomendaciones de ajuste, y lineamientos sobre la caracterización de materiales alternativos, como los agregados reciclados.

#### **2.2.11.1. Consideraciones generales del ACI 301-20**

El documento *ACI 301-20: "Specifications for Concrete Construction"* es la guía vigente del ACI para el diseño de mezclas de concreto normal y de alta densidad. Esta guía proporciona un método sistemático que permite determinar las proporciones de cemento, agua, agregados y aditivos con base en los requerimientos de resistencia, trabajabilidad, durabilidad y economía del concreto. Aunque el enfoque principal del ACI 301-20 es el concreto convencional, el documento contempla ajustes necesarios cuando se utilizan materiales no tradicionales como agregados reciclados (ACI Committee 301, 2020).

#### **2.2.11.2. Procedimiento general adaptado de Enrique Rivva Lopez**

El método ACI, adoptado por el Ingeniero Enrique Rivva Lopez sigue una serie de pasos sistemáticos que, en el caso del agregado reciclado, procederemos a realizar un proporcionamiento en lo que respecta a las propiedades del agregado grueso y el agregado reciclado. El procedimiento general adaptado se desarrolla como sigue:

##### **a. Cálculo de la resistencia promedio requerida ( $F'_{cr}$ )**

Según indica el ACI Committee 211 (2022):

Debido a la variabilidad del concreto, a menudo se requiere una resistencia promedio a la compresión,  $f'_{cr}$ , como resistencia requerida. Esta resistencia promedio a la compresión debe exceder la resistencia a la compresión especificada  $f'_c$  por un margen suficiente para mantener el número de resultados no conformes por debajo del 1 %. Se utilizan varios métodos para determinar la resistencia promedio requerida, dependiendo de la cantidad de datos disponibles de ensayos de resistencia. (p. 10)

Para este caso en específico, emplearemos la Tabla 3 correspondiente a cuando no hay datos disponibles de desviación estándar.

**Tabla 3**

*F'cr si no hay datos disponibles de desviación estándar*

<b>F'c</b>	<b>F'cr</b>
< 210 kg/cm <sup>2</sup>	F'c+70
210 kg/cm <sup>2</sup> - 350 kg/cm <sup>2</sup>	F'c+84
> 350 kg/cm <sup>2</sup>	F'c+98

*Nota.* Adaptado de Diseño de Mezclas (pp 57), por R. L. Enrique, 1992

#### **b. Contenido de aire atrapado**

López (1992) explica que durante las operaciones propias de la colocación del concreto pueden formarse burbujas de aire en la pasta, fenómeno que recibe el nombre de aire atrapado o aire natural. Alternativamente, la mezcla también puede contener burbujas que han sido introducidas de manera deliberada mediante el uso de aditivos especiales, en cuyo caso se habla de aire incorporado. Estas dos formas de presencia de aire se suman para dar origen al denominado aire total en una mezcla de concreto, es decir, la combinación del volumen de aire atrapado más el aire incorporado.

En condiciones normales de fabricación, los concretos contienen inevitablemente una pequeña cantidad de aire atrapado, cuya proporción varía dependiendo de múltiples factores. Entre estos factores se encuentran la calidad y características de los materiales empleados, las condiciones bajo las cuales se realiza la mezcla y colocación, así como la granulometría y el tamaño máximo del agregado grueso utilizado. Este tipo de burbujas atrapadas suele tener un diámetro cercano a 1 mm, presentando formas irregulares que afectan ligeramente la homogeneidad de la mezcla.

Por otro lado, el concreto con aire incorporado se caracteriza porque el aire se añade de manera controlada con el objetivo de mejorar propiedades específicas, principalmente relacionadas con la durabilidad frente a condiciones extremas, como ciclos repetidos de congelamiento y descongelamiento. Las burbujas incorporadas son mucho más pequeñas que las atrapadas de forma natural, con diámetros que oscilan entre 10 y 1000 micrones, y suelen tener un contorno esférico, favoreciendo una distribución más uniforme dentro de la mezcla.

La incorporación intencional de aire produce una red de pequeñas burbujas que representa entre el 9 % y el 10 % del volumen del mortero en el concreto. Este sistema de burbujas actúa como un mecanismo de alivio de presión, reduciendo significativamente los daños internos ocasionados por la expansión del agua congelada en los poros capilares. Gracias a esta propiedad, el concreto con aire incorporado se vuelve una opción preferida en obras expuestas a climas fríos o sometidas a ciclos de congelación frecuentes. Además, su uso es altamente recomendable en estructuras que estarán en contacto con ambientes agresivos, como aquellos expuestos al agua de mar, aguas contaminadas o agentes químicos de alta agresividad, ya que el aire incorporado ayuda a disminuir el deterioro prematuro por ataques químicos.

No obstante, la presencia de aire, si bien otorga beneficios en cuanto a durabilidad, también impacta en la resistencia mecánica del concreto. En mezclas ricas, por ejemplo, cada incremento del 1 % en el contenido de aire incorporado puede provocar una disminución de hasta el 5 % en la resistencia a la compresión. Esta relación es menos negativa en mezclas pobres, donde incluso puede observarse una ligera mejora en la resistencia final, debido a que las mezclas con aire incorporado suelen requerir menor cantidad de agua, optimizando así su relación agua-cemento.

Finalmente, para el caso de mezclas que no cuentan con aditivos incorporadores de aire, López (1992) proporciona una la Tabla 4 que estima el porcentaje de aire atrapado según el tamaño máximo nominal del agregado grueso, siempre que éste cumpla con las gradaciones requeridas por la norma NTP 400.037 o por la especificación ASTM C33. Esta información resulta fundamental para el diseño de mezclas, ya que permite anticipar variaciones en las propiedades que va a tener el concreto, relacionadas con la presencia natural de aire en la pasta.

**Tabla 4**

*Contenido de aire atrapado*

<b>Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso</b>	<b>Aire Atrapado (%)</b>
6 "	0,20
3 "	0,30
2 "	0,50
1 ½ "	1,00
1 "	1,50
¾ "	2,00
½ "	2,50
3/8 "	3,00

*Nota.* Adaptado de Diseño de Mezclas (p. 85), por R. L. Enrique, 1992

### c. Contenido de agua

Según Lopez (1992) la determinación del volumen unitario de agua consiste en establecer cuánta agua debe añadirse a la mezcladora por metro cúbico de concreto, con el objetivo de lograr la consistencia deseada cuando los agregados se encuentran completamente secos.

Sin embargo, también menciona que, dado que en la práctica los agregados rara vez están en estado seco, la cantidad de agua inicialmente definida necesita ser ajustada tomando en cuenta su porcentaje de absorción y su contenido de humedad.

Además, averiguó que este volumen de agua —que, junto con la relación agua-cemento efectiva, permite calcular el factor cemento— depende principalmente de las propiedades físicas de los agregados, del nivel de consistencia que se quiere alcanzar y de la cantidad de aire presente en la mezcla.

Por otro lado, nos menciona que la incorporación de aditivos minerales finamente divididos puede reducir ligeramente la demanda de agua en la mezcla. Asimismo, factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa pueden alterar la cantidad de agua necesaria.

A continuación, nos indica que la Tabla 5 elaborada siguiendo las recomendaciones del Comité 211 del ACI, facilita la elección del volumen unitario de agua para agregados en estado seco, tanto en concretos con aire incorporado como en los que no lo tienen. Esta selección se realiza considerando la consistencia deseada de la mezcla y el tamaño máximo nominal del agregado grueso utilizado.

**Tabla 5**  
*Volumen Unitario de Agua*

SLUMP		3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 ½ "	2 "	3 "	4 "
concreto sin aire incorporado	1 " a 2 "	207	199	190	179	166	154	130	113
	3 " a 4 "	228	216	205	193	181	169	145	124
	6 " a 7 "	243	228	216	202	190	178	160	
concreto con aire incorporado	1 " a 2 "	181	175	168	160	150	142	122	107
	3 " a 4 "	202	193	184	175	165	157	133	119
	6 " a 7 "	216	205	197	184	174	166	154	

*Nota.* Adaptado de Diseño de Mezclas (p. 78), por R. L. Enrique, 1992

#### **d. Relación agua/cemento por resistencia**

López (1992) señala que, dado que la mayoría de las propiedades deseables del concreto endurecido dependen directamente de la calidad de la pasta —que es el producto final del proceso de hidratación del cemento—, uno de los pasos más importantes en la selección de las proporciones de una mezcla es la correcta elección de la relación agua-cemento. Esta relación constituye un factor crítico, ya que determina en gran medida el comportamiento del concreto a largo plazo, afectando tanto su resistencia mecánica como su durabilidad frente a agentes externos.

La cantidad de agua que debe emplearse en relación con el contenido de cemento en una mezcla de concreto varía en función de varios requisitos: entre ellos, la resistencia estructural esperada, la durabilidad necesaria frente a condiciones ambientales específicas y las características de acabado que se desean alcanzar en la superficie final. A partir de estas necesidades, se define la denominada relación agua-cemento de diseño, la cual corresponde al valor que se selecciona de tablas estándar considerando que los agregados están en condición de saturado superficialmente seco; es decir, en un estado en el cual no absorben ni liberan agua al mezclarse.

Sin embargo, en la práctica, los agregados rara vez se encuentran en esta condición ideal. Por ello, se debe calcular la relación agua-cemento efectiva, que toma en cuenta la humedad real del agregado en el momento de la mezcla. Esta corrección es crucial para asegurar que la cantidad de agua disponible para el proceso de hidratación sea la adecuada y que no se alteren las propiedades mecánicas esperadas del concreto.

Cuando se requiere garantizar la durabilidad del concreto, especialmente en ambientes severos o expuestos a agentes agresivos, el procedimiento recomendable es primero determinar la relación agua-cemento necesaria para cumplir con los requisitos de durabilidad. Luego, se establece la relación correspondiente a la resistencia a compresión promedio que se desea lograr. Finalmente, entre ambos valores, se selecciona el menor, dado que este proporcionará mejores garantías de desempeño tanto a nivel estructural como de durabilidad a largo plazo.

La elección de la relación agua-cemento basada en la resistencia a compresión se fundamenta en que esta propiedad es una de las más fáciles de medir de manera confiable en el laboratorio. Además, dentro de ciertos límites razonables, existe una correlación directa entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento presentes en un metro cúbico de mezcla. No obstante, es importante considerar que diferentes tipos de

agregados, así como diversas marcas o tipos de cemento, pueden producir resistencias distintas aún utilizando una misma relación agua-cemento.

Por esta razón, López (1992) recomienda que la selección de la relación agua-cemento por resistencia se realice mediante ensayos experimentales específicos, utilizando los materiales reales que se emplearán en la obra. Para ello, se preparan mezclas de prueba que contemplen todas las posibles combinaciones de materiales y condiciones de trabajo. Los resultados de estos ensayos permiten desarrollar curvas que relacionan la resistencia obtenida con la relación agua-cemento empleada, bajo condiciones controladas de trabajabilidad y consistencia definidas.

La Tabla 6, adaptada de los trabajos del Comité 211 del ACI, ofrece valores de relaciones agua-cemento en peso que son consideradas máximas permisibles para diferentes niveles de resistencia promedio, tanto en concretos con aire incorporado como en aquellos sin aire. Es importante señalar que estos valores son aproximados y adoptan un enfoque relativamente conservador, asumiendo el uso de cemento portland normal Tipo I y agregados que cumplen con los requisitos establecidos en las normas ASTM C33 o NTP 400.037. Los valores propuestos en dicha tabla están diseñados para permitir alcanzar las resistencias previstas a los 28 días de curado bajo condiciones estándar de laboratorio, proporcionando así una guía confiable para el diseño de mezclas de concreto en distintas aplicaciones.

**Tabla 6**  
*Relación Agua-Cemento por Resistencia*

F'cr (Kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua / cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0,8	0,71
200	0,7	0,61
250	0,62	0,53
300	0,55	0,46
350	0,48	0,4
400	0,43	-
450	0,38	-

*Nota.* Adaptado de Diseño de Mezclas (p. 91), por R. L. Enrique, 1992

#### **e. Factor cemento y contenido de cemento**

Según lo expuesto por López (1992), una vez que se ha determinado tanto el volumen unitario de agua por metro cúbico de concreto como la relación agua-cemento adecuada

para la mezcla, resulta posible calcular el denominado factor cemento. Este cálculo se realiza de manera sencilla: basta con dividir el volumen unitario de agua, expresado en litros por metro cúbico, entre la relación agua-cemento seleccionada, obteniendo así la cantidad de cemento necesaria, expresada en kilogramos, para cada metro cúbico de concreto preparado. Esta operación permite ajustar con precisión las proporciones de la mezcla para asegurar que cumpla con las propiedades estructurales y de durabilidad previstas en el diseño.

En casos donde las especificaciones técnicas del proyecto estipulen un contenido mínimo de cemento —ya sea por motivos estructurales, de durabilidad o de calidad—, se deberá comparar dicho requerimiento con el contenido de cemento obtenido en el proceso de diseño de la mezcla. El valor definitivo será el mayor de ambos, garantizando de esta forma que se satisfacen no solo las necesidades de resistencia, sino también los estándares mínimos establecidos para la obra. Esta práctica busca asegurar un comportamiento adecuado del concreto a largo plazo, evitando deficiencias que puedan comprometer la a la estructura.

Adicionalmente, la incorporación de aditivos químicos o materiales de naturaleza puzolánica en la mezcla, aunque puede modificar positivamente algunas propiedades del concreto como su trabajabilidad, durabilidad o tiempo de fraguado, no debe ser utilizada como justificación para reducir el contenido de cemento originalmente previsto. En caso de que, tras la incorporación de estos aditivos, se pretenda realizar una disminución en la cantidad de cemento, será indispensable contar con la aprobación previa del Ingeniero Estructural responsable y de la Inspección de obra. Esta aprobación debe basarse en una garantía escrita emitida por el Constructor, en la cual se comprometa formalmente a que las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto no se verán afectadas negativamente.

Para lograr una verificación efectiva de estos aspectos, se recomienda que la determinación final del contenido de cemento en una mezcla no se base únicamente en cálculos teóricos o referencias de laboratorio, sino que se apoye en ensayos prácticos realizados bajo condiciones similares a las de la obra real. Estos ensayos deben replicar lo más fielmente posible las condiciones ambientales, métodos de colocación y procedimientos de curado que se aplicarán durante la construcción. De esta manera, el Constructor podrá garantizar, con evidencia empírica, que todas las propiedades esenciales del concreto —resistencia, durabilidad, trabajabilidad y acabado superficial— serán cumplidas conforme a lo especificado en el proyecto.

En resumen, el control riguroso del contenido de cemento es un factor esencial para asegurar la calidad del concreto en obra. No solo responde a necesidades estructurales y normativas, sino que también protege la inversión realizada, extendiendo la vida útil de las estructuras y minimizando futuros costos de mantenimiento o reparación debido a fallas prematuras.

#### **f. Selección del contenido de agregado grueso**

López (1992) explica que, para llevar a cabo la selección adecuada del contenido de agregado grueso en una mezcla de concreto, se deben seguir ciertas recomendaciones establecidas por el Comité 211 del ACI. Este comité basa su criterio en la premisa de que agregados gruesos que poseen un tamaño máximo nominal similar y una granulometría comparable deberían ser capaces de proporcionar concretos con trabajabilidad aceptable, siempre que se emplee un volumen adecuado de agregado grueso, medido en condiciones de seco al horno y compactado, por la unidad cúbica de concreto. De este modo, se busca estandarizar el diseño de mezclas, asegurando tanto la facilidad de colocación como la uniformidad en las propiedades mecánicas del material.

Para facilitar esta selección, el Comité 211 ha elaborado la Tabla 7, la cual constituye una herramienta fundamental en el diseño de mezclas de concreto. Esta tabla relaciona el tamaño máximo nominal del agregado grueso con el módulo de fineza del agregado fino. A partir de estos dos parámetros principales, es posible determinar un coeficiente denominado  $b/b_o$ , el cual resulta de dividir el peso seco del agregado grueso necesario por metro cúbico de concreto entre el peso unitario seco y varillado del mismo agregado. Ambos valores se expresan en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), permitiendo realizar comparaciones y ajustes precisos en el diseño de la mezcla.

Este coeficiente  $b/b_o$  es especialmente útil porque proporciona una referencia cuantitativa clara para ajustar el contenido de agregado grueso en función de las características de los materiales disponibles en obra. Así, si los agregados presentan ligeras variaciones en granulometría o forma, se puede realizar una adaptación razonable del contenido sin afectar negativamente la trabajabilidad ni la calidad del concreto resultante. Además, el uso de este procedimiento permite optimizar el uso de los materiales, contribuyendo tanto a la eficiencia económica del proyecto como a la sostenibilidad del proceso constructivo.

**Tabla 7***Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto*

Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de fineza del fino. (b/b0)			
	2,40 %	2,60 %	2,80 %	3,00 %
3/8 "	0,5	0,48	0,46	0,44
1/2 "	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4 "	0,66	0,64	0,62	0,6
1 "	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2 "	0,76	0,74	0,72	0,7
2 "	0,78	0,76	0,74	0,72
3 "	0,81	0,79	0,77	0,75
6 "	0,87	0,85	0,83	0,81

*Nota.* Adaptado de Diseño de Mezclas (p. 115), por R. L. Enrique, 1992

López (1992) señala que, una vez obtenido el coeficiente b/b0 a partir de la Tabla 7, se puede determinar la cantidad de agregado grueso seco y compactado necesaria para la mezcla. Este valor se consigue multiplicando el coeficiente b/b0 por el peso unitario seco varillado del agregado grueso. Así, siguiendo el método planteado por el ACI, se logra establecer de manera precisa el volumen de agregado grueso que debe incorporarse por metro cúbico de concreto, optimizando la composición de la mezcla en función de sus propiedades deseadas.

Un análisis más detallado de la Tabla 7 revela que, para lograr una trabajabilidad similar en distintas mezclas de concreto, el contenido de agregado grueso no depende exclusivamente del tamaño máximo nominal del agregado ni del módulo de fineza del agregado fino. De hecho, el valor de b/b0 se mantiene relativamente constante, independientemente de la resistencia requerida o de la proporción de cemento en la mezcla. Esto evidencia que, aunque la Tabla 7 proporciona una guía útil, no necesariamente captura todas las variables que pueden influir en el comportamiento del concreto en estado fresco.

Diversos especialistas coinciden en que la Tabla 7 presenta ciertas limitaciones. Estas limitaciones se manifiestan especialmente cuando se utilizan tipos de agregados que difieren en características como granulometría, forma o textura superficial. Si bien agregados de granulometría y tamaño similares tienden a producir concretos de

trabajabilidad comparable, las diferencias en el perfil de las partículas —por ejemplo, entre agregados redondeados y angulares— pueden alterar significativamente la cantidad de mortero necesaria. Los agregados de perfil angular, al presentar un mayor contenido de vacíos, demandan un volumen adicional de mortero para llenar esos espacios, afectando directamente la trabajabilidad de la mezcla y, potencialmente, su resistencia final.

Asimismo, se considera que la Tabla 7 no refleja adecuadamente las variaciones dentro de la granulometría del agregado grueso para diferentes tamaños máximos nominales. Si bien estas variaciones pueden manifestarse indirectamente en el porcentaje de vacíos, no se abordan de manera explícita en la tabla, lo cual limita su aplicabilidad en condiciones donde se presentan agregados atípicos o no convencionales.

En respuesta a estas observaciones, el Comité 211 del ACI sostiene que las diferencias en la cantidad de mortero requerida debido a variaciones en el perfil o granulometría del agregado se equilibran, en cierta medida, por las diferencias naturales en el contenido de vacíos del material seco y compactado. No obstante, en situaciones específicas donde se requieren concretos de alta trabajabilidad, como en vaciados por bombeo o en elementos estructurales densamente armados, puede ser recomendable reducir aproximadamente en un 10 % el contenido de agregado grueso estimado mediante la Tabla 7. Esta reducción busca facilitar la colocación y consolidación del concreto en zonas de difícil acceso.

Cabe advertir que, al aplicar esta disminución del contenido de agregado grueso, deben tomarse precauciones adicionales. Es esencial asegurar que propiedades fundamentales como el asentamiento, la resistencia a compresión y la relación agua-cemento permanezcan dentro de los márgenes recomendados. Además, se debe garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto, ya que cualquier alteración en las proporciones puede repercutir en el desempeño a largo plazo del concreto.

En definitiva, aunque la Tabla 7 constituye una herramienta de gran utilidad para los diseñadores de mezclas, su aplicación debe realizarse de manera crítica, teniendo en cuenta las características específicas de los materiales disponibles, las condiciones de colocación y los requisitos particulares del proyecto. El juicio técnico del diseñador será fundamental para equilibrar la facilidad de manejo de la mezcla con la calidad estructural y la durabilidad esperada del concreto (López, 1992).

### **g. Selección de las proporciones del agregado fino**

López (1992) expone que, para seleccionar adecuadamente las proporciones del agregado fino en una mezcla de concreto, resulta recomendable, en situaciones donde exista duda, optar por emplear un mayor porcentaje de agregado fino. Esta elección, aunque pueda provocar un ligero incremento en la cantidad de pasta, ofrece beneficios importantes para el concreto en estado fresco, ya que proporciona una protección efectiva contra la segregación de materiales, facilita la trabajabilidad de la mezcla, mejora el proceso de compactación y ayuda a prevenir la formación de defectos como las cangrejas. Estas ventajas justifican ampliamente la decisión de preferir una proporción más elevada de agregado fino en contextos de incertidumbre.

A lo largo de los años, diversas investigaciones han tratado de definir un porcentaje óptimo de agregado fino en relación con el volumen total del agregado, proponiendo que dicho porcentaje fuera aquel que minimiza la cantidad de pasta necesaria en la mezcla. Sin embargo, en la actualidad se reconoce que no existe un valor universalmente aplicable que pueda considerarse óptimo para todas las mezclas de concreto. Esto se debe a que tanto las propiedades de la pasta como las características del agregado grueso presentan variaciones significativas de un caso a otro. Por ello, en cada diseño específico de mezcla resulta imprescindible encontrar la combinación más adecuada entre agregado fino y grueso, buscando lograr las propiedades deseadas tanto en estado fresco – como la trabajabilidad y la resistencia al sangrado – como en el concreto endurecido – como la resistencia y la durabilidad –.

Sobre esta base, se acepta de manera general que un porcentaje de agregado fino cercano al 40 % del volumen absoluto total de agregados puede ser adecuado para mezclas promedio. Esta proporción, de acuerdo a la experiencia práctica, suele ser ligeramente inferior al porcentaje que se requeriría para alcanzar la máxima densidad o el mínimo contenido de vacíos en el agregado combinado. Tal diferencia es consecuencia directa de la separación del agregado dentro de la matriz de pasta: una mezcla diseñada únicamente para máxima densidad podría volverse menos trabajable y más propensa a la segregación durante el vaciado.

La diferencia entre el porcentaje de agregado fino que proporciona la máxima densidad y el porcentaje óptimo, que busca equilibrar trabajabilidad y cohesión, generalmente no es elevada. Rara vez supera el 8 %, y en la mayoría de los casos oscila entre un 2 % y un 5 %. Para propósitos prácticos de diseño de mezcla, se recomienda considerar una disminución promedio del 3 % respecto al porcentaje de máxima

densidad, ya que la sensibilidad de la mezcla a pequeños cambios en el contenido de pasta cerca del valor óptimo es relativamente baja.

El procedimiento para determinar el porcentaje de agregado fino asociado a la máxima densidad del agregado total es sencillo. Consiste en mezclar diversas proporciones de agregados fino y grueso en estado seco y compactado, pesarlos, y graficar una curva donde se pueda identificar el porcentaje correspondiente al peso unitario máximo. Este método permite al diseñador optimizar preliminarmente la combinación de agregados, contribuyendo a lograr una mezcla más eficiente y controlada.

Por su parte, el método propuesto por el Comité 211 del ACI calcula el volumen absoluto de agregado fino como el valor residual que resulta de restar, de la unidad, la suma de los volúmenes absolutos de los demás componentes de la mezcla: cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso seco. Esta metodología se basa en el principio de que el volumen total desplazado por los ingredientes en una unidad cúbica de concreto —conocido como volumen de sólidos— puede determinarse dividiendo el peso de cada componente entre su peso sólido específico, definido a su vez como el producto del peso específico del material y el peso unitario del agua.

Además, el Comité 211 sugiere un método alternativo que facilita la determinación del peso de agregado fino requerido en la mezcla. Según este procedimiento, si se dispone de suficiente experiencia o información que permita estimar el peso total de la unidad cúbica de concreto fresco, entonces el peso del agregado fino puede calcularse simplemente como la diferencia entre el peso total del concreto fresco y la suma de los pesos de los demás ingredientes, lo cual representa un enfoque práctico que puede ser muy útil en trabajos de campo o situaciones donde se necesite agilizar el proceso de diseño de mezcla (López, 1992).

#### **h. Corrección por humedad de los agregados**

Según López (1992), para lograr una dosificación adecuada en la preparación del concreto, es fundamental realizar un ajuste correcto de las cantidades de agregado, considerando el contenido de humedad real de estos materiales en obra. En la práctica, los agregados rara vez se encuentran completamente secos; por lo general, se presentan en estado húmedo. Por esta razón, el peso seco de los agregados debe ser incrementado en función del porcentaje de agua que contienen, incluyendo tanto el agua absorbida en sus poros como la humedad libre en su superficie.

De igual manera, el volumen de agua de mezclado que se introduce en la mezcladora deberá ajustarse. Específicamente, se debe disminuir el volumen de agua de diseño en una cantidad equivalente a la humedad superficial o humedad libre aportada por los agregados. Esta corrección se basa en restar del contenido total de humedad el porcentaje de absorción del material, obteniendo así el valor de humedad libre que efectivamente altera la cantidad de agua disponible en la mezcla.

López (1992) describe que, en función de su condición de humedad, los agregados en obra pueden clasificarse en cuatro estados distintos:

- *Estado seco*: el agregado se encuentra sin agua en su superficie ni en sus poros internos. Esta es una condición puramente teórica y es la base para el cálculo inicial de los contenidos de agregado fino y grueso, previo a cualquier corrección por humedad real.
- *Estado semi-seco o secado al aire*: la superficie del agregado está seca, pero parte del agua permanece retenida en sus poros. En esta condición, el contenido de humedad del agregado es inferior a su capacidad de absorción.
- *Estado saturado superficialmente seco*: el agregado tiene sus poros completamente saturados de agua, pero su superficie no presenta humedad libre. Esta es la condición considerada ideal, ya que en ella el agregado no absorbe ni aporta agua a la mezcla, manteniendo así inalterada la relación agua-cemento diseñada.
- *Estado húmedo o mojado*: además de estar saturados sus poros, la superficie del agregado contiene humedad libre adicional. Este exceso de agua superficial debe ser descontado del agua de mezclado para evitar afectar la proporción original diseñada en la mezcla.

Asimismo, López (1992) enfatiza la importancia de definir claramente tres conceptos fundamentales en el ajuste de humedad:

- *Capacidad de absorción*: representa la cantidad de agua necesaria para que el agregado pase del estado seco al saturado superficialmente seco. La ecuación 1, la expresa como un porcentaje respecto al peso seco del material.

$$\% \text{ Absorción} = 100 (SSS - S) / S \quad (1)$$

Donde:

SSS : Peso del agregado al estado saturado superficialmente seco.

S : Peso del agregado al estado seco.

- *Contenido de humedad:* es la cantidad total de agua que posee el agregado en un momento dado. La ecuación 2, la determina como la diferencia entre el peso húmedo del agregado y su peso seco.

$$\text{Contenido de humedad} = 100 (H - S) / S \quad (2)$$

Donde:

H : Peso del agregado.

S : Peso del agregado al estado seco.

- *Humedad superficial:* se define como la diferencia entre el contenido de humedad total y la capacidad de absorción del agregado. Puede ser positiva, indicando que el agregado aporta agua a la mezcla —por lo cual se debe disminuir la cantidad de agua de mezclado—, o negativa, indicando que el agregado absorberá parte del agua disponible, requiriendo entonces una adición de agua para mantener la relación agua-cemento prevista.

Finalmente, al realizar la corrección por humedad de los agregados en el diseño de mezcla, pueden presentarse tres situaciones posibles: (a) que tanto el agregado fino como el grueso aporten agua a la mezcla; (b) que uno de los agregados aporte agua y el otro absorba agua de la mezcla; o (c) que ambos agregados absorban agua de la mezcla. Cualquiera de estos escenarios exige un ajuste cuidadoso para garantizar que las proporciones diseñadas y las propiedades finales del concreto no se vean alteradas (López, 1992).

### **i. Proporcionamiento del diseño**

De acuerdo con López (1992), en el proceso de diseño de mezclas de concreto, el Comité 211 del American Concrete Institute (ACI) ha desarrollado un procedimiento bastante sencillo y sistemático que facilita la determinación de las proporciones adecuadas de los materiales que conforman un metro cúbico de concreto. Este método se apoya en diversas tablas de referencia, presentadas previamente, que proporcionan valores orientativos basados en condiciones específicas de los materiales y de la obra.

El procedimiento recomendado para la selección de proporciones es aplicable principalmente a mezclas de concreto de peso normal, es decir, aquellas que utilizan

agregados convencionales y presentan densidades típicas. No obstante, aclara que los mismos principios y datos básicos pueden adaptarse para el diseño de concretos pesados —que emplean agregados de alta densidad— y concretos ciclópeos —que incorporan piedras de gran tamaño—, aunque en estos casos se requiere información complementaria adicional para ajustar el diseño de mezcla de forma adecuada.

Es importante considerar que, en los proyectos de obra, usualmente se imponen limitaciones o requisitos específicos que el diseñador de la mezcla debe respetar. Estas restricciones buscan asegurar que el concreto cumpla con las exigencias técnicas, de durabilidad y de ejecución establecidas para el proyecto. Entre las principales limitaciones que pueden presentarse se incluyen:

- La *relación agua-cemento máxima* permitida, la cual influye directamente en la durabilidad y resistencia del concreto.
- El *contenido mínimo de cemento* requerido para asegurar un desempeño adecuado en términos de resistencia y durabilidad.
- El *contenido máximo de aire* permitido, que debe controlarse cuidadosamente para mantener las propiedades mecánicas y de trabajabilidad.
- El *asentamiento* específico, relacionado con la consistencia del concreto fresco y su facilidad de colocación.
- El *tamaño máximo nominal del agregado grueso*, que debe seleccionarse en función de las dimensiones del elemento estructural y de la congestión del refuerzo.
- La *resistencia a compresión mínima* que el concreto debe alcanzar a la edad de diseño.
- Además, pueden existir *requisitos especiales* relacionados con la resistencia promedio especificada, el uso de aditivos químicos o minerales, o la selección de tipos particulares de cemento o agregados adecuados a condiciones específicas del proyecto.

López (1992) destaca que la correcta estimación de las cantidades de materiales necesarios para fabricar una unidad cúbica de concreto requiere seguir una secuencia ordenada de pasos. Esta secuencia considera las propiedades particulares de los materiales disponibles —como la granulometría del agregado, la absorción de agua, la resistencia del cemento, entre otros factores—, con el objetivo de diseñar una mezcla

que no solo cumpla con los requisitos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad, sino que también sea eficiente y adecuada para el tipo de obra que se ejecutará.

La aplicación disciplinada de este procedimiento permite optimizar el desempeño del concreto, garantizar la calidad de la construcción, y cumplir de manera efectiva con las exigencias establecidas en las especificaciones técnicas del proyecto (López, 1992).

## **2.2.12. Criterios técnicos de aplicación en canales**

### **2.2.12.1. Impacto entre Costos y eficiencia para la construcción de canales con material demolido**

En el contexto de la reutilización de concreto reciclado en la construcción de canales, el factor de costo y eficiencia desempeña un papel crucial en la viabilidad de este tipo de proyectos. La utilización de concreto reciclado puede generar ahorros significativos al reducir la necesidad de adquirir nuevos materiales, ya que los escombros de demolición se pueden triturar y reutilizar, disminuyendo así los costos de extracción y transporte de agregados vírgenes. Este ahorro es especialmente notable en proyectos a gran escala, donde el transporte de materiales frescos representa una porción considerable del presupuesto total.

Adicionalmente, el concreto reciclado consume menos energía en su proceso de producción en comparación con la fabricación de concreto nuevo, ya que la trituración de material existente requiere menos recursos que la extracción y procesamiento de nuevos agregados. Esto no solo reduce el costo energético del proyecto, sino que también minimiza las emisiones de dióxido de carbono, un beneficio directo en términos de eficiencia ambiental.

Por otro lado, la eficiencia del concreto reciclado radica en su capacidad de compactación y densidad, que lo hacen adecuado para aplicaciones como bases de pavimentos, rellenos y cimentaciones. Sin embargo, su calidad puede variar dependiendo de las propiedades del concreto original, lo que puede requerir pruebas adicionales para garantizar su viabilidad en proyectos de alta demanda estructural. No obstante, cuando se emplea de manera correcta, el concreto reciclado ofrece una solución eficiente tanto en términos de costos como de rendimiento en una amplia gama de aplicaciones constructivas.

### **2.2.12.2. Revestimiento de canales**

El revestimiento de canales con concreto reciclado es una solución práctica y sostenible que ayuda a prolongar la vida útil de infraestructuras hidráulicas, como los canales de irrigación y drenaje. Este tipo de revestimiento proporciona una superficie resistente al desgaste y a la erosión causada por el flujo continuo de agua, al tiempo que reduce la pérdida de agua por infiltración. Sin embargo, es importante señalar que el concreto reciclado puede ser más susceptible a fisuras, por lo que se recomienda combinarlo con materiales impermeables o sistemas adicionales de sellado para evitar filtraciones.

Una ventaja adicional del concreto reciclado en el revestimiento de canales es su alta capacidad de compactación, lo que asegura una adecuada estabilidad estructural en terrenos irregulares o con movimiento. Además, el uso de agregados reciclados en este tipo de aplicaciones permite reducir significativamente el impacto ambiental asociado a la extracción de nuevos materiales, ya que se reutilizan desechos de construcciones anteriores.

Asimismo, los costos de revestir canales con concreto reciclado son menores en comparación con el uso de concreto tradicional, debido a la reducción en el transporte de materiales y en la adquisición de nuevos agregados. Esto, sumado a sus propiedades técnicas, hace que el concreto reciclado sea una opción eficiente tanto en términos económicos como de rendimiento. De este modo, se fomenta una gestión más sostenible de los recursos en proyectos de infraestructura hídrica.

### **2.2.12.3. Control de la erosión y estabilidad**

El control de la erosión y la estabilidad es uno de los principales beneficios al utilizar concreto reciclado en la construcción de canales. El flujo constante de agua en estos sistemas puede generar una erosión significativa en las paredes y el lecho de los canales. El uso de concreto reciclado, al ser un material denso y resistente, ayuda a estabilizar las estructuras, previniendo la degradación de los suelos circundantes y mejorando la durabilidad de los sistemas de irrigación.

El concreto reciclado también se destaca por su capacidad de proporcionar una base sólida y compacta, lo que es crucial para prevenir el movimiento del suelo y las fallas estructurales en áreas vulnerables. En las zonas donde el terreno es inestable o propenso a deslizamientos, el concreto reciclado puede actuar como una barrera efectiva para evitar la erosión del suelo y asegurar la estabilidad de la estructura del canal.

Además, los agregados reciclados pueden usarse para fortalecer las paredes de los canales, reduciendo el impacto de las corrientes de agua que, de otro modo, causarían desgaste y daños. Este enfoque no solo garantiza una mayor vida útil para los canales, sino que también contribuye a la sostenibilidad al minimizar la necesidad de nuevos materiales y al reducir la explotación de recursos naturales.

Por último, debido a la naturaleza permeable del concreto reciclado, puede ser especialmente eficaz en el manejo del agua, permitiendo un drenaje controlado que reduce el riesgo de inundaciones y desbordamientos, lo que, a su vez, protege las áreas aledañas de la erosión.

#### **2.2.12.4. Consideraciones técnicas**

- *Durabilidad y resistencia:* Aunque el concreto reciclado tiene aplicaciones viables, su durabilidad y resistencia pueden ser ligeramente inferiores a las del concreto tradicional. En proyectos de irrigación, se debe garantizar que las mezclas de concreto reciclado cumplan con las normativas necesarias para asegurar una larga vida útil y un buen comportamiento frente a los cambios climáticos y la exposición al agua.
- *Mantenimiento y reparación:* El concreto reciclado requiere un monitoreo constante debido a la posibilidad de fisuras causadas por movimientos del suelo o el desgaste natural. Para contrarrestar este riesgo, se recomienda el uso de revestimientos adicionales o la combinación con materiales flexibles que proporcionen una barrera impermeable.

### **2.3. Definición de términos**

#### **2.3.1. Concreto**

“Es una mezcla compuesta por cemento, agregados (finos y gruesos), agua y, en ocasiones, aditivos, que endurece y se convierte en un material resistente. El concreto proporciona estabilidad volumétrica y durabilidad” (Neville, 1995).

#### **2.3.2. Agregados**

“Son materiales, generalmente de origen natural, que se mezclan con cemento para formar concreto. Pueden ser agregados finos (como arena) o gruesos (como grava) y juegan un papel importante en la estabilidad y durabilidad del concreto” (Neville, 1995).

### **2.3.3. Granulometría**

“Es la distribución de los tamaños de las partículas dentro de los agregados. Controlar la granulometría de los agregados es crucial para obtener un concreto con buenas propiedades de trabajabilidad y resistencia” (Neville, 1995).

### **2.3.4. Resistencia a la compresión**

“Es una de las propiedades más importantes del concreto, definida como la capacidad del material para soportar fuerzas que tienden a reducir su tamaño. Es crucial para evaluar la calidad y el desempeño estructural del concreto” (Neville, 1995).

### **2.3.5. Resistencia a la tracción**

“Aunque el concreto es principalmente resistente a la compresión, su resistencia a la tracción es menor. La resistencia a la tracción es de interés en aplicaciones donde las tensiones de tracción están presentes, como en pavimentos” (Neville, 1995).

### **2.3.6. Módulo de Elasticidad**

“Es una medida de la rigidez del concreto, describiendo su capacidad para deformarse elásticamente cuando se aplica una carga. Un concreto con un módulo de elasticidad más alto es más rígido y resistente a la deformación” (Neville, 1995).

### **2.3.7. Durabilidad**

“Se refiere a la capacidad del concreto para resistir el deterioro causado por factores ambientales, químicos o mecánicos. La durabilidad es esencial para asegurar la longevidad del concreto en estructuras expuestas a condiciones adversas” (Neville, 1995).

### **2.3.8. Diseño de mezclas según el método ACI 211**

“El método ACI 211 es uno de los más reconocidos para el diseño de mezclas de concreto. Proporciona procedimientos para seleccionar las proporciones adecuadas de los materiales que componen la mezcla, basándose en requisitos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad” (Neville, 1995).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Diseño de investigación

La estrategia planteada para esta investigación es el diseño “Experimental” del tipo “Cuasi Experimentos”, debido a que se sometieron briquetas de concreto diseñado a condiciones determinadas tales como la adición de material demolido para observar los efectos que se producen.

### 3.2. Acciones y actividades

Las principales acciones y actividades a realizar en esta investigación son:

- Recopilación de información referente a la saturación de los depósitos de material excedentes (DME) empleados en la localidad de Tacna.
- Extracción y recolección de muestras de material demolido en los DME para su posterior adición en las mezclas de concreto.
- Caracterización de los materiales a través de ensayos como: ensayo de contenido de humedad, ensayo de peso unitario volumétrico (densidad natural), ensayo de peso específico y porcentaje de absorción, ensayo de análisis granulométrico, y resistencia a la compresión de probetas cilíndricas
- Aplicar el método ACI para el diseño de mezcla de concreto utilizando agregados en su estado natural y reciclado con materiales demolido para comparar sus resultados.
- Análisis de los costos de producción para ambos tipos de ensayos.
- Evaluación del impacto ambiental que genera la práctica del diseño de mezcla de concreto utilizando material proveniente de demoliciones.

### 3.3. Materiales e instrumentos

#### 3.3.1. Materiales y equipos

Materiales y equipos de laboratorio para los ensayos:

- Horno
- Cemento
- Agua
- Agregado Grueso

- Agregado Fino
- Material proveniente de demoliciones
- Prensa hidráulica para ensayos de resistencia a la compresión
- Moldes para probetas
- Software y herramientas para el análisis de costos de producción.

### 3.3.2. Instrumento

Se utilizaron estándares de laboratorio, guías de observación, notas de campo, programas informáticos, así como protocolos y/o normas técnicas, las cuales fueron adquiridas tanto de manera gratuita como comprada. Estos formatos están estandarizados conforme a las Normas Técnicas Peruanas, lo que ha permitido la realización confiable de ensayos de laboratorio tales como:

- *Manejo de Residuos de la Actividad de la Construcción y Demolición NTP 400.050*: Esta norma se aplica a los residuos generados en el ámbito de la construcción, los cuales son, en su mayoría, materiales remanentes de actividades como construcción, demolición, reparación o reforzamiento. Además, sugiere diversas formas de manejo, con énfasis en el reciclaje y el reúso, incluyendo su aplicación en carreteras y en estructuras civiles.
- *Reciclaje de Concreto de Demolición NTP 400.503*: La presente norma está relacionada con la gestión de residuos de construcción, esta norma establece los requisitos para manejar el concreto de demolición de manera eficiente, proporcionando directrices para su empleo como material de relleno no estructural, para su empleo como agregados pétreos en otras mezclas de concreto, entre otros usos.
- *Contenido de Humedad del Agregado Fino y Grueso por secado - NTP 339.185 2021*: El propósito de esta Norma Técnica Peruana es otorgar la metodología para medir el contenido de humedad en los agregados. De acuerdo con la norma, el contenido de humedad se define como la relación (expresada en porcentaje) entre el peso del agua presente en una muestra y el peso de las partículas de la muestra. Este procedimiento implica determinar el peso del agua evaporada mediante el secado de una pequeña muestra del material en un horno, a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C. La diferencia de peso antes y después del secado corresponde al peso del agua contenida en el material.
- *Peso Unitario en Agregados – NTP 400.017 2020*: Esta norma técnica peruana describe el procedimiento para medir la densidad de masa,

comúnmente conocida como peso unitario, en agregados. El ensayo puede realizarse tanto en estado suelto como compactado y es aplicable a agregados finos, gruesos o combinaciones de ambos, siempre que el tamaño nominal máximo no exceda los 125 mm. Además, permite calcular el volumen de vacíos entre partículas utilizando un único método estandarizado.

- *Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso – NTP 400.021 2020:* Esta norma establece cómo determinar la gravedad específica (también llamada densidad relativa) y el porcentaje de absorción de los agregados gruesos. La densidad relativa se expresa de forma adimensional y puede reportarse en tres estados: seca al horno (S), saturada superficialmente seca (SSS), o como densidad relativa aparente. La primera se obtiene tras secar completamente el agregado, mientras que las otras dos se miden luego de un periodo controlado de inmersión en agua.
- *Peso Específico y Absorción del Agregado Fino – NTP 400.022 2021:* La NTP 400.022 especifica el procedimiento para determinar tanto la densidad relativa como la capacidad de absorción del agregado fino. Al igual que en los agregados gruesos, se considera la densidad en estado seco (SH), en condición saturada superficialmente seca (SSS), y la densidad relativa aparente. Los valores se obtienen tras secar o saturar el material según lo estipulado en la norma, permitiendo evaluar su comportamiento en diversas condiciones de humedad.
- *Granulometría por Tamizado para Agregado Fino y Grueso – NTP 400.012 2021:* Esta norma detalla la metodología para llevar a cabo el análisis granulométrico de agregados, ya sea mediante tamizado o sedimentación. Se emplea principalmente para verificar la distribución del tamaño de las partículas, asegurando el cumplimiento con las especificaciones técnicas del proyecto. Los resultados también sirven para controlar la producción de mezclas que incluyen agregados, así como para estudiar la porosidad y la forma en que se acomodan las partículas en un volumen determinado.
- *Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio – NTP 339.183 2013:* La Norma Técnica Peruana define el procedimiento que debe seguirse para la elaboración y el curado de especímenes de concreto dentro del laboratorio, bajo condiciones estrictamente controladas tanto en cuanto a los materiales empleados como a las condiciones del ensayo. Este procedimiento aplica a concretos que pueden ser consolidados mediante varillado o vibrado.

- *Rotura de Probetas de Concreto – NTP 339.034 2021*: El objetivo principal de esta NTP es determinar la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas y en extracciones diamantinas de concreto. La norma se aplica a concreto con un peso unitario superior a 800 kg/m<sup>3</sup>. El método consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados a una velocidad predefinida hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de la probeta se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección recta de la probeta de concreto endurecido.
- *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural – ACI 318-19*: Esta norma establece una metodología de diseño para concreto con la finalidad de proteger la salubridad y seguridad pública, estableciendo requisitos mínimos para la resistencia, estabilidad, funcionamiento, durabilidad, e integridad de las estructuras de concreto.

### **3.4. Población y muestra de estudio**

#### **3.4.1. Población**

La población está compuesta por concreto proveniente de la demolición de estructuras como veredas, pontones, losas de piso, canales, sardineles, columnas y losas, entre otros. El concreto reciclado fue obtenido de un Depósito de Material Excedente (DME) de un proyecto realizado en el distrito de Calana. Aproximadamente se recolectaron 5 m<sup>3</sup> de fragmentos de concreto para su estudio y análisis.

#### **3.4.2. Muestra**

La muestra representativa consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de concreto, a las cuales se les reemplazó parcialmente la cantidad de agregado grueso por agregado reciclado, a su vez, se elaboró probetas cilíndricas con concreto estándar de 175 Kg/cm<sup>2</sup> para su comparación.

El número de especímenes consistió en 6 probetas por cada diseño de concreto efectuado, según lo estipulado en la norma técnica peruana NTP 339.183 2013 el cual indica lo siguiente “Usualmente tres o más especímenes deberán ser moldeados para cada edad y condiciones de prueba a menos que se especifique lo contrario (Nota 8)” (INDECOPI, 2013).

En la misma norma, la nota 8 mencionada indica las edades para la rotura de las briquetas “NOTA 8: Las edades de ensayo generalmente son 7 días y 28 días para la resistencia a la compresión” (INDECOPI, 2013).

Por consiguiente, la muestra consiste en la elaboración de 30 probetas cilíndricas de concreto, de las cuales cada 6 probetas corresponden un diseño de mezclas de un concreto de 175 Kg/cm<sup>2</sup> estándar y 4 diseños reemplazando parcialmente el agregado grueso en proporción de 20 %, 30 %, 40 % y 50 % respectivamente, las cuales se evaluaron a los 7 y 28 días, para posteriormente someterlas a ensayos de compresión.

Las probetas elaboradas fueron 6 denominadas N.A. - X que representa a las muestras no alteradas, 6 probetas denominadas 20 % - X que representan las muestras con un reemplazo del 80 % agregado grueso y 20 % Agregado reciclado, 6 probetas denominadas 30 % - X que representan las muestras con un reemplazo del 70 % agregado grueso y 30 %, 6 probetas denominadas 40 % - X que representan las muestras con un reemplazo de 60 % agregado grueso y 40 % Agregado reciclado y finalmente 6 probetas denominadas 50 % - X que representan las muestras con un reemplazo del 50 % agregado grueso y 50 % Agregado reciclado.

### **3.5. Operacionalización de variables**

Para efectos de la tesis, a continuación, se presenta en la Tabla 8, la variable 1 “Reutilización del concreto proveniente de material demolido” y la variable 2 “Diseño de Mezclas para la aplicación en canales”, en la cual se muestra la definición conceptual, definición operacional, así como también sus dimensiones, indicadores y escala o niveles de medición correspondientes.

**Tabla 8**  
*Operacionalización de variables de investigación*

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala/ Niveles de medición
Reutilización del Concreto proveniente de Material Demolido	La reutilización del concreto proveniente de estructuras demolidas consiste en el aprovechamiento de escombros de concreto como fuente de agregados reciclados para la elaboración de nuevas mezclas. El concreto reciclado, debidamente procesado y caracterizado, puede incorporarse como sustituto parcial o total del agregado grueso en mezclas convencionales, manteniendo propiedades físico-mecánicas adecuadas para su uso en obras civiles.	Corresponde al conjunto de actividades técnicas y logísticas realizadas en la ciudad de Tacna para evaluar el potencial de reutilización del concreto demolido. Incluye la identificación de los depósitos de material excedente (DME), recolección de muestras representativas de concreto demolido, y su caracterización mediante ensayos normalizados en laboratorio (granulometría, humedad, peso específico, absorción, etc.), con el fin de determinar su idoneidad como agregado reciclado en el diseño de mezclas de concreto estructural.	Reutilización del concreto	Volumen Generado en obra	Razón
				Volumen reciclado	
				Granulometría	
			Caracterización del agregado reciclado	Contenido de Humedad	
				Peso Unitario	
				Peso Específico	
				Absorción	
Dosificación					
Diseño de Mezclas para la Aplicación En Canales	El diseño de mezclas de concreto para la aplicación en canales hace referencia a la formulación técnica de proporciones de materiales que permitan obtener una mezcla con propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad adecuadas para estructuras hidráulicas.	Corresponde a la elaboración y evaluación experimental de mezclas de concreto utilizando el método ACI, en las que se sustituye parcial o totalmente el agregado grueso convencional por agregado reciclado. El desempeño de estas mezclas se mide a través de ensayos de resistencia a la compresión, tipo de rotura y otras propiedades físico-mecánicas. Asimismo, se evalúa la aplicabilidad del concreto resultante en la construcción de canales de riego, considerando criterios de durabilidad, comportamiento estructural, costos de producción y sostenibilidad ambiental.	Comportamiento mecánico del concreto	Resistencia a la compresión	Razón
				Tipo de Rotura	
				Gastos sin reutilizar el concreto	
			Análisis de costos	Gastos reutilizando el concreto	
				Diferencia de gastos	
				Evaluación de Impacto ambiental	Consecuencias de la reutilización del concreto

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis estadístico**

El procesamiento de datos se llevó a cabo a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, aplicando fórmulas estadísticas y técnicas normadas para cada tipo de prueba. Se organizaron los datos en matrices y tablas de Excel, lo cual permitió identificar patrones, promedios y desviaciones significativas entre los distintos diseños de mezcla de concreto con agregado reciclado.

Para el análisis de los datos, se empleó la estadística descriptiva, mediante la cual se calcularon promedios, porcentajes y se generaron gráficos comparativos entre las resistencias alcanzadas por las probetas con distintos porcentajes de reemplazo de agregado grueso por concreto reciclado. Se evaluaron los resultados tanto a los 7 como a los 28 días de curado, permitiendo así establecer comparaciones con el concreto estándar de 175 kg/cm<sup>2</sup>.

Asimismo, se recurrió al uso de herramientas del software Excel para elaborar tablas de resultados y facilitar la interpretación de los mismos, determinando la viabilidad técnica del uso de concreto reciclado a diferentes proporciones, de acuerdo a su comportamiento mecánico frente a la compresión.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

La presente tesis planteó realizar 4 diseños de mezclas de concreto reciclado y comparar con una muestra estándar de 175 kg/cm<sup>2</sup>. La adición de material reciclado será del 20 %, 30 %, 40 %, 50 %.

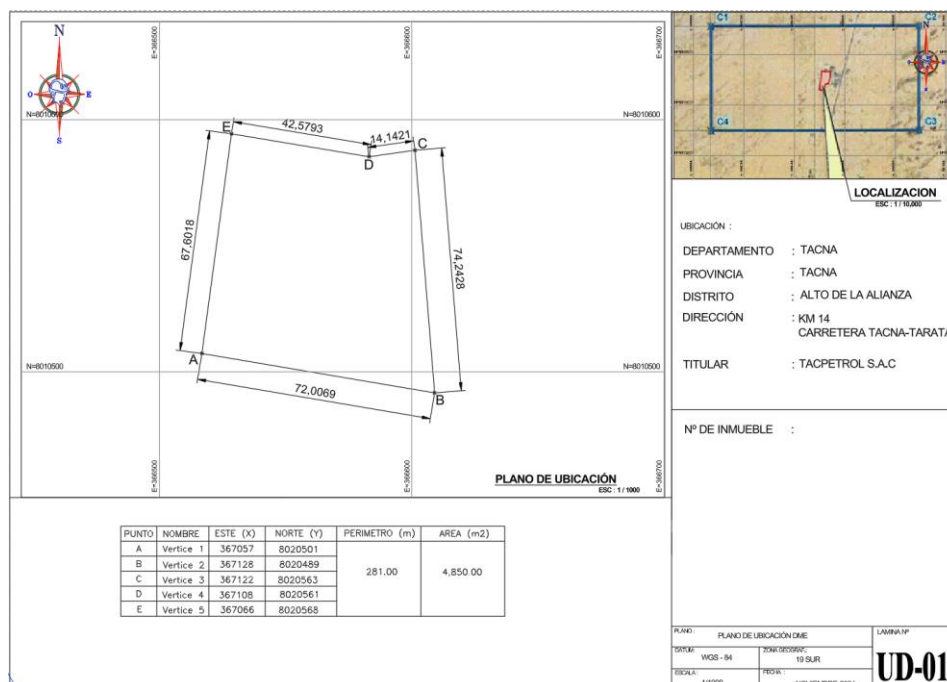
### 4.1. Trabajos preliminares

#### 4.1.1. En campo

##### 4.1.1.1. Elección del botadero

Para la realización de los ensayos de la presente tesis, es primordial elegir nuestra fuente de materia prima. En este caso, se emplearon residuos de demolición o concretos reciclados, los cuales se pueden encontrar en cualquiera de los 37 botaderos informales distribuidos por la ciudad de Tacna (República, 2019). Para esta investigación en particular, se decidió obtener el concreto reciclado del botadero Autorizado y manejado por la empresa TACPRETROL S.A.C., ubicado en el distrito de Alto de la Alianza de la ciudad de Tacna, precisamente en el KM 14 de la carretera Tacna-Tarata.

**Figura 1**  
*Plano de Ubicación del DME*



#### 4.1.1.2. Obtención y fragmentación del concreto reciclado

En la Figura 2 se muestra la zona de desmonte de residuos de construcción perteneciente al botadero TACPETROL S.A.C. el cual contenía una variedad de concretos de distintos tamaños, formas, tipos de estructuras, resistencias y volúmenes. Los concretos de grandes dimensiones presentan mayor dificultad de movilización, por lo que, en estos casos, se optará por fraccionarlos en partes más pequeñas para facilitar tanto su transporte como su trituración. Para recolectar la cantidad de agregado necesaria para nuestros ensayos, se extrajeron aproximadamente 300 kg de fragmentos de concreto. Durante este proceso, se encontraron materiales contaminantes como madera, vidrio, plástico, papel, cartón y otros elementos que no eran útiles para los ensayos, por lo que fue necesario realizar una separación de estos materiales, así como de basura y desechos orgánicos presentes en el lugar. Los equipos utilizados para esta tarea incluyeron un combo grande, una lampa y costales de polipropileno.

**Figura 2**  
*Ubicación de residuos de construcción en el DME*



#### 4.1.2. En laboratorio

##### 4.1.2.1. Trituración del concreto reciclado

La trituración del concreto reciclado representó una etapa clave en la obtención del agregado, siendo este último el componente principal de la presente investigación. Debido a que el proceso se realizó de forma manual, la fragmentación fue considerablemente lenta. Esto se debió a la necesidad de evitar el uso de una chancadora, ya que esta podría haber generado microfisuras o pulverizado el material, reduciendo significativamente el volumen útil de agregado reciclado, sin embargo, para acelerar el procedimiento, como se describe en la Figura 3, empleamos un martillo mecánico para fragmentar la muestra en tamaños que faciliten la trituración con la comba. Aunque este método implicó mayor tiempo, ofreció mayor control sobre el tamaño de las partículas obtenidas, además de garantizar un procedimiento más seguro y preciso.

##### 4.1.2.2. Elección selectiva del agregado reciclado

Debido a la trituración manual, el agregado reciclado mostraba una considerable variedad de tamaños, generalmente finos y partículas pasantes a la malla N°16, para lo cual, como se observa en la Figura 3, como último paso en este proceso, optamos por tamizar por la malla N°16 el material triturado, obteniendo de esta manera, solo material grueso, el cual pasaremos a realizar los ensayos respectivos, considerando a la muestra como agregado grueso.

**Figura 3**  
*Proceso de trituración*



##### 4.1.2.3. Adquisición de los agregados grueso y fino

Adquirimos 200 kg de agregado grueso y 200 kg de agregado fino de la cantera Arunta, abasteciéndonos para realizar los ensayos correspondientes y de esta manera poder determinar sus propiedades.

## 4.2. Ensayo de agregados

### 4.2.1. En laboratorio

Una vez preparados los agregados grueso, fino y reciclado, fueron trasladados al laboratorio para la ejecución de los ensayos correspondientes, tales como análisis granulométrico, absorción, peso específico, entre otros. Estos ensayos permitieron obtener parámetros fundamentales como el módulo de fineza, el contenido de humedad y la absorción, los cuales fueron utilizados posteriormente en el diseño de mezcla. Para la realización de estas pruebas se emplearon diversos equipos y materiales, entre ellos: balanzas, taras, tamices, horno, baldes, cucharas y trapos.

#### 4.2.1.1. Contenido de humedad del agregado fino y grueso por secado - NTP 339.185 2021

Se separó una muestra representativa de acuerdo con lo indicado en la norma y las instrucciones del laboratorio. Posteriormente, se realizó el pesaje, con una aproximación del 0,1 % de nueve taras vacías (AG-1, AG-2, AG-3, AF-1, AF-2, AF-3, AR-1, AR-2 y AR-3). Luego, se adicionó aproximadamente 500 gr de material en estado húmedo tal como se observa en la

Figura 4 para el caso del agregado grueso y reciclado, y alrededor de 150 gr para el agregado fino.

**Figura 4**

*Humedad - Peso del Agregado en estado húmedo*



Una vez registrados los pesos en estado húmedo, las muestras fueron introducidas en el horno de laboratorio como se observa en la Figura 5, a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante un período de 24 horas.

**Figura 5**  
*Humedad - Introducción de las muestras en el horno*



Transcurrido dicho tiempo, las muestras fueron retiradas del horno y pesadas nuevamente. En la Figura 6 se logra observar una disminución en el peso de la muestra, estos datos los registrados y se procedió a su análisis en gabinete para la realización de los cálculos correspondientes.

**Figura 6**  
*Humedad – Peso del Agregado en estado seco*



#### 4.2.1.2. Peso unitario en agregados – NTP 400.017 2020

Se realizó el muestreo de los agregados conforme a la normativa, asegurando que el laboratorio utilizara un recipiente previamente calibrado, así como todos las herramientas y equipos de trabajos que se muestran en la Figura 7. Se seleccionó el procedimiento de densidad de masa suelta y, posteriormente, el procedimiento por apisonado, empleando tres muestras para cada método.

**Figura 7**  
*Peso Unitario – Materiales y equipos calibrados*



Para las muestras sometidas al procedimiento de peso suelto, se llenó el recipiente hasta el reboce con una pala como se muestra en la

Figura 8, asegurando que el agregado se descargara desde una altura no mayor a 50 mm sobre el borde superior del recipiente.

**Figura 8**  
*Peso Unitario – vertimiento del agregado en el molde*



La superficie del agregado fue nivelada con una regla metálica como se muestra en la Figura 9, permitiendo que las partículas de mayor tamaño equilibraran los vacíos en la parte superior del recipiente.

**Figura 9**  
*Peso Unitario – Nivelación de superficie del agregado*



Así mismo, se utilizó una brocha para eliminar cualquier exceso de material que pudiera haberse esparcido durante el vertido del agregado o el proceso de nivelación, asegurando que no queden restos como se muestra en la Figura 10.

**Figura 10**  
*Peso Unitario – Limpieza de material excedente*



Posteriormente, se determinó la masa del recipiente con su contenido como se muestra en la

Figura 11 y la masa del recipiente vacío como se visualiza en la Figura 12, registrando los valores con una precisión de 0,05 kg.

**Figura 11**  
*Peso Unitario – Masa de recipiente más muestra*



**Figura 12**  
*Peso Unitario – Masa de recipiente*



En el caso del procedimiento por apisonado, se repitió el mismo procedimiento, con la diferencia de que el llenado se efectuó en tres capas, compactando cada una con 25 golpes de una varilla lisa tal como se muestra en la Figura 13. Finalmente, se niveló la muestra con una regla y se registraron los pesos. Una vez obtenidos todos los datos, se procedió al análisis en gabinete para la realización de los cálculos correspondientes.

**Figura 13**  
*Peso Unitario – Apisonado por capas del agregado*



**4.2.1.3. Peso específico y absorción del agregado grueso – NTP 400.021 2020**

Se incluyó el agregado reciclado en el ensayo, por lo que se realizó el muestreo de 5 kg de agregado grueso y 5 kg de agregado reciclado como se observa en la Figura 14, de acuerdo con las especificaciones de la norma técnica.

**Figura 14**  
*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Muestreo de los agregados*



Posteriormente, las muestras fueron colocadas en el horno a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas como se muestra en la figura 15.

Figura 15

**Figura 15**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Secado de las muestras*



Transcurrido este tiempo, las muestras fueron retiradas del horno y dejadas enfriar a temperatura ambiente durante 3 horas. Luego, fueron completamente sumergidas en agua tal como se verifica en la

Figura 16, por un período de  $24\text{ horas} \pm 4\text{ horas}$ , conforme a lo establecido en la normativa.

**Figura 16**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Muestras sumergidas*



Al día siguiente, las muestras fueron retiradas del agua y extendidas sobre un paño absorbente como se muestra en la Figura 17, rodándolas suavemente hasta eliminar todas las partículas visibles de agua.

**Figura 17**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Secado Superficial*



Se procedió al pesaje y marcado de seis taras (AG-1, AG-2, AG-3, AR-1, AR-2 y AR-3), vertiendo aproximadamente 500 gr de muestra en cada una como se observa en la

Figura 18. Este registro correspondió a la condición de saturado superficialmente seco (SSS).

**Figura 18**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Recolección de muestras*



Luego de determinar la condición SSS, las muestras fueron colocadas de inmediato en una canastilla la cual fue pesado en un estado totalmente sumergido como se muestra

en la Figura 19 y se determinó su masa aparente en agua a una temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 19**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Peso sumergido*



Finalmente, las muestras de ensayo fueron secadas nuevamente en el horno a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20**

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Secado al horno del material*



Transcurrido el tiempo, se realizó el pesaje de las muestras para obtener el registro del peso seco notándose una disminución en el peso como se observa en la

Figura 21. Una vez obtenidos todos los datos, se procedió al análisis en gabinete para la realización de los cálculos correspondientes.

#### Figura 21

*P. Específico y Absorción del A.G. y A.R. – Peso de las muestras secas*



#### 4.2.1.4. Peso específico y absorción del agregado fino – NTP 400.022 2021

Se realizó el muestreo de aproximadamente 5 kg de agregado fino como se observa en la

Figura 22, considerando que la cantidad mínima requerida por la norma técnica es de 1 kg.

#### Figura 22

*P. Específico y Absorción del A.F. – Muestreo del material*



La muestra fue colocada en el horno a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas como se observa en la Figura 23.

**Figura 23**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Secado al horno*



Transcurrido este tiempo, las muestras fueron retiradas del horno y dejadas enfriar a temperatura ambiente durante 3 horas. Posteriormente, fueron completamente sumergidas en agua como se observa en la Figura 24, por un período de  $24\text{ horas} \pm 4\text{ horas}$ , según lo establecido en la normativa.

**Figura 24**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Saturación*



Al día siguiente, se realizó la decantación del exceso de agua con cuidado, evitando la pérdida de finos como se observa en la Figura 25.

**Figura 25**

*P. Específico y Absorción del A.F. –  
Decantación del agregado*



La muestra fue extendida sobre una superficie plana no absorbente como se visualiza en la Figura 26, de acuerdo con la norma, y expuesta al sol mientras se agitaba con frecuencia para garantizar un secado homogéneo.

**Figura 26**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Secado al sol*



El proceso continuó hasta que la muestra alcanzó una condición de flujo libre. Para verificar si el agregado fino se encontraba en estado superficialmente seco,

iniciamos con realizar una prueba de tamizado con la malla N°4 como se observa en la Figura 27.

**Figura 27**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Tamizado*



Posteriormente, se utilizó un cono de Abrams pequeño, sosteniendo el molde firmemente sobre una superficie no absorbente y colocando el diámetro mayor hacia abajo. Se llenó el molde hasta la mitad y se aplicaron 10 golpes con la barra compactadora como se observa en la Figura 28. Luego, se agregaron más capas de agregado fino, repitiendo la compactación con 10, 3 y 2 golpes en cada capa, respectivamente.

**Figura 28**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Comprobación de la humedad*



Se niveló el material con la parte superior del molde, se retiró el material suelto de la base y se levantó el molde verticalmente. Según la norma, si la humedad superficial aún estaba presente, el agregado fino conservaba su forma moldeada, mientras que una ligera caída indicaba que se había alcanzado un estado superficialmente seco como en nuestro caso, el cual se visualiza en la figura 29.

**Figura 29**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Muestra en estado SSS*



Una vez determinada la condición de saturado superficialmente seco (SSS), se prepararon tres muestras de aproximadamente 500 gr cada una y se introdujeron en un picnómetro previamente calibrado como en la Figura 30.

**Figura 30**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Picnómetro + muestra*



Se llenó el picnómetro hasta el 90 % de su capacidad con agua como se aprecia en la Figura 31.

**Figura 31**

*P. Específico y Absorción del A.F. –  
Picnómetro + muestra + agua*



Las muestras fueron calentadas en baño maría para facilitar la extracción de burbujas de aire utilizando una cocina eléctrica del laboratorio como se aprecia en la Figura 32.

**Figura 32**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Baño maría*



Transcurridos aproximadamente 20 minutos, el picnómetro fue rodado y agitado manualmente como se ve en la Figura 33 para eliminar completamente las burbujas de aire visibles. Este proceso se repitió durante un período de 15 a 20 minutos.

**Figura 33**

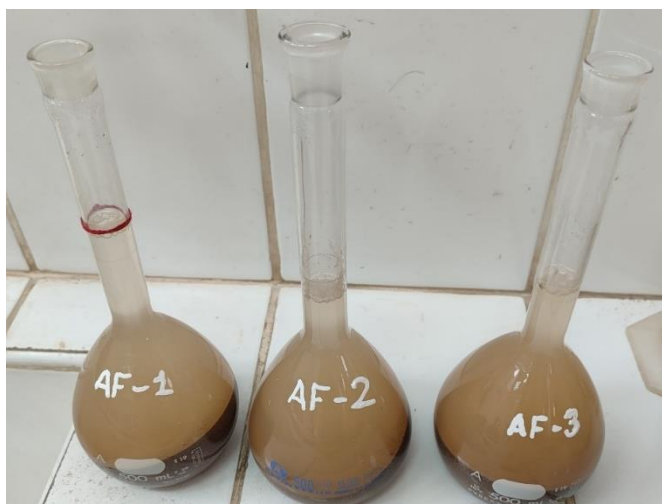
*P. Específico y Absorción del A.F. – Extracción de burbujas*



Luego de la eliminación de todas las burbujas de aire, el agua queda con muchos finos suspendidos como se observa en Figura 34, por lo que se ajustó la temperatura del picnómetro y su contenido a  $23\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$ , dejando reposar las muestras por 24 horas.

**Figura 34**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Reposo de 24 h*



Transcurrido este tiempo, se llevó el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad de calibración y se procedió a registrar sus pesos tal como se muestra en la Figura 35.

**Figura 35**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Peso sumergido*



Posteriormente, se retiró el agregado fino del picnómetro y se secó en el horno hasta alcanzar una masa constante, a una temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Luego, las muestras fueron enfriadas al aire a temperatura ambiente durante  $1,0\text{ h} \pm \frac{1}{2}\text{ h}$  y se determinó su masa como se muestra en la Figura 36.

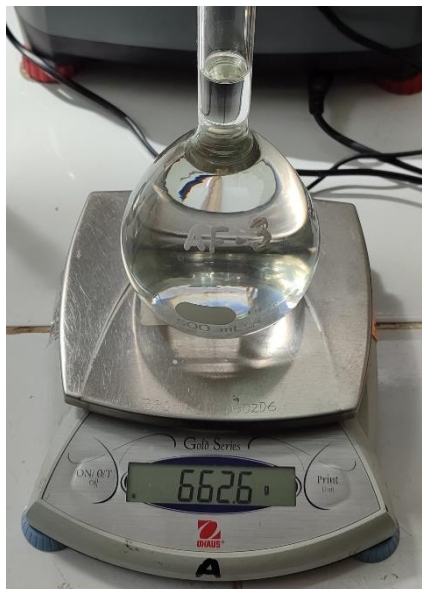
**Figura 36**

*P. Específico y Absorción del A.F. – Peso seco*



Finalmente, se determinó la masa del picnómetro lleno hasta su capacidad de calibración con agua a  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  como se muestra en la Figura 37. Una vez obtenidos todos los datos, se procedió al análisis en gabinete para la realización de los cálculos correspondientes.

**Figura 37**  
*P. Específico y Absorción del  
A.F. – Picnómetro con agua*



#### 4.2.1.5. Granulometría por tamizado – NTP 400.012 2021

Se realizó el muestreo de 1 kg de agregado fino, superando lo mínimo según la norma técnica. Para el caso de agregado grueso y reciclado, la norma nos indica una cantidad mínima según la Tabla 9.

**Tabla 9**  
*Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso*

Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas, mm (pulg)		Cantidad de la muestra de ensayos mínimo, kg (lb)	
mm	pulg	kg	lb
9,5	3/8	1	2
12,5	1/2	2	4
19,0	3/4	5	11
25,0	1	10	22

**Tabla 9** (continuación)

Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas, mm (pulg)		Cantidad de la muestra de ensayos mínimo, kg (lb)	
mm	pulg	kg	lb
37,5	1 1/2	15	33
50,0	2	20	44
63,0	2 1/2	35	77
75,0	3	60	130
90,0	3 1/2	100	220
100,0	4	150	330
125,0	5	300	660

*Nota.* Adaptado de la NTP 400.012 2021

Verificando nuestra muestra, indica un TMN de  $\frac{3}{4}$  " por lo tanto, nuestra muestra mínima es de 5 Kg.

Se seleccionaron tamices con tamaños adecuados para proporcionar según las especificaciones del material a ensayar, así mismo, los tamices fueron ensamblados en orden de abertura decreciente, desde la tapa hasta la base del conjunto como se muestra en la

Figura 38.

**Figura 38**  
Granulometría – Tamices en orden



La muestra fue colocada sobre el tamiz superior como se observa en la Figura 39 y dividida en tres porciones. Cada porción fue tamizada de manera individual, combinando posteriormente las masas retenidas en un tamiz especificado antes de calcular el porcentaje de la muestra retenida en cada tamiz.

**Figura 39**  
*Granulometría – vertimiento de la muestra*



Para garantizar un tamizado adecuado, se sostuvo firmemente cada tamiz con su tapa y fondo bien ajustados en una posición ligeramente inclinada como muestra la Figura 40. Luego, se golpeó el filo contra el talón de la otra mano a una velocidad aproximada de 150 golpes por minuto, girando el tamiz un sexto de vuelta por cada 25 golpes.

**Figura 40**  
*Granulometría – Tamizado manual*



Finalmente, se determinó la masa de cada fracción retenida utilizando una balanza como muestra la Figura 41 y se registraron los datos obtenidos para los cálculos respectivos.

**Figura 41**  
*Granulometría – Peso de cada retenido*



#### 4.2.2. Cálculos en gabinete y resultados

##### 4.2.2.1. Contenido de humedad del agregado fino y grueso por secado - NTP 339.185 2021

###### a. Ecuación

La ecuación 3 se emplea para calcular el contenido de humedad total evaporable, esta ecuación nos brinda la norma NTP 339.185 2021.

$$p = 100(W - D)/D \quad (3)$$

Donde:

$p$  = contenido total de humedad evaporable de la muestra, en porcentaje

$W$  = masa de la muestra húmeda original, en gramos

$D$  = masa de la muestra seca, en gramos

###### b. Resultados

La Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 10**  
*Contenido de Humedad - Resultado Ag. Fino*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado Fino		
			AF-01	AF-02	AF-03
Peso del Recipiente		gr.	297	275,9	243,2
Peso del recipiente + muestra húmeda		gr.	469	497	417
Peso del recipiente + muestra seca		gr.	467,7	494,6	415,1
Peso de muestra húmeda	W	gr.	172	221,1	173,8
Peso de muestra seca	D	gr.	170,7	218,7	171,9
Peso del Agua	W-D	gr.	1,3	2,4	1,9
Porcentaje de Humedad	(W-D)/D	%	0,80 %	1,10 %	1,10 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>1,00 %</b>	

**Tabla 11**  
*Contenido de Humedad – Resultado Ag. Grueso*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado Grueso		
			AG-01	AG-02	AG-03
Peso del Recipiente		gr.	132,3	133	225,3
Peso del recipiente + muestra húmeda		gr.	608,9	578,6	600,1
Peso del recipiente + muestra seca		gr.	607,2	576,9	598,4
Peso de muestra húmeda	W	gr.	476,6	445,6	374,8
Peso de muestra seca	D	gr.	474,9	443,9	373,1
Peso del Agua	W-D	gr.	1,7	1,7	1,7
Porcentaje de Humedad	(W-D)/D	%	0,40 %	0,40 %	0,50 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>0,40 %</b>	

**Tabla 12**  
*Contenido de Humedad – Resultado Ag. Reciclado*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado Reciclado		
			AR-01	AR-02	AR-03
Peso del Recipiente		gr.	247,8	292,7	179,2
Peso del recipiente + muestra húmeda		gr.	687,1	811,2	660,1
Peso del recipiente + muestra seca		gr.	677,7	798,9	648,8
Peso de muestra húmeda	W	gr.	439,3	518,5	480,9
Peso de muestra seca	D	gr.	429,9	506,2	469,6
Peso del Agua	W-D	gr.	9,4	12,3	11,3
Porcentaje de Humedad	(W-D)/D	%	2,20 %	2,40 %	2,40 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>2,30 %</b>	

#### 4.2.2.2. **Peso unitario en agregados – NTP 400.017 2020**

##### a. Ecuación

La ecuación 4 se emplea para calcular la densidad de masa por el procedimiento de apisonado, así como también para el procedimiento de peso suelto, esta ecuación nos brinda la norma NTP 400.017 2020.

$$M = (G - T)/V \quad (4)$$

Donde:

$M$  = Densidad de masa del agregado, kg/m<sup>3</sup>

$G$  = Masa del recipiente más la muestra, kg

$T$  = Masa del recipiente, kg

$V$  = Volumen del recipiente, m<sup>3</sup>

##### b. Resultados

La Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 13**  
*Peso Unitario – Resultado Ag. Fino*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado fino					
			Suelto			Compactado		
			AF-01	AF-02	AF-03	AF-01	AF-02	AF-03
Peso del Recipiente	T	kg	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	13,86	13,93	13,97	14,54	14,52	14,55
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	5,07	5,14	5,17	5,74	5,73	5,75
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 563	1 585	1 595	1 771	1 767	1 773
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>		<b>1 581</b>			<b>1 770</b>	

**Tabla 14**  
*Peso Unitario – Resultado Ag. Grueso*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado grueso					
			Suelto			Compactado		
			AG-01	AG-02	AG-03	AG-01	AG-02	AG-03
Peso del Recipiente	T	kg	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	13,2	13,05	13,23	13,56	13,59	13,53
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	4,41	4,25	4,44	4,77	4,79	4,74
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 358	1 312	1 369	1 470	1 478	1 461
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>		<b>1 346</b>			<b>1 470</b>	

**Tabla 15**  
*Peso Unitario – Resultado Ag. Reciclado*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado reciclado					
			Suelto			Compactado		
			AF-01	AF-02	AF-03	AF-01	AF-02	AF-03
Peso del Recipiente	T	kg	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79	8,79
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	12,59	12,62	12,57	13,08	13,09	13,02
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	3,8	3,83	3,77	4,29	4,3	4,22
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 172	1 181	1 163	1 321	1 326	1 302
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>		<b>1 172</b>			<b>1 317</b>	

#### 4.2.2.3. **Peso específico y absorción del agregado grueso – NTP 400.021 2020**

##### a. Ecuación

La ecuación 5 se emplea para calcular la densidad relativa (gravedad específica) en base al agregado saturado superficialmente seca, esta ecuación nos brinda la norma NTP 400.021 2020.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SSD)} = B/(B - C) \quad (5)$$

Donde:

$A$  = masa de la muestra secada al horno, gr

$B$  = masa de la muestra de ensayo saturada superficialmente seca al aire, gr

$C$  = masa aparente de la muestra de ensayo saturada, en agua, gr

Así mismo, La ecuación 6 se emplea para calcular el porcentaje de absorción, esta ecuación nos brinda la misma norma.

$$\text{Absorción, \%} = \left[ \frac{(B-A)}{A} \right] \times 100 \quad (6)$$

##### b. Resultados

La Tabla 16 y Tabla 17 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 16**

*Peso Específico y Absorción – Resultado Ag. Grueso*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado grueso		
			AG-01	AG-02	AG-03
Peso de la Tara		g	128	127	132
Peso de la Tara + Muestra Secada al Horno		g	660,3	655,5	679,7
Peso de la Tara + Muestra Saturada Superficialmente Seca		g	665	660	685
Peso de la Muestra Secada al Horno	A	g	532,3	528,5	547,7
Peso de la Muestra Saturada Superficialmente Seca	B	g	537	533	553
Peso de la Muestra Sumergida	C	g	331	331	344
Densidad relativa (gravedad específica) (SSD)	B/(B-C)	gr./cm <sup>3</sup>	2,61	2,64	2,65
<b>Promedio</b>		<b>gr./cm<sup>3</sup></b>		<b>2,63</b>	
Absorción	(B-A)/A	%	0,9 %	0,9 %	1,0 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>0,9 %</b>	

**Tabla 17**  
**Peso Específico y Absorción – Resultado Ag. Reciclado**

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado grueso		
			AG-01	AG-02	AG-03
Peso de la Tara		gr	130	130	132
Peso de la Tara + Muestra Secada al Horno		gr	625	648,8	653,6
Peso de la Tara + Muestra Saturada Superficialmente Seca		gr	654	678	683
Peso de la Muestra Secada al Horno	A	gr	495	518,8	521,6
Peso de la Muestra Saturada Superficialmente Seca	B	gr	524	548	551
Peso de la Muestra Sumergida	C	gr	306	321	322
Densidad relativa (gravedad específica) (SSD)	B/(B-C)	gr./cm <sup>3</sup>	2,4	2,41	2,41
<b>Promedio</b>		<b>gr./cm<sup>3</sup></b>		<b>2,41</b>	
Absorción	(B-A)/A	%	5,9 %	5,6 %	5,6 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>5,7 %</b>	

#### 4.2.2.4. Peso específico y absorción del agregado fino – NTP 400.022 2021

##### a. Ecuación

La ecuación 7 se emplea para calcular la densidad relativa (gravedad específica) en base al agregado saturado superficialmente seca, esta ecuación nos brinda la norma NTP 400.022 2020.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)} = S / (B + S - C) \quad (7)$$

Donde:

*A* = masa de la muestra secada al horno, gr

*B* = masa del picnómetro llenado de agua hasta la marca de calibración, gr

*C* = masa del picnómetro llenado de muestra y agua hasta la marca de calibración, gr

*S* = masa de la muestra saturada superficialmente seca, gr

Así mismo, La ecuación 8 se emplea para calcular el porcentaje de absorción, esta ecuación nos brinda la misma norma.

$$\text{Absorción, \%} = \left[ \frac{(S-A)}{A} \right] \times 100 \quad (8)$$

## b. Resultados

La Tabla 18 fue extraído de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 18**  
*Peso Específico y Absorción – Resultado Ag. Fino*

Descripción	Fórmula	Unidad	Agregado fino		
			AF-01	AF-02	AF-03
Peso de la Tara		g	128,3	126,2	131,5
Peso de la Tara + Muestra SSS		g	483,4	482,5	485,4
Peso de la Tara + Muestra Seca al Horno		g	481,3	480,5	483,3
Peso de la Muestra Seca al Horno	A	g	353,0	354,3	351,8
Peso del Picnómetro con de agua	B	g	662,5	681,2	662,6
Peso del Picnómetro con agua y muestra	C	g	886,1	905,4	885,5
Peso de la Muestra SSS	S	g	355,1	356,3	353,9
Densidad relativa (gravedad específica) (SSD)	$S/(B+S-C)$	gr./cm <sup>3</sup>	2,7	2,7	2,7
<b>Promedio</b>		<b>gr./cm<sup>3</sup></b>		<b>2,7</b>	
Absorción	$(S-A)/A$	%	0,6 %	0,6 %	0,6 %
<b>Promedio</b>		<b>%</b>		<b>0,6 %</b>	

### 4.2.2.5. Granulometría por tamizado– NTP 400.012 2021

#### a. Definiciones

- *Huso granulométrico*: Son los límites mínimos y máximos de la gradación de cada agregado que debe cumplirse para elaborar concreto, estos husos fueron extraídos de la NTP 400.037 2021.
- *Tamaño Máximo*: es el correspondiente al menor tamiz por el que pasa toda la muestra de agregado grueso
- *Tamaño Máximo Nominal*: Es el que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido entre 5 % y el 15 %
- *Módulo de Fineza*: Se calcula tras sumar el porcentaje acumulado retenido de agregado de cada uno de los siguientes tamices (porcentaje acumulado retenido) y dividir la suma entre 100: 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); 9,5 mm (3/8 pulg); 19,0 mm (3/4 pulg); 37,5 mm (1 1/2 pulg) y mayores; incrementando en la relación 2 a 1.

## b. Resultados

### La Tabla 19, Tabla 20 y

Tabla 21, así como la Figura 42,

Figura 43 y Figura 44 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

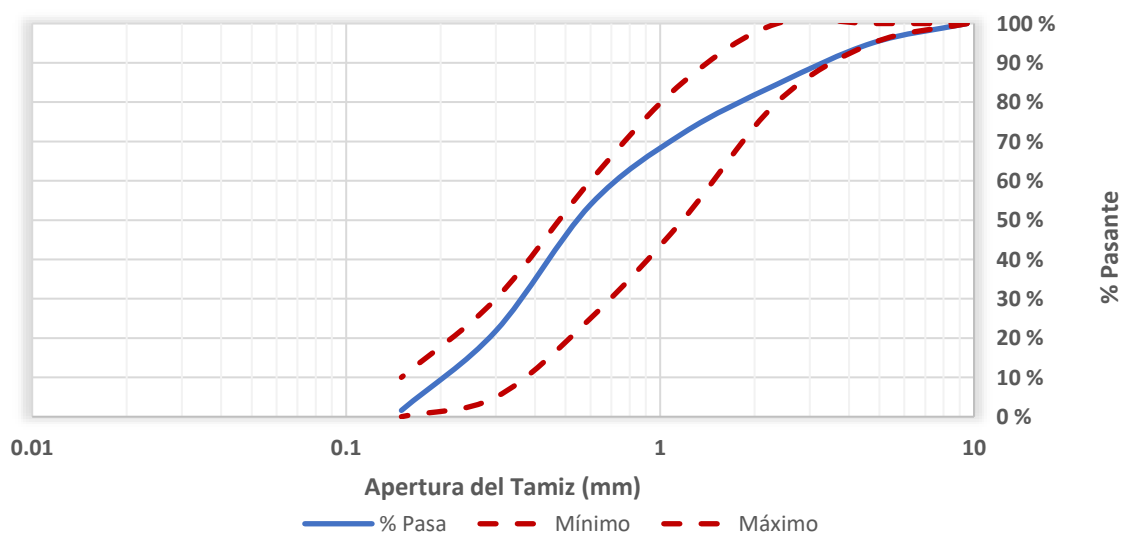
**Tabla 19**

*Granulometría – Resultado Ag. Fino*

Tamiz		Peso retenido (gr.)	% Retenido		% Pasa	Gradación		
N°	mm		Parcial	Acumulado		Mínimo	Máximo	
3/8 "	9,5	0	0 %	0 %	100 %	100 %	100 %	
N° 4	4,75	35,4	5 %	5 %	95 %	95 %	100 %	
N° 8	2,36	75,3	11 %	15 %	85 %	80 %	100 %	
N° 16	1,18	89,8	13 %	28 %	72 %	50 %	85 %	
N° 30	0,6	130	18 %	46 %	54 %	25 %	60 %	
N° 50	0,3	230	32 %	78 %	22 %	5 %	30 %	
N° 100	0,15	145,2	20 %	98 %	2 %	0 %	10 %	
Fondo		11,4	2 %	100 %	0 %			
<b>Peso total:</b>		<b>717,1 gr.</b>	<b>Módulo de fineza:</b>	<b>2,71 %</b>	<b>T. Máximo:</b>	<b>3/8 "</b>	<b>T. Máximo nominal:</b>	<b>N° 8</b>

**Figura 42**

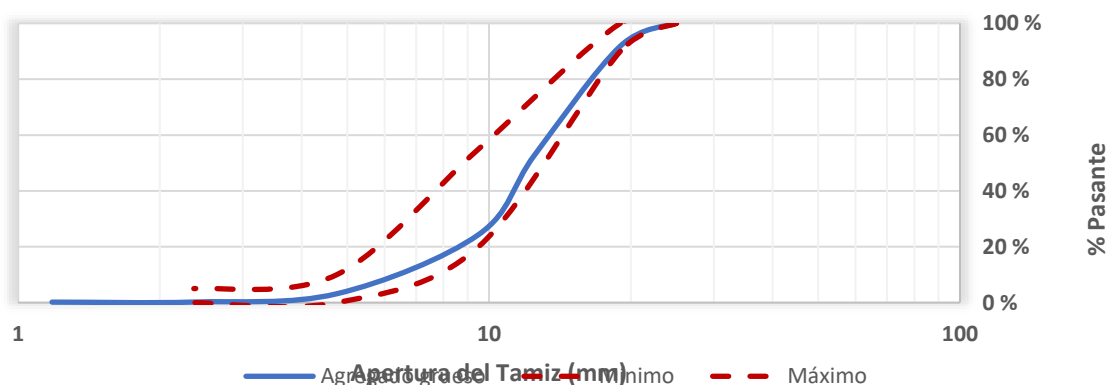
*Curva Granulométrica – Resultado Ag. Fino*



**Tabla 20**  
Granulometría – Resultado Ag. Grueso

Tamiz		Peso retenido (gr.)	% retenido		% Pasa	Gradación		Huso 67
N°	mm		Parcial	Acumulado		Mínimo	Máximo	
1 ½ "	37,5							
1 "	25	0	0 %	0 %	100 %	100 %		100 %
¾ "	19	444,4	8 %	8 %	92 %	90 %		100 %
½ "	12,5	2 122,3	39 %	47 %	53 %			
3/8 "	9,5	1 556,5	29 %	76 %	24 %	20 %		5 %
N° 4	4,75	1 154,4	21 %	97 %	3 %	0 %		10 %
N° 8	2,36	161,7	3 %	100 %	0 %	0 %		5 %
N° 16	1,18	1,4	0 %	100 %	0 %			
FONDO		9,5	0 %	100 %	0 %			
<b>Peso total:</b>		<b>5 450,2 gr</b>	<b>Módulo de fineza:</b>	<b>4,27 %</b>	<b>T. Máximo:</b>	<b>1 "</b>	<b>T. Máximo nominal:</b>	<b>¾ "</b>

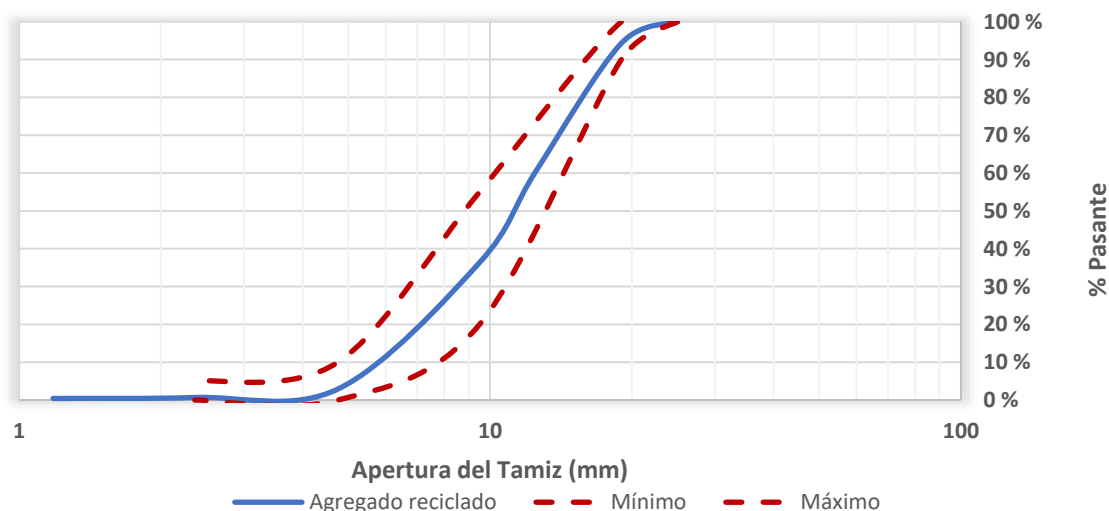
**Figura 43**  
Curva Granulométrica – Resultado Ag. Grueso



**Tabla 21**  
Granulometría – Resultado Ag. Reciclado

Tamiz		Peso retenido (gr.)	% retenido		% Pasa	Gradación		Huso 67
N°	mm		Parcial	Acumulado		Mínimo	Máximo	
1 ½ "	37,5							
1 "	25	0	0 %	0 %	100 %	100 %		100 %
¾ "	19	291,5	6 %	6 %	94 %	90 %		100 %
½ "	12,5	1 733,2	34 %	40 %	60 %			
3/8 "	9,5	1 230,3	24 %	64 %	36 %	20 %		55 %
N° 4	4,75	1 710,6	33 %	97 %	3 %	0 %		10 %
N° 8	2,36	113,1	2 %	99 %	1 %	0 %		5 %
N° 16	1,18	13,4	0 %	100 %	0 %			
Fondo		21,4	0 %	100 %	0 %			
<b>Peso total:</b>		<b>5 113,5 gr</b>	<b>Módulo de fineza:</b>	<b>4,05 %</b>	<b>T. Máximo:</b>	<b>1 "</b>	<b>T. Máximo nominal:</b>	<b>¾ "</b>

**Figura 44**  
Curva Granulométrica – Resultado Ag. Reciclado



### 4.3. Diseño de mezcla

#### 4.3.1. Proporcionamiento del agregado reciclado

Una vez concluidos los ensayos para los agregados, se obtuvieron los datos necesarios para iniciar el diseño de mezclas. A continuación, se presentó la Tabla 22, la cual muestra un resumen con los resultados obtenidos en los ensayos.

**Tabla 22**  
Resumen de los ensayos para agregados

Tipo de agregado	Contenido de humedad (%)	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )		Peso específico y absorción		Granulometría		
		Suelto	Compactado	P.E. (gr./cm <sup>3</sup> )	Absorción	M.F.	T.M.	T.M.N.
Agregado fino	1,00 %	1 581	1 770	2,70	0,60 %	2,71%	3/8 "	Nº 8
Agregado grueso	0,40 %	1 346	1 470	2,63	0,90 %	4,27%	1 "	¾ "
Agregado reciclado	2,30 %	1 172	1 317	2,41	5,70 %	4,05%	1 "	¾ "

Se elaboraron cinco diseños de mezcla siguiendo el método ACI. Uno de estos diseños correspondió a una resistencia de  $f_c = 175 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que los cuatro restantes consideraron el reemplazo parcial del agregado grueso con agregado reciclado en proporciones del 20 %, 30 %, 40 % y 50 %.

Para la realización de los ensayos según el método ACI, fue necesario determinar las propiedades del nuevo agregado resultante de la sustitución parcial del agregado grueso por agregado reciclado. Para ello, se aplicó un criterio en el que las propiedades fueron establecidas en función del porcentaje de reemplazo. Por ejemplo, para un reemplazo del 20 % por agregado Reciclado:

$$\text{Propiedad}(X \%A.R.) = [(100 - X) \% \times A.G] + (X \% \times A.R) \quad (9)$$

- *Contenido de Humedad*

$$\text{Humedad}(20 \%A.R.) = 80 \% (A.G) + 20 \% (A.R)$$

$$\text{Humedad}(20 \%A.R.) = \frac{80 \times 0,4 \%}{100} + \frac{20 \times 2,3 \%}{100}$$

$$\text{Humedad} (20 \%A.R.) = 0,8 \%$$

- *Peso Unitario Suelto*

$$P.U.\text{suelto} (20 \%A.R.) = 80 \% (A.G) + 20 \% (A.R)$$

$$P.U.\text{suelto} (20 \%A.R.) = \frac{80 \times 1\,346}{100} + \frac{20 \times 1\,172}{100}$$

$$P.U.\text{suelto} (20 \%A.R.) = 1\,311 \text{ Kg/cm}^3$$

- *Peso Unitario Compactado*

$$P.U.\text{compactado} (20 \%A.R.) = 80 \% (A.G) + 20 \% (A.R)$$

$$P.U.\text{compactado} (20 \%A.R.) = \frac{80 \times 1\,470}{100} + \frac{20 \times 1\,317}{100}$$

$$P.U.\text{compactado} (20 \%A.R.) = 1\,439 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Peso específico*

$$\text{Peso específico} (20 \%A.R.) = 80 \% (A.G) + 20 \% (A.R)$$

$$\text{Peso específico} (20 \%A.R.) = \frac{80 \times 2,63}{100} + \frac{20 \times 2,41}{100}$$

$$\text{Peso específico} (20 \%A.R.) = 2,59 \text{ gr/cm}^3$$

- *Absorción*

$$\text{Absorción} (20 \%A.R.) = 80 \% (A.G) + 20 \% (A.R)$$

$$\text{Absorción} (20 \%A.R.) = \frac{80 \times 0,9 \%}{100} + \frac{20 \times 5,7 \%}{100}$$

$$\text{Absorción} (20 \%A.R.) = 1,9 \%$$

- *Módulo de Fineza*

$$M.F. (20 \%A.R.) = 80 \%(A.G) + 20 \%(A.R)$$

$$M.F. (20 \%A.R.) = \frac{80 \times 4,27 \%}{100} + \frac{20 \times 4,05 \%}{100}$$

$$M.F. (20 \%A.R.) = 4,23 \%$$

- *Tamaño Máximo*

Se utilizará el mayor de ambos, para este caso:

$$T.M. (A.G) = T.M. (A.R)$$

$$\therefore T.M. (20 \%A.R.) = 1 \text{ ''}$$

- *Tamaño Máximo Nominal*

Se utilizará el mayor de ambos, para este caso:

$$T.M.N. (A.G) = T.M. (A.R)$$

$$\therefore T.M.N. (20 \%A.R.) = 3/4 \text{ ''}$$

Este proporcionamiento se realizó para los 4 reemplazos parciales del agregado reciclado, los resultados obtenidos se muestran en Tabla 23, Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26 obteniendo los datos necesarios para realizar la dosificación por el método ACI.

**Tabla 23**

*Propiedades al 20 % de Agregado Reciclado*

Tipo de agregado	Contenido de humedad (%)	Peso unitario (kg/m³)		Peso específico y absorción		Granulometría		
		Suelto	Compactado	P.e. (gr./cm³)	Absorción	M.f.	T.m.	T.m.n.
Agregado fino	1,00 %	1 581	1 770	2,70	0,60 %	2,71 %	3/8 ''	N° 8
80 % a.g. + 20 % a.r.	0,80 %	1 311	1 439	2,59	1,90 %	4,23 %	1 ''	¾ ''

**Tabla 24**

*Propiedades al 30 % de Agregado Reciclado*

Tipo de agregado	Contenido de humedad (%)	Peso unitario (kg/m³)		Peso específico y absorción		Granulometría		
		Suelto	Compactado	P.e. (gr./cm³)	Absorción	M.f.	T.m.	T.m.n.
Agregado fino	1,00 %	1 581	1 770	2,70	0,60 %	2,71 %	3/8 ''	N° 8
70 % a.g. + 30 % a.r.	1,00 %	1 294	1 424	2,56	2,30 %	4,21 %	1 ''	¾ ''

**Tabla 25**  
*Propiedades al 40 % de Agregado Reciclado*

Tipo de agregado	Contenido de humedad (%)	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )		Peso específico y absorción		Granulometría		
		Suelto	Compactado	P.e. (gr./cm <sup>3</sup> )	Absorción	M.f.	T.m.	T.m.n.
Agregado fino	1,00 %	1 581	1 770	2,7	0,60 %	2,71 %	3/8 "	N° 8
60%a.g. + 40%a.r.	1,20 %	1 276	1 408	2,54	2,80 %	4,18 %	1 "	¾ "

**Tabla 26**  
*Propiedades al 50 % de Agregado Reciclado*

Tipo de agregado	Contenido de humedad (%)	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )		Peso específico y absorción		Granulometría		
		Suelto	Compactado	P.e. (gr./cm <sup>3</sup> )	Absorción	M.f.	T.m.	T.m.n.
Agregado fino	1,00 %	1 581	1 770	2,70	0,60 %	2.71 %	3/8 "	N° 8
50 % a.g. + 50 % a.r.	1,40 %	1 259	1 393	2,52	3,30 %	4.16 %	1 "	¾ "

Para sustentar técnicamente este criterio, se consultó la opinión de ingenieros especialistas, quienes emitieron una evaluación favorable. Además, se llevó a cabo un ensayo de mayor impacto en el diseño de mezclas con el propósito de comprobar la fiabilidad de las proporciones empleadas. En este sentido, se procedió a realizar el ensayo de peso unitario suelto y varillado para los niveles de reemplazo del 20 %, 30 %, 40 % y 50 %.

#### 4.3.1.1. Ensayo de Peso Unitario con reemplazo de Agregado Reciclado

- Se tomaron muestras de 16 kg para su uso en el diseño, procediendo a su distribución según las proporciones establecidas en la Tabla 27.

**Tabla 27**  
*Proporción en peso del agregado reciclado*

Combinado	Agregado grueso	Agregado reciclado	Total
20 %	12,80 kg	3,20 kg	16,00 kg
30 %	11,20 kg	4,80 kg	16,00 kg
40 %	9,60 kg	6,40 kg	16,00 kg
50 %	8,00 kg	8,00 kg	16,00 kg

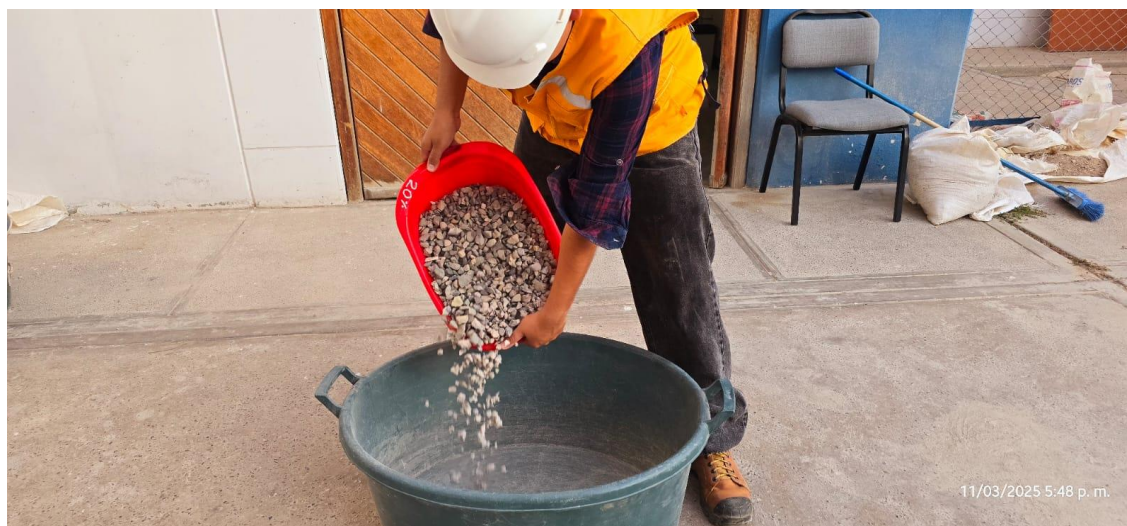
Posteriormente, se realizó el pesaje, considerando en primer lugar el peso del recipiente vacío y, a continuación, adicionando los agregados en las proporciones correspondientes tal como muestran los valores en la Tabla 28.

**Tabla 28**  
*Proporción de las muestras para diseño*

Descripción	Unidades	Muestras combinadas				
		No alterada	20 %	30 %	40 %	50 %
Peso del recipiente	g	381	378	378	377	378
Peso del a.g.	g	16,000	12,800	11,200	9,600	8,000
Peso del a.r.	g	0	3,200	4,800	6,400	8,000
Peso del recipiente + a.g.	g	16,381	13,178	11,578	9,977	8,378
Peso del recipiente + a.g. + a.r.	g	16,381	16,378	16,378	16,377	16,378

- Para garantizar una mezcla homogénea, las muestras fueron vertidas en un recipiente de mayor capacidad como se ve en la Figura 45.

**Figura 45**  
*Vertimiento de las mezclas de A.G. y A.R. en un recipiente*



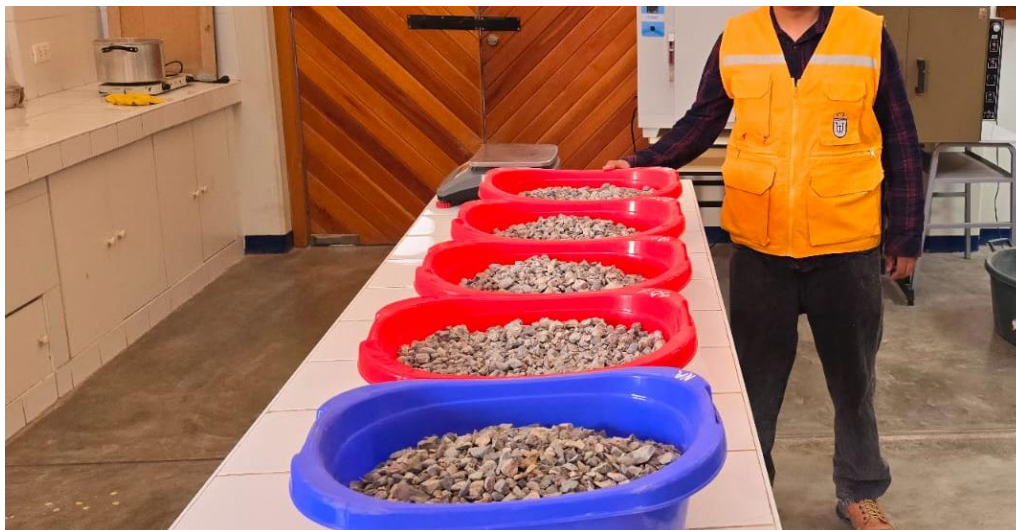
La mezcla fue batida durante 5 minutos con movimientos circulares como en la Figura 46, permitiendo la integración uniforme de los agregados.

**Figura 46**  
*Proceso de batido manual del A.G. y A.R.*



Una vez homogeneizadas las muestras, las separamos y etiquetamos correspondientemente como se visualiza en la Figura 47, posteriormente se dio inicio al ensayo de peso unitario conforme a lo indicado en la norma NTP 400.017:2020.

**Figura 47**  
*Muestras homogéneas con reemplazo parcial de A.R.*



Previamente, se realizó el muestreo de los agregados según lo estipulado en la norma, y se verificó que el laboratorio contara con un recipiente calibrado. Se seleccionó

el procedimiento de densidad de masa suelta y, posteriormente, el procedimiento por apisonado, utilizando tres muestras para cada caso.

Para las muestras sometidas al procedimiento de peso suelto, el recipiente fue llenado hasta el reboce con la ayuda de una pala, asegurando que el agregado se descargara desde una altura no mayor a 50 mm sobre el borde superior del recipiente como muestra la Figura 48.

**Figura 48**

*P.U. proporciones – Vertimiento del agregado en el molde*



La superficie del agregado fue nivelada utilizando una regla metálica que se ve en la Figura 49, de manera que las partículas de mayor tamaño equilibraran los vacíos presentes en la parte superior del recipiente.

**Figura 49**

*P.U. proporciones – Nivelación de superficie del agregado*



Con el uso de una brocha, se eliminaron los excesos de material que pudieron haberse esparcido durante el vertido del agregado o el proceso de nivelación como se observa en la Figura 50.

**Figura 50**

*P.U. proporciones – Limpieza de material excedente*



Se determinó la masa del recipiente con su contenido y la masa del recipiente vacío, registrando los valores con una precisión de 0,05 kg como en la Figura 51 y Figura 52.

**Figura 51**

*P.U. proporciones – Masa de recipiente más muestra*



**Figura 52**  
*P.U. proporciones – Masa de recipiente*



En el caso del procedimiento por apisonado, se repitió el mismo procedimiento, con la diferencia de que el llenado se realizó en tres capas, compactando cada una con 25 golpes de una varilla lisa tal como se observa en la Figura 53. Finalmente, se niveló la muestra con una regla y se registraron los pesos. Una vez obtenidos todos los datos, se procedió al análisis en gabinete para la realización de los cálculos correspondientes.

**Figura 53**  
*P.U. proporciones – Apisonado por capas del agregado*



Finalmente, se registraron los pesos obtenidos para cada una de las proporciones analizadas para su posterior cálculo. A continuación, la Tabla 29, Tabla 30,

Tabla 31 y Tabla 32 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 29**  
Peso Unitario – Resultado 80 % AG + 20 % AR

Descripción	Fórmula	Unidad	80 % A.G. + 20 % A.R.					
			Suelto			Compactado		
			20 % - 01	20 % - 02	20 % - 03	20 % - 01	20 % - 02	20 % - 03
Peso del Recipiente	T	Kg	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	Kg	12,41	12,35	12,37	12,77	12,81	12,78
Peso de muestra seca neta	G-T	Kg	4,29	4,22	4,24	4,64	4,69	4,65
Peso Unitario	(G-T)/V	Kg/m <sup>3</sup>	1 321,48	1 302,36	1 308,22	1 431,55	1 445,12	1 434,33
<b>Promedio</b>		<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1 310,69</b>			<b>1 437,00</b>		

**Tabla 30**  
Peso Unitario – Resultado 70 % AG + 30 % AR

Descripción	Fórmula	Unidad	70 % A.G. + 30 % A.R.					
			Suelto			Compactado		
			30 % - 01	30 % - 02	30 % - 03	30 % - 01	30 % - 02	30 % - 03
Peso del Recipiente	T	kg	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	12,34	12,34	12,32	12,75	12,71	12,73
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	4,22	4,21	4,19	4,62	4,59	4,61
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 300,51	1 298,36	1 292,19	1 425,69	1 415,21	1 420,76
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1 297,02</b>			<b>1 420,56</b>		

**Tabla 31**  
Peso Unitario – Resultado 60 % AG + 40 % AR

Descripción	Fórmula	Unidad	60 % A.G. + 40 % A.R.					
			Suelto			Compactado		
			40 % - 01	40 % - 02	40 % - 03	40 % - 01	40 % - 02	40 % - 03
Peso del Recipiente	T	kg	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	12,26	12,28	12,25	12,72	12,69	12,66
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	4,13	4,16	4,13	4,59	4,57	4,54
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 273,69	1 281,71	1 273,07	1 415,83	1 407,81	1 399,18
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1 276,16</b>			<b>1 407,61</b>		

**Tabla 32**  
Peso Unitario – Resultado 50 % AG + 50 % AR

Descripción	Fórmula	Unidad	50 % A.G. + 50 % A.R.					
			Suelto			Compactado		
			50 % - 01	50 % - 02	50 % - 03	50 % - 01	50 % - 02	50 % - 03
Peso del Recipiente	T	kg	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12
Volumen del Recipiente	V	m <sup>3</sup>	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
Peso del recipiente + muestra seca	G	kg	12,21	12,2	12,18	12,66	12,63	12,64
Peso de muestra seca neta	G-T	kg	4,09	4,07	4,06	4,53	4,51	4,52
Peso Unitario	(G-T)/V	kg/m <sup>3</sup>	1 260,74	1 255,81	1 251,8	1 397,33	1 389,93	1 393,32
<b>Promedio</b>		<b>kg/m<sup>3</sup></b>		<b>1 256,12</b>			<b>1 393,53</b>	

Comparamos estos resultados con los obtenidos a través del criterio empleado inicialmente y comparamos los resultados.

Tras verificar los resultados obtenidos, en la Tabla 33 se puede demostrar que el criterio de proporcionamiento empleado es aceptado debido al pequeño margen de error que se obtuvo con ensayos reales, por lo tanto, procedemos a realizar los diseños de mezclas.

**Tabla 33**  
Porcentaje de error

Descripción	Unidad	Peso unitario							
		Suelto				Varillado			
		20 %	30 %	40 %	50 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Dato ensayado	Kg/m <sup>3</sup>	1 311	1 297	1 276	1 256	1 437	1 421	1 408	1 394
Dato teórico	Kg/m <sup>3</sup>	1 311	1 294	1 276	1 259	1 439	1 424	1 408	1 393
Diferencia	Kg/m <sup>3</sup>	0,6166	3,1346	0,3083	2,9291	2,0555	3,1860	0,8222	0,4111
<b>Error</b>	<b>%</b>	<b>0,05 %</b>	<b>0,24 %</b>	<b>0,02 %</b>	<b>0,23 %</b>	<b>0,14 %</b>	<b>0,22 %</b>	<b>0,06 %</b>	<b>0,03 %</b>

#### 4.3.2. Diseño de Mezcla por el Método ACI

Se establece la relación de materiales que se usará en el diseño de mezcla estándar y con agregados reciclado en 20 %, 30 %, 40 % y 50 %.

En la investigación de este proyecto se utilizó la referencia de ACI PRC-211.1 (Proporcionamiento de mezclas), este contiene un método de diseño de mezcla con consideraciones técnicas.

Los informes de cálculo de los distintos diseños de mezclas se encuentran en la Tabla 34 para el diseño estándar y en la Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37 y

Tabla 38 para los reemplazos correspondientes, a continuación, se muestran los resultados:

**Tabla 34**

*Diseño de Mezcla  $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$  – Estándar (1 m<sup>3</sup>)*

<b>Materiales</b>	<b>Peso</b>	<b>Dosificación</b>
Agregado grueso:	928,13 kg	0,35 m <sup>3</sup>
Agregado fino:	836,94 kg	0,31 m <sup>3</sup>
Cemento:	326,43 kg	7,68 bls
Agua:	206,29 lt	0,21 m <sup>3</sup>

**Tabla 35**

*Diseño de Mezcla  $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$  - 80 %  
AG + 20 % AR (1 m<sup>3</sup>)*

<b>Materiales</b>	<b>Peso</b>	<b>Dosificación</b>
Agregado grueso:	912,30 kg	0,35 m <sup>3</sup>
Agregado fino:	840,76 kg	0,31 m <sup>3</sup>
Cemento:	326,43 kg	7,68 bls
Agua:	211,44 lt	0,21 m <sup>3</sup>

**Tabla 36**

*Diseño de Mezcla  $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$  - 70 %  
AG + 30 % AR (1 m<sup>3</sup>)*

<b>Materiales</b>	<b>Peso</b>	<b>Dosificación</b>
Agregado grueso:	904,33 kg	0,35 m <sup>3</sup>
Agregado fino:	842,73 kg	0,31 m <sup>3</sup>
Cemento:	326,43 kg	7,68 bls
Agua:	213,94 lt	0,21 m <sup>3</sup>

**Tabla 37**

*Diseño de Mezcla  $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$  - 60 %  
AG + 40 % AR (1 m<sup>3</sup>)*

<b>Materiales</b>	<b>Peso</b>	<b>Dosificación</b>
Agregado grueso:	896,32 kg	0,35 m <sup>3</sup>
Agregado fino:	844,72 kg	0,31 m <sup>3</sup>
Cemento:	326,43 kg	7,68 bls

Agua:	216,40 lt	0,22 m <sup>3</sup>
-------	-----------	---------------------

**Tabla 38**

*Diseño de Mezcla  $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2 - 50 \% \text{ AG} + 50 \% \text{ AR}$  ( $1 \text{ m}^3$ )*

<b>Materiales</b>	<b>Peso</b>	<b>Dosificación</b>
Agregado Grueso:	888,28 Kg	0,35 m <sup>3</sup>
Agregado Fino:	846,75 Kg	0,31 m <sup>3</sup>
Cemento:	326,43 Kg	7,68 bls
Agua:	218,81 Lt	0,22 m <sup>3</sup>

#### 4.4. Elaboración y curado del concreto en laboratorio

Para garantizar el correcto procedimiento en la elaboración y curado del concreto en el laboratorio, se siguió la norma peruana NTP 339.183 "Concreto. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio". El proceso se llevó a cabo de la siguiente manera:

Se prepararon en recipientes los materiales necesarios en las proporciones y pesos establecidos como se observa en la Figura 54 según el diseño de mezclas correspondiente.

**Figura 54**

*Elaboración y Curado del concreto – Proporciones de los materiales*



Se optó por un mezclado mecánico, empleando un tambor, el cual fue humedecido previamente para evitar la pérdida de agua en la mezcla, tal como se observa en la Figura 55.

**Figura 55**  
*Elaboración y Curado del concreto –  
Humedecimiento de los equipos*



Se añadió el agregado grueso junto con una parte del agua de la mezcla como observamos en la Figura 56. Posteriormente, se puso en funcionamiento el tambor y se incorporaron progresivamente el agregado fino, el agua restante y el cemento, garantizando la adecuada integración de todos los materiales.

**Figura 56**  
*Elaboración y Curado del concreto – Se introducen los  
materiales*



Una vez incorporados todos los componentes en la mezcladora, el concreto fue mezclado durante 3 minutos, seguido de un reposo de 3 minutos y una última fase de mezclado de 2 minutos, asegurando así una mezcla homogénea.

Como se observa en la Figura 57, se prepararon previamente los moldes, aplicando con la ayuda de una brocha, un agente desmoldante, en este caso, petróleo.

**Figura 57**

*Elaboración y Curado del concreto – Preparación de los moldes*



Como se muestra en la

Figura 58, elaborado el concreto, los especímenes fueron moldeados en el mismo lugar donde permanecerían almacenados durante 24 horas, utilizando un cucharón para el llenado de los moldes.

**Figura 58**

*Elaboración y Curado del concreto – Llenado de los moldes*



El método de consolidación empleado correspondió a lo establecido en la normativa, realizándose el varillado en tres capas de igual profundidad, aplicando 25 golpes con una varilla de 16 mm de diámetro.

Finalizado el proceso de moldeado, se llevó a cabo la etapa de curado. Transcurridas 24 horas  $\pm$  8 horas desde el vaciado, los especímenes fueron desmoldados con mucho cuidado como vemos en la Figura 59.

**Figura 59**

*Elaboración y Curado del concreto – Desmoldado a las 24h*



Finalmente, los especímenes fueron trasladados a un tanque de almacenamiento de agua como en la Figura 60, conforme a los requerimientos de la norma NTP 334.077.

**Figura 60**

*Elaboración y Curado del concreto – Curado de los especímenes*



#### 4.5. Rotura de probetas de concreto en laboratorio

Los especímenes fueron ensayados a las edades de 7 y 28 días, conforme a lo establecido en la norma NTP 339.034, la cual recomienda el ensayo de tres especímenes por cada edad. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

En la fecha programada para la rotura, se retiraron las muestras del tanque de agua y se secaron con un paño, asegurando que el ensayo se realizara con los especímenes en estado húmedo.

Antes de proceder con la rotura, se registraron las dimensiones de cada espécimen según lo especificado en la normativa, tomando dos medidas del diámetro y tres de la longitud como observamos en la

Figura 61.

#### **Figura 61**

*Rotura de Probetas – Medidas de los especímenes a ensayar*



Posteriormente, como observamos en la Figura 62, se determinó el peso de cada muestra, permitiendo así el cálculo de su densidad.

#### **Figura 62**

*Rotura de Probetas – Peso de los especímenes*



Como siguiente paso, observamos en la Figura 63, que se colocó el bloque de rotura inferior sobre la mesa de ensayo, con la cara endurecida orientada hacia arriba. Se limpiaron las superficies de contacto de los bloques superior e inferior y se verificó que el espécimen estuviera alineado con el centro de empuje del bloque de apoyo superior.

### **Figura 63**

*Rotura de Probetas – Colocación de los bloques de rotura*



Con la asistencia del técnico de laboratorio, se aplicó la carga de manera continua y sin impactos. Luego, se registró la fuerza aplicada hasta la rotura del espécimen.

Finalmente, se retiró el espécimen y se identificó el tipo de rotura conforme a lo establecido en la norma técnica.

La Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43 fueron extraídos de los resultados certificados, entregados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la UPT.

**Tabla 39**  
*Rotura de Briquetas – Estándar 175 Kg/cm<sup>2</sup>*

N°	Especímen	Fecha de moldeado	Fecha de rotura	Edad días	Área cm <sup>2</sup>	Lectura kn	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia %	Tipo de fractura
1	N.a. - 01	12/03/25	19/03/25	7	176,71	255,30	147,3	84,18 %	4
2	N.a. - 02	12/03/25	19/03/25	7	176,71	251,95	145,4	83,08 %	4
3	N.a. - 03	12/03/25	19/03/25	7	176,71	263,10	151,8	86,75 %	1
4	N.a. - 04	12/03/25	09/04/25	28	176,71	372,45	214,9	122,81 %	3
5	N.a. - 05	12/03/25	09/04/25	28	176,71	373,40	215,5	123,12 %	2
6	N.a. - 06	12/03/25	09/04/25	28	176,71	369,90	213,4	121,97 %	2

**Tabla 40**  
*Rotura de Briquetas – 175 Kg/cm<sup>2</sup> con 20 % de Agregado Reciclado*

N°	Especímen	Fecha de moldeado	Fecha de rotura	Edad días	Área cm <sup>2</sup>	Lectura kn	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia %	Tipo de fractura
1	20 % - 01	12/03/25	19/03/25	7	176,71	247,10	142,6	81,48 %	4
2	20 % - 02	12/03/25	19/03/25	7	176,71	240,35	138,7	79,25 %	5
3	20 % - 03	12/03/25	19/03/25	7	176,71	242,80	140,1	80,06 %	4
4	20 % - 04	12/03/25	09/04/25	28	176,71	358,70	207,0	118,28 %	2
5	20 % - 05	12/03/25	09/04/25	28	176,71	356,95	206,0	117,70 %	3
6	20 % - 06	12/03/25	09/04/25	28	176,71	358,15	206,7	118,09 %	2

**Tabla 41**  
*Rotura de Briquetas – 175 Kg/cm<sup>2</sup> con 30 % de Agregado Reciclado*

N°	Especímen	Fecha de moldeado	Fecha de rotura	Edad días	Área cm <sup>2</sup>	Lectura kn	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia %	Tipo de fractura
1	30 % - 01	12/03/25	19/03/25	7	176,71	238,15	137,4	78,53 %	5
2	30 % - 02	12/03/25	19/03/25	7	176,71	236,25	136,3	77,90 %	4
3	30 % - 03	12/03/25	19/03/25	7	176,71	234,75	135,5	77,40 %	4
4	30 % - 04	12/03/25	09/04/25	28	176,71	330,80	190,9	109,08 %	5
5	30 % - 05	12/03/25	09/04/25	28	176,71	327,65	189,1	108,04 %	2
6	30 % - 06	12/03/25	09/04/25	28	176,71	332,65	191,9	109,69 %	2

**Tabla 42***Rotura de Briquetas – 175 Kg/cm<sup>2</sup> con 40 % de Agregado Reciclado*

N°	Especímen	Fecha de moldeado	Fecha de rotura	Edad días	Área cm <sup>2</sup>	Lectura kn	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia %	Tipo de fractura
1	40 % - 01	12/03/25	19/03/25	7	176,71	219,50	126,7	72,38 %	2
2	40 % - 02	12/03/25	19/03/25	7	176,71	221,35	127,7	72,99 %	4
3	40 % - 03	12/03/25	19/03/25	7	176,71	218,70	126,2	72,11 %	2
4	40 % - 04	12/03/25	09/04/25	28	176,71	328,85	189,8	108,43 %	5
5	40 % - 05	12/03/25	09/04/25	28	176,71	329,10	189,9	108,52 %	6
6	40 % - 06	12/03/25	09/04/25	28	176,71	326,20	188,2	107,56 %	5

**Tabla 43***Rotura de Briquetas – 175 Kg/cm<sup>2</sup> con 50 % de Agregado Reciclado*

N°	Especímen	Fecha de moldeado	Fecha de rotura	Edad días	Área cm <sup>2</sup>	Lectura kn	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia %	Tipo de fractura
1	50 % - 01	12/03/25	19/03/25	7	176,71	215,60	124,4	71,09 %	6
2	50 % - 02	12/03/25	19/03/25	7	176,71	213,95	123,5	70,55 %	4
3	50 % - 03	12/03/25	19/03/25	7	176,71	221,65	127,9	73,09 %	2
4	50 % - 04	12/03/25	09/04/25	28	176,71	313,70	181,0	103,44 %	2
5	50 % - 05	12/03/25	09/04/25	28	176,71	308,20	177,8	101,62 %	3
6	50 % - 06	12/03/25	09/04/25	28	176,71	308,90	178,2	101,85 %	3

#### 4.6. Análisis de costos de producción

En este apartado se realiza un análisis comparativo de los costos asociados a la producción de concreto, considerando dos enfoques: el uso tradicional de agregado grueso y el transporte del material demolido, frente a la reutilización del mismo material como agregado reciclado.

Para tener una visión más realista, nos apoyamos en el presupuesto de un expediente técnico ubicado en el distrito de Calana en Tacna, denominado “Mejoramiento del servicio de movilidad urbana en la vía TA - 614 tramo empalme PE - 40 hasta KM 1 + 550 sector Cerro Blanco en el distrito de Calana – provincia y departamento de Tacna” de Código único de inversiones N° 2542865.

#### 4.6.1. Escenario 1: Sin reciclar el material

Este trabajo de investigación afecta directamente a la adquisición del agregado grueso utilizado en canales de regadío y el transporte de agregado grueso, por lo que es importante demostrar el presupuesto destinado para estos.

##### a. Análisis de costos unitarios (ACU)

Veamos el Análisis de Costos Unitarios de la Tabla 44, se puede identificar que la cantidad de agregado grueso (piedra chancada ½ ") utilizada para un metro cúbico de concreto en canales de regadío es de 0,5940 m<sup>3</sup> a un precio de S/. 80,51, además, también en la Tabla 45 se identificó que el servicio de Transporte de Material Excedente al Depósito de Material Excedente (DME) está valorada por el peso a transportar (toneladas) valorizándose en S/. 23,60 por cada tonelada.

**Tabla 44**  
*ACU Concreto en Canal de Regadío*

Partida	05.01.04.01.01	Canal: concreto f'c=210 kg/cm <sup>2</sup>					
Rendimiento	m <sup>3</sup> /día EQ. 25,0000	MO. 25,0000	Costo unitario directo por: m <sup>3</sup>			495,46	
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra							
101010002	Capataz	hh	0,2000	0,06400	29,160	1,870	
101010003	Operario	hh	6,0000	1,92000	27,460	52,720	
101010004	Oficial	hh	1,0000	0,32000	21,590	6,910	
101010005	Peón	hh	8,0000	2,56000	19,530	50,000	
Materiales							
20701000002	Piedra chancada ½ "	m <sup>3</sup>		0,59400	80,510	47,820	
2070200010002	Arena gruesa	m <sup>3</sup>		0,47400	80,510	38,160	
207070002	Agua	m <sup>3</sup>		0,22500	8,500	1,910	
213010002	Cemento portland tipo I (42.5 kg)	bol		9,50300	29,490	280,240	
Equipos							
301010006	Herramientas manuales	% mo	5,0000		111,500	5,580	
3012900010002	Vibrador de concreto 4 hp 1.35 "	hm	0,5000	0,16000	21,710	3,470	
301290004	Mezcladora de concreto de 9-11p <sup>3</sup>	hm	1,0000	0,32000	21,190	6,780	

*Nota.* Extraído del expediente técnico TA-614

**Tabla 45**  
*ACU Transporte de Material Excedente al DME*

Partida 10.02 Transporte de material excedente a DME					Rend: 50,000 ton/DIA	
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Materiales						
5300180	Servicio de Transporte de Material Excedente al DME	ton		1	23,6	23,6
						23,6
<b>Costo unitario por ton:</b>						<b>23,6</b>

*Nota.* Extraído del expediente técnico TA-614

### b. Metrado

A continuación, se mostrará los metrados correspondientes para este análisis, rescatado del Expediente Técnico:

Como se aprecia en la Tabla 46, la partida de Concreto para Canales de Regadío contiene un metrado total de 264.40 m<sup>3</sup>.

**Tabla 46**  
*Metrado de Canal de Concreto*

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado
05.01.04.01.01	Canal: concreto f'c = 210 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	264,40

Sin embargo, la presente investigación, solo afecta al insumo del agregado grueso, por lo tanto, estimamos la cantidad de agregado grueso que se necesitará para construcción del canal de regadío. Para calcular dicha cantidad basta con multiplicar el Volumen de concreto, por la cantidad de agregado grueso por metro cúbico mostrado en el ACU, obteniendo un metrado total de 157,05 m<sup>3</sup> de agregado grueso como observamos en la Tabla 47.

**Tabla 47**  
*Metrado de Agregado Grueso*

	ACU	Volumen de Concreto	Metrado
Agregado Grueso	m <sup>3</sup> 0,594	264,40	157,05

Respecto a la partida de Transporte de Material Excedente contaremos únicamente las partidas correspondientes al transporte de demolición de concreto, las cuales se muestran ordenadas en la Tabla 48.

**Tabla 48***Metrado de material demolido*

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado
03.01.01.01	Demolición de veredas y bermas existentes en forma manual e = 0.15 m	m <sup>3</sup>	75,42
03.01.01.02	Demolición de jardineras hexagonales de concreto	m <sup>3</sup>	1,83
05.01.01.01	Demolición de canal existente	m <sup>3</sup>	210,50
<b>Total</b>			<b>287,75</b>

De estas partidas se obtiene un total de 287,75 m<sup>3</sup> de concreto demolido, con una estimación por parte de los ensayos realizados anteriormente, el peso específico del agregado reciclado es 2,41 gr/cm<sup>3</sup> y aplicando un Factor de Esponjamiento de 1,30; se obtuvo un metrado total de 901,52 ton de concreto demolido. Este resultado se muestra en la Tabla 49.

**Tabla 49***Metrado de transporte del material demolido*

		Factor de esponjamiento	Concreto Demolido	Peso específico	Metrado
Transporte del Material excedente al DME	ton	1,3	287,75	2,41	901,52

### c. Presupuesto

Verificamos el presupuesto presente en el expediente y actualizamos los precios unitarios con cotizaciones actuales. Los resultados están expresados en la Tabla 50.

**Tabla 50***Presupuesto Sin Reciclar el Material*

	Unidad	Metrado	P.U.	P.P.
Agregado Grueso	m <sup>3</sup>	157,05	S/ 115,00	S/ 18 061,16
Transporte de Material Excedente al DME	ton	901,52	S/ 23,60	S/ 21 275,89
<b>Total</b>				<b>S/ 39 337,05</b>

Se evidencia que el presupuesto destinado para la ejecución de dichas partidas corresponde a un monto total de S/. 39 337,05 soles.

#### 4.6.2. Escenario 2: reciclando el material

Para reciclar el concreto demolido, es importante precisar que se requerirán algunos trabajos adicionales, por lo cual será importante detallar estos adicionales.

##### a. Análisis de costos unitarios (ACU)

Lo insumos de Agregado grueso y el transporte de material demolido al DME se explicaron anteriormente, sin embargo, adicionalmente para este nuevo proceso se tendrán que considerar dos nuevas partidas para hacer efectivo el reciclaje del concreto.

Como primer punto, se muestra en la Tabla 51 que se consideró adicionar un nuevo diseño de mezclas el cual incluye los ensayos en laboratorio para el agregado reciclado que se obtendrá de la trituración del concreto demolido, con estos resultados se procederá a hacer un nuevo diseño de mezclas en las proporciones que considere el proyectista, en este caso, propusimos un proporcionamiento de 50 % de Agregado Grueso y 50 % de Agregado Reciclado.

**Tabla 51**  
*ACU Diseño de Mezcla de Concreto*

Partida	Diseño de Mezcla de Concreto				Rend:	1,000 glb/DIA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	<b>Materiales</b>					
30 00444	(Servicio) SC Diseño de Mezcla de Concreto	und		1,0000	400,00	400,00
						400,00
				Costo Unitario por glb :		400,00

Como segundo punto, se visualiza en la Tabla 52 que se consideró la formulación de una nueva partida denominada "Trituración del concreto demolido", de donde, con ayuda de profesionales con experiencia en obras de construcción, se detalló los insumos y sus respectivas cantidades a utilizar para llevar a cabo este proceso.

**Tabla 52**  
*ACU Trituración de concreto reciclado*

Partida	Trituración de concreto reciclado				Rend:	200,00 m³/DIA
	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	<b>Mano de Obra</b>					
	Capataz	hh	0,100	0,0040	30,94	0,12

Operario	hh	2,000	0,0800	25,78	2,06
Peon	hh	3,000	0,1200	18,37	2,20
					<b>4,39</b>
<b>Materiales</b>					
Agua Para Obra	m <sup>3</sup>		0,2250	5,04	1,13
Petroleo Diésel B5 S-50	gal		0,2000	14,95	2,99
Lubricantes, Filtros Y Grasas	% EQ		5,0000	128,47	6,42
					<b>10,55</b>
<b>Equipo</b>					
Herramientas Manuales	% mo		5,0000	4,39	0,22
Chancadora Secundaria 36 " S	hm	1,000	0,0400	128,47	5,14
Taladro	hm	1,000	0,0400	6,35	0,25
					<b>5,61</b>
					<b>Costo Unitario por m<sup>3</sup> : 20,55</b>

### b. Metrado

Para el caso del agregado grueso, inicialmente teníamos un metrado de 157,05 m<sup>3</sup> sin embargo, al utilizar una proporción de 50 % Agregado Grueso y 50 % Agregado Reciclado en el diseño de mezclas del concreto, el metrado de este insumo disminuye a 78,53 m<sup>3</sup>. Este resultado se muestra en la Tabla 53.

**Tabla 53**  
*Nuevo Metrado de Agregado Grueso*

	Unidad	Metrado
Agregado Grueso	m <sup>3</sup>	78,53

Respecto a la partida de Transporte de Material Excedente, contamos con un metrado inicial de 287,75 m<sup>3</sup> de material demolido, del cual, restaremos el volumen de agregado Reciclado necesario para el diseño de mezclas más un 10 % de desperdicios. Por lo tanto, el volumen a transportar disminuye a 201,37 m<sup>3</sup>, que, transformados en toneladas, luego de aplicar el factor de esponjamiento de 1,30 y multiplicarlo por el peso específico, nos entregó un valor de 688,49 ton. Este resultado se muestra en la Tabla 54.

**Tabla 54**  
*Nuevo Metrado de transporte de material excedente*

		Factor de esponjamiento	Concreto Demolido	Peso específico	Metrado
Transporte del Material excedente al DME	ton	1,3	201,37	2,41	630,89

Para el caso del diseño de mezclas, como se muestra en la Tabla 55, será necesario solo un diseño con la resistencia requerida en la obra.

**Tabla 55**

*Metrado de Diseño de Mezcla de concreto*

	<b>Unidad</b>	<b>Metrado</b>
Diseño de Mezcla de Concreto	glb	1,00

Finalmente, como se visualiza en la Tabla 56, el metrado correspondiente a la partida de "Trituración de concreto reciclado", es el volumen necesario para el diseño de mezclas, el cual corresponde al 50 % del agregado más un 10 % de desperdicio, por lo tanto, se deberá procesar 86,38 m<sup>3</sup> de concreto reciclado.

**Tabla 56**

*Metrado de trituración de concreto reciclado*

	<b>Unidad</b>	<b>Metrado</b>
Trituración de Concreto Reciclado	m <sup>3</sup>	86,38

**c. Presupuesto**

Procedemos a indicar los precios unitarios previamente cotizados. De esta manera, los resultados se muestran en la Tabla 57. Logrando evidenciar que el presupuesto para la aplicación de concreto reciclado en la construcción del canal de regadío proyectado en el expediente técnico es de S/. 26 094,84 soles.

**Tabla 57**

*Presupuesto Reciclando el Material*

		<b>Metrado</b>	<b>P.U.</b>	<b>P.P.</b>
Agregado Grueso	m <sup>3</sup>	78,53	S/ 115,00	S/ 9 030,58
Transporte de Material Excedente al DME	ton	630,89	S/ 23,60	S/ 14 889,09
Diseño de Mezcla de Concreto	glb	1,00	S/ 400,00	S/ 400,00
Trituración de Concreto Reciclado	m <sup>3</sup>	86,38	S/ 20,55	S/ 1 775,17
<b>Total</b>				<b>S/ 26 094,84</b>

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

En el presente capítulo se analizaron las tablas, gráficas y resultados obtenidos en el Capítulo IV. Asimismo, se evaluó si la hipótesis general y las hipótesis específicas fueron confirmadas a través de los ensayos realizados, o si, por el contrario, deben considerarse como nulas.

### 5.1. Contraste de la hipótesis

#### 5.1.1. Contrastación de hipótesis general

La hipótesis general planteada en esta investigación establece que *“el concreto elaborado con material proveniente de demoliciones representa una alternativa viable y sostenible para su aplicación en canales – Tacna, 2024”*. Para contrastarla, se evaluaron comparativamente los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio aplicados a diferentes diseños de mezcla: un concreto estándar (sin agregado reciclado) y cuatro diseños adicionales con reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado en proporciones del 20 %, 30 %, 40 % y 50 %.

En primer lugar, los ensayos físicos realizados, como el análisis granulométrico, el contenido de humedad y el peso unitario, evidenciaron que los agregados reciclados, si bien presentan una mayor absorción de agua y variabilidad en su distribución de tamaños, pueden ser controlados mediante un adecuado proceso de dosificación y corrección por humedad. Esto permitió que las mezclas con agregado reciclado mantuvieran una trabajabilidad aceptable y coherente con los fines constructivos propuestos.

Respecto a los ensayos mecánicos, se observó que, aunque el concreto estándar mostró un rendimiento superior en términos de resistencia a la compresión, todas las mezclas con agregado reciclado lograron superar el valor mínimo requerido de  $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de curado. Esta superación del umbral mínimo indica que las propiedades mecánicas del concreto reciclado fueron adecuadas para aplicaciones hidráulicas como canales o inclusive en la aplicación de otras estructuras que se puedan presentar en obra.

Cabe destacar que la inclusión de material reciclado no generó un deterioro drástico en la calidad del concreto, lo que permite inferir que el uso de agregado grueso reciclado sí tiene una influencia positiva en las propiedades físicas y mecánicas del

concreto cuando se encuentra dentro de rangos de reemplazo técnicamente controlados. Esta afirmación se refuerza por el hecho de que todas las muestras evaluadas cumplieron con los parámetros establecidos por la normativa técnica vigente.

Por lo tanto, con base en el análisis técnico de los datos experimentales y en función del cumplimiento de los requisitos establecidos para el diseño de mezclas, se concluye que la hipótesis alterna ( $H_a$ ) es aceptada. Esto valida que la reutilización de concreto proveniente de material demolido representa una opción técnica y ambientalmente viable para su aplicación en la construcción de canales en la ciudad de Tacna, promoviendo a su vez una gestión más eficiente y sostenible de los residuos de construcción.

### **5.1.2. Contrastación de hipótesis específicas**

#### **a. Como hipótesis específica 1, se planeó que**

*El uso de material demolido mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto, haciéndolo comparable o superior al concreto tradicional.*

Esta hipótesis se relaciona directamente con el estudio de Carizaile y Anquise (2015), quienes determinaron que el concreto elaborado con agregado reciclado presentó propiedades similares al concreto convencional, pese a ciertas variaciones en costos. De manera similar, en el presente estudio se observó que las mezclas con agregado reciclado lograron superar consistentemente el valor mínimo de resistencia de  $175 \text{ kg/cm}^2$  y conservaron propiedades físicas aceptables como trabajabilidad y densidad

#### **b. Como hipótesis específica 2, se planteó que**

*El concreto elaborado con material demolido es factible, para la elaboración teniendo igual o similar comportamiento frente al concreto convencional aplicado en la construcción de canales.*

El trabajo de Silva et al. (2022) demostró la viabilidad de utilizar residuos de construcción en mezclas de concreto, logrando resistencias que validan su uso en obras civiles como en veredas en su caso. Nuestra investigación ratifica este hallazgo al comprobar que el concreto reciclado mantiene un desarrollo de resistencia progresivo y propiedades compatibles con estructuras hidráulicas como canales, siempre que se controle adecuadamente el proceso de mezclado y dosificación

**c. Como hipótesis específica 3, se planteó que**

*La producción de concreto con material demolido reduce el impacto ambiental en comparación con la producción de concreto tradicional.*

La tesis de Machaca (2018) indicó que la producción de agregado reciclado contribuye a mitigar los impactos ambientales de los residuos de construcción. En el presente estudio, se reconoce que el uso de material demolido reduce la explotación de canteras y la cantidad de residuos, promoviendo una economía circular y un modelo constructivo más sostenible.

**d. Como hipótesis específica 4, se planteó que**

*La reutilización de material demolido en las mezclas de concreto genera ahorros económicos en comparación con el uso de materiales vírgenes.*

Carizaile y Anquise (2015) también abordaron el aspecto económico, aunque en su caso el costo del agregado reciclado era mayor. En cambio, en esta investigación, se evidenció una reducción de costos del 33,66 %, al pasar de S/. 39 337,05 a S/. 26 094,84; debido principalmente al menor uso de agregado natural y al aprovechamiento de los escombros. Esto valida la hipótesis desde un enfoque práctico local

## CONCLUSIONES

Se confirma que el concreto elaborado con material proveniente de demoliciones representa una alternativa viable y sostenible para su aplicación en canales, validando su factibilidad tanto desde el punto de vista técnico como económico y ambiental.

Se comprobó que la incorporación de agregado reciclado en proporciones de hasta el 50 % mantiene las propiedades físicas y mecánicas del concreto dentro de los parámetros aceptables según el diseño que corresponde a  $175 \text{ kg/cm}^2$ , permitiendo su uso en infraestructuras hidráulicas de baja a moderada exigencia. Así, se contribuye al conocimiento sobre la optimización del diseño de mezclas con componentes reciclados.

Se evidenció que el comportamiento del concreto con material demolido es adecuado en comparación con el concreto tradicional, cumpliendo los requisitos mínimos sugeridos por el ACI318S - 19, aportando nuevas alternativas técnicas para la construcción de canales de irrigación, lo cual abre camino a proyectos más sostenibles.

Se confirmó que la producción de concreto reciclado reduce el impacto ambiental asociado al consumo de recursos vírgenes y la disposición de residuos, este impacto ambiental es directamente proporcional a la magnitud del proyecto, como en este caso que se reduce  $78,53 \text{ m}^3$  de material virgen explotado y  $295,33 \text{ ton}$  de material con destino en algún botadero, reforzando de esta manera el enfoque de economía circular aplicado a la ingeniería civil.

El análisis económico demostró que el uso de agregado reciclado genera un ahorro considerable del 33,66 % en los costos de producción equivalentes a S/. 13 242,21, proporcionando argumentos sólidos para su implementación en proyectos de infraestructura de bajo costo.

## RECOMENDACIONES

*A los investigadores en ingeniería civil, se recomienda seguir con los estudios en laboratorio, buscando un reemplazar el agregado grueso en proporciones de 60 %, 70 %, 80 %, 90 % o 100 % por agregado reciclado y verificar si cumple con los requerimientos mínimos según el diseño de mezclas empleado.*

*A las universidades y centros de investigación, se sugiere ampliar los estudios sobre la durabilidad del concreto con agregado reciclado por el Método ACI, evaluando su comportamiento a largo plazo frente a condiciones ambientales adversas como humedad constante, ataques químicos y variaciones térmicas, con el fin de determinar su aplicabilidad en obras de mayor exigencia*

*A las municipalidades y gobiernos locales, como entidades generadoras y gestoras de residuos de construcción, se les recomienda fomentar la implementación de plantas de reciclaje de material demolido e incentivar la investigación aplicada sobre su uso en proyectos de infraestructura pública, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso.*

*A los profesionales del sector construcción, se recomienda considerar la implementación de los resultados de esta investigación como una alternativa viable para enfrentar problemáticas comunes en obras, tales como la reducción de costos de producción y la escasez de materiales pétreos en las proximidades del proyecto.*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Agudelo, H. &.-Á. (2023). *Prácticas de circularidad en la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición en el sector de la construcción: una revisión bibliográfica de las estrategias y los elementos clave en su implementación*. Madrid: Informes de la Construcción.
- ACI Committee 211. (2022). *Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide*. ACI PRC-211.1-22, 34. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- ACI Committee 301. (2020). *Specifications for Concrete Construction*. ACI 301-20. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2001). *ACI 555R-01 – Removal and Reuse of Hardened Concrete*. ACI Committee 555, Farmington Hills, MI.
- Areco, M. V. (05 de 08 de 2024). *La importancia de las infraestructuras sostenibles*. Obtenido de Ineria: <https://ineriamanagement.com/la-importancia-de-las-infraestructuras-sostenibles/>
- ASTM. (2009). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*. <https://www.astm.org/d7263-09.html>.
- BRE Global. (2020). *BREEAM In-Use International Technical Manual: Commercial Version 6.0.0*. BRE Global. BRE Global. Obtenido de [https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2020/10/SD6063\\_BREEAM-In-Use-International\\_Commercial-Technical-Manual-V6.pdf](https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2020/10/SD6063_BREEAM-In-Use-International_Commercial-Technical-Manual-V6.pdf)
- Carizaile Laurente, E. A., & Anquise Huayhua, S. E. (2015). *Viabilidad Del Uso De Concreto Reciclado Para La Construcción De Viviendas En La Ciudad De Tacna*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Caycho Hidalgo, T. E., & Espinoza Rodriguez, D. (2019). *Mezcla De Concreto Con Agregado Grueso Reciclado Usando Cemento Portland Tipo Hs Para Cimentaciones, Distrito La Molina, Año-2019*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Chasquero Martinez, J., & Hurtado Collantes, H. (2019). *Uso Del Concreto Reciclado Proveniente De Demoliciones Para La Producción De Afirmado*. Cajamarca: Universidad Nacional de Jaén.

- Comité ACI 318. (2019). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- Committee 555. (Marzo de 2001). Removal and Reuse of Hardened Concrete. *ACI 555R-01*. USA: American Concrete Institute.
- Consejo de ministros. (Julio de 2004). Decreto Supremo N°057-2004-PCM. Lima, Perú: El Peruano.
- Davila Pablo, M. C., Huaynalaya Rashuaman, M., Zapata Samata, J. M., & Jiménez Yabar, H. M. (2024). Elaboración del concreto con agregados reciclados para su utilización en la industria del premezclado. *4(2)*. *Tecnohumanismo*. Obtenido de <https://doi.org/10.53673/th.v4i2.262>
- Escobedo Cifuentes, D. L. (2022). *Diseño De Investigación Sobre Propuesta De Reutilización De Residuos De Concreto Demolido En La Construcción De Banquetas*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Guacaneme Lizarazo, F. A. (2015). *Ventajas y usos del concreto reciclado*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Guerra Aguilar, W. V. (2022). *Diseño de concreto reciclado para construcción de muros prefabricados de viviendas modulares con el Método ACI en Villa María del Triunfo*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Huillca Merma, L. D., & Quispe Mamani, C. R. (2023). *Comparación Del Uso Del Concreto Con Agregado Grueso Reciclado Y Natural En La Construcción De Veredas En La Ciudad De Arequipa*. Arequipa: Universidad Católica San Pablo.
- INDECOPI. (2013). NTP 339.183-2013. Concreto. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio. *2° Edición*, 24. Lima, Perú: INDECOPI 2013.
- INDECOPI. (2019). NTP 339.047-2019 Concreto, Definiciones y terminología relativas al hormigón y agregados. *3° Edición*, 24. Lima, Perú: INACAL 2019.
- Instituto nacional de defensa civil – INDECI. (2007). *Programa de Prevención y Medidas de Mitigación Ante Desastres de la Ciudad de Tacna*. Tacna.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 15th edition*. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association.
- Lopez, E. R. (1992). Diseño de Mezclas. *Tecnología del Concreto*. Miraflores, Lima, Perú.

- Machaca Mamani, E. B. (2018). *Producción de Agregado Reciclado Para Mitigar Los Impactos Ambientales De Los Residuos De Construcción En La Ciudad De Tacna*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Milagros Cecilia Davila Pablo, M. H. (2024). Elaboración del concreto con agregados reciclados para su utilización en la industria del premezclado. 4(2). *Tecnohumanismo*. Obtenido de <https://doi.org/10.53673/th.v4i2.262>
- Ministerio de Energía y Minas. (2013). Decreto Supremo N° 003-2013-Vivienda. Lima, Perú: Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos.
- Ministerio de Salud DIGESA. (2004). Guía Técnica para la Clausura y Conversión de Botaderos de Residuos Sólidos. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente & Ministerio de Vivienda, construcción y Saneamiento. (mayo de 2016). Manejo de residuos de construcción y demolición en obras menores. *Guía Informativa*. San Isidro, Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.
- MVCS. (Enero de 2021). Modificación de la norma técnica G.040, definiciones del reglamento nacional de edificaciones. *Resolución Ministerial N°029-2021-Vivienda*. Lima, Perú: El Peruano.
- Neville, A. M. (1995). *Tecnología del Concreto*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Portugal Barriga, P. (2020). *Tecnología del concreto de alto desempeño*. Lima: Instituto Peruano del Cemento y del Concreto.
- Redacción 360 en concreto. (2022). Agregados Reciclados: ¿Qué y Para Qué? Colombia: ARGOS 360. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-reciclados-que-y-para-que/>
- República, L. (11 de noviembre de 2019). *La República.pe*. Obtenido de <https://larepublica.pe/sociedad/2019/11/09/tacna-tiene-37-botaderos-que-son-ilegales-oefa-basura-contraminacion-ambiental-lrsd>
- RNE. (2020). Norma E.060 concreto armado. 1° Edición. Lima, Perú: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción.
- Silva Lindarte, A. N., Bedoya Ramirez, K., & Cardozo Rojas, M. (2022). *Diseño de mezclas de concreto de bajo impacto ambiental, con la incorporación del material granular extraído de los RCD para la vereda Barzalosa del Municipio de Girardot*. COLOMBIA: Corporación Universitaria Minuto de Dios.

- Téllez Suarez, I., & Rangel Perez, H. D. (2020). *Diseño De Mezclas De Concreto Con Reciclaje De Aridos*. San José Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander.
- U.S. Green Building Council. (2021). *LEED v4.1: Building Design and Construction*.  
Obtenido de U.S. Green Building Council: <https://www.usgbc.org/leed/v41>
- W. Martínez-Molina, A. A.-A.-G.-G.-B.-G.-A.-Q.-A.-V. (2015). *Concreto reciclado: una revisión*. Morelia, Michoacán, México: Revista ALCONPAT.

## ANEXOS

## Anexo 1

## Matriz de Consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicador	Metodología
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿De qué forma se puede reutilizar el concreto proveniente del material demolido, en el diseño de mezclas de concreto para su aplicación en canales?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Determinar de qué forma es posible reutilizar el concreto proveniente del material demolido en el diseño de mezclas de concreto para su aplicación en canales.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>El concreto elaborado con material proveniente de demoliciones representa una alternativa viable y sostenible para su aplicación en canales.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>Reutilización del Concreto proveniente de Material Demolido</p>	<p>- Volumen Generado en obra</p> <p>- Volumen reciclado</p> <p>- Granulometría</p> <p>- Contenido de Humedad</p> <p>- Peso Unitario</p> <p>- Peso Específico</p> <p>- Absorción</p> <p>- Dosificación</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b></p> <p>- Aplicada</p> <p><b>Nivel de investigación:</b></p> <p>- Aplicativo</p>
<p><b>Problemas específicos</b></p> <p>a. ¿Cómo influye el uso del concreto proveniente del material demolido en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto?</p> <p>b. ¿Qué tan factible es la implementación del concreto elaborado con material demolido en comparación con el concreto tradicional para la elaboración de canales?</p> <p>c. ¿Cuál es el impacto ambiental generado al producir mezclas de concreto con material demolido?</p> <p>d. ¿Cuál es el impacto económico tras la reutilización de material demolido en las mezclas de concreto?</p>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>a. Analizar la influencia del uso de material demolido en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto</p> <p>b. Comprobar la factibilidad del uso del concreto elaborado con material proveniente de demoliciones frente al concreto tradicional para la construcción de canales</p> <p>c. Determinar el impacto ambiental de la producción de mezclas de concreto con material demolido</p> <p>d. Explicar el impacto económico de la reutilización de material demolido en las mezclas de concreto</p>	<p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>a. El uso de material demolido mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto, haciéndolo comparable o superior al concreto tradicional</p> <p>b. El concreto elaborado con material demolido es factible, para la elaboración teniendo igual o similar comportamiento frente al concreto convencional aplicado en la construcción de canales</p> <p>c. La producción de concreto con material demolido reduce el impacto ambiental en comparación con la producción de concreto tradicional</p> <p>d. La reutilización de material demolido en las mezclas de concreto genera ahorros económicos en comparación con el uso de materiales vírgenes</p>	<p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Diseño de Mezclas para la Aplicación En Canales</p>	<p>- Resistencia a la compresión</p> <p>- Tipo de Rotura</p> <p>- Gastos sin reutilizar el concreto</p> <p>- Gastos reutilizando el concreto</p> <p>- Diferencia de gastos</p> <p>- Consecuencias de la reutilización del concreto</p>	<p><b>Diseño de investigación:</b></p> <p>- Experimental tipo "Cuasi Experimentos"</p>