UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio comparativo de las propiedades técnicas de tres mezclas de concreto empleando materiales reciclados como el POC y caucho en reemplazo parcial de la arena en la ciudad de Pucallpa.

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Espinoza Trujillo, Angela Tatiana (0000-0002-3762-3557)

Jiménez Guerrero, Benji Boris (0000-0002-0229-6226)

ASESOR

Ing. Eyzaguirre Acosta, Carlos Augusto (0000-0001-9769-2135)

Lima, 28 de febrero de 2020

DEDICATORIA

Dedicamos la presente tesis a nuestros queridos abuelos, “Pipo” y “Mami”, donde partieron a mejor vida. Que Dios los tenga en su santa gloria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a la UPC por habernos inculcado la formación como futuros ingenieros para la sociedad, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir creciendo profesionalmente día a día.

Agradecemos a la Empresa “OLAMSA” por habernos permitido visitar sus instalaciones en la ciudad de Pucallpa y por proveer los materiales necesarios. Su apoyo ha sido fundamental para realizar nuestro trabajo.

Agradecemos al Ing. Carlos Eyzaguirre Acosta y al Ing. José Ulises Rodríguez Barboza; nuestro asesor de tesis y nuestro asesor de conference paper respectivamente, por habernos apoyado en nuestro trabajo e impartir todos sus conocimientos para guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis.

Nuestro agradecimiento también va dirigido al Gerente de Investigación y Desarrollo de la Empresa “UNICON” el Ing. José Álvarez Cangahuala por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico.

Y para finalizar y no menos importante, agradecemos de manera especial a nuestros señores padres por su apoyo incondicional y por siempre creer en nosotros. Porque sin ellos no estaríamos en el lugar donde estamos.

RESUMEN

Actualmente, el sector construcción es uno de los sectores más contaminantes a nivel mundial, es considerado uno de los máximos aportantes de emisiones de carbono. En esta industria se utilizan materiales como el cemento y acero, cuyos elementos son considerados como materiales con alta energía incorporada. La fabricación de estos materiales tiene un impacto considerable de CO₂; el cemento por sí solo, representa el 5% de emisiones de CO₂ a nivel mundial. También, la industria concretera es responsable de la extracción indiscriminada de recursos no renovables como el agua y agregados, arena y piedra, provenientes de las canteras, graveras, pedregales, etc.

La presente tesis tiene como propósito los análisis comparativos de las propiedades técnicas de mezclas de concreto elaboradas con agregados reciclados y/o sub productos de las industrias como el Clinker de aceite de palma (POC) y caucho; con el fin de disminuir la extracción indiscriminada de agregados de las canteras que son utilizados por la industria concretera. Asimismo, reducir la cantidad de CO₂ que es producido por la extracción de estos agregados ya que son altamente contaminantes para el medio ambiente. El trabajo de nuestra investigación se basa en realizar 156 probetas de ensayo con agregados reciclados en la mezcla de concreto dando diferentes beneficios estructurales como el incremento de la flexión, compresión y tracción.

Se presenta como un proyecto factible que propone una alternativa eco amigable para contrarrestar el impacto ambiental negativo causado por la industria concretera mediante un estudio comparativo de tres mezclas de concreto empleando materiales reciclados como el POC y caucho en reemplazo parcial de la arena.

Palabras clave: POC, caucho, concreto, eco amigable, graveras, canteras, CO₂.

Comparative study of the technical properties of three concrete mixtures using recycled materials such as POC and rubber in partial replacement of the sand in the city of Pucallpa

ABSTRACT

Currently, the construction sector is one of the most polluting sectors worldwide, it is considered one of the maximum contributors of carbon emissions. In this industry, materials such as cement and steel are used, whose elements are considered as materials with high energy incorporated. The manufacture of these materials has a considerable CO₂ impact; Cement alone represents 5% of CO₂ emissions worldwide. Also, the concrete industry is responsible for the indiscriminate extraction of non-renewable resources such as water and aggregates, sand and stone, coming from quarries, gravel, rock, etc.

The purpose of this thesis is the comparative analysis of the technical properties of concrete mixtures made from recycled aggregates and / or by-products from industries such as Palm Oil Clinker (POC) and rubber; in order to reduce the indiscriminate extraction of aggregates from quarries that are used by the concrete industry. Also, reduce the amount of CO₂ that is produced by the extraction of these aggregates as they are highly polluting for the environment. The work of our research is based on performing 156 test specimens with recycled aggregates in the concrete mixture giving different structural benefits such as increased flexion, compression and traction.

It is presented as a feasible project that proposes an eco-friendly alternative to counteract the negative environmental impact caused by the concrete industry through a comparative study of three concrete mixtures using recycled materials such as POC and rubber in partial sand replacement.

Keywords: POC, rubber, concrete, eco-friendly, gravel, quarries, CO₂

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO	14
1.1 Huella de carbono	14
1.2 Impacto Ambiental	14
1.3 Ecoamigable	14
1.4 El concreto	15
1.5 Agregados reciclados	15
1.6 El caucho.....	15
1.7 El POC	16
1.8 Método ACI	17
1.9 Norma Técnica Peruana	17
METODOLOGÍA.....	18
2.1 Nivel de Investigación	18
2.2 Diseño de Investigación	18
2.3 Procedimiento.....	18
RESULTADOS.....	20
3.1 Materiales reciclados.....	20
3.2 Diseño de mezcla según Comité 211 del ACI	22
3.2.1 Ensayo de materiales (agregados)	22
3.2.2 Diseño de mezcla base	30
3.3 Resultados en estado fresco.....	39
3.3.1 Temperatura	39
3.3.2 Medición de Slump.....	39
3.3.3 Contenido de aire	40
3.4 Resultados de ensayo de resistencia	42
3.4.1 Ensayo de Compresión en probetas cilíndricas de concreto – ASTM C39 / NTP 339.034	42
3.4.2 Ensayo de Tracción por Compresión diametral Tracción Indirecta – ASTM C496 / NTP 339.084	50
3.4.3 Resistencia a la Flexión en vigas de concreto endurecido – ASTM C78.....	58
3.5 Estudio Comparativo Técnico	67
3.6 Estudio comparativo económico	71
3.7 Estudio Comparativo Ambiental.....	80

3.6.1. Cálculo de emisiones de CO ₂	82
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes de la mezcla	5
Tabla 2 Propiedades físicas y mecánicas del cemento, agregados y caucho.....	6
Tabla 3 Proporciones de mezcla de concreto con caucho	6
Tabla 4 Análisis granulométrico del agregado fino.....	22
Tabla 5 Análisis granulométrico de POC	23
Tabla 6 Análisis granulométrico del agregado grueso	24
Tabla 7 Análisis de peso específico del agregado fino	25
Tabla 8 Análisis de peso específico de agregado grueso.....	26
Tabla 9 Análisis de peso unitario suelto del agregado fino.....	27
Tabla 10 Análisis de peso unitario compactado de agregado fino	27
Tabla 11 Análisis de peso unitario suelto del agregado grueso.....	28
Tabla 12 Análisis de peso unitario compactado del agregado grueso	28
Tabla 13 Contenido de humedad del agregado fino.....	29
Tabla 14 Contenido de humedad del agregado grueso.....	29
Tabla 15 Características del cemento a utilizar	30
Tabla 16 Resumen de las propiedades de los agregados	30
Tabla 17 <i>Fórmula para hallar la F'_{cr}</i>	31
Tabla 18 Contenido de aire atrapado por TMN de agregado grueso.....	31
Tabla 19 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregado grueso	32
Tabla 20 Relación de agua/cemento por resistencia.....	32
Tabla 21 Volumen grueso por unidad de volumen de concreto.....	33
Tabla 22 Dosificaciones previas halladas por el método de ACI.....	34
Tabla 23 Dosificación de materiales sin corrección por humedad.....	34
Tabla 24 Peso de agregados de mezcla de concreto corregidos por humedad.....	35
Tabla 25 Proporción de mezcla de concreto tradicional $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	36
Tabla 26 Proporciones de las mezclas con porcentaje parcial de los agregados reciclados para un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	37
Tabla 27 Proporción de mezcla de concreto tradicional $f'c = 230 \text{ kg/cm}^2$	37
Tabla 28 Proporciones de las mezclas con porcentaje parcial de los agregados reciclados para un $f'c = 230 \text{ kg/cm}^2$	38
Tabla 29 Resultados de las temperaturas obtenidas para las tipologías	39
Tabla 30 Resultados de asentamientos de las tipologías de concreto.....	40
Tabla 31 Resultados de medición de porcentaje de aire.....	41
Tabla 32 Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de compresión.....	43
Tabla 33 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	44
Tabla 34 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	45
Tabla 35 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	45
Tabla 36 Resultado de resistencias promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC para un $f'c$ de 210 y 230 kg/cm^2	45
Tabla 37 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	46

Tabla 38 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	47
Tabla 39 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de compresión.....	47
Tabla 40 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC para un f'_c de 210 y 230 kg/cm ²	47
Tabla 41 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de compresión.....	48
Tabla 42 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de compresión.....	49
Tabla 43 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de compresión.....	49
Tabla 44 Resultado de resistencias promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC y caucho para un f'_c de 210 y 230 kg/cm ²	49
Tabla 45 Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta	51
Tabla 46 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	53
Tabla 47 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	53
Tabla 48 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	53
Tabla 49 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC	54
Tabla 50 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	55
Tabla 51 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	55
Tabla 52 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	55
Tabla 53 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho	56
Tabla 54 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	57
Tabla 55 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	57
Tabla 56 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.....	57
Tabla 57 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC y caucho.	58
Tabla 58 Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de Flexión	60
Tabla 59 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de flexión.....	61
Tabla 60 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de flexión.....	61
Tabla 61 Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de flexión.....	61

Tabla 62 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC .	62
Tabla 63 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de flexión.	63
Tabla 64 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de flexión.	63
Tabla 65 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de flexión.	63
Tabla 66 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho.	64
Tabla 67 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de Flexión.	65
Tabla 68 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de Flexión.	65
Tabla 69 Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de Flexión.	65
Tabla 70 Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho.	66
Tabla 71 Tabla comparativa de resistencias promedio según tipo de esfuerzo, tipo de concreto y porcentaje de reemplazo de agregado fino	67
Tabla 72 Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Compresión	68
Tabla 73 Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Tracción Indirecta.	69
Tabla 74 Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Flexión.	70
Tabla 75 Cálculo de factor de flebe base.	71
Tabla 76 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto tradicional con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	71
Tabla 77 Cálculo de costo de flete para un concreto con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	72
Tabla 78 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 10% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	72
Tabla 79 Cálculo de costo de flete para un concreto con 10% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	72
Tabla 80 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	73
Tabla 81 Cálculo de costo de flete para un concreto con 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	73
Tabla 82 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	73
Tabla 83 Cálculo de costo de flete para un concreto con 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	74
Tabla 84 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 3% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	74
Tabla 85 Cálculo de costo de flete para un concreto con 3% de adición de caucho con resistencia 230 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	74
Tabla 86 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 5% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	75
Tabla 87 Cálculo de costo de flete para un concreto con 5% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	75

Tabla 88 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 7% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	75
Tabla 89 Cálculo de costo de flete para un concreto con 7% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	76
Tabla 90 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 10% de adición de POC con resistencia 230 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	76
Tabla 91 Cálculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 10% de adición de POC con resistencia 230 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	76
Tabla 92 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	77
Tabla 93 Cálculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	77
Tabla 94 Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	77
Tabla 95 Cálculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm ² para la ciudad de Pucallpa.	78
Tabla 96 Tabla comparativa de costo directo por porcentaje de reemplazo de agregado fino de todas las proporciones.....	78
Tabla 97 Tabla de costo de 1 m ³ de concreto con los porcentajes de reemplazo recomendados	79
Tabla 98 Emisiones de CO ₂ (Indicador GRI: EN16)	81
Tabla 99 Cantidad de kilogramos emitidos de CO ₂ por tonelada de material	82
Tabla 100 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ²	82
Tabla 101 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 10% de POC en reemplazo parcial de la arena.	83
Tabla 102 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 130 kg/cm ² con un 12.5% de POC en reemplazo parcial de la arena.	83
Tabla 103 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 15% de POC en reemplazo parcial de la arena.	83
Tabla 104 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 3% de caucho en reemplazo parcial de la arena.	84
Tabla 105 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 5% de caucho en reemplazo parcial de la arena.	84
Tabla 106 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 7% de caucho en reemplazo parcial de la arena.	85
Tabla 107 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 2.5% de caucho y 10% de POC en reemplazo parcial de la arena.	85
Tabla 108 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 2.5% de caucho y 12.5% de POC en reemplazo parcial de la arena.	86
Tabla 109 Cálculo de emisiones de CO ₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm ² con un 2.5% de caucho y 15% de POC en reemplazo parcial de la arena.	86
Tabla 110 Emisiones de CO ₂ de todas las mezclas de concreto realizadas.....	87
Tabla 111 Tabla de las emisiones de carbono emitidas por los porcentajes de reemplazo recomendados por el estudio técnico y económico	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de gases efecto invernadero por sector	2
Figura 2. Emisiones de CO ₂ a nivel mundial	2
Figura 3. Mapa regional del departamento de Ucayali.....	3
Figura 4. Crecimiento poblacional de Pucallpa.....	4
Figura 5. Componentes del caucho.....	7
Figura 6. Proporciones de la mezcla (%).....	7
Figura 7. Microscopio óptico del concreto con caucho.....	8
Figura 8. Comparación visual de POC molido con la arena	9
Figura 9. Comparación de esfuerzo de compresión y tracción en el concreto con POC.....	9
Figura 10. Prueba de velocidad ultrasónica para comprobar la densidad del concreto.....	10
Figura 11. La resistencia a flexión de las vigas de concreto se determinó según la norma ASTM C348	11
Figura 12. Prueba de absorción de agua.....	11
Figura 13. Tipo de Emisiones.....	14
Figura 14. Procesamiento de agregados reciclados	15
Figura 15. Caucho y derivados	16
Figura 16. Pedazos de POC	16
Figura 17. POC extraído de las calderas.....	20
Figura 18. Caucho granulado.....	21
Figura 19. Caucho cribado.....	21
Figura 20. Muestra de probetas despues de 28 días de curado.....	42
Figura 21. Prueba de compresión a probeta de concreto tradicional.....	43
Figura 22. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de POC.....	44
Figura 23. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de caucho	46
Figura 24. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de caucho y POC	48
Figura 25. Muestra de probetas despues de 28 días de curado.....	50
Figura 26. Prueba de Tracción Indirecta de concreto tradicional.....	51
Figura 27. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC.....	52
Figura 28. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC.....	54
Figura 29. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC y caucho	56
Figura 30. Vigas después del curado	58
Figura 31. Prueba de flexión a probeta de concreto tradicional	59
Figura 32. Prueba de flexión a probeta de concreto con adición de POC	60
Figura 33. Rotura de probeta prismática de concreto con adición de caucho	62
Figura 34. Prueba de flexión a probeta de concreto con adición de POC y caucho	64
Figura 35. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Compresión.....	68
Figura 36. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Tracción Indirecta.....	69
Figura 37. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Flexión	70
Figura 38. Gráfico de costos por metro cúbico de todas las mezclas realizadas	79
Figura 39. Emisiones de gases contaminantes emitidos por el Sector construcción.	80
Figura 40. Gráfico comparativo del promedio de las emisiones de CO ₂ emitidas por tipo de mezcla.....	87

INTRODUCCIÓN

Realidad problemática

En la actualidad, la forma en que el mundo ha estado utilizando los recursos naturales ha colocado una enorme presión sobre el medio ambiente causando problemas de carácter mundial como el calentamiento global. Una causa de este problema es el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que provienen de fuentes naturales y artificiales. (Wu y Low, 2012). Uno de los máximos aportantes de las emisiones de carbono a nivel mundial es la industria de la construcción. En dicha industria, dos de los principales materiales de construcción como el hormigón (concreto) y acero, son considerados como materiales con alta energía incorporada. La fabricación de materias primas (cemento y acero) tienen un impacto considerable de CO₂, la sección de cemento por sí solo representa el 5% de emisiones CO₂ a nivel mundial hecha por el hombre (Worrell, 2001). El transporte de materiales de construcción en bruto también es considerado como un agente contaminante (Wu y Low, 2012). Además, la construcción de edificios no siempre es eficaz y puede generar emisiones de carbono innecesarias (Wu, 2013). Por todo esto, la industria de la construcción se enfrenta a una creciente presión para reducir los gases de efecto invernadero, siendo este sector como una de las mayores fuentes de emisiones de carbono en el mundo. Es necesario entender que el problema es de suma importancia; ya que, existe una necesidad imperativa de reducir los altos niveles de impacto ambiental y así facilitar un desarrollo ecológico y sostenible. También, el problema es importante; ya que, la solución de este genera *“conciencia colectiva respecto a los problemas potenciales que genera el crecimiento de la industria de la construcción en el deterioro del medio ambiente”* (Mattey Pedro, 2015). Por ello, la industria de la construcción ha comenzado a trabajar para lograr la sostenibilidad. El objetivo de la construcción sostenible es crear y operar un entorno saludable teniendo como principios a la reducción del consumo de recursos, reutilizar los recursos y utilizar los recursos reciclables. Por ejemplo, se han desarrollado tecnologías para mitigar las emisiones de carbono durante la producción de cemento. (Huntzinger y Eatmon, 2009).

Figura 1. Emisiones de gases efecto invernadero por sector

IPCC Report 2014

Por otro lado, la industria concretera emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y 1 billón de toneladas de agua por año, obteniendo un coste ambiental de 1 toneladas de CO₂ emitida por cada tonelada de cemento producida, teniendo en cuenta que dicho sector también genera emisiones de material particulado generando un alto impacto ambiental.

Productos	Emisiones Mundiales de CO ₂
Plásticos	1,3%
Cemento	5%
Ropa	9%
Alimentación	13%
Ocio	18%

Figura 2. Emisiones de CO₂ a nivel mundial

Denkstatt, consultora independiente especializada en desarrollo sostenible

Delimitación de la investigación

El escenario seleccionado es la ciudad de Pucallpa debido a que los últimos años ha tenido un alto crecimiento poblacional que genera la creación de nuevas edificaciones para ser utilizadas por las personas que se encuentran en esta región. La creación de edificaciones representa 3.25% de todas las emisiones de CO₂ en la ciudad de Pucallpa según informe sectorial del MINAM y dentro de 20 años se tiene calculado un incremento hasta un 15%. Asimismo, existe un alto impacto ambiental negativo en la ciudad debido principalmente por la deforestación y la incineración de la planta aceitera. De este producto se obtiene el clinker de aceite de palma (POC), que se utilizará como material reciclado en nuestro proyecto. Por otra parte, debido al rápido crecimiento del sector automotriz, la eliminación de residuos de caucho se está convirtiendo en un problema significativo, aportando así a la contaminación ambiental de la ciudad. Es por ello, que dicho residuo contaminante será utilizado como material reciclado para la mezcla de concreto como sustituto de agregado fino.

Figura 3. Mapa regional del departamento de Ucayali

Gobierno Regional de Ucayali

Figura 4. Crecimiento poblacional de Pucallpa

INEI

Antecedentes

Actualmente, en el ámbito constructivo se necesita la implementación de nuevas técnicas que aporten y apunten en gran medida a una construcción eco amigable. Por ende, el uso de caucho reciclado en la elaboración de concreto como reemplazo de agregado fino se presenta como una alternativa viable que facilite la construcción ecológica. El uso del caucho aporta ventajas significativas en el caso de tracción tanto en vigas, placas y losas. Los estudios demuestran que aportan hasta resistencias de 20 Mpa (Fantilli, 2016).

Tabla 1

Componentes de la mezcla

Components	RLC_0	RLC_5	RLC_12
Water (Kg)	168	168	168
Cement Type II A_LL 42.5R (Kg)	352	352	352
Stone aggregate (Kg)	1131	1123	1110
Rubber granulares 3_20 mm (Kg)	243	241	238
Superplasticizer (I)	6	6	6
Polypropylene fibers (Kg)	0	5	12

Fuente: Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

El trabajo experimental del uso del caucho en el concreto se ha llevado a cabo para evaluar la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la densidad y propiedades de durabilidad como absorción de agua y resistencia a la abrasión. Se utiliza el reemplazo de agregados finos de caucho para preparar la mezcla de concreto con diferentes porcentajes (0%, 4%, 4.5%, 5% y 5.5%) como se muestra en la tabla 3. Se considera una relación constante a/c de 0.40. La dosificación del superplastificante fue variada de 1.5% a 2.4% para lograr el factor de comparación de 0.9.

Tabla 2

Propiedades físicas y mecánicas del cemento, agregados y caucho

Analysis	Results
PPC cement	
Setting time	Initial time - 115min Final time - 248 min
Compressive Strenght	3 Days - 24.5 Mpa 7 Days - 34.5 Mpa 28 Days - 45.2 Mpa
Water absorption	
Coarse aggregate	0.50%
Fine aggregate	0.50%
Crumb rubber	0.30%

Fuente: Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

Tabla 3

Proporciones de mezcla de concreto con caucho

Mix No.	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Crumb rubber by weight (%)	Water/cement ratio	Admixture (%) by weight of cement	Compaction factor
CR 0	1	2.11	2.92	0	0.4	1.5	0.9
CR 4	1	2.03	2.92	4	0.4	2	0.9
CR 4.5	1	2.02	2.92	4.5	0.4	2.1	0.9
CR 5	1	2	2.92	5	0.4	2.2	0.9
CR 5.5	1	1.99	2.92	5.5	0.4	2.4	0.91

Fuente: Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

En la figura 5 se muestra la comparativa de carga efectiva para el rompimiento del concreto en prueba de presión en 3 puntos entre el concreto ligero tradicional (TLC) y concreto elaborado con caucho reciclado (RLC)

Figura 5. Componentes del caucho

Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

La incorporación del 4% y 5.5% del caucho en el concreto como alternativa a los agregados finos da como resultado una disminución de la resistencia a la compresión en 3.79% y 17.8% respectivamente que se muestra en la Fig. 5. La disminución en la fuerza se debe generalmente a la falta de adhesión entre partículas de goma lisa y pasta de cemento. Con esto, se desarrollarán grietas rápidamente alrededor de las partículas de caucho en el momento de la carga, dando como resultado una rápida ruptura de concreto.

Figura 6. Proporciones de la mezcla (%)

Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

La figura 7 muestra presencia de huecos, debido a la acumulación de caucho alrededor de los agregados. Se ha observado que el ancho de los vacíos aumenta con la inclusión de caucho en la mezcla de hormigón. Además, debido a la textura suave del caucho, la fuerza de esta interfaz se reduce aún más. Esta lleva a una propagación más fácil de grietas en la carga. Ha sido observado a partir del análisis de microscopio óptico que las micro-grietas son vistas emergentemente donde el caucho de miga estaba presente como se muestra en Fig. 7, que produce una disminución de la resistencia a la flexión. El aumento de absorción de agua se debe a la naturaleza fina del caucho que resulta en la generación de grietas y vacíos como se muestra en la Fig. 7. Las micro-grietas también desempeñan un papel importante en la penetración del agua, ya que proporciona un continuo camino para que el agua penetre dentro del concreto.

Figura 7. Microscopio óptico del concreto con caucho

Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete

La segunda técnica que aplicar es el uso del clinker de aceite de palma (POC) residuo de la incineración de sus subproductos de la industria de la palma aceitera.

Figura 8. Comparación visual de POC molido con la arena

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

Para hacer posible este reemplazo se analizaron y compararon las propiedades, tanto físicas como químicas de ambos materiales, se encontró que la porosidad del POC es mucho mayor al de la arena, es decir que el porcentaje de absorción del POC es de 10 ± 5 % a comparación del 1.59% de la arena, por ende se debe utilizar un aditivo superplastificante, recordando que una de las principales propiedades de este aditivo es la reducción del agua (12%). La investigación se centró en diferentes cantidades de reemplazo de POC (0%, 12,5%, 25%, 37,5%, 50%, 62,5%, 75%, 87,5%, 100%), y se llegó a los siguientes resultados:

Figura 9. Comparación de esfuerzo de compresión y tracción en el concreto con POC

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

Todas las mezclas están muy por encima del rango indicando las propiedades satisfactorias del POC para su inclusión como agregado para la mezcla de concreto. Como se muestra en la Fig.10 los porcentajes que produjeron mayor rendimiento de resistencia son el 12.5%, 25% y 37.5%.

Figura 10. Prueba de velocidad ultrasónica para comprobar la densidad del concreto.

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

La Fig. 11 muestra el efecto del reemplazo fino de POC sobre la resistencia a la flexión de las muestras de mortero. La resistencia a la flexión de vigas de mortero de 40 mm x 40 mm x 160 mm con soportes inferiores a una distancia de 100 mm se determinó de acuerdo con ASTM C348 (2014). Como se observa en la figura, en general, un aumento en el nivel de reemplazo fino de POC reduce la resistencia a la flexión más allá del nivel de reemplazo del 50%.

Figura 11. La resistencia a flexión de las vigas de concreto se determinó según la norma ASTM C348

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

Figura 12. Prueba de absorción de agua

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

Hipótesis

Se disminuirá la extracción de recursos naturales no renovables; reemplazando parcialmente la arena por agregados reciclados en la elaboración del concreto sin comprometer las propiedades técnicas; a su vez se disminuirá la emisión de CO₂ de esta mezcla con la adición de POC y caucho

Objetivo General

Diseñar una mezcla de concreto, reemplazando parcialmente los agregados naturales por materiales reciclados que son altamente contaminantes para el medio ambiente, como lo son el caucho usado y el clinker de aceite de palma (POC) y obtener una mezcla con las mismas características técnicas que el concreto tradicional, pero con menos emisiones de CO₂.

Objetivos Específicos

- Adquirir el material reciclado; el POC y el caucho y darle la forma necesaria para la realización de la investigación.
- Elaborar el diseño de mezcla, del concreto tradicional, con reemplazo parcial de POC con 10%, 12.5%, 15%; de caucho con 3%, 5% y 7%; y de caucho y POC 2.5%-10%, 2.5%-12.5%, 2.5%-15% correspondientemente.
- Obtener los resultados de los ensayos y pruebas del concreto tradicional y de los que tienen reemplazo parcial de agregado fino en estado fresco (temperatura, slump, contenido de aire) y en estado endurecido (compresión, tracción y flexión).
- Realizar un estudio comparativo de las propiedades técnicas de las 10 tipologías de concreto obtenidas.
- Realizar un estudio económico comparativo y determinar en cuanto se podría reducir las emisiones de gases contaminantes utilizando los materiales reciclados en reemplazo parcial a la arena.

Descripción del Contenido

El trabajo de investigación se divide en seis capítulos.

El primer capítulo se presenta la introducción del tema, en donde se menciona los antecedentes de la realidad problemática, justificación e importancia del problema; también desarrollamos nuestros objetivos generales y específicos.

El segundo capítulo muestra el marco teórico, donde explicaremos conceptos sostenibles y ecoamigables. Así como también los métodos, técnicas y análisis de datos que pondremos en práctica para la realización de nuestra investigación.

En el tercer capítulo presentaremos la metodología aplicada en la investigación; donde serán desarrollados el nivel, diseño y procedimiento aplicado para la realización de la presente tesis.

El cuarto capítulo muestra el diseño de mezcla de concreto de las diferentes tipologías estudiadas y ensayadas con sus respectivos resultados en estado fresco; como temperatura, slump y porcentaje de aire; y en estado endurecido, como resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión. A su vez, se realizará un análisis comparativo de los resultados todas las tipologías elaboradas, como el desempeño de las mezclas ante la aplicación de fuerzas y medir su resistencia, ver la reducción del coste, la optimización de recursos, calidad de las mezclas y el impacto ambiental que estas generan.

El quinto capítulo comprende las conclusiones del trabajo realizado. Contiene el reporte y análisis de las mezclas, y concluirá con la mejor tipología de concreto que obtuvo mejores resultados frente al concreto tradicional.

Finalmente el sexto capítulo brindaremos las recomendaciones y formas correctas de la preparación y el correcto uso de las nuevas tipologías de las mezclas.

MARCO TEÓRICO

1.1 Huella de carbono

Las emisiones de GEI, principalmente CO₂, CH₄, provocan cambios en la composición de la atmósfera terrestre alterando el flujo natural de radiación infrarroja absorbida por la superficie y provocando un incremento en la temperatura del planeta.

Figura 13. Tipo de Emisiones

GHG Protocol

1.2 Impacto Ambiental

El impacto ambiental es el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente, este puede ser negativo o positivo. Las acciones de las personas sobre el medio ambiente siempre provocarán efectos colaterales sobre éste. La preocupación por los impactos ambientales abarca varios tipos de acciones, como la contaminación de los mares con petróleo, los desechos de la energía radioactiva o desechos radioactivos/nucleares, la contaminación auditiva, la emisión de gases nocivos, o la pérdida de superficie de hábitats naturales, entre otros.

1.3 Ecoamigable

La intención se enfoca en no crear daño al medio ambiente, y prevenir que el mayor daño posible se produzca al medio ambiente a través de sus interacciones con él.

1.4 El concreto

Se denomina concreto a la mezcla de cemento, arena gruesa, piedra y agua, que se endurece conforme avanza la reacción química del agua con el cemento. La cantidad de cada material en la mezcla depende de la resistencia que se indique en los planos de estructuras. Siempre la resistencia de las columnas y de los techos debe ser superior a la resistencia de cimientos y falsos pisos.

1.5 Agregados reciclados

Los agregados reciclados brindan una alternativa a la construcción de nuevas estructuras con la utilización de materiales reciclados o de segundo uso en su vida útil.

Figura 14. Procesamiento de agregados reciclados

Fuente: Elaboración Propia

1.6 El caucho

El caucho es un material que se obtiene a partir de las secreciones de tipo lechosa que son producidas por el árbol de caucho. La resina que se obtiene de forma natural del árbol se conoce con el nombre de látex, luego de esto, este producto es tratado con diversos químicos, los que posteriormente van a dar paso a la fabricación del látex, los usos de este material pueden ser muy variados, sin embargo la aplicación que mayor relevancia tiene es en la fabricación de neumáticos.

Figura 15. Caucho y derivados

Concepto Definición,de

1.7 El POC

El POC, sus siglas en ingles “*palm oil clinker*” o mejor conocido como clinker de aceite de palma. El POC es un subproducto de la incineración de la fibra del mesocarpio del fruto de la palma aceitera que es utilizado para las calderas de la misma fábrica. Es un material ligero, sólido y poroso, que se puede emplear como un agregado de peso ligero, como la arena.

Figura 16. Pedazos de POC

Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction

1.8 Método ACI

El método americano ACI es el diseño de las proporciones de una mezcla de concreto, dicho método es el más conocido y usado. Este se fundamenta en el principio básico de la relación agua / cemento (a/c) desarrollado por Abrams. Dicha metodología se basa en seguir de forma ordenada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen para 1 m³ de concreto.

1.9 Norma Técnica Peruana

Las Normas Técnicas Peruanas son documentos que establecen las especificaciones de calidad de los productos, procesos y servicios. Existen también NTP's sobre terminología, métodos de ensayo, muestreo, envase y rotulado que se complementan entre sí. Su aplicación es de carácter voluntario.

METODOLOGÍA

2.1 Nivel de Investigación

La técnica que se investigará es explorativa; ya que, trata de la mezcla de 2 elementos, el caucho de neumático reciclado y el POC ; el caucho aporta beneficios estructurales de flexión y sustituye a algunos elementos como la arcilla expandida para aligerar el peso del concreto, mientras que el uso del POC aporta todo tipo de beneficios estructurales como: resistencia a los sulfatos, densidad, alta resistencia al esfuerzo de compresión y tracción. La investigación se basará principalmente en determinar las cantidades exactas de adición de ambos elementos en conjunto.

2.2 Diseño de Investigación

Nuestra investigación será experimental, por un lado, la adición del POC que aporta mejoras mecánicas significativas al concreto y, por otro lado, el uso del caucho para obtener un concreto con menor emisión de CO₂. Adicionalmente, a esto se realizará otra prueba en un concreto con la adición de POC y caucho con el fin de mantener las propiedades mecánicas y reducir el uso del agregado fino al implementar ambas técnicas; que son eco amigables, de esta manera se podrá obtener resultados que ayuden a la reducción de las emisiones de CO₂.

2.3 Procedimiento

Los pasos seguidos para el desarrollo de la investigación son los siguientes:

- El primer paso fue la adquisición de los materiales (el caucho y el POC) y darle la forma necesaria para el uso en la mezcla de concreto.
- El segundo paso fueron las pruebas de granulometría de los materiales reciclados; y de los agregados regulares que se utilizan en la preparación del concreto (arena gruesa y piedra chancada).
- El tercer paso fue el diseño de las distintas mezclas con distintos porcentajes de reemplazo de los materiales reciclados y el vaciado de las probetas de dichas mezclas.
- El cuarto paso fueron las pruebas de resistencia de las probetas elaboradas, recolección de datos y una retroalimentación con mejora continua de las distintas

mezclas realizadas; para así rehacer las mezclas y obtener los porcentajes de reemplazos adecuados.

- El quinto paso fue el estudio comparativo técnico, económico y ambiental (huella de carbono) del concreto tradicional con el concreto con reemplazo parcial de agregado fino por materiales reciclados.

RESULTADOS

3.1 Materiales reciclados

POC:

Para la obtención del POC tuvimos que realizar un viaje hacia la ciudad de Pucallpa a visitar la fábrica de palma aceitera OLAMSA S.A.. El POC es un desecho del proceso de producción del aceite de palma, que como ya se explicó en el marco teórico, es un sub-desecho de las calderas de la fábrica y salen con una granulometría adecuada para el reemplazo directo en la preparación del concreto, exceptuando el hecho de que el POC debe de estar en una condición saturada para evitar absorción de agua; ya que este material es muy poroso. También, se debe de tener cuidado con las partículas orgánicas que pueda tener; este trabajo se eliminaría si se extrajera el producto ni bien se apaguen las calderas y de esta manera no tendrían contacto con otros desechos o residuos ajenos al subproducto.

Figura 17. POC extraído de las calderas

Foto tomada en la fábrica de OLAMSA

Caucho:

Por otro lado, la obtención del caucho de neumático fue mucho más simple, se adquirió de una fábrica de llantas, dicho material proviene de las raspadura de las bandas de rodamiento; el caucho debe de pasar por un proceso de molienda para poder tener la granulometría adecuada para la utilización de este en la mezcla de concreto, obtuvimos dos tipos de tamaño del caucho; el caucho cribado (19 mm hasta 0.15 mm) y el caucho granulado (4.75 mm a menos de 0.75 mm).

Figura 18. Caucho granulado

Fuente: Propia

Figura 19. Caucho cribado

Fuente: Propia

3.2 Diseño de mezcla según Comité 211 del ACI

3.2.1 Ensayo de materiales (agregados)

3.2.1.1 Granulometría del agregado fino

En el agregado fino, se determina el módulo de fineza (MF), el cual nos puede indicar que tan grandes o pequeñas pueden ser las partículas del agregado. Mientras mayor sea el MF el agregado será más grande o si el MF es menor el tamaño de las partículas del agregado serán más pequeñas.

Tabla 4
Análisis granulométrico del agregado fino

Malla	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
3/8"	0	0	0	100
Nº 4	0.3	0.04	0.04	99.96
Nº 8	60.5	7.17	7.2	92.8
Nº 16	289.2	34.26	41.46	58.54
Nº 30	334.3	39.6	81.07	18.93
Nº 50	122.9	14.56	95.63	4.37
Nº 100	32.5	3.85	99.48	0.52
Fondo	4.4	0.52	100	0
Total	844.1			

El módulo de fineza está dado por la sumatoria de los porcentajes acumulados retenidos de los tamices 3/8", Nº4, Nº8, Nº16, Nº30, Nº50 y Nº100.

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

En el agregado fino (arena) el módulo de fineza resultó 3.25, lo cual nos indica que las partículas del agregado son grandes.

3.2.1.2 Granulometría del POC

Para el POC se realizó el análisis granulométrico para determinar el módulo de fineza ya que se trata de un agregado fino.

Tabla 5
Análisis granulométrico de POC

Malla	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
3/8"	1.8	0.42	0.42	99.58
Nº 4	39.5	9.32	9.74	90.26
Nº 8	79.7	18.8	28.54	71.46
Nº 16	142.9	33.71	62.26	37.74
Nº 30	88.4	20.85	83.11	16.89
Nº 50	51.6	12.17	95.28	4.72
Nº 100	16.5	3.89	99.17	0.83
Fondo	3.5	0.83	100	0
Total	423.9			

El módulo de fineza está dado por la sumatoria de los porcentajes acumulados retenidos de los tamices 3/8", Nº4, Nº8, Nº16, Nº30, Nº50 y Nº100.

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

En el agregado fino (POC) el módulo de fineza resultó 3.79, lo cual nos indica que las partículas del agregado son grandes.

3.2.1.3 Granulometría del agregado grueso

Tabla 6
Análisis granulométrico del agregado grueso

Malla	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
2"	0	0	0	100
1 1/2"	0	0	0	100
1"	0	0	0	100
3/4"	98.6	23.26	23.26	76.74
1/2"	1233.8	291.06	314.32	-214.32
3/8"	194.5	45.88	360.2	-260.2
Nº 4	460.6	108.66	468.86	-368.86
Fondo	12.5	2.95	471.81	-371.81
Total	2000			

El módulo de fineza para el agregado grueso (MG) está dado por la sumatoria de los porcentajes acumulados retenidos de los tamices 3, 1 1/2", 3/4", 3/8", Nº4, Nº8, Nº16, Nº30, Nº50 y Nº100.

$$MG = \sum \% Ret. Acum. \frac{(3", 1 \frac{1}{2}", 3/4", 3/8", N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ}16, N^{\circ}30, N^{\circ}50, N^{\circ}100)}{100}$$

En el agregado grueso el módulo de fineza resultó 8.52, lo cual nos indica que las partículas del agregado son bastantes grandes.

3.2.1.4 Peso específico del agregado fino

El peso específico es la relación del peso del material entre el volumen que ocupa sin incluir sus vacíos, en los ensayos realizados determinamos el peso específico de masa y el porcentaje de absorción de los agregados tanto fino como grueso.

Tabla 7
Análisis de peso específico del agregado fino

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Peso fiola	-	167.9	gr
Peso de la arena superficialmente seca	-	500	gr
Peso de la arena superficialmente seca + Peso fiola	-	667.6	gr
Peso de la arena superficialmente seca + Peso fiola + Peso del agua	-	981.4	gr
Peso del agua	W	313.8	gr
Peso de la arena seca	A	494.9	gr
Volumen de la fiola	V	500	ml

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso específico.

$$\bullet \quad P.E. = \left(\frac{A}{V-W} \right) \longrightarrow P.E. = \left(\frac{494.9}{500 - 313.8} \right)$$

El peso específico del agregado fino es 2657.89.

$$\bullet \quad \%abs = \left(\frac{500-A}{A} \times 100 \right) \longrightarrow \%abs = \left(\frac{500 - 494.9}{494.9} \times 100 \right)$$

El porcentaje de absorción es de 1.03%.

3.2.1.5 Peso específico del agregado grueso

Para el peso específico del grueso se determinó el peso específico de masa y el porcentaje de absorción.

Tabla 8
Análisis de peso específico de agregado grueso

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra saturada superficialmente seca	B	2009.3	gr
Peso de la muestra saturada superficialmente seca dentro del agua + canastilla		2886.1	gr
Peso de la canastilla dentro del agua		1613.8	gr
Peso de la muestra saturada dentro del agua	C	1272.3	gr
Peso de la muestra seca	A	1991.6	gr

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso específico.

$$\bullet \quad P.E. = \left(\frac{A}{V-W} \right) \longrightarrow P.E. = \left(\frac{1991.6}{2009.3 - 1272.3} \right)$$

El peso específico del agregado fino es 2702.31.

$$\bullet \quad \%abs = \left(\frac{B-A}{A} \times 100 \right) \longrightarrow \%abs = \left(\frac{2009.3 - 1991.6}{1991.6} \times 100 \right)$$

El porcentaje de absorción es de 0.89%.

3.2.1.6 Peso unitario del agregado fino

El ensayo para la determinación del peso unitario se expresa en kg/m³ y es la cantidad de agregado o material que entra en 1m³ incluyendo sus vacíos. Para fines de diseño de mezcla, el peso unitario debe estar en condición seca.

Tabla 9
Análisis de peso unitario suelto del agregado fino

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra suelta + recipiente	-	5852.1	gr	5.85	kg
Peso del recipiente	-	1609.6	gr	1.61	kg
Peso de la muestra suelta	Ws	4242.5	gr	4.24	kg
Volumen del recipiente	V	2703.7	cm ³	0.0027	m ³
Peso unitario suelto	PUS	-	gr/cm ³	1569.44	kg/m ³

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso unitario suelto.

$$\bullet \quad PUS = \frac{Ws}{V} \quad \longrightarrow \quad PUS = \frac{4.24}{0.0027}$$

El peso unitario suelto del agregado fino es de 1596.44 kg/m³.

Tabla 10
Análisis de peso unitario compactado de agregado fino

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra compac + recipiente		6488.7	gr	6.49	kg
Peso del recipiente		1609.6	gr	1.61	kg
Peso de la muestra compactada	Ws	4879.1	gr	4.88	kg
Volumen del recipiente	V	2703.7	cm ³	0.0027	m ³
Peso unitario compactada	PUC	-	gr/cm ³	1804.93	kg/m ³

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso unitario compactado.

$$\bullet \quad PUC = \frac{Wc}{V} \quad \longrightarrow \quad PUC = \frac{4.88}{0.0027}$$

El peso unitario compactado del agregado fino es de 1804.93 kg/m³

3.2.1.7 Peso unitario del agregado grueso

Tabla 11

Análisis de peso unitario suelto del agregado grueso

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra suelta + recipiente		27023.4	gr	27.02	kg
Peso del recipiente		5777.8	gr	5.78	kg
Peso de la muestra suelta	Ws	21245.6	gr	21.25	kg
Volumen del recipiente	V	13975.8	cm ³	0.0014	m ³
Peso unitario suelto	PUS	1.52017058	gr/cm ³	1520.17	kg/m ³

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso unitario suelto.

$$\bullet \quad PUS = \frac{Ws}{V} \quad \longrightarrow \quad PUS = \frac{21.25}{0.0014}$$

El peso unitario suelto del agregado grueso es de 1520.17 kg/m³.

Tabla 12

Análisis de peso unitario compactado del agregado grueso

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra compac. + recipiente		28393	gr	28.39	kg
Peso del recipiente		5777.8	gr	5.78	kg
Peso de la muestra compactada	Ws	22615.2	gr	22.62	kg
Volumen del recipiente	V	13975.8	cm ³	0.0014	m ³
Peso unitario compactada	PUC	-	gr/cm ³	1618.17	kg/m ³

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de peso unitario compactado.

$$\bullet \quad PUC = \frac{Wc}{V} \quad \longrightarrow \quad PUC = \frac{22.62}{0.0014}$$

El peso unitario compactado del agregado grueso es de 1618.17 kg/m³.

3.2.1.8 Contenido de humedad del agregado fino

Tabla 13

Contenido de humedad del agregado fino

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra húmeda	Ph	500	gr
Peso de la muestra seca	Ps	497.3	gr
Contenido de agua	Ph-Ps	2.7	gr
Contenido de humedad	h	0.54	%

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de contenido de humedad.

- $$h = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps} \right) \times 100 \quad \longrightarrow \quad h = \left(\frac{2.7}{497.3} \right) \times 100$$

El contenido de humedad del agregado fino es de 0.54%.

3.2.1.9 Contenido de humedad del agregado grueso

Tabla 14

Contenido de humedad del agregado grueso

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra húmeda	Ph	2000	gr
Peso de la muestra seca	Ps	1996.2	gr
Contenido de agua	Ph-Ps	3.8	gr
Contenido de humedad	h	0.19	%

Nota: Tabla de procedimiento para cálculo de contenido de humedad.

- $$h = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps} \right) \times 100 \quad \longrightarrow \quad h = \left(\frac{3.8}{1996.2} \right) \times 100$$

El contenido de humedad del agregado fino es de 0.19%.

3.2.2 Diseño de mezcla base

Se diseñará dos mezclas base de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c=230 \text{ kg/cm}^2$ según el método ACI.

Tabla 15
Características del cemento a utilizar

Cemento Sol / Tipo I	
$f'c$	210 kg/cm^2
f_y	4200 kg/cm^2
P_e	3.15 gr/cm^3
slump	4" pulg
$P_e \text{ H}_2\text{O}$	1000 kg/m^3

Nota: Los valores del cuadro fueron obtenidos del mismo fabricante de Cemento Sol / Tipo I; excepto el slump, cuyo dato es elegido por nosotros.

Tabla 16
Resumen de las propiedades de los agregados

Agregados	Fino	Grueso
Perfil		angular
Peso unitario suelto (kg/m^3)	1569.44	1520.17
Peso unitario compactado (kg/m^3)	1804.93	1618.17
Peso específico (kg/m^3)	2657.89	2702.31
Modulo de fineza	3.25	8.52
TMN		3/4"
% abs	1.03	0.89
% w	0.54	0.19

Nota: En este cuadro se reunió todos los datos obtenidos de los ensayos requeridos para el análisis de los agregados.

Con los datos previos de las tablas 15 y 16 se procede al calculo de proporciones para el diseño del concreto tradicional 210 kg/cm^2 y 230 kg/cm^2 , siguiendo paso a paso el método de ACI.

- Paso 1: Calculo de $f'cr$, resistencia promedio requerida (para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$)

Tabla 17
Fórmula para hallar la F'_{cr}

F'_c	F'_{cr}
Menos de 210	$F'_c + 70$
210 – 350	$F'_c + 84$
>350	$F'_c + 98$

Fuente : Comité 211 del ACI

$$F'_{cr} = 210 + 84 = 284 \frac{kg}{cm^2}$$

- La resistencia promedio requerida para un f'_c 210 es de 284 kg/cm^2
- Paso 2: Cálculo de contenido de aire

Tabla 18
Contenido de aire atrapado por TMN de agregado grueso

Tamaño Máximo nominal del agregado grueso	Aire atrapado (%)
3/8"	3
1/2"	2.5
3/4"	2
1"	1.5
1 1/2"	1
2"	0.5
3"	0.3
4"	0.2

Fuente : Comité 211 del ACI

- El porcentaje de aire atrapado es de 2% según el tamaño nominal del agregado grueso.
- Paso 3: Cálculo de contenido de agua en la mezcla

Tabla 19

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregado grueso

AGUA, en kg/m ³ de concreto, para los tamaños máximos nominales de agregado grueso y asentamientos indicados								
ASENTAMIENTO (centímetros)	9.5 mm 3/8"	12.7 mm 1/2"	19.00 mm 3/4"	25.4 mm 1"	38.0 mm 1 1/2"	50.8 mm 2"	76.0 mm 3"	152.0 mm 6"
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10.0	228	216	205	103	181	160	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
CONCRETO CON AIRE INCORPORADO								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10.0	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0 a 17.5	216	205	197	184	174	166	154	---

Fuente : Comité 211 del ACI

- Por tabla se halló que para esta mezcla necesita 205 litros de agua por m³.
- Paso 4: Cálculo de relación agua/cemento por resistencia requerida

Tabla 20

Relación de agua/cemento por resistencia

f'cr (kg/cm ²)	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	

Fuente : Comité 211 del ACI

- Como no se tiene la resistencia requerida en la tabla 20, interpolamos para hallar la relación a/c (sin aire incorporado) = 0.559.

- Paso 5: Hallamos el contenido de cemento

$$\frac{205}{c} = 0.55$$

- Para la relación obtenida el contenido de cemento para 1 metro cúbico de concreto es de 371.003 kilogramos.

- Paso 6: Cálculo del agregado grueso

Tabla 21

Volumen grueso por unidad de volumen de concreto

Tamaño Máximo nominal del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen			
	concreto (b/bo), para diferentes módulos de fineza del agregado			
mm	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.7	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25.4	0.71	0.69	0.67	0.65
38	0.76	0.74	0.72	0.7
50.8	0.78	0.76	0.74	0.72
76	0.81	0.79	0.77	0.75
152	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente : Comité 211 del ACI

- El peso del agregado grueso para un metro cúbico de concreto es de 970.902 kilogramos.

- Paso 7: Calculamos el volumen absoluto de la mezcla

Tabla 22

Dosificaciones previas halladas por el método de ACI

Aire	2.00%
Agua	205 lt.
Cemento	366.73 kg
Peso a. Grueso	972.75 kg

Nota: Estos datos que se encuentran en kilogramos, lo vamos a pasar a metros cúbicos para poder hallar el volumen del agregado fino, y por ende, el peso de la arena.

$$\sum \text{materiales} = 0.70 \text{ m}^3$$

- Paso 8: Cálculo del agregado fino

$$\text{Vol. a. fino} = 1.0\text{m}^3 - 0.70\text{m}^3 = 0.30\text{m}^3$$

$$\text{Peso a. fino} = 0.30\text{m}^3 \times 2657.89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- El peso del agregado fino es de 797.367 kilogramos.
- Paso 9: Presentación del estado fresco del concreto por metro cúbico

Tabla 23

Dosificación de materiales sin corrección por humedad

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Aire	2	%
Agua	215.697	lt.
Cemento	366.73	kg.
Agregado grueso	972.902	kg.
Agregado fino	797.367	kg.

Fuente: Propia

- Paso 10: Corrección de agua por humedad de los agregados

$$\text{Peso seco} \times \left(\frac{w\%}{100} + 1 \right)$$

Tabla 24

Peso de agregados de mezcla de concreto corregidos por humedad

	Peso de agregado (sin corrección) (kg.)	%w (absorción)	Peso de agregado (corregido) (kg.)
Agregado Fino	797.367	0.54	811.673
Agregado Grueso	972.902	0.19	972.75

Fuente: Propia

Para hallar el aporte de agua de los agregados se utilizó las siguientes fórmulas.

$$\text{agregado fino} = \frac{(0.54 - 1.03) \times 797.367}{100}$$

$$\text{agregado fino} = -3.74 \text{ lt}$$

$$\text{agregado grueso} = \frac{(0.19 - 0.89) \times 972.902}{100}$$

$$\text{agregado grueso} = -6.79 \text{ lt.}$$

$$\sum \text{aporte de agua por agregados} = -10.697 \text{ lt}$$

$$\text{agua} = 205 \text{ lt.} - (-10.697 \text{ lt.})$$

- Por lo tanto el agua efectiva de la mezcla es de 213.56 litros.

- Paso 11: Hallar la dosificación del Plastificante

El aditivo que se utilizó fue el Sika Cem Plastificante, su dosificación es de 250 ml. por cada bolsa de cemento, es decir:

$$bolsa\ de\ cemento = \frac{367.003\ kg}{42.5\ kg} = 8.635\ bolsas.$$

$$SP = 8.635\ bolsas \times 250\ ml = 2,158.5\ ml$$

$$densidad = 1.20 \frac{kg}{lt.}$$

$$SP = 2,158.5\ ml \times 1.20 \frac{kg}{lt.} = 2,589\ kg$$

- Por lo tanto, se utilizó 2,158.5 ml de plastificante.

Tabla 25

Proporción de mezcla de concreto tradicional $f'c = 210\ kg/cm^2$

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Aire	2	%
Agua	213.56	lt.
Cemento	366.73	kg.
Agregado grueso	972.75	kg.
Agregado fino	799.78	kg.
Plastificante	2.16	lt.

Nota: La proporción se realizó con el manual de Comité 211 del ACI.

Nota: La dosificación del Plastificante fue hallada por recomendación del productor y los litros usados se restaron al contenido de agua efectiva de la mezcla.

- Se procede a reemplazar el porcentaje de todas las proporciones realizadas, tanto como de POC, como de caucho del agregado fino. ($f'c = 210\ kg/cm^2$)

Tabla 26

Proporciones de las mezclas con porcentaje parcial de los agregados reciclados para un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Tipología		POC (kg/m3)	Caucho (kg/m3)	Agregado fino (kg/m3)	Agua (lt./m3)	SP (lt./m3)	Cemento Port. Tipo I (kg/m3)	Agregado grueso (kg/m3)	Aire (%)
CT	0%	-	-	799.78					
P-1	10%	79.98	-	719.80					
P-2	12.50%	99.97	-	619.83					
P-3	15%	119.97	-	499.86					
C-1	3%	-	2.40	797.38	213.56	2.16	366.73	972.75	2
C-2	5%	-	39.99	759.79					
C-3	7%	-	55.98	743.80					
PC-1	10% - 2.5%	79.98	19.99	699.81					
PC-2	12.5% - 2.5%	99.97	19.99	679.81					
PC-3	15% -- 2.5%	119.97	19.99	659.82					

Nota: El POC al ser un material poroso, se tuvo que dejar en estado de superficie seca saturada (SSS), para que de esta manera no absorba agua efectiva de la mezcla.

Tabla 27

Proporción de mezcla de concreto tradicional $f'c \text{ } 230 \text{ kg/cm}^2$

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Aire	2	%
Agua	215.697	lt.
Cemento	386.79	kg.
Agregado grueso	972.75	kg.
Agregado fino	782.965	kg.
Plastificante	2.275	lt.

Nota: La proporción se realizó con el manual de Comité 211 del ACI.

Nota: La dosificación del Plastificante fue hallada por recomendación del productor y los litros usados se restaron al contenido de agua efectiva de la mezcla.

- Se procede a reemplazar el porcentaje de todas las proporciones realizadas, tanto como de POC, como de caucho del agregado fino. ($f'c = 230 \text{ kg/cm}^2$)

Tabla 28

Proporciones de las mezclas con porcentaje parcial de los agregados reciclados para un $f'c = 230 \text{ kg/cm}^2$

Tipología		POC (kg/m ³)	Caucho (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agua (lt./m ³)	SP (lt./m ³)	Cemento Port. Tipo I (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	Aire (%)
CT	0%	-	-	782.97					
P-1	10%	78.30	-	704.67					
P-2	12.50%	97.87	-	606.80					
P-3	15%	117.44	-	489.35					
C-1	3%	-	2.35	780.62	215.69	2.28	386.79	972.75	2
C-2	5%	-	39.15	743.82					
C-3	7%	-	54.81	728.16					
PC-1	10% - 2.5%	78.30	19.99	701.49					
PC-2	12.5% - 2.5%	97.87	19.99	681.92					
PC-3	15%-- 2.5%	117.44	19.99	662.34					

Nota: El POC al ser un material poroso, se tuvo que dejar en estado de superficie seca saturada (SSS), para que de esta manera no absorba agua efectiva de la mezcla.

3.3 Resultados en estado fresco

3.3.1 Temperatura

Para la medición e interpretación de la temperatura de las mezclas de concreto realizadas se utilizó la norma NTP 339.184 / ASTM C 1064 como referencia; obtuvimos temperaturas que se encuentran en el rango 18° a 32°.

Los resultados entre las tipologías de nuestra investigación son muy similares entre sí, como se muestra en la Tabla 36; esto quiere decir que los materiales adicionales que utilizamos no tienen una reacción directa con la temperatura.

Tabla 29

Resultados de las temperaturas obtenidas para las tipologías

Tipología de mezcla	Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	
		210	230
		Temperatura Grados Celcius (°)	
CT	-	19.80	20.20
P-1	10%	19.89	20.12
P-2	12.50%	19.78	20.01
P-3	15%	19.75	20.2
C-1	3%	20.24	20.21
C-2	5%	20.23	20.22
C-3	7%	20.40	20.18
PC-1	2.5% - 10%	19.20	20.15
PC.2	2.5% - 12.5%	19.84	19.97
PC-3	2.5% - 15%	20.00	20.17

Fuente: Propia

3.3.2 Medición de Slump

Para la medición del asentamiento se utilizó la norma NTP 339.035:2009 / ASTM C 143:2008. El slump de diseño fue de 4" pero nosotros utilizamos un SP (superplastificante) por eso el slump que obtuvimos fue mucho mayor, entre un rango de 6.50" a 10.04". También se midió el slump en tres tiempos (0, 15 y 30 minutos), para ver la trabajabilidad de la mezcla en el tiempo. La razón por la cual se utilizó el SP fue por el POC; ya que, este material al ser poroso absorbe el agua efectiva de la mezcla y para evitar agregar más agua y que la resistencia se vea afectada se decidió utilizar un SP y el POC en estado SSS.

A continuación, se presenta el cuadro de slump de las mezclas realizadas

Tabla 30

Resultados de asentamientos de las tipologías de concreto

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Slump de diseño (pulg.)	Tipología de mezcla	Porcentaje de reemplazo	0' (pulg.)	15' (pulg.)	30' (pulg.)
210	4"	CT	-	10.04	9.19	7.97
		P-1	10%	9.50	8.14	7.18
		P-2	12.50%	9.28	7.84	7.12
		P-3	15%	9.07	7.82	6.78
		C-1	3%	9.90	9.13	7.99
		C-2	5%	9.61	9.10	7.93
		C-3	7%	9.49	9.05	7.61
		PC-1	2.5% - 10%	9.46	7.87	6.87
		PC.2	2.5% - 12.5%	9.09	7.46	6.83
		PC-3	2.5% - 15%	8.94	7.45	6.50
		CT	-	9.98	8.79	7.60
		P-1	10%	9.44	8.01	7.09
230	4"	P-2	12.50%	9.10	7.79	7.06
		P-3	15%	8.80	7.57	6.58
		C-1	3%	9.80	8.67	7.51
		C-2	5%	9.77	8.73	7.44
		C-3	7%	9.69	8.57	7.20
		PC-1	2.5% - 10%	9.18	7.92	6.74
		PC.2	2.5% - 12.5%	8.88	7.44	6.74
		PC-3	2.5% - 15%	8.48	7.21	6.36

Fuente: Propia

3.3.3 Contenido de aire

Para la medición de porcentaje de aire se utilizó la norma NTP 339.083:2003 / ASTM C 231:1997. Según norma el porcentaje de aire de la mezcla debe ser la de diseño según el tamaño de agregado, en nuestro caso el porcentaje de aire según nuestro agregado es de 2%, este puede tener una variación de $\pm 0.5\%$; y los resultados obtenidos se encuentran dentro de ese rango (1.5% - 2.5%).

A continuación, se presenta el cuadro de porcentaje de aire de las mezclas realizadas.

Tabla 31
Resultados de medición de porcentaje de aire

Porcentaje de aire de diseño	Tipología de mezcla	Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm2)	
			210	230
			Porcentaje de aire real	
2%	CT	-	2.00%	2.10%
	P-1	10%	1.94%	2.09%
	P-2	12.50%	2.00%	2.12%
	P-3	15%	2.02%	2.15%
	C-1	3%	1.95%	1.97%
	C-2	5%	2.11%	2.00%
	C-3	7%	2.23%	1.98%
	PC-1	2.5% - 10%	1.95%	2.00%
	PC.2	2.5% - 12.5%	2.00%	2.00%
	PC-3	2.5% - 15%	2.05%	1.96%

Fuente: Propia

3.4 Resultados de ensayo de resistencia

3.4.1 Ensayo de Compresión en probetas cilíndricas de concreto – ASTM C39 / NTP 339.034

Para nuestro ensayo se utilizó probetas cilíndricas de 4 x 8 pulgadas (10 x 20 cm).

Figura 20. Muestra de probetas despues de 28 días de curado

Fuente: Propia

La prueba se realizó a 28 y 30 días de hacer el desmoldado de las probetas. Se ensayaron 8 probetas de la mezcla de concreto tradicional; 20 probetas de concreto con adición de POC, 18 probetas con adición de caucho y 18 probetas con adición de la combinación de POC y caucho.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta entre el área promedio de la sección.

3.4.1.1 Concreto Tradicional

Para el concreto tradicional tuvimos que hacer 3 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de f'_c 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con las mezclas con reemplazo parcial de agregado fino.

Figura 21. Prueba de compresión a probeta de concreto tradicional

Fuente: Propia

Tabla 32

Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
280	Probeta I	6	10.05	20.05	79.327	33022	14859.94	187.325
	Probeta II	6	10.1	19.98	80.118	35970	16186.72	202.035
210	Probeta III	28	10	20	78.540	56156	25270	321.748
	Probeta IV	28	9.98	20.1	78.226	58022	26110	333.777
	Probeta V	28	9.99	19.98	78.383	56000	25200	321.499
230	Probeta VI	30	10.1	20.1	80.118	61244	27560	343.991
	Probeta VII	30	10	20.1	78.540	62667	28200	359.054
	Probeta VIII	30	10	19.99	78.540	61978	27890	355.107

Fuente: Propia

- Como ya mencionamos que solo utilizaremos el f'_c de 210 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio fue de 325.67 kg/cm² a los 28 días después de iniciado el curado.

3.4.1.2 Concreto con adición de POC

Para el concreto con reemplazo parcial de POC tuvimos que hacer 3 dosificaciones en distintos porcentajes de reemplazo con la mezcla base de f'_c 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las

otras mezclas. También, se realizaron pruebas con el concreto de f'_c 230 kg/cm², como otra base distinta para poder tener referencias sobre el comportamiento de las probetas de ensayo.

Como referencia de la mezcla base, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el POC tuvimos un 10%, 12.5% y 15% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de compresión.

Figura 22. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de POC

Fuente: Propia

Tabla 33

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)
210	Probeta I	28	9.95	19.98	77.756	58222	26200	336.950
	Probeta II	28	10.1	19.98	80.118	57244	25760	321.524
	Probeta III	28	10	20	78.540	56978	25640	326.459
230	Probeta IV	30	10.1	19.9	80.118	61467	27660	345.239
	Probeta V	30	10	20	78.540	61756	27790	353.833
	Probeta VI	30	9.97	20.12	78.069	62644	28190	361.090

Fuente: Propia

Tabla 34

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
280	Probeta I	6	10.02	20.2	78.854	26222	11800	149.643
	Probeta II	6	9.98	20.3	78.226	28667	12900	164.907
210	Probeta III	28	9.95	19.98	77.756	58756	26440	340.036
	Probeta IV	28	9.94	20.1	77.600	58911	26510	341.623
	Probeta V	28	10	20.2	78.540	58444	26300	334.862
230	Probeta VI	30	10	20	78.540	63822	28720	365.674
	Probeta VII	30	10.1	19.99	80.118	64933	29220	364.710
	Probeta VIII	30	10	19.97	78.540	64422	28990	369.112

Fuente: Propia

Tabla 35

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	10	19.97	78.540	56000	25200	320.856
	Probeta II	28	10	19.97	78.540	56844	25580	325.695
	Probeta III	28	10.1	20	80.118	55511	24980	311.788
230	Probeta IV	30	9.9	20.1	76.977	61333	27600	358.549
	Probeta V	30	9.95	20.15	77.756	60267	27120	348.782
	Probeta VI	30	10	19.97	78.540	60711	27320	347.849

Fuente: Propia

- Los resultados de resistencia promedio para f'_c de 210 kg/cm² y 230 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 36

Resultado de resistencias promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC para un f'_c de 210 y 230 kg/cm²

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
10%	210	328
12.50%	210	339
15%	210	319
10%	230	353
12.50%	230	366
15%	230	352

Fuente: Propia

3.4.1.3 Concreto con adición de caucho

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho tuvimos que hacer 2 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas.

De las tres relaciones de agua y cemento que diseñamos, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 3%, 5% y 7% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de compresión.

Figura 23. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de caucho

Fuente: Propia

Tabla 37

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	9.9	19.98	76.977	48778	21950	285.15
	Probeta II	28	9.95	20	77.756	47444	21350	274.58
	Probeta III	28	10	20.1	78.540	44822	20170	256.81
230	Probeta IV	30	10.1	20.15	80.118	53089	23890	298.18
	Probeta V	30	10	20	78.540	57044	25670	326.84
	Probeta VI	30	10	20	78.540	55289	24880	316.78

Fuente: Propia

Tabla 38

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	9.95	20.2	77.756	46489	20920	269.045
	Probeta II	28	9.99	20	78.383	47778	21500	274.295
	Probeta III	28	9.98	20	78.226	44956	20230	258.610
230	Probeta IV	30	10	20	78.540	49556	22300	283.932
	Probeta V	30	10.1	19.9	80.118	52111	23450	292.692
	Probeta VI	30	10	19.97	78.540	51111	23000	292.845

Fuente: Propia

Tabla 39

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	10	19.98	78.540	44422	19990	254.521
	Probeta II	28	10.1	20	80.118	46622	20980	261.862
	Probeta III	28	10	20	78.540	45689	20560	261.778
230	Probeta IV	30	10	20.1	78.540	46667	21000	267.380
	Probeta V	30	9.96	19.97	77.913	48000	21600	277.233
	Probeta VI	30	10	20	78.540	49778	22400	285.206

Fuente: Propia

- Los resultados de resistencia promedio para f'_c de 210 kg/cm² y 230 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 40

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC para un f'_c de 210 y 230 kg/cm².

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
3%	210	272
5%	210	267
7%	210	259
3%	230	314
5%	230	290
7%	230	277

Fuente: Propia

3.4.1.4 Concreto con adición de caucho y POC

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho y POC utilizamos la dosificación para una mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas.

Realizamos distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 2.5% de reemplazo parcial y para el POC un 10%, 12.5% y 15% del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de compresión.

Figura 24. Prueba de compresión a probeta con reemplazo parcial de caucho y POC

Fuente: Propia

Tabla 41

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	10	20	78.540	60667	27300	347.594
	Probeta II	28	10	19.97	78.540	59956	26980	343.520
	Probeta III	28	9.97	19.9	78.069	60222	27100	347.128
230	Probeta IV	30	10	20	78.540	62711	28220	359.308
	Probeta V	30	10.1	20.1	80.118	62000	27900	348.234
	Probeta VI	30	10	20.1	78.540	62444	28100	357.780

Fuente: Propia

Tabla 42

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	10	20.1	78.540	60667	27300	347.594
	Probeta II	28	9.92	20	77.288	62200	27990	362.151
	Probeta III	28	9.98	20	78.226	62667	28200	360.494
230	Probeta IV	30	10.1	20	80.118	64689	29110	363.337
	Probeta V	30	10	20.2	78.540	64222	28900	367.966
	Probeta VI	30	10	19.99	78.540	65933	29670	377.770

Fuente: Propia

Tabla 43

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de compresión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	9.9	20.1	76.977	58289	26230	340.752
	Probeta II	28	10.1	19.95	80.118	57733	25980	324.270
	Probeta III	28	10	19.97	78.540	59711	26870	342.119
230	Probeta IV	30	10	20.1	78.540	59978	26990	343.647
	Probeta V	30	9.97	20	78.069	61933	27870	356.991
	Probeta VI	30	9.99	20	78.383	58044	26120	333.236

Fuente: Propia

- Las resistencias promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 44

Resultado de resistencias promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC y caucho para un f'c de 210 y 230 kg/cm².

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
2.5% - 10%	210	346
2.5% - 12.5%	210	357
2.5% - 15%	210	336
2.5% - 10%	230	355
2.5% - 12.5%	230	370
2.5% - 15%	230	345

Fuente: Propia

3.4.2 Ensayo de Tracción por Compresión diametral Tracción Indirecta – ASTM C496 / NTP 339.084

Para el ensayo de tracción indirecta se utilizó probetas cilíndricas de 6 x 12 pulgadas (15 x 30 cm).

Figura 25. Muestra de probetas despues de 28 días de curado

Fuente: Propia

La prueba se realizó a 28 y 30 días de hacer el desmoldado de las probetas. Se ensayaron 8 probetas de la mezcla de concreto tradicional; 20 probetas de concreto con adición de POC, 18 probetas con adición de caucho y 18 probetas con adición de la combinación de POC y caucho.

Para hallar la resistencia a tracción por compresión diametral las tensiones normales de tracción se distribuyen uniformemente y son iguales a:

$$T = 2P/\pi l d$$

T = Resistencia a la tracción por compresión diametral, kPa.

P = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo, Kn.

l = longitud, m.

d = diámetro, m.

3.4.2.1 Concreto Tradicional

Para el concreto tradicional tuvimos que hacer 3 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con las mezclas con reemplazo parcial de agregado fino.

Figura 26. Prueba de Tracción Indirecta de concreto tradicional

Fuente: Propia

Tabla 45

Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
280	Probeta I	6	10	20.05	11885	5391.04	17.117
	Probeta II	6	10.02	20.05	12460	5651.86	17.910
210	Probeta III	28	15.23	30.49	45120	20466.43	28.059
	Probeta IV	28	15.24	30.1	44930	20380.25	28.284
	Probeta V	28	15.24	30.15	45890	20815.70	28.840
230	Probeta VI	30	15.24	30.1	48700	22090.32	30.657
	Probeta VII	30	15.23	30.12	48000	21772.80	30.216
	Probeta VIII	30	15.25	30.13	47500	21546.00	29.852

Fuente: Propia

- Como ya mencionamos que solo utilizaremos el f'_c de 210 kg/cm^2 , y con esta dosificación la resistencia promedio fue de 28 kg/cm^2 a los 28 días después de iniciado el curado.

3.4.2.2 Concreto con adición de POC

Para el concreto con reemplazo parcial de POC tuvimos que hacer 3 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de f'_c 210 kg/cm^2 como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas.

De las tres relaciones de agua y cemento que diseñamos, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el POC tuvimos un 10%, 12.5% y 15% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de tracción.

Figura 27. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC

Fuente: Propia

Tabla 46

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	15.22	30.48	45630	20697.77	28.404
	Probeta II	28	15.24	30.48	46710	21187.66	29.038
	Probeta III	28	15.2	30.5	45990	20861.06	28.647
230	Probeta IV	30	15.21	30.25	48200	21863.52	30.251
	Probeta V	30	15.22	30.3	47630	21604.97	29.825
	Probeta VI	30	15.2	30.5	48000	21772.80	29.899

Fuente: Propia

Tabla 47

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
280	Probeta I	6	10	20.3	9563	4337.78	13.604
	Probeta II	6	10	20.35	9170	4159.51	13.012
210	Probeta III	28	15.22	30.45	47230	21423.53	29.429
	Probeta IV	28	15.24	30.47	46930	21287.45	29.184
	Probeta V	28	15.25	30.5	46700	21183.12	28.993
230	Probeta VI	30	15.25	30.51	47000	21319.20	29.170
	Probeta VII	30	15.23	30.49	48300	21908.88	30.036
	Probeta VIII	30	15.24	30.5	50000	22680.00	31.063

Fuente: Propia

Tabla 48

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	15.23	30.49	44970	20398.39	27.965
	Probeta II	28	15.22	30.47	45710	20734.06	28.463
	Probeta III	28	15.3	30.5	45300	20548.04	28.032
230	Probeta IV	30	15.3	30.5	45450	20616.12	28.125
	Probeta V	30	15.28	30.48	46700	21183.12	28.956
	Probeta VI	30	15.26	30	46900	21273.84	29.584

Fuente: Propia

- Como ya mencionamos que solo utilizaremos el $f'c$ de 210 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 49

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
10%	210	28.70
13%	210	29.20
15%	210	28.15
10%	230	29.99
13%	230	30.09
15%	230	28.89

Fuente: Propia

3.4.2.3 Concreto con adición de caucho

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho tuvimos que hacer 2 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas. De las tres relaciones de agua y cemento que diseñamos, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 3%, 5% y 7% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de tracción.

Figura 28. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC

Fuente: Propia

Tabla 50

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	15.23	30.46	43300	19640.88	26.953
	Probeta II	28	15.24	30.46	43670	19808.71	27.166
	Probeta III	28	15.3	30.5	42800	19414.08	26.485
230	Probeta IV	30	15.35	30.48	45600	20684.16	28.145
	Probeta V	30	15.4	30.45	44990	20407.46	27.705
	Probeta VI	30	15.45	30.43	45200	20502.72	27.763

Fuente: Propia

Tabla 51

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	15.22	30.47	42890	19454.90	26.707
	Probeta II	28	15.23	30.48	43200	19595.52	26.873
	Probeta III	28	15.24	30.45	42230	19155.53	26.279
230	Probeta IV	30	15.25	30.5	44500	20185.20	27.628
	Probeta V	30	15.3	30.45	43220	19604.59	26.789
	Probeta VI	30	15.35	30.38	43600	19776.96	26.999

Fuente: Propia

Tabla 52

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)
210	Probeta I	28	15.5	30.47	42200	19141.92	25.802
	Probeta II	28	15.23	30.5	41360	18760.90	25.712
	Probeta III	28	15.4	30.49	41870	18992.23	25.750
230	Probeta IV	30	15.45	30.5	42880	19450.37	26.277
	Probeta V	30	15.4	30.5	42800	19414.08	26.313
	Probeta VI	30	15.37	30.48	44300	20094.48	27.307

Fuente: Propia

- Como ya mencionamos que solo utilizaremos el f'_c de 210 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 53

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
3%	210	26.87
5%	210	26.62
7%	210	25.75
3%	230	27.87
5%	230	27.14
7%	230	26.63

Fuente: Propia

3.4.2.4 Concreto con adición de caucho y POC

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho y POC utilizamos la dosificación para una mezcla de f'_c 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas. Realizamos distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 2.5% de reemplazo parcial y para el POC un 10%, 12.5% y 15% del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de tracción.

Figura 29. Prueba de Tracción Indirecta de concreto con adición de POC y caucho

Fuente: Propia

Tabla 54

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	15.3	30.5	47780	21673.01	29.567
	Probeta II	28	15.25	30.45	48340	21927.02	30.061
	Probeta III	28	15.35	30.45	47230	21423.53	29.179
230	Probeta IV	30	15.22	30.5	49300	22362.48	30.668
	Probeta V	30	15.23	30.49	50100	22725.36	31.155
	Probeta VI	30	15.3	30.45	48670	22076.71	30.167

Fuente: Propia

Tabla 55

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	15.25	30.35	48230	21877.13	30.091
	Probeta II	28	15.25	30.5	49100	22271.76	30.484
	Probeta III	28	15.22	30.4	48470	21985.99	30.251
230	Probeta IV	30	15.22	30.5	51030	23147.21	31.744
	Probeta V	30	15.23	30.49	54960	24929.86	34.178
	Probeta VI	30	15.3	30.45	48560	22026.82	30.099

Fuente: Propia

Tabla 56

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de tracción indirecta.

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Carga (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm2)
210	Probeta I	28	15.3	30.5	47460	21527.86	29.369
	Probeta II	28	15.25	30.5	46500	21092.40	28.869
	Probeta III	28	15.4	30.46	46890	21269.30	28.866
230	Probeta IV	30	15.22	30.5	48300	21908.88	30.046
	Probeta V	30	15.23	30.49	47890	21722.90	29.781
	Probeta VI	30	15.3	30.45	48960	22208.26	30.347

Fuente: Propia

- La resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 57

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC y caucho.

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
2.5% - 10%	210	29.60
2.5% - 12.5%	210	30.28
2.5% - 15%	210	29.03
2.5% - 10%	230	30.66
2.5% - 12.5%	230	32.01
2.5% - 15%	230	30.06

Fuente: Propia

3.4.3 Resistencia a la Flexión en vigas de concreto endurecido – ASTM C78

Para nuestro ensayo se utilizó probetas prismáticas de 15 x 15 x 14 centímetros.

En este ensayo se determina la resistencia a la flexión del concreto, para esto usamos 8 vigas de concreto tradicional, 14 vigas de concreto con adición de POC, 12 vigas de concreto con adición de caucho y 12 vigas de concreto con adición de POC y caucho.

Figura 30. Vigas después del curado

Fuente: Propia

Antes de dar inicio al ensayo se determinará las dimensiones de la probeta prismática con aproximación a 1mm. Se ensayará la probeta con una carga constante suave hasta la rotura.

Cuando la falla ocurre en el tercio central, se aplica la siguiente fórmula:

$$Mr = PL/bh^2$$

Mr = Módulo de rotura

P = Carga

L = Luz

b = ancho promedio

h = altura promedio

3.4.3.1 Concreto Tradicional

Para el concreto tradicional tuvimos que hacer 3 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con las mezclas con reemplazo parcial de agregado fino.

Figura 31. Prueba de flexión a probeta de concreto tradicional

Fuente: Propia

Tabla 58

Resultados de probetas de concreto tradicional sometidas a Esfuerzo de Flexión

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm ²)
280	Viga I	6	15.00	14.70	45.3	3845	1744.09	53.74
	Viga II	6	15.10	14.80	45.5	3995	1812.13	54.96
210	Viga III	28	15.17	14.90	45.5	4980	2258.93	67.29
	Viga IV	28	15.00	14.80	45.5	4900	2222.64	67.86
230	Viga VI	30	15.13	14.90	45.7	5200	2358.72	70.75
	Viga VII	30	15.10	15.00	45.9	5320	2413.15	71.87

Fuente: Propia

- Como ya mencionamos que solo utilizaremos el $f'c$ de 210 kg/cm², y con esta dosificación la resistencia promedio fue de 67 kg/cm² a los 28 días después de iniciado el curado.

3.4.3.2 Concreto con adición de POC

Para el concreto con reemplazo parcial de POC tuvimos que hacer 3 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas. De las tres relaciones de agua y cemento que diseñamos, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el POC tuvimos un 10%, 12.5% y 15% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos.

Figura 32. Prueba de flexión a probeta de concreto con adición de POC

Fuente: Propia

Tabla 59

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 10 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
210	Viga I	28	15.10	14.90	45.1	5180	2349.65	69.69
	Viga II	28	15.15	15.00	45.2	5110	2317.90	67.76
230	Viga III	30	15.00	14.80	45.5	5270	2390.47	72.98
	Viga IV	30	15.30	15.10	55.9	5350	2426.76	85.73

Fuente: Propia

Tabla 60

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 12.5 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
Viga I	6	15.40	15.10	45.1	3035	1376.68	38.98
Viga II	6	15.00	15.30	45.2	3100	1406.16	39.90
Viga III	28	15.17	15.00	45.5	5280	2395.01	70.40
Viga IV	28	15.16	15.10	45.5	5210	2363.26	68.55
Viga V	30	15.20	14.90	45.0	5460	2476.66	72.81
Viga VI	30	15.10	14.85	45.8	5400	2449.44	74.27

Fuente: Propia

Tabla 61

Resultados de probetas con reemplazo parcial de POC a 15 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
210	Viga I	28	15.17	14.90	46.0	5080	2304.29	69.38
	Viga II	28	15.50	15.18	45.8	4960	2249.86	63.60
230	Viga III	30	15.10	14.80	45.5	5120	2322.43	70.43
	Viga IV	30	15.30	15.00	45.9	5200	2358.72	69.33

Fuente: Propia

- La resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 62

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de POC.

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm²)	Resistencia promedio (kg/cm²)
10%	210	68.72
13%	210	69.47
15%	210	66.49
10%	230	79.35
13%	230	73.54
15%	230	69.88

Fuente: Propia

3.4.3.3 Concreto con adición de caucho

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho tuvimos que hacer 2 dosificaciones, de las cuales solo usaremos la mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas.

De las tres relaciones de agua y cemento que diseñamos, tuvimos que realizar distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 3%, 5% y 7% de reemplazo parcial del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos.

Figura 33. Rotura de probeta prismática de concreto con adición de caucho

Fuente: Propia

Tabla 63

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 3 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
210	Viga I	28	15.33	15.20	46.0	4980	2258.93	64.66
	Viga II	28	15.27	15.00	45.8	4920	2231.71	65.60
230	Viga III	30	15.20	14.90	45.0	5070	2299.75	67.61
	Viga IV	30	15.10	14.85	45.8	5100	2313.36	70.15

Fuente: Propia

Tabla 64

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 5 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
210	Viga I	28	15.00	14.90	45.0	4790	2172.74	64.73
	Viga II	28	15.27	14.80	45.8	4700	2131.92	64.37
230	Viga III	30	15.30	14.90	45.5	4900	2222.64	65.64
	Viga IV	30	15.10	14.85	45.8	4870	2209.03	66.98

Fuente: Propia

Tabla 65

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 7 % sometidas a Esfuerzo de flexión

Resistencia de diseño (kg/cm2)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm2)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm2)
210	Viga I	28	15.17	15.40	45.5	4700	2131.92	59.45
	Viga II	28	15.23	15.30	45.7	4650	2109.24	59.59
230	Viga III	30	15.10	14.90	45.0	4790	2172.74	64.30
	Viga IV	30	15.15	14.85	45.8	4880	2213.57	66.90

Fuente: Propia

- La resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 66

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho.

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
3%	210	65.13
5%	210	64.55
7%	210	59.52
3%	230	68.88
5%	230	66.31
7%	230	65.60

Fuente: Propia

3.4.3.4 Concreto con adición de caucho y POC

Para el concreto con reemplazo parcial de caucho y POC utilizamos la dosificación para una mezcla de $f'c$ 210 kg/cm² como base para realizar la comparación técnica, económica y ambiental con respecto a las otras mezclas. Realizamos distintas dosificaciones en los porcentajes de reemplazo de la arena; en el caucho tuvimos un 2.5% de reemplazo parcial y para el POC un 10%, 12.5% y 15% del agregado fino, de esta manera obtuvimos distintas resistencias de cada porcentaje a medida que realizabamos los ensayos de Flexión.

Figura 34. Prueba de flexión a probeta de concreto con adición de POC y caucho

Fuente: Propia

Tabla 67

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 10% sometidas a Esfuerzo de Flexión.

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm ²)
210	Viga I	28	15.23	15.2	45.7	5320	2413.15	69.08
	Viga II	28	15.17	15	45.5	5210	2363.26	69.47
230	Viga VI	30	15.10	14.99	45.5	5460	2476.66	73.22
	Viga VII	30	15.15	14.90	45.8	5300	2404.08	72.17

Fuente: Propia

Tabla 68

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 12.5% sometidas a Esfuerzo de Flexión.

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm ²)
210	Viga I	28	15.33	15	46	5400	2449.44	72.00
	Viga II	28	15.17	15.15	45.5	5370	2435.83	70.19
230	Viga I	30	15.15	15.00	45.5	5499	2494.35	73.40
	Viga II	30	15.30	14.97	45.6	5500	2494.80	73.08

Fuente: Propia

Tabla 69

Resultados de probetas con reemplazo parcial de caucho a 2.5 % y POC a 15% sometidas a Esfuerzo de Flexión.

Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Muestra	Edad (días)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Luz libre (cm ²)	Carga (lb)	Carga (kg)	Módulo de rotura (kg/cm ²)
210	Viga I	28	15.20	14.89	45.6	5090	2308.82	68.87
	Viga II	28	15.17	15	45.5	5190	2354.18	69.20
230	Viga I	30	15.30	14.90	46	5240	2376.86	70.19
	Viga II	30	15.20	14.85	46	5300	2404.08	72.42

Fuente: Propia

- La resistencia promedio de cada porcentaje de reemplazo fue:

Tabla 70

Resultado de resistencia promedio de probetas con adición parcial en distintos porcentajes de caucho.

Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm²)	Resistencia promedio (kg/cm²)
2.5% - 10%	210	69.27
2.5% - 12.5%	210	71.09
2.5% - 15%	210	69.04
2.5% - 10%	230	72.69
2.5% - 12.5%	230	73.24
2.5% - 15%	230	71.30

Fuente: Propia

3.5 Estudio Comparativo Técnico

A continuación, presentaremos un cuadro comparativo general de todos los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia de todas las mezclas realizadas con $f'c$ 210 kg/cm².

Tabla 71

Tabla comparativa de resistencias promedio según tipo de esfuerzo, tipo de concreto y porcentaje de reemplazo de agregado fino

		Porcentaje de reemplazo	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Compresión	CT	0%	210	326
	P-1	10%	210	328
	P-2	12.50%	210	339
	P-3	15%	210	319
	C-1	3%	210	272
	C-2	5%	210	267
	C-3	7%	210	259
	PC-1	2.5% - 10%	210	346
	PC-2	2.5% - 12.5%	210	357
	PC-3	2.5% - 15%	210	336
Tracción	CT	0%	210	28
	P-1	10%	210	29
	P-2	12.50%	210	29
	P-3	15%	210	28
	C-1	3%	210	27
	C-2	5%	210	27
	C-3	7%	210	26
	PC-1	2.5% - 10%	210	30
	PC-2	2.5% - 12.5%	210	30
	PC-3	2.5% - 15%	210	29
Flexión	CT	0%	210	68
	P-1	10%	210	69
	P-2	12.50%	210	69
	P-3	15%	210	66
	C-1	3%	210	65
	C-2	5%	210	65
	C-3	7%	210	60
	PC-1	2.5% - 10%	210	69
	PC-2	2.5% - 12.5%	210	71
	PC-3	2.5% - 15%	210	69

Fuente: Propia

Figura 35. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Compresión

Fuente: Propia

En caso del concreto tradicional con resistencia 210 kg/cm^2 , llegó a una resistencia de 326 kg/cm^2 a los 28 días de iniciado el curado. Para el POC, que se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 la proporción de reemplazo recomendada es de P-2; ya que esta mezcla obtuvo 339 kg/cm^2 de resistencia los 28 días de iniciado el curado. Para el caucho, que de igual manera se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 se recomienda la mezcla C-1; ya que llegó a una resistencia de 272 kg/cm^2 . Y por último para la combinación del POC y del caucho se recomienda usar la mezcla PC-2; ya que este diseño obtuvo una resistencia de 357 kg/cm^2 , 9.51% más que el CT. Teniendo en cuenta que conforme pasen los días la resistencia seguirá subiendo.

Tabla 72

Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Compresión

	Resistencia de diseño (kg/cm2)	Porcentaje de reemplazo	Resistencia promedio (kg/cm2)
CT 210	210	0%	326
P-2	210	12.50%	339
C-1	210	3%	272
PC-2	210	2.5% - 12.5%	357

Fuente: Propia

Figura 36. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Tracción Indirecta

Fuente: Propia

En caso del concreto tradicional con resistencia 210 kg/cm^2 , llegó a una resistencia de 28 kg/cm^2 a los 28 días de iniciado el curado. Para el POC, que se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 la proporción de reemplazo recomendada es de P-2; ya que esta mezcla obtuvo 29 kg/cm^2 de resistencia los 28 días de iniciado el curado, igual al CT. Para el caucho, que de igual manera se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 se recomienda la mezcla C-1; ya que llegó a una resistencia de 27 kg/cm^2 . Y por último para la combinación del POC y del caucho se recomienda usar la mezcla PC-2; ya que este diseño obtuvo una resistencia de 30 kg/cm^2 , superando los resultados del CT.

Tabla 73

Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Tracción Indirecta.

	Resistencia de diseño (kg/cm2)	Porcentaje de reemplazo	Resistencia promedio (kg/cm2)
CT 210	210	0%	28
P-2	210	12.50%	29
C-1	210	3%	27
PC-2	210	2.5% - 12.5%	30

Fuente: Propia

Figura 37. Gráfico comparativo de las distintas mezclas de concreto sometidas a Flexión

Fuente: Propia

En caso del concreto tradicional con resistencia 210 kg/cm^2 , llegó a una resistencia de 68 kg/cm^2 a los 28 días de iniciado el curado. Para el POC, que se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 la mezcla recomendada es el P-2; ya que, esta mezcla obtuvo 69 kg/cm^2 de resistencia los 28 días de iniciado el curado. Para el caucho, que de igual manera se diseño con una resistencia de 210 kg/cm^2 se recomienda la mezcla C-1; ya que llegó a una resistencia de 65 kg/cm^2 . Y por último para la combinación del POC y del caucho se recomienda usar la mezcla PC-2; ya que este diseño obtuvo una resistencia de 71 kg/cm^2 .

Tabla 74

Tabla de porcentajes de reemplazo recomendadas para la Flexión

	Resistencia de diseño (kg/cm2)	Porcentaje de reemplazo	Resistencia promedio (kg/cm2)
CT 210	210	0%	68
P-2	210	12.50%	69
C-1	210	3%	65
PC-2	210	2.5% - 12.5%	71

Fuente: Propia

3.6 Estudio comparativo económico

La comparación económica de todas nuestras mezclas nos servirá para identificar si estamos realizando un concreto económico; es decir que sea menos o en todo caso que no sobrepase al concreto tradicional de resistencia 210 kg/cm^2 .

Primero vamos a calcular el flete base; ya que, es uno de los factores que cambian en cada una de las mezclas. Cabe resaltar que no calcularemos costos como mano de obra porque tienen la misma influencia en todas las mezclas; solo consideraremos costos influyentes directamente con los materiales y transporte de estos; el transporte es un costo influyente por el peso de estos mismos.

Tabla 75
Cálculo de factor de flebe base

Flete base sólidos (< 500 km.)	Índice INEI 32	Flete Base (1991)	Fb
0.023781	468.3	65.52	0.16997317

Fuente: INEI

- Para el concreto tradicional el proceso de costeo fue el siguiente:

Tabla 76
Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto tradicional con resistencia 210 kg/cm^2 para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.129	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
Agregado fino	799.78	kg.	0.287	m3	230	m3	72.23
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							362.86
CF							6.03
							368.89

Fuente: Propia

Tabla 77

Cálculo de costo de flete para un concreto con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete A. Fino	0.16997317	0.79978	20.00	2.71882289
Costo flete A. Grueso	0.16997317	0.97275	20.00	3.30682808
				6.026

Fuente: Propia

- Para el concreto con adición de POC es sus distintos porcentajes el proceso de costeo fue el siguiente:

Tabla 78

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 10% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.129	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 10	79.98	kg.	0.024	m3	0	-	0.00
Agregado fino	719.80	kg.	0.269	m3	230	m3	61.95
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							352.59
CF							6.23
							358.82

Fuente: Propia

Tabla 79

Cálculo de costo de flete para un concreto con 10% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.169973173	0.079978	35.00	0.47579401
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.719802	20.00	2.4469406
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				6.23

Fuente: Propia

Tabla 80

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.129	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 12.5	99.97	kg.	0.031	m3	0	-	0.00
Agregado fino	699.81	kg.	0.262	m3	230	m3	60.23
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							350.86
CF							6.28
							357.15

Fuente: Propia

Tabla 81

Cálculo de costo de flete para un concreto con 12.5% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.16997317	0.0999725	35.00	0.59474251
Costo flete A. Fino	0.16997317	0.6998075	20.00	2.37897003
Costo flete A. Grueso	0.16997317	0.97275	20.00	3.30682808
				6.28

Fuente: Propia

Tabla 82

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.129	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 15	119.97	kg.	0.039	m3	0	-	0.00
Agregado fino	679.81	kg.	0.254	m3	230	m3	58.51
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							349.14
CF							6.33
							355.48

Fuente: Propia

Tabla 83

Cálculo de costo de flete para un concreto con 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.169973173	0.119967	35.00	0.71369101
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.679813	20.00	2.31099945
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				6.33

Fuente: Propia

- Para el concreto con adición de caucho es sus distintos porcentajes el proceso de costeo fue el siguiente:

Tabla 84

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 3% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
CAUCHO 3	23.99	kg.	0.003	m3	0.1	kg	2.40
Agregado fino	775.79	kg.	0.290	m3	230	m3	66.77
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							359.80
CF							5.94
							365.75

Fuente: Propia

Tabla 85

Cálculo de costo de flete para un concreto con 3% de adición de caucho con resistencia 230 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.7757866	20.00	2.6372582
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				5.94

Fuente: Propia

Tabla 86

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 5% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
CAUCHO 5	39.99	kg.	0.009	m3	0.1	kg	4.00
Agregado fino	759.79	kg.	0.284	m3	230	m3	65.40
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							360.03
CF							5.89
							365.92

Fuente: Propia

Tabla 87

Cálculo de costo de flete para un concreto con 5% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete A. Fino	0.16997317	0.759791	20.00	2.58288174
Costo flete A. Grueso	0.16997317	0.97275	20.00	3.30682808
				5.89

Fuente: Propia

Tabla 88

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 7% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
CAUCHO 7	55.98	kg.	0.015	m3	0.1	kg	5.60
Agregado fino	743.80	kg.	0.278	m3	230	m3	64.02
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							360.25
CF							5.84
							366.08

Fuente: Propia

Tabla 89

Cálculo de costo de flete para un concreto con 7% de adición de caucho con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.7437954	20.00	2.52850529
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				5.84

Fuente: Propia

- Para el concreto con adición de caucho y POC es sus distintos porcentajes el proceso de costeo fue el siguiente:

Tabla 90

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 10% de adicción de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 10	79.98	kg.	0.0293	m3	0.00	-	0.00
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.007	m3	0.10	kg.	2.00
Agregado fino	699.81	kg.	0.256	m3	230.00	m3	58.97
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							351.60
CF							6.16
							357.76

Fuente: Propia

Tabla 91

Cálculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 10% de adicción de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.16997317	0.079978	35.00	0.47579401
Costo flete A. Fino	0.16997317	0.6998075	20.00	2.37897003
Costo flete A. Grueso	0.16997317	0.97275	20.00	3.30682808
				6.16

Fuente: Propia

Tabla 92

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 12.5% de adicción de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 12.5	99.97	kg.	0.036625	m3	0.00	-	0.00
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.007	m3	0.10	kg.	2.00
Agregado fino	679.81	kg.	0.249	m3	230.00	m3	57.28
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							349.91
CF							6.21
							356.13

Fuente: Propia

Tabla 93

Cáculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 12.5% de adicción de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.169973173	0.0999725	35.00	0.59474251
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.679813	20.00	2.31099945
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				6.21

Fuente: Propia

Tabla 94

Cálculo del costo directo para la elaboración de un concreto con 2.5% de adición de caucho y 15% de adicción de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	P.U. (S/.)	Unidad de P.U.	Costo
Aire	2	%	0.02	m3	0	-	0.00
Agua	213.56	lt.	0.21	m3	0	-	0.00
Cemento	366.73	kg.	0.123	m3	22.2	kg	203.54
Agregado grueso	972.75	kg.	0.359	m3	190	m3	68.21
POC 15	119.97	kg.	0.04395	m3	0.00	-	0.00
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.007	m3	0.10	kg.	2.00
Agregado fino	659.82	kg.	0.242	m3	230.00	m3	55.60
Superplastificante	2.1585	lt.	0.0022	m3	8.75	lt	18.89
							348.23
CF							6.26
							354.49

Fuente: Propia

Tabla 95

Cálculo de costo de flete para un concreto con 2.5% de adición de caucho y 15% de adición de POC con resistencia 210 kg/cm² para la ciudad de Pucallpa.

	Fb	Carga (Tn)	Dist. Virtual (km.)	Costo
Costo flete POC	0.169973173	0.119967	35.00	0.71369101
Costo flete A. Fino	0.169973173	0.6598185	20.00	2.24302888
Costo flete A. Grueso	0.169973173	0.97275	20.00	3.30682808
				6.26

Fuente: Propia

A continuación, presentaremos un cuadro comparativo general de todos los resultados obtenidos del proceso de costeo de todas las mezclas realizadas.

Tabla 96

Tabla comparativa de costo directo por porcentaje de reemplazo de agregado fino de todas las proporciones.

	Porcentaje de reemplazo del agregado fino	Costo Directo
CT 210	0%	368.89
P-1	10%	358.82
P-2	12.50%	357.15
P-3	15%	355.48
C-1	3%	365.75
C-2	5%	365.92
C-3	7%	366.08
PC-1	2.5% - 10%	357.76
PC-2	2.5% - 12.5%	356.13
PC-3	2.5% - 15%	354.49

Fuente: Propia

Figura 38. Gráfico de costos por metro cúbico de todas las mezclas realizadas

Fuente: Propia

Según los resultados obtenidos en la comparación técnica, llegamos a la conclusión que le mejor porcentaje de reemplazo para a mezcla PC-2 con reemplazo de 2.5% de caucho y 12.5% de POC debido a los resultados de resistencia obtenidos; según ese porcentaje compararemos los costos de los distintos materiales reciclado de reemplazo.

Tabla 97

Tabla de costo de 1 m³ de concreto con los porcentajes de reemplazo recomendados

	Porcentaje de reemplazo del agregado fino	Costo Directo (nuevos soles)
CT 210	0%	368.89
P-2	12.50%	357.15
C-1	3%	365.92
PC-2	2.5% - 12.5%	356.13

Fuente: Propia

- Como se aprecia en la Tabla 97 todas las mezclas con reemplazo parcial de agregado fino por POC y caucho tuvieron un menor costo de producción; dichas mezclas disminuyeron en hasta en un 3.46%.

3.7 Estudio Comparativo Ambiental

La huella de carbono nos permite identificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son liberadas a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de cualquier actividad medido en toneladas de CO₂ equivalente.

Figura 39. Emisiones de gases contaminantes emitidos por el Sector construcción.

Fuente: GHG Protocol

- Concreto Tradicional

Es el material de mayor consumo en el mundo después del agua. La producción mundial alcanza los 12 billones de toneladas anuales. Ello convierte a esta industria en el usuario más importante de recursos naturales del planeta.

- Cemento

El proceso de fabricación del cemento (Clinker) requiere un importante consumo de energía por tonelada. Tanto la descarbonatación de la caliza como el empleo de combustibles fósiles en el horno rotatorio, liberan CO₂ con un aporte del 60% y un 40% respectivamente.

Tabla 98
Emisiones de CO₂ (Indicador GRI: EN16)

	2010	2011
Emisiones directas de CO ₂ (t)	6'116,647	6'429,151
Emisiones indirectas de CO ₂ (t)	582,008	983,400
Total Emisiones de CO ₂ (t CO ₂ /t de cemento producido)	0.643	0.639
Total Emisiones de CO ₂ (t CO ₂ /t de clinker producido)	0.812	0.833

(*)Datos referenciales para total emisiones de CO₂ al año 2010:

Latinoamérica:	0.863 (t CO ₂ /t de clinker)
Unión Europea 27:	0.862 (t CO ₂ /t de clinker)
Meta CSI para año 2012:	0.750 (t CO ₂ /t de clinker)

Fuente: Greenhouse GAS Protocol

- Agregados

Los agregados fino y grueso, se obtienen generalmente por minería (primarios). A veces resulta como subproducto de otro proceso, como la escoria granulada de alto horno o el hormigón reciclado (secundarios). Se los puede triturar y lavar, fraccionándolos en diversos tamaños de partículas para satisfacer los requisitos de la granulometría. En algunas ocasiones se los puede secar. Estos procesos llevan implícitos cierta cantidad de energía.

Tabla 99

Cantidad de kilogramos emitidos de CO₂ por tonelada de material

Material	kg de CO ₂ emitido por tonelada de cada material
Cemento	1,000
Agregado grueso natural	135
Agregado fino natural	83
Arena de escoria	80
Aditivo	0.21
Agua	0

Fuente: Instituto del cemento Portland Argentino

3.6.1. Cálculo de emisiones de CO₂

Mediante los datos del Instituto del cemento Portland mostrados en la Tabla 103 podemos obtener los valores de CO₂ de los materiales necesarios para la mezcla del concreto tradicional. Con estos números se procede a calcular la huella de carbono del concreto f'c 210 Kg/cm².

Tabla 100

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm²

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO ₂
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO ₂
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO ₂
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO ₂
Agregado fino	799.78	kg.	66.38	Kg de CO ₂
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO ₂
			564.43	Kg de CO ₂

Fuente: Propia

Se procede a calcular la huella de carbono para un concreto con adición de POC con una reemplazo parcial del agregado fino de 10%, 12.5% y 15%. El POC; al ser un material reciclado, no representa un proceso de actividad para la emisión de gases de efecto invernadero. Por ello, el valor numérico de CO₂ del POC es 0 kg de CO₂.

Tabla 101

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 10% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 10	79.98	kg.	0.00	Kg de CO2
Agregado fino	719.80	kg.	50.39	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			548.44	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 102

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 12.5% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 12.5	99.97	kg.	0.00	Kg de CO2
Agregado fino	699.81	kg.	48.99	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			547.04	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 103

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 15% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 15	119.97	kg.	0.00	Kg de CO2
Agregado fino	679.81	kg.	47.59	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			545.64	Kg de CO2

Fuente: Propia

De igual manera se procede a calcular la huella de carbono para un concreto con caucho de 3%, 5% y 7% en reemplazo parcial de la arena. El caucho representa una industria de alta contenido de gases contaminantes para su fabricación. Para nuestra tesis, se utilizó caucho reciclado, cuyo material no presenta ninguna cantidad de CO₂. Pero, este producto se debe de procesar para poder utilizarlo en la mezcla y esto requiere pasar por máquinas trituradoras especiales. Este proceso de trituración contiene un valor numérico de CO₂ (20.97 Kg CO₂).

Tabla 104

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 3% de caucho en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.02	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.21	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
CAUCHO 3	23.99	kg.	0.50	Kg de CO2
Agregado fino	775.79	kg.	54.31	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			553.07	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 105

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 5% de caucho en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
CAUCHO 5	39.99	kg.	0.84	Kg de CO2
Agregado fino	759.79	kg.	53.19	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			552.08	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 106

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 7% de caucho en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.02	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.21	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
CAUCHO 7	55.98	kg.	1.17	Kg de CO2
Agregado fino	743.80	kg.	52.07	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			551.50	Kg de CO2

Fuente: Propia

Por último, se realizó la mezcla con ambos materiales reciclados; el POC y el caucho. Con ambos productos se puede contrarrestar el impacto ambiental negativo debido a que no representan un coeficiente de CO₂ para la contaminación ambiental. En el caso del caucho se utilizó un 2.5% para todas las mezclas y para el POC se empleó 3 porcentajes distintos (10%, 12.5% y 15%). En las siguientes tablas se observa los resultados de CO₂ para la mezcla de los 2 materiales reciclados.

Tabla 107

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 2.5% de caucho y 10% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 10	79.98	kg.	0	Kg de CO2
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.42	Kg de CO2
Agregado fino	699.81	kg.	48.99	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			547.46	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 108

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 2.5% de caucho y 12.5% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 12.5	99.97	kg.	0	Kg de CO2
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.42	Kg de CO2
Agregado fino	679.81	kg.	47.59	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			546.06	Kg de CO2

Fuente: Propia

Tabla 109

Cálculo de emisiones de CO₂ para la elaboración de un concreto f'c 210 kg/cm² con un 2.5% de caucho y 15% de POC en reemplazo parcial de la arena.

Material	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Aire	2	%	0.00	Kg de CO2
Agua	213.56	lt.	0.00	Kg de CO2
Cemento	366.73	kg.	366.73	Kg de CO2
Agregado grueso	972.75	kg.	131.32	Kg de CO2
POC 15	119.97	kg.	0	Kg de CO2
CAUCHO 2.5	19.99	kg.	0.42	Kg de CO2
Agregado fino	659.82	kg.	46.19	Kg de CO2
Superplastificante	2.1585	lt.	0.00	Kg de CO2
			544.66	Kg de CO2

Fuente: Propia

Para el estudio comparativo tomaremos como referencia los porcentajes recomendados por el estudio técnico y económico.

En la tabla 114 se muestran todas las emisiones de carbono promedio por tipo de mezcla, y en esta se observa que la emisión más baja de carbono fue la mezcla de 2.5% de caucho y 15% de POC.

Tabla 110

Emisiones de CO₂ de todas las mezclas de concreto realizadas.

	Porcentaje de reemplazo del agregado fino	Emisiones de CO ₂ (kg de CO ₂)
CT 210	0%	564.43
POC	10%	548.44
	12.50%	547.04
	15%	545.64
Caucho	3%	553.07
	5%	552.08
	7%	551.50
Caucho y POC	2.5% - 10%	547.46
	2.5% - 12.5%	546.06
	2.5% - 15%	544.66

Fuente: Propia

Figura 40. Gráfico comparativo del promedio de las emisiones de CO₂ emitidas por tipo de mezcla

Fuente: Propia

En el gráfico mostrado se puede apreciar mejor las distintas variaciones que presenta cada porcentaje de reemplazo parcial de agregado fino, ya que los insumos de reemplazo al ser reciclados tienen un menor impacto al realizarse la preparación del concreto.

Tabla 111

Tabla de las emisiones de carbono emitidas por los porcentajes de reemplazo recomendados por el estudio técnico y económico

	Porcentaje de reemplazo del agregado fino	Emisiones de CO2 (kg de CO2)
CT 210	0%	564.43
P-2	12.50%	547.04
C-1	3%	553.07
PC-2	2.5% - 12.5%	546.06

Fuente: Propia

Según las emisiones de carbono obtenidas en la tabla 111, los porcentajes de reemplazo recomendados previamente por el estudio técnico y económico fueron de 2.5% de caucho y 12.5% de POC, observándose una disminución de 18.37 kg de CO₂. Cabe resaltar que en este análisis aún no se incluye el factor ambiental por rehusar materiales reciclados, dichos residuos por separados presentan una alta contaminación hacia el medio ambiente.

CONCLUSIONES

- La obtención de los materiales fue factible; ya que, el Clinker de aceite de palma (POC) es un residuo de la fabricación del producto aceite de palma y no tiene costo alguno. De la misma manera la obtención del caucho reciclado molido en los dos distintos tamaños que utilizamos (cribado y granulado) fue muy económica.
- El diseño de la mezcla con la proporción exacta fue una tarea de mejora continua, de acuerdo con los resultados de resistencia que fuimos obteniendo a lo largo de nuestra investigación y la retroalimentación de realizar diversas mezclas de concreto.
- Para hacer más clara la influencia de la investigación se llevó a cabo una serie de ensayos como compresión, tracción indirecta, flexión a probetas con distintos porcentajes de agregados reciclados llegando a concluir que con el 2.5% de caucho y 12.5% de POC obtuvimos resultados satisfactorios en los 3 ensayos de resistencia que realizamos; así como también un concreto más económico y con menos emisiones de CO₂.
- La mezcla PC-2 tuvo un resultado similar al del CT, se puede decir que esta proporción no afecta a resistencia a la compresión del concreto. En el caso de la resistencia a la tracción, la mezcla PC-2 presenta un aumento del 5% de la resistencia. Para la resistencia a la flexión; también tiene resultados satisfactorios y que se encuentran dentro del rango de la NTP y ASTM.
- La mezcla PC-1 también presenta una disminución de los costos en un 4% respecto al CT. De igual manera esta mezcla tiene un 3.6% menos emisiones de CO₂ respecto a la mezcla de CT.
- La investigación teórica permitió identificar el problema de los gases de efecto invernadero causados por el sector construcción y de la alta emisión de dióxido de carbono que provoca dicho sector. El trabajo de Albano (2008), Kanadasan (2017), así como otros; permitieron el abordaje técnico del problema obteniendo resultados con la finalidad de minimizar el impacto ambiental y llevaron a los autores de este trabajo investigativo a determinar que las técnicas para contrarrestar este problema es la utilización de agregados reciclados para obtener un concreto eco-amigable, sin perder las características principales de resistencia y que sea más económico.

RECOMENDACIONES

- El POC debe estar en estado SSS (Saturado Superficialmente) para así obtener una mezcla con mejor trabajabilidad; ya que el POC al ser un material demasiado poroso absorbe en exceso el agua de la mezcla de concreto y si no se realiza este paso previo se obtendría una mezcla seca y el agua necesaria para la mezcla sería insuficiente.
- El POC debe de estar libre de impurezas orgánicas, de existir dichas impurezas afectaría al desempeño en términos de resistencia de la mezcla.
- Se debe utilizar un 50% de caucho cribado y 50% de caucho granulado del peso requerido según porcentaje adecuado para tener una mezcla más homogénea y obtener mejores resultados en los ensayos de resistencia.
- Verter la dosis adecuada de plastificante sugerida según fabricante, mediante se realiza la mezcla. La dosificación del plastificante puede variar dependiendo de la marca que se va a utilizar. También, se puede utilizar un superplastificante de ser necesario.
- Esta investigación es una base para futuras investigaciones en donde se requiera utilizar este concreto en distintas condiciones a las que se presentan en esta tesis. Para ello, se necesitará ensayos complementarios según lo requerido por normas de calidad a las que se pueden ver sujetas.

REFERENCIAS

- CHEN L. et al. (2016), Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*, 9(9), p.767
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V., (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Constr. Build. Mater.*
- Angel, S., Jose, A., Perez, B., Aranguren, D.C., Pedro, L., Lopez, J., Luis, M., Esteban, L.J., Sanz, B., Jose, L., Saez, H., Ramis, J., Olivares, D., (2017). Physico e mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Constr. Build. Mater.*
- A.P. Fantilli, B. Chiaia, (2013) Eco-mechanical performances of cement-based materials: an application to self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* Vol 40, pp. 189–196.
- B.L. Damineli, F.M. Kemeid, P.S. Aguiar, V.M. John (2010), Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cement and Concrete Composites*. Vol 32, pp. 555–562.
- G. Habert, N. Roussel, (2009), Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement and Concrete Composites*. Vol 31, pp. 397–402.
- Asensio E. et al. (2016), Clay-based construction and demolition waste as a pozzolanic addition in blended cements. Effect on sulfate resistance. *Construction and Building Materials*, 127, pp.950–958.
- Palomo A. et al. (2004), Precast elements made of alkali-activated fly ash concrete. In V. M. Malhotra, ed. *International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*. USA.^[1]_[SEP]
- Donatello S., Fernández-Jiménez A. y Palomo A. (2012), An assessment of Mercury immobilisation in alkali activated fly ash (AAFA) cements. *Journal of hazardous materials*, 213–214, pp.207–15.
- INEI: Estadísticas Ambientales Enero 2015/ Recuperado de:
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin-estadisticas-ambientales_1.pdf

INEI: Perú – Anuario de Estadísticas Ambientales 2015 / Recuperado de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1342/libro.pdf

Segre, N.; Joeke, I (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cem. Concr. Res.* 30,1421–1425. [CrossRef].

Oikonomou, N.; Stefanidou, M.; Mavridou, S. (2006) Improvement of the bonding between rubber tire particles and cement paste in cement products. In *Proceedings of the 15th Conference of the Technical Chamber of Greece, Alexandroupoli, Greece*, pp. 234–242.

Gesoglu, M.; Güneyisi, E.; Khoshnaw, G. (2014); Ipek, S. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Constr. Build. Mater.* 73, 19–24.

Isler, J. W., (2012) “Assessment of Concrete Masonry Units Containing Aggregate Replacements of Waste Glass and Rubber Tire Particles,” MS thesis, University of Colorado-Boulder, Boulder, CO, 108 pp.

Schlangen, E.; Joseph, C. Self-Healing Processes in Concrete. In *Self-Healing Materials*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA:Weinheim, Germany, 2009; pp. 141–182. Sukontasukkul, P., and Chaikaew, C., (2006) “Properties of Concrete Pedestrian Block Mixed with Crumb Rubber,” *Construction and Building Materials*, V. 20, No. 7, pp. 450–457.

Wiktor, V.; Jonkers, H.M. (2011) Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 33, 763–770.

Wang, J.Y.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2012) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.*, 26, 532–540.

Yang, Z.X.; Hollar, J.; He, X.D.; Shi, X.M. (2011) A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cem. Concr. Compos.* 33, 506–512. Tabla de dosificaciones y equivalencias, UNACEM; Ing. Rodolfo Castillo