



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Desempeño, factibilidad y sostenibilidad de hormigones hidráulicos estándares con el uso de agregados reciclados

Trabajo de titulación previo a la obtención del título
de Ingeniero Civil.

Autor:

Pablo Andrés Vásquez Vélez

CI: 0105501365

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, M.Sc., Ph.D.

CI: 0301500476

Cuenca – Ecuador

10/octubre/2019

RESUMEN

El proyecto se enfoca en la elaboración de hormigones sostenibles, implementando agregados reciclados como sustitutos parciales del agregado grueso. Los materiales que se reciclaron e incorporaron en las mezclas tratan de desechos del proceso de producción de piezas de porcelana y cerámica, al igual que se implementa vidrio proveniente de la recolección de botellas rotas de uso ordinario.

Los materiales fueron debidamente caracterizados, y tanto los agregados naturales como los agregados reciclados cumplieron con las características necesarias para ser incorporados en mezclas de hormigón bajo la norma ASTM C33. En base a las características se determinó una dosificación ideal para los ensayos denominada mezcla patrón, este misma sirve como hito referencial y en base a ella se cuantifica el desempeño de las otras mezclas.

El objetivo principal del proyecto fue analizar la influencia de los agregados reciclados en la resistencia final del hormigón para lo cual se definió la realización de 12 tipos de mezclas con diferentes componentes y cantidades contando con 6 especímenes de cada una.

Se utilizaron ensayos destructivos y no destructivos en los diferentes elementos de hormigón. El ensayo no destructivo aplicado fue la resistividad eléctrica, la cual indica parámetros de calidad del hormigón. Para los ensayos destructivos se realizaron pruebas de resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta. Los tiempos de curado para los ensayos se consideraron de 7, 14 y 28 días.

El mejor desempeño de los agregados reciclados fue el de la porcelana, definiendo como dosificación óptima, a la que contiene 30% agregado grueso natural y 70% porcelana triturada. Esta mezcla superó la resistencia final del hormigón de la mezcla patrón alcanzando los 373 Kg/cm², a diferencia de las demás mezclas que redujeron su resistencia entre un 15 a 40 %.

Cualitativamente las alternativas medioambientales aportan hasta con un 60 % en la calificación necesaria para una certificación medioambiental, y cuantitativamente se logra reducir 690.9 GJ de energía al igual que se reduce la emisión de 47187 Kg de CO_{2e} a la atmosfera.

Palabras clave:

Hormigón, Desempeño, Hormigón reciclado, Porcelana, Cerámica, Vidrio, Sostenibilidad.

ABSTRACT

The project focuses on the development of sustainable concrete, implementing recycled aggregates as partial substitutes for coarse aggregate. The materials that were recycled and incorporated into the mixtures come from waste from the production process of porcelain and ceramic pieces, just as glass from the collecting of broken bottles of ordinary use is implemented.

The materials were duly characterized, and both natural aggregates and recycled aggregates, met the necessary characteristics to be incorporated into concrete mixtures under ASTM C33. Based on the characteristics, an ideal dosage for the tests called standard mixture was determined, it serves as a benchmark and based on it the performance of the other mixtures is quantified.

The main objective of the project was to analyze the influence of recycled aggregates on the final strength of concrete, for which the realization of 12 types of mixtures with different components and quantities was defined, with 6 specimens of each.

Destructive and non-destructive tests were used on the different concrete elements. The non-destructive test applied was the electrical resistivity, which indicates concrete quality parameters. For destructive tests, compressive strength and indirect tensile strength tests were performed. Curing times for the trials were considered 7, 14 and 28 days.

The best performance of the recycled aggregates was that of the porcelain, defining as optimal dosage, which contains 30% natural coarse aggregate and 70% crushed porcelain. This mixture exceeded the final concrete strength of the standard mix reaching 373 Kg/cm², unlike the other mixtures that reduced its strength by 15 to 40%.

Qualitatively, the environmental alternatives contribute up to 60% in the necessary qualification for an environmental certification, and quantitatively it is possible to reduce 690.9 GJ of energy as well as reducing the emission of 47187 Kg of CO₂e into the atmosphere.

Keywords:

Concrete, Performance, Recycled concrete, Porcelain, Ceramics, Glass, Sustainability.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. ANTECEDENTES.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3. OBJETIVO.....	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4. ORGANIZACIÓN.....	16
CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. AGREGADOS.....	17
2.1.1. GENERALIDADES.....	17
2.1.2. TIPOS DE AGREGADOS.....	17
2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	18
2.1.3.1. GRANULOMETRÍA.....	18
2.1.3.2. DENSIDAD RELATIVA.....	20
2.1.3.3. ABSORCIÓN.....	22
2.1.3.4. MASA UNITARIA.....	23
2.1.3.5. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	24
2.2. HORMIGÓN.....	24
2.2.1. GENERALIDADES.....	24
2.2.2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	25
2.2.2.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	25
2.2.2.2. RESISTENCIA A TRACCIÓN.....	26
2.2.2.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMO INDICADOR DE CALIDAD.....	27
2.3. EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	28
2.3.1. GREENROADS.....	28
2.3.2. PALATE V2.2.....	30
2.3.3. LEED v4.....	30
CAPÍTULO 3 - MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1. MATERIALES.....	32
3.1.1. AGREGADOS.....	32
3.1.2. CEMENTO.....	34
3.1.3. AGUA.....	34
3.2. METODOLOGÍA.....	34
3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	35
3.2.1.1. GRANULOMETRÍA.....	35
3.2.1.2. . DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN.....	36



3.2.1.3.	ABSORCIÓN.....	36
3.2.1.4.	MASA UNITARIA.....	36
3.2.1.5.	DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	37
3.2.2.	DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	37
3.2.3.	ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	40
3.2.4.	ENSAYO DE MUESTRAS.....	43
3.2.4.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	43
3.2.4.2.	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	43
3.2.4.3.	ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	43
3.2.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	45
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		46
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	46
4.1.1.	GRANULOMETRÍA.....	46
4.1.2.	DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN.....	49
4.1.2.1.	DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS.....	49
4.1.2.2.	DENSIDAD DEL ÁRIDO FINO.....	50
4.1.3.	MASA UNITARIA.....	51
4.1.4.	DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	51
4.2.	DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	52
4.3.	ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	52
4.4.	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	54
4.4.1.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	54
4.4.2.	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.....	59
4.4.3.	ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	65
4.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	67
4.5.1.	GREENROADS.....	67
4.5.2.	PALATE V2.2.....	69
4.5.3.	LEED v4.....	70
CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		72
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	72
5.2.	DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	72
5.3.	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	72
5.4.	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	73
REFERENCIAS.....		74
ANEXOS.....		77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. El nivel de líquido representa los vacíos, el nivel de vacíos es constante si se tiene agregados con tamaños uniformes, mientras que la variedad de tamaños reduce el nivel de vacíos (Kosmatka & Wilson, 2016).	19
Ilustración 2. Transmisión de carga eléctrica a través de espécimen de hormigón. Fuente: (Andrade & D'Andrea, 2011).	27
Ilustración 3. Agregado Grueso	32
Ilustración 4. Agregado Fino	32
Ilustración 5. Agregado Reciclado Cerámica	33
Ilustración 6. Agregado Reciclado Porcelana	33
Ilustración 7. Agregado Reciclado Vidrio	33
Ilustración 8. Cemento Holcim Fuerte GU Fuente: (Holcim Ecuador S.A, 2015)	34
Ilustración 9. Granulometría de agregados gruesos.	35
Ilustración 10. Granulometría de agregados finos. Fuente: (Tapia, 2018).	35
Ilustración 11. Ensayo Masa Unitaria	37
Ilustración 12. Flujograma de diseño de mezclas ACI 211.1	38
Ilustración 14. Calibración de Equipo de Resistividad Eléctrica	43
Ilustración 15. Probeta cilíndrica de hormigón con placas de cobre.	44
Ilustración 16. Ensayo de Resistividad Eléctrica.	45
Ilustración 16. Análisis de Áreas de Fallo en mezcla M10 (CL70)	64
Ilustración 18. Checklist para certificación Greenroads de mezcla patrón.	68
Ilustración 19. Checklist para certificación Greenroads de mezcla con agregados reciclados.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los agregados según el tamaño (Niño Hernández, 2010)	18
Tabla 2. Serie de tamices normalizada. (NTE INEN 154, 1987)	19
Tabla 3. Requisitos de gradación del árido fino. (NTE INEN 872, 2011)	20
Tabla 4. Requisitos de gradación del árido grueso. (INEN 872, 2011)	20
Tabla 5. Categorías de evaluación Greenroads. Fuente: (Tapia, 2018)	29
Tabla 6. Niveles de Certificación Greenroads v2 (Greenroads, 2018)	29
Tabla 7. Niveles de Certificación LEED v4 (LEED, 2019)	30
Tabla 8. Porcentaje medio de aire atrapado	39
Tabla 9. Contenido de agua por m ³ de Hormigón	39
Tabla 10. Relación a/c para resistencia media a compresión.	39
Tabla 11. volumen de grava por m ³ de hormigón.	40
Tabla 12. Etiquetado y Contenido de las mezclas de hormigón.	42
Tabla 13. Densidades y Absorción de los Agregados Gruesos en Kg/m ³	49
Tabla 14. Densidades y Absorción de los Agregados Gruesos en g/cm ³	49
Tabla 15. Densidad y Absorción de agregado fino en Kg/m ³	50
Tabla 16. Densidad y Absorción de agregado fino en g/cm ³	50
Tabla 17. Masa Unitaria Agregado Grueso Natural	51
Tabla 18. Porcentajes de degradación del agregado grueso.	51
Tabla 19. Dosificación de la muestra patrón para 1 m ³ sin correcciones de humedad.	52
Tabla 20. Volumen requerido para 6 probetas cilíndricas.	52
Tabla 21. Dosificación de la muestra patrón para 1 m ³ con correcciones de humedad.	52
Tabla 22. Dosificación de Muestra Patrón para volumen de diseño.	53
Tabla 23. Dosificación de mezcla 70% AG natural – 30% Ag reciclado para volumen de diseño.	53

Tabla 24. Dosificación de mezcla 30% AG natural – 70% Ag reciclado para volumen de diseño.....	53
Tabla 25. Resultados de Análisis de Áreas de Fallo.....	64
Tabla 26. Resultados de Resistividad Eléctrica.....	66
Tabla 27. Entrada de datos en PaLate v2.2 para hormigón con mezcla patrón.....	69
Tabla 28. Resultados de PaLate v2.2 para hormigón con mezcla patrón.....	69
Tabla 29. Entrada de datos en PaLate v2.2 para hormigón con mezcla de agregados reciclados.....	69
Tabla 30. Resultados de PaLate v2.2 para hormigón con mezcla de agregados reciclados.....	70
Tabla 31. Resumen de Resultados PaLate.....	70
Tabla 32. Checklist LEED v4 de mezcla patrón.....	71
Tabla 33. Checklist LEED v4 de mezcla con agregados reciclados.....	71

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica del agregado grueso natural.....	46
Gráfica 2. Curva granulométrica de porcelana triturada como agregado grueso.....	47
Gráfica 3. Curva granulométrica de cerámica triturada como agregado grueso.....	47
Gráfica 4. Curva granulométrica de grueso vidrio triturado como agregado grueso.....	48
Gráfica 5. Curva Granulométrica del agregado fino.....	48
Gráfica 6. Resistencias de probetas cilíndricas de hormigón a Compresión.....	55
Gráfica 7. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de porcelana.....	56
Gráfica 8. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de cerámica.....	57
Gráfica 9. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de vidrio.....	57
Gráfica 10. Resistencias de hormigón a compresión con agregados reciclados sin lavar.....	58
Gráfica 11. Resistencias de hormigón a compresión con agregados reciclados lavados.....	58
Gráfica 12. Resistencias de probetas cilíndricas de hormigón a Tracción.....	60
Gráfica 13. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de porcelana.....	61
Gráfica 14. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de cerámica.....	61
Gráfica 15. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de vidrio.....	62
Gráfica 16. Resistencias de hormigón a tracción con agregados reciclados sin lavar.....	62
Gráfica 17. Resistencias de hormigón a tracción con agregados reciclados lavados.....	63
Gráfica 18. Relación resistencia a compresión vs Porcentaje de área de falla.....	65
Gráfica 19. Resistividad Eléctrica de las mezclas de hormigón.....	66
Gráfica 20. Relación entre Resistencia a Compresión y Resistividad Eléctrica.....	67

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	21
Ecuación 2.....	21
Ecuación 3.....	21
Ecuación 4.....	22
Ecuación 5.....	22
Ecuación 6.....	22
Ecuación 7.....	23
Ecuación 8.....	23
Ecuación 9.....	23
Ecuación 10.....	24
Ecuación 11.....	26
Ecuación 12.....	26
Ecuación 13.....	45

**ÍNDICE DE ANEXOS**


Anexo 1. Granulometría Agregado Grueso Natural.....	77
Anexo 2. Granulometría Agregado Grueso Cerámica.....	77
Anexo 3. Granulometría Agregado Grueso Porcelana.....	77
Anexo 4. Granulometría Agregado Grueso Vidrio.....	77
Anexo 5. Granulometría Agregado Fino.....	78
Anexo 6. Diseño de la mezcla patrón.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 7. Tabla Resumen de la Mezcla 1.....	79
Anexo 8. Tabla Resumen de la Mezcla 1.....	80
Anexo 9. Tabla Resumen de la Mezcla 3.....	81
Anexo 10. Tabla Resumen de la Mezcla 4.....	81
Anexo 11. Tabla Resumen de la Mezcla 5.....	82
Anexo 12. Tabla Resumen de la Mezcla 6.....	82
Anexo 13. Tabla Resumen de la Mezcla 7.....	83
Anexo 14. Tabla Resumen de la Mezcla 8.....	83
Anexo 15. Tabla Resumen de la Mezcla 9.....	84
Anexo 16. Tabla Resumen de la Mezcla 10.....	84
Anexo 17. Tabla Resumen de la Mezcla 11.....	85
Anexo 18. Tabla Resumen de la Mezcla 12.....	85
Anexo 19. Tabla Resumen de Resistencias.....	86
Anexo 20. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 4.....	87
Anexo 21. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 6.....	87
Anexo 22. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 10.....	87
Anexo 23. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 12.....	87

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Pablo Andrés Vásquez Vélez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DESEMPEÑO, FACTIBILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES HIDRÁULICOS ESTÁNDARES CON EL USO DE AGREGADOS RECICLADOS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de Octubre del 2019



Pablo Andrés Vásquez Vélez

C.I: 0105501365



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pablo Andrés Vásquez Vélez, autor del trabajo de titulación "DESEMPEÑO, FACTIBILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES HIDRÁULICOS ESTÁNDARES CON EL USO DE AGREGADOS RECICLADOS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 10 de Octubre del 2019

Pablo Andrés Vásquez Vélez

C.I: 0105501365



DEDICATORIA

A mis padres, Esteban y Fanny, que me han acompañado en cada momento, brindándome su cariño y apoyo incondicional, celebrando mis victorias y levantándose en mis derrotas, con la ilusión de verme cumplir mis sueños.

A mis hermanas, María Gabriela y María José, mis fieles consejeras que, gracias a sus alientos, jamás han permitido que me rinda y me han guiado con su experiencia, buscando siempre lo mejor para mí.

Dedico también a mi familia, especialmente a mis abuelitas, quienes siempre han colmado mi vida de amor. Cumpló la promesa de ser su pequeño ingeniero, y le pido a dios que las llene de salud para que nunca me falten.

Pablo Vásquez



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme alcanzar esta meta.

A mis padres y hermanas, por ser la luz y la fuerza en mi vida.

A mi familia que siempre me han brindado su aliento, con el fin de verme crecer personal y profesionalmente.

A mis queridos amigos, que gracias a ellos esta etapa de mi vida ha sido una experiencia enriquecedora y llena de gratos recuerdos.

Al ingeniero Daniel Mogrovejo por guiarme durante el desarrollo de este proyecto.

Agradezco también a Daniela Álvarez, por estar presente y ayudarme a crecer con cada experiencia y logro que he alcanzado.

Pablo Vásquez

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.

1.1. ANTECEDENTES.

El planeta ha atestiguado un crecimiento poblacional a través de los años, que, poco a poco, ha dejado marcas y consecuencias en la calidad de vida. Una de sus consecuencias más drásticas es la contaminación, que, es el resultado de las actividades productivas realizadas por el hombre en su vida cotidiana. La conservación de recursos naturales ha generado la búsqueda de alternativas y la impulsión del emprendimiento, con el afán de realizar actividades sin causar consecuencias graves al medio ambiente (Aguilar, Muñoz, & Loyola, 2005).

Alavedra, Domínguez, Gonzalo, & Serra (1997) comentan que, por varios siglos, la ingeniería en muchas de sus aplicaciones ha interpretado un papel fundamental en la construcción. Principalmente la ingeniería civil en el transcurso de los años ha generado grandes avances tecnológicos en: diseños, maquinaria, herramientas, pero muy pocos en los materiales de construcción, sobre todo, en los materiales implicados en el hormigón, lo cual representa en la baja sustitución de los agregados minerales por materiales renovables o reciclados.

En la actualidad, el incremento de los niveles de polución en los ríos y en los suelos, debido a la inadecuada explotación de las canteras proveedoras de materias primas de la construcción, el altamente contaminante proceso de elaboración de cemento, y el ruido producido por la maquinaria implicada en las obras civiles, exige investigar alternativas para disminuir la contaminación generada por los proyectos constructivos y así progresar en aspectos, tales como: la planificación y elaboración de “obras verdes”, lo cual origina la investigación de nuevos materiales que puedan ser incluidos y adaptados en la construcción, aportando así sus propiedades (Aguas, 2015).

Caram (2012) indica que la cantidad de hormigón que se produce en países desarrollados aproximadamente bordea entre 2 a 3 toneladas/persona/año. Ramírez (2002) parte desde un punto de vista sostenible direccionado al uso racional de agregados naturales y a la reutilización de recursos, argumenta que su uso produciría un decremento en la energía implicada, reducción al impacto ambiental y deforestación al extraer agregados con la erosión del suelo, al igual que una minoría de contaminación por desechos inorgánicos.

Una forma de aminorar la contaminación y reducir el impacto por el uso excesivo de los recursos físicos, según Mora (2014), es la inclusión y evaluación de nuevos materiales dentro de la construcción, como es el caso de la implementación de hormigones hidráulicos alternativos y sustentables. Hormigones que emplean materiales descartados de procesos industriales tales como como los retazos de porcelana, cerámica o vidrio. Sin embargo, los materiales sustitutos deberían aportar resistencia al hormigón para preservar o mejorar las propiedades físicas y químicas en cualquier uso (Bignozzi & Saccani, 2012).

Mensualmente en Cuenca, se generan alrededor de 2.400.000 m² de objetos provenientes de la porcelana, entre ellos: recubrimientos de paredes, pisos, vajillas, etc. De igual forma, como cualquier empresa, este proceso industrial genera residuos antes de su comercio sea por imperfecciones, daños, roturas, etc... Una porción de los residuos generados son responsabilidad de la empresa GRAIMAN, la que produce diariamente 11 toneladas de porcelana, tales residuos podrían ser empleados en la incorporación como agregado grueso mineral en la producción de hormigones en la investigación de este trabajo de titulación (Tapia, 2018).

En el Ecuador durante el año 2017, el 47.47 % de los hogares clasificó los residuos, según una encuesta revelada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). En dicho año, únicamente, el 12.69 % corresponde al vidrio del total de materiales reciclados, de acuerdo al sondeo realizado sobre una muestra de 30.023 hogares, en los que se consultó a más de 100.000 personas a nivel nacional. Esta es una cifra alarmante debido a que el reciclaje de botellas de vidrio representa una reducción del 25 al 50 % de energía (AGN, 2018).

En base al problema que acabamos de exponer, con el fin de reducir el impacto ambiental y colaborar en el ámbito de las obras civiles; es planteada la alternativa de utilizar materiales reciclados de la zona del austro que no sean biodegradables y que sean potenciales contaminantes, como cerámica, porcelana o vidrio, con el objetivo de que actúen como sustitutos parciales de los agregados minerales en la fabricación de hormigones hidráulicos estándares determinando su factibilidad y sostenibilidad.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

La investigación propone principalmente brindar alternativas sustentables para las empresas involucradas en el sector de la construcción, al igual que para las industrias que producen los desperdicios como es el caso de GRAIMAN, e inclusive para entidades

públicas como EMAC EP, que se dedica a la recolección de residuos y reciclaje. Dichas empresas pueden ser parte del cambio, implementando una alternativa sustentable y amigable con el medio ambiente, y además que disminuir las emisiones de gases represente un ahorro energético y preserve las áreas que, usualmente, fueran explotadas para la obtención de materiales pétreos.

El hormigón alternativo en base a los distintos materiales tendrá diferentes comportamientos que se espera sean iguales o mejores al de los hormigones tradicionales. Esto da un plus a las entidades que lo utilicen, con el beneficio de poder postularse a una certificación medio ambiental. Esta clase de hormigones no debe perder las propiedades físico mecánicas de su muestra patrón, y para que sean aplicables deben cumplir con las características de un hormigón estructural la cual depende directamente de la resistencia a compresión y tracción.

1.3. OBJETIVO.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

Determinar la factibilidad y sostenibilidad del uso de agregados reciclados como la porcelana, cerámica o vidrio en Hormigones Hidráulicos Estándares.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar los agregados naturales y reciclados (granulometría, absorción, densidades y abrasión).
- Diseñar las mezclas con diferentes porcentajes de agregados.
- Analizar la variabilidad de resultados en términos de la resistencia a la compresión $f'c$ y la resistencia a tracción indirecta.
- Hallar la relación entre áreas de fallo por caras lisas del agregado y resistencia a compresión
- Analizar la resistividad eléctrica de las diferentes mezclas con su resistencia a compresión.
- Determinar la factibilidad y sostenibilidad del ciclo de vida.
- Estimar el beneficio por el uso de desechos de porcelana, cerámica o vidrio en la elaboración de hormigón, para obtener una certificación o calificación sostenible con el uso de una herramienta calificadora o similares.
- Definir un diseño óptimo en base a las propiedades físico mecánicas y el análisis del ciclo de vida.

1.4. ORGANIZACIÓN.

La investigación está compuesta de varias etapas, la primera etapa determina las propiedades de los agregados, tanto de origen mineral como los agregados de origen reciclado provenientes de GRAIMAN y la AZENDE, dichos agregados serán incorporados en la elaboración de los hormigones alternativos, se empleará un tamaño máximo nominal de material correspondiente a 3/4”.

En las siguientes etapas que corresponden a la segunda y tercera, se realiza los ensayos a una muestra patrón de hormigón hidráulico estándar y a los hormigones hidráulicos alternativos en estado endurecido, para comparar características de cada especie. Se ejecuta cada ensayo necesario a los agregados y a los hormigones en base a las normativas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), American Concrete Institute (ACI) y American Society for Testing and Materials (ASTM).

La cuarta etapa caracteriza la factibilidad de la implementación de los nuevos hormigones y sus beneficios medioambientales que repercuten en ahorro energético y en disminución de emisiones gases contaminantes como CO₂. El impacto ambiental se analiza gracias a las herramientas medioambientales que pueden ser calculadoras o calificadoras como PaLATE y GreenRoads, o incluso considerar nuevas herramientas alternativas que se adapten mejor según la necesidad.

CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO.

2.1. AGREGADOS.

2.1.1. GENERALIDADES.

La construcción de obras consume gran cantidad de recursos, especialmente cuando se habla de la construcción con hormigón, en la cual se implican grandes volúmenes de agregados pétreos (Aguilar et al., 2005). Los agregados desempeñan un papel fundamental en el hormigón, generalmente estos ocupan del 60 al 75% del volumen de un hormigón hidráulico estándar, e influyen notablemente en las propiedades frescas y endurecidas del concreto, así también en sus proporciones de mezclas, sostenibilidad y costo (Kosmatka & Wilson, 2016).

2.1.2. TIPOS DE AGREGADOS.

La correcta selección de los agregados para el uso en mezclas de hormigón, resulta ser elemento crítico ya que de ellos depende el desempeño del hormigón a largo plazo (Yam, Carcaño, & Moreno, 2003).

Los agregados tienen varias formas de ser diferenciados, esto depende del enfoque y del uso que se pretende dar, dichas clasificaciones pueden darse por su geología, densidad, fuente o tamaño (Neville & Brooks, 2010).

En base a la geología se considera a las rocas como: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Debido a la fuente pueden clasificarse como: agregados naturales, agregados manufacturados o agregados reciclados. Los agregados naturales son los correspondientes a los extraídos de canteras de grava y piedra, y de los depósitos fluviales. El agregado manufacturado se refiere al obtenido de escorias de fundiciones de acero, arcillas expandidas, limaduras de hierro, entre otros. Mientras se toma como agregado reciclado, a los cuales provienen de reuso de pavimentos, edificaciones o residuos de procesos industriales como la cerámica, porcelana y vidrio (Mamlouk & Zaniewski, 2013). Estos materiales después de pasar por un proceso de disminución de tamaño y cribado pasan a ser materia prima.

La forma más común de clasificar es por su tamaño, metodología mediante en base a las dimensiones de sección transversal de los agregados se les asigna una denominación, estos rangos de valores varían desde fracciones de milímetros hasta centímetros.

Tabla 1. Clasificación de los agregados según el tamaño (Niño Hernández, 2010)

Tamaño (mm)	Denominación más común	Clasificación
< 0.002	Arcilla	Fracción muy fina
0.002 - 0.074 (No.200)	Limo	
0.074 - 4.76 (No.200 - No.4)	Arena	Agregado fino
4.76 - 19.1 (No.4 - 3/4")	Gravilla	Agregado Grueso
19.1 - 50.8 (3/4" - 2")	Grava	
50.8 - 152.4 (2" - 6")	Piedra	
> 152.4 (6")	Rajón, Piedra bola	

Generalmente se suele dividir los agregados en dos grupos: árido fino y árido grueso.

Árido fino. Árido que pasa por el tamiz de 9,5 mm (3/8") y que la mayor parte de sus partículas pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y son retenidas en su mayoría en el tamiz 75 μ m (No.200), o también se le denomina a la parte de un árido que pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y es retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200) NTE INEN 694.

Árido grueso. Árido en que la mayor parte de sus partículas quedan retenidas en el tamiz de 4,75 mm (No. 4), o la porción de un árido retenido sobre el tamiz de 4,75 mm (No. 4) NTE INEN 694.

2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

2.1.3.1. GRANULOMETRÍA.

Se define como granulometría a la distribución del tamaño de las partículas del agregado, dado por una serie de tamices, que rigen bajo la norma NTE INEN 696 (ASTM C136) (Carrión & Guambaña, 2018); el proceso corresponde a separar al árido en diferentes fracciones de partículas del mismo tamaño o que estén comprendidos dentro de límites de tamaño, y determinar el porcentaje que se retienen dentro de estos rangos.

De este ensayo se obtiene las curvas granulométricas, las cuales corresponden al tamaño del tamiz en escala logarítmica, en la abscisa y el porcentaje del material acumulado que pasa por cada tamiz en la ordenada. Las curvas facilitan la identificación si existe una buena distribución del material o si existen excesos de fracciones gruesas o finas.

La influencia de la granulometría en el hormigón repercute principalmente en la cantidad de pasta necesaria para rellenar los vacíos entre agregados, mientras mayor variedad de tamaños de partículas, menor cantidad de vacíos existirá y por ende se requiere menor cantidad de cemento. (Kosmatka & Wilson, 2016)

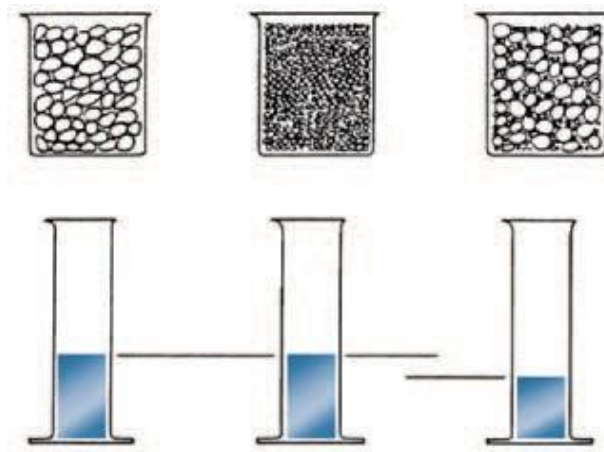


Ilustración 1. El nivel de líquido representa los vacíos, el nivel de vacíos es constante si se tiene agregados con tamaños uniformes, mientras que la variedad de tamaños reduce el nivel de vacíos (Kosmatka & Wilson, 2016).

La secuencia de tamices de mayor a menor viene dada por la normativa NTE INEN 154.

Tabla 2. Serie de tamices normalizada. (NTE INEN 154, 1987)

Tamiz N°	Abertura (mm)
2"	50,00
1 1/2"	37,50
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12,50
3/8"	9,50
N°4	4,75
N°8	2,38
N°10	2,00
N°16	1,19
N°20	0,84
N°30	0,59
N°40	0,42
N°50	0,297
N°60	0,246
N°80	0,177
N°100	0,149
N°200	0,074

En base a la normativa NTE INEN 872, se obtiene la Tabla 3 donde se detalla los requisitos de gradación del agregado fino y en la Tabla 4, los requisitos de gradación del agregado grueso.

Tabla 3. Requisitos de gradación del árido fino. (NTE INEN 872, 2011)

Tamiz INEN	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μ m	25 a 60
300 μ m	10 a 30
150 μ m	2 a 10

Tabla 4. Requisitos de gradación del árido grueso. (INEN 872, 2011)

TAMIZ INEN (aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje en masa que debe pasar por los tamices INEN indicados en la columna (1) para ser considerado como árido grueso de grado:									
	90- 37,5 mm	63- 37,5 mm	53- 4,75 mm	37,5- 4,75 mm	26,5- 4,75 mm	19- 4,75 mm	13,2- 4,75 mm	9,5- 4,75 mm	53- 26,5 mm	37,5-19 mm
106	100									
90	90-100									
75		100								
63	25-60	90-100	100						100	
53		35-70	95-100	100					90-100	100
37,5	0-15	0-15		95-100	100				35-70	90-100
26,5			35-70		95-100	100			0-15	20-56
19	0-5	0-5		35-70		90-100	100			0-15
13,2			10-30		25-60		90-100	100	0-5	
9,5				10-30		20-55	40-70	85-100		0-5
4,75			0-5	0-5		0-10	0-15	10-30		
2,36						0-5	0-5	0-10		
1,18								0-5		

2.1.3.2. DENSIDAD RELATIVA.

Se la define como la relación entre la masa y el volumen de una masa determinada, esta propiedad debe ser determinada cuando se trabaja con hormigones, ya que los agregados presentan cavidades o poros, estos pueden estar vacíos, saturados o parcialmente saturados. Para los hormigones, la densidad relativa es parte de los parámetros considerados en la dosificación, en base a ella se hacen las correcciones de agua y se precisa la cantidad de agregado por metro cubico de concreto, debido a que los poros exteriores consumen agua que estaba destinada para la hidratación del cemento, mientras que los poros interiores ocupan un volumen en la mezcla (Tapia, 2018).

La mayoría de los agregados naturales cuenta con una densidad relativa entre 2.4 y 2.9 (Kosmatka & Wilson, 2016), valores que servirán de referencia para los agregados reciclados. Según Mora (2014) los agregados cerámicos gruesos y finos tienen valores por debajo de dicho rango por lo que concluye que los agregados mencionados en su trabajo de investigación serían aptos para la elaboración de hormigones de baja resistencia. Mientras que Tapia (2018) consiguió buenos resultados, proponiendo que sus agregados reciclados son más compactos que los naturales pero más livianos.

Los pasos para la obtención de la densidad y gravedad específica se detallan en la normativa NTE INEN 857 para agregado grueso y NTE INEN 856 para agregado fino.

Densidad del árido grueso.

- Densidad relativa árido seco al horno (Densidad relativa SH)

Es la masa seca por unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo el volumen de sus poros, pero excluyendo los vacíos.

$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{997.5 * A}{B - C}$$

Ecuación 1

- Densidad relativa saturado superficialmente seco (Densidad SSS)

Relación entre la masa en estado SSS y el volumen del material, incluyendo el volumen de sus poros saturados, pero sin incluir los vacíos.

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{997.5 * B}{B - C}$$

Ecuación 2

- Densidad relativa aparente

Conocida también como masa unitaria, es la masa sobre la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo sus poros permeables e impermeables

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{997.5 * A}{A - C}$$

Ecuación 3

Donde: A = Masa de la muestra seca al horno, gr.
 B = Masa de la muestra saturada superficialmente seca, gr.
 C = Masa aparente en agua de la muestra saturada, gr.

SH = Seco al Horno.

SSS = Saturado Superficialmente Seco.

Densidad del árido fino por el método volumétrico.

- Densidad relativa árido seco al horno (Densidad relativa SH)

$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{S1 * \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R2 - R1)}$$

Ecuación 4

- Densidad relativa saturado superficialmente seco (Densidad SSS)

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{S1}{0.9975 * (R2 - R1)}$$

Ecuación 5

- Densidad relativa aparente

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{S1 * \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975 * (R2 - R1) - \left[\left(\frac{S1}{S}\right) (S - A)\right]}$$

Ecuación 6

Donde:

- A = masa en aire de la muestra seca al horno (gr)
- R1= lectura inicial del nivel de agua (cm³)
- R2= lectura final del nivel de agua (cm³)
- S= masa para la absorción (gr)
- S1= masa inicial (gr)

Para la obtención de las densidades reales se debe multiplicar a todas las densidades por la densidad específica del agua a la temperatura del ensayo valor que se expresa en Kg/m³.

2.1.3.3. ABSORCIÓN.

La absorción puede definir la porosidad de un agregado, mientras más poroso sea el agregado mayor será el valor de la absorción y menor la resistencia mecánica del mismo. La absorción debe corregirse en la cantidad de agua a incorporarse en el momento del diseño del hormigón. Según Kosmatka & Wilson (2016), se conoce que la absorción del agregado grueso debe estar entre 0% al 4% mientras que para el agregado fino deberíamos encontrarnos en un rango entre 0% y 5%.

Para el cálculo de este parámetro del agregado fino y grueso empleamos la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Ecuación 7

A = masa en aire de la muestra seca [gr]

Donde: B = masa en aire la muestra saturada superficialmente seca [gr]

C = masa aparente en agua de la muestra saturada [gr]

2.1.3.4. MASA UNITARIA.

El peso volumétrico o masa unitaria de un agregado, es la masa del agregado requerido para rellenar un volumen específico, también se puede definir como masa por unidad de volumen. Se la denomina masa unitaria compacta cuando al agregado se lo posiciona en capas y posteriormente se compacta con una varilla, si solo se la ubica por gravedad se la define como masa unitaria suelta (Mamlouk & Zaniewski, 2013). Para la determinación de esta propiedad se emplea la norma NTE INEN 858, generalmente se obtiene la masa unitaria compactada y el resultado de esta es utilizado en la dosificación del hormigón, la masa unitaria es calculada con la siguiente ecuación:

$$M = (G - T)/V$$

Ecuación 8

M = masa unitaria (peso volumétrico) del árido, kg/m³

Donde: G = masa del árido más el molde, kg

T = masa del molde, kg

V = volumen del molde, m³, y

PARA EL VOLUMEN DEL MOLDE:

$$V = (W - M) / D$$

Ecuación 9

V = volumen del molde, m³

Donde: W = masa del agua, placa de vidrio y molde, kg.

M = masa de la placa de vidrio y molde, kg

D = densidad del agua para la temperatura de medición, kg/m³, y

En Cuenca hablando de manera general y bajo el criterio del autor se podría decir que el agua que llega a la ciudad, se encuentra a una temperatura de 17°C. por lo que la densidad del agua según la NTE INEN 858 a esta temperatura, corresponde a un valor de 998.86 Kg/m³.

2.1.3.5. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

El objetivo de este ensayo es representar la calidad del agregado. Se aplica la norma NTE INEN 860 (ASTM C131), la cual consiste en seleccionar una muestra de agregado y colocarla dentro de la máquina de los Ángeles con una carga abrasiva, con una velocidad y tiempo normado, donde finalmente el material ensayado se extrae de la máquina, se lo lava sobre el tamiz N° 12 y se lo seca al horno por 24 horas. El fin del ensayo es determinar el porcentaje de desgaste del agregado grueso. Para lo cual se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{Pa - Pb}{Pa} * 100$$

Ecuación 10

Donde: Pa = Masa de muestra seca antes de colocar en la máquina de los Ángeles.
Pb = Masa de la muestra seca retenida en el tamiz N°12.

2.2. HORMIGÓN.

2.2.1. GENERALIDADES.

La NTE INEN 694 que trata de terminología, define al hormigón hidráulico como: “Material compuesto de partículas embebidas en una mezcla aglutinante conformada por agua y cemento hidráulico”.

La calidad del hormigón está influenciada por varios factores entre estos la composición química, los procesos de hidratación del cemento, propiedades físico-mecánicas de los agregados y la adición de aditivos (Mamlouk & Zaniewski, 2013).

2.2.2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.

Las propiedades del hormigón en estado endurecido están fuertemente ligadas a las características de los agregados, la resistencia de ellos y la resistencia de la pasta (Niño Hernández, 2010).

Para esta investigación es importante determinar dichas propiedades ya que, al incorporar agregados reciclados con diferentes propiedades para cada uno, se debe evaluar su comportamiento e influencia en las mezclas, al igual que en las características del producto final como hormigón endurecido.

Varios parámetros pueden influenciar a la resistencia del hormigón, como son: la resistencia del cemento, la relación agua/cemento, la edad del hormigón, las condiciones de curado. La influencia de la relación agua/cemento es muy evidente en la resistencia debido a que a mayor sea esta relación menor resistencia y rigidez tendrá la muestra.

2.2.2.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

La resistencia a la compresión simple puede ser considerada como la característica más transcendental de un hormigón, es la resistencia para la cual se diseña la mezcla en base a la función que vaya a desempeñar. Generalmente se expresa en MPa. o en Kg/cm^2 y se la conoce también como el parámetro f'_c . Dicho parámetro está ligado directamente a la edad de la muestra. Los hormigones de mayor uso general llamados hormigones estándares u hormigones convencionales tienen una resistencia a la compresión entre los 20 MPa a 40 MPa (Kosmatka & Wilson, 2016), fuera de esos rangos por el lado inferior se denominan hormigones pobres, los cuales no pueden ser empleados en usos estructurales, de igual forma los hormigones con un f'_c mayor a 40 MPa se los considera como hormigones de alto desempeño u hormigones de alta resistencia.

Los especímenes cilíndricos que se pondrán a prueba en este proyecto se elaboran en referencia de la normativa NTE INEN 1576 (ASTM C31) y para ensayar la resistencia a compresión simple se siguen los procedimientos indicados en la norma NTE INEN 1573 (ASTM C39). El ensayo de compresión simple consiste en aplicar una carga axial de compresión a un espécimen cilíndrico a una velocidad de $0.25 \pm 0.05 \text{ mpa/s}$, el cilindro debe tener una relación entre la altura sobre diámetro igual a 2.

Para determinar f'_c se debe dividir la carga máxima alcanzada para el área de la sección transversal.

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Ecuación 11

$f'c$ = Resistencia a compresión del espécimen, en kg/cm².

Donde: P = Máxima carga aplicada, en kg.

A = Área de la carga axial del espécimen, en cm².

Una vez fallada la muestra, es importante observar el tipo de rotura y como se distribuyeron los esfuerzos para consideraciones en próximas mezclas, este análisis forense nos puede ayudar con la determinación de un indicio o la causa del fallo, que puede darse por la pasta, agregado u otros motivos.

2.2.2.2. RESISTENCIA A TRACCIÓN.

Debido a la naturaleza del hormigón su estructura es muy débil ante esfuerzos de tracción, por lo que la resistencia a tracción no siempre es un parámetro considerado en el diseño de estructuras (Niño Hernández, 2010). Sin embargo, la necesidad de determinar este parámetro se debe a que el hormigón tiene otros usos aparte del estructural como su uso en pavimentos, estructuras que están sometidas a esfuerzos indirectos, una buena resistencia a tracción puede significar buenas cualidades de adherencia de los agregados, una pasta resistente o uso de agregados muy limpios.

La resistencia a tracción es muy baja si la comparamos con la resistencia a compresión, esta apenas representa el 10 % al 15 % del $f'c$ (Park, Lee, & Kim, 2004).

La forma en la que se lleva el ensayo de tracción indirecta es mediante la colocación de una carga a compresión, pero en sentido longitudinal de la probeta, se aplica la carga hasta que se presenta la falla, la carga es proporcionada a una velocidad constante de 0.9 MPa/min (ASTM C496, 1996).

Una vez dado el fallo se determina la carga máxima y para hallar la resistencia a tracción utilizamos la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * L * D}$$

Ecuación 12

Donde: T = resistencia a la tracción indirecta [Kg/ cm²]

P = carga máxima aplicada señalada por la máquina de ensayo [kg]

L = longitud [cm]

D = diámetro [cm]

Según Neville & Brooks (2010) los valores normales de la resistencia indirecta a tracción del hormigón se encuentra en un rango de 2.5 MPa a 3.1 MPa.

2.2.2.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMO INDICADOR DE CALIDAD.

La resistividad es un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del hormigón, por ende, del grado de curado y de la impermeabilidad, también se lo puede ver como la resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el hormigón. Es un ensayo no destructivo por lo que se puede repetir muchas veces sin alterar el material, es un ensayo adecuado para el autocontrol del fabricante y del usuario (Andrade & D'Andrea, 2011).

La resistividad eléctrica se basa en la ley de Ohm siendo una propiedad volumétrica del material e indica la resistencia al paso de cargas eléctricas a través del mismo. Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor es su resistencia mecánica (Andrade & D'Andrea, 2011). En el endurecimiento en estado fresco al principio del mezclado tiene un valor bajo, pero, según el cemento se va hidratando y el hormigón va fraguando y endureciendo, el valor de la resistividad aumenta.

La influencia de otros parámetros tales como la naturaleza de los agregados, su grado de humedad y su forma geométrica es algo que también se debe considerar. Sin embargo, la matriz es lo que define la capacidad de circulación de la electricidad y lo que condiciona más al valor de resistividad. Siendo así la porosidad un parámetro muy influyente.

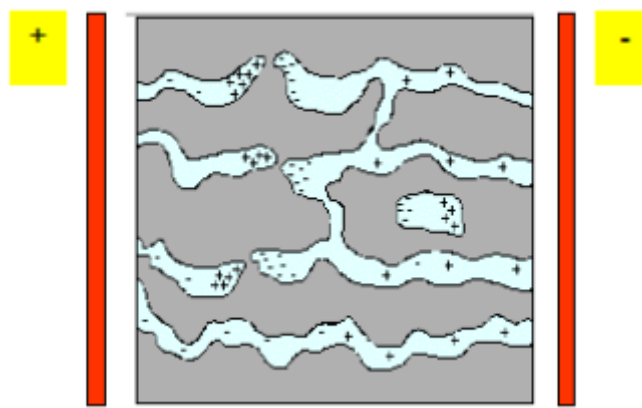


Ilustración 2. Transmisión de carga eléctrica a través de espécimen de hormigón.
Fuente: (Andrade & D'Andrea, 2011).

2.3. EVALUACIÓN AMBIENTAL.

El uso racional de la energía y los materiales en las empresas, no pueden considerarse como un acto aislado, sino que debe estar fuertemente enlazado con la minimización del impacto medio ambiental, preservación de recursos naturales, mejora en la calidad de vida y la disminución de dependencia energética. (Aranda Usón & Zabalza Bribián, 2010)

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos, se pone al alcance de las empresas nuevos medios para lograr una reducción de uso de recursos y cada vez mejorar la eficiencia de las instalaciones y equipos. Disminuyendo los costes económicos, pero sin afectar a la producción ni a la prestación de servicios.

A la hora de gestionar cualquier empresa de manera sostenible, es importante la conciencia medio ambiental. A esto se le llama ecoeficiencia, que no es más que la reducción del impacto ambiental y de los costes de producción, mediante la minimización de recursos consumidos y residuos producidos. La ecoeficiencia debe promover y estimular la innovación y creatividad, a la hora de buscar nuevas alternativas para procesos y materiales (Aranda Usón & Zabalza Bribián, 2010). En el caso de la ingeniería reconstruyendo procesos y metodologías para la búsqueda de nuevas alternativas bioamigables.

Existen herramientas medioambientales que nos ayudan en la calificación de estos procesos, dividiéndose estas en dos: calculadoras y calificadoras. Las herramientas calculadoras brindan información cuantitativa sobre el impacto generado, mientras que las herramientas calificadoras en base a un sistema de puntos obtenidos por acciones sostenibles, premian o certifican a la infraestructura.

2.3.1. GREENROADS.

Greenroads Rating System es básicamente un manual de instrucciones para medir y manejar sustentablemente proyectos de infraestructura como: calles, carreteras, puentes, senderos y más.

Se la considera a esta como una herramienta calificadora que asigna una certificación, basado en una revisión de documentos de un proyecto que cumplan ciertos estándares y tecnologías alternativas y renovables (Sabnis, 2011).

Para establecer el beneficio producido por el uso de un agregado reciclado en la elaboración de hormigón para la obtención de una certificación por medio de la

herramienta greenroads se usa la versión on-line Greenroads v2 Project Checklist. Esta checklist está compuesta por siete categorías y se explican mejor a continuación:

*Tabla 5. Categorías de evaluación Greenroads.
Fuente: (Tapia, 2018).*

Requerimientos del proyecto	Actividades básicas obligatorias para ser consideradas "sostenibles"
Medio ambiente y agua	Promover las mejores prácticas ambientales relacionadas con el uso de la tierra, el hábitat, el agua y otros recursos ecológicos.
Actividades de construcción	Promover las mejores prácticas ambientales, sociales y económicas para la construcción más allá del cumplimiento mínimo.
Materiales y diseño	Promover prácticas responsables para la administración de materiales a fin de reducir los costos, extender la vida útil y reducir el mantenimiento.
Utilidades y controles	Promueva las mejores prácticas para mejorar las operaciones, mejorar la movilidad, sistemas eficientes y mejorar la experiencia del usuario.
Acceso y habitabilidad	Promueva las mejores prácticas para mejorar la calidad de vida, incluida la seguridad, la salud humana, el acceso, la justicia social y la creación de lugares.
Creatividad y esfuerzo	Promover prácticas que son únicas y superan las expectativas de rendimiento.

Greenroads permite alcanzar cuatro niveles de certificación, por medio del cumplimiento de sus requisitos para entrar a evaluación, más un número de puntos adquiridos en el checklist.

Tabla 6. Niveles de Certificación Greenroads v2 (Greenroads, 2018).

Bronce	Requerimientos del proyecto + (40-49) puntos
Plata	Requerimientos del proyecto + (50-59) puntos
Oro	Requerimientos del proyecto + (60-79) puntos
Evergreen	Requerimientos del proyecto + (80-130) puntos

2.3.2. PALATE V2.2

PaLATE es una herramienta calculadora, que permite la evaluación del ciclo de vida de pavimentos para efectos ambientales y económicos. Fue diseñado por el consorcio de diseño y fabricación verde de la universidad de California-Berkeley.

PaLATE evalúa los efectos ambientales y económicos del pavimento y la construcción de carreteras. Los usuarios ingresan los diseños iniciales, el material de construcción inicial, el material y los procesos de mantenimiento, el equipo y el costo de un proyecto.

Los resultados ambientales incluyen: consumo de energía, consumo de agua, emisiones de dióxido de carbono, emisiones de NOx, emisiones de materia particulada-10, emisiones de dióxido de azufre, CO2 equivalente y más (Sabnis, 2011).

2.3.3. LEED v4.

La certificación LEED, es un sistema de certificación de proyectos que significa Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental. Esta herramienta es de tipo calificadora desarrollada por el US Green Building Council. LEED proporciona una guía para el diseño de edificaciones eficientes, económicos y que mejoran la calidad de vida. (U.S. Green Building Council, 2018).

Entre los criterios que evalúa están: sostenibilidad en los materiales y recursos, eficiencia energética, innovación en el proceso de diseño, materiales y recursos respetuosos con el medio ambiente, eficiencia y aprovechamiento del agua. El criterio que más puntúa es la eficiencia energética, seguido por el uso de materiales renovables o reciclados.

Para la certificación se debe de cumplir con una serie de pasos y elaborar un plan de trabajo, para luego ser enviado, revisado y aprobado o denegado por personal calificado LEED.

Según la puntuación obtenida en la evaluación, LEED ubica a los proyectos dentro de los siguientes niveles de certificación:

Tabla 7. Niveles de Certificación LEED v4 (LEED, 2019)

Nivel	Puntos
Certificación LEED	40-49
Silver	50-59
Gold	60-70
Platinum	80 o más.



Entre los beneficios de esta certificación se encuentran: la reducción de residuos en los vertederos, mejor conservación de la energía y agua, edificios más saludables y seguros para los habitantes, los propietarios pueden beneficiarse de desgravaciones fiscales dependiendo de sus municipios, y el principal beneficio con esta certificación suele ser la aminoración de costes de operación los cuales rentabilizan este tipo de construcciones, por más de que en cierto casos el valor de la construcción o del inmueble pueda ser mayor a los convencionales. (U.S. Green Building Council, 2018).

CAPÍTULO 3 - MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. MATERIALES.

3.1.1. AGREGADOS.

Los agregados de origen natural empleados fueron proporcionados por la empresa Vipesa Cia. Ltda., ubicada en la ciudad de Cuenca. Los áridos son provenientes de la mina en el sector El Descanso, ubicada a 19 km al norte de la ciudad.

- Agregado Grueso: Grava – Tamaño máximo nominal (TMN) = 19 mm (3/4")
- Agregado Fino: Arena Gruesa – Módulo de Finura (MF) = 2.70



Ilustración 3. Agregado Grueso



Ilustración 4. Agregado Fino

Los agregados reciclados como: la cerámica y la porcelana, fueron facilitados por la empresa Graiman, desde su planta en el parque industrial de Cuenca. Mientras que el vidrio fue adquirido en la empresa Azende, en su planta de producción en Paute.



Ilustración 5. Agregado Reciclado Cerámica



Ilustración 6. Agregado Reciclado Porcelana



Ilustración 7. Agregado Reciclado Vidrio

Los materiales reciclados son sometidos a un proceso de trituración para poder relacionarlos y para mejorar la maniobrabilidad de los agregados en la mezcla. El tamaño mínimo al que se reducen los agregados es de 8mm, pero la uniformidad se ve limitada debido a la trituradora no regulable. Este proceso fue realizado en la trituradora de mandíbulas del Laboratorio de la Facultad de Arquitectura. El producto obtenido fue

tamizado sobre el tamiz N°4 para la eliminación del material fino. Al igual que se descartó el material retenido sobre el tamiz 1” para las mezclas, al residuo se lo sometió nuevamente a trituración para mejor aprovechamiento del material.

3.1.2. CEMENTO.

Para la elaboración de los hormigones se emplea un conglomerante, en este caso es un cemento hidráulico de la empresa Holcim. El cemento es de tipo GU, es decir, fraguado normal y uso general. Se fabrica bajo la normativa INEN 2380, esta norma regula los requisitos de desempeño que debe cumplir un cemento hidráulico (Holcim Ecuador S.A., 2015).



*Ilustración 8. Cemento Holcim Fuerte GU
Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2015)*

3.1.3. AGUA.

El agua empleada en los procesos de elaboración de mezclas de hormigón y en los procesos de curado de las muestras, es agua potable de la ciudad de Cuenca. El agua de la ciudad es altamente controlada por organismos como ETAPA EP, que garantizan su calidad y potabilidad, por lo tanto, bajo la normativa NEC 2015, es apta para la elaboración y curado de hormigones.

3.2. METODOLOGÍA.

Para la elaboración del hormigón se deben seguir ciertos procedimientos: (1) Caracterización de los agregados, (2) Diseño de las mezclas de hormigón, (3) Elaboración de la mezcla patrón y mezclas con agregados reciclados, (4) Ensayo de las muestras endurecidas y (5) Evaluación ambiental.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

Es necesario la caracterización de los agregados naturales y los agregados reciclados, para el diseño de la mezcla patrón y para ello se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

3.2.1.1. GRANULOMETRÍA.

Para la realización de este ensayo se tomó una muestra representativa de los materiales, esta muestra se la debe secar por 24 horas en el horno, se pesó 5 Kg para el agregado grueso, y se procede con el cribado mediante los tamices indicados en la norma NTE INEN 696.



Ilustración 9. Granulometría de agregados gruesos.

Para el agregado fino, se prepara una muestra de 500 gr secos, y se realiza el tamizado por los tamices, N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200 (NTE INEN 696).



Ilustración 10. Granulometría de agregados finos. Fuente: (Tapia, 2018).

Para la granulometría de los agregados reciclados de cerámica y porcelana, primero se tiene que dividir las piezas grandes con un martillo, seguido a esto se introduce el material

en la trituradora. Debido a la presencia de una gran cantidad de material fino por el proceso de triturado, se procede a tamizar y eliminar el material pasante al tamiz N° 4. De igual forma todo el material retenido sobre el tamiz 1” se lo vuelve a triturar para la reducción de su tamaño.

3.2.1.2. DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN.

Densidad del árido grueso.

Para los agregados gruesos la normativa NTE INEN 857 especifica los pasos a seguir y la cantidad de muestra a prepararse. Este ensayo se debe realizar para cada uno de los materiales gruesos a implicarse, tanto natural como reciclados.

Densidad del árido fino.

La preparación de agregado fino empieza con la toma de una muestra representativa de arena que haya pasado el tamiz No 4. Se colocan aproximadamente 1200 gr en una bandeja y se la satura con agua por 24 horas. Luego se siguen los pasos para el método gravimétrico especificado en la Norma NTE INEN 856.

3.2.1.3. ABSORCIÓN.

La absorción de cada material debe ser calculada debido a que, en el diseño de mezclas se requiere hacer correcciones de la cantidad de agua que se debe añadir a la mezcla, para alcanzar la resistencia deseada.

La absorción es calculada en base a los datos obtenidos en los ensayos de densidades mediante la aplicación de la ecuación 7.

3.2.1.4. MASA UNITARIA.

El peso volumétrico o masa unitaria se rige bajo los procedimientos de la normativa NTE INEN 858, el cual consiste en llenar un recipiente normalizado en tres capas, apisonando cada una de las capas con una varilla de punta redondeada, dando 25 golpes en cada estrato. Gracias a este ensayo y junto al de la densidad del agregado grueso también se puede determinar el porcentaje de vacíos.

La masa unitaria suele ser empleada para la obtención de la curva que relaciona el Peso unitario y la relación de árido fino con el grueso ($A_{\text{fino}}/A_{\text{grueso}}$), para la dosificación en las mezclas de hormigón.



Ilustración 11. Ensayo Masa Unitaria

3.2.1.5. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

El ensayo de Degradación del Árido Grueso de partículas menores a 37.5mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles (NTE INEN 860) o mayormente conocido como ensayo de abrasión empieza con la preparación del material. Para esto según la norma y la distribución granulométrica del agregado debemos definir el tipo de graduación. En base al tipo de graduación tenemos determinado un número de esferas y una masa abrasiva. Una vez definidos los parámetros anteriores, se procede a tamizar el material y hallar las masas requeridas según las tablas de la norma INEN 860, luego se procede a lavar bien el material para remover los finos y se procede a secarlo por 24 horas. El material seco es pesado (5000 gr) e introducido en la máquina de los ángeles con la carga abrasiva, y se lo hace girar por 500 veces a una velocidad de 33 rev/min. Finalizado este proceso se desciende el material de la máquina, se lo lava sobre el tamiz N°12 y se lo procede a secar nuevamente por 24 horas para tomar su peso final. Luego se aplica la ecuación 10 para hallar su porcentaje de degradación.

3.2.2. DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.

Las propiedades del hormigón pueden variar en función de la proporción de la mezcla, forma de colocación, condiciones y curado de la mezcla en obra (Mamlouk & Zaniewski, 2013).

El diseño de la mezcla se basa en el método ACI 211.1 publicada en el año 1991, y en el libro de Kosmatka & Wilson (2016) que hasta hoy en día sigue siendo una referencia

mundial para este proceso, el método parte de la relación agua/cemento. Es importante la calidad de los materiales, por lo que estos deben estar dentro del cumplimiento de la norma ASTM C33.

El método puede ser seguido paso a paso con este flujograma:

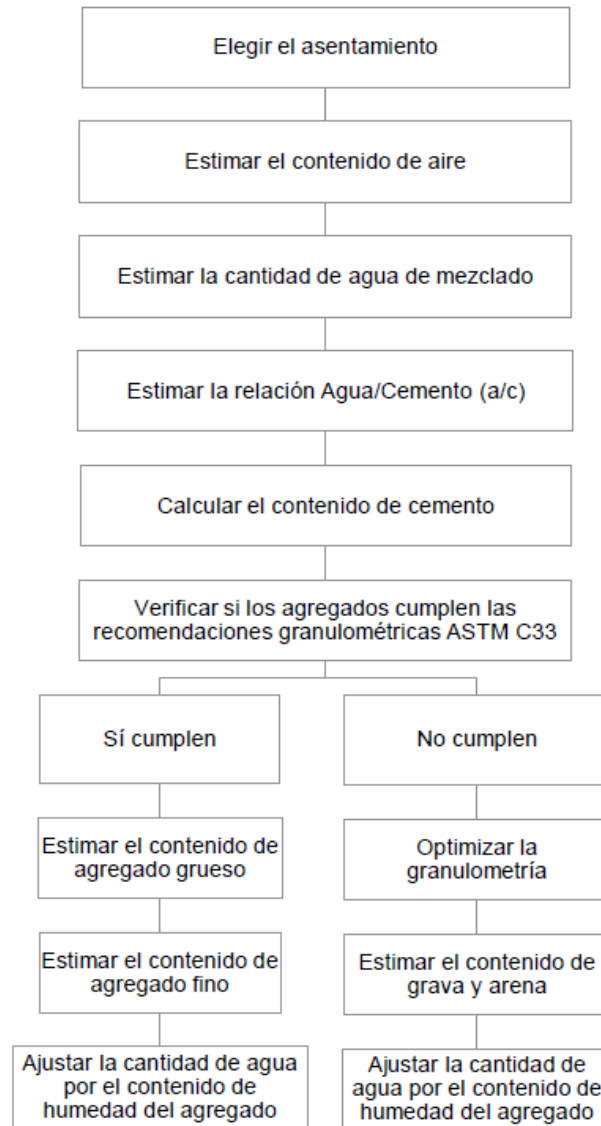


Ilustración 12. Flujograma de diseño de mezclas ACI 211.1

Fuente: (Tapia, 2018)

En primera instancia se debe definir un asentamiento, el cual está ligado al tipo de estructura en el que se requiere el hormigón. Para ello, al requerir hormigones estándares o de densidad normal cuya resistencia a compresión se encuentra entre los 20 y 40 MPa. Donde para el proyecto se ha definido un valor de 7.5 cm promedio.

A partir del tamaño máximo nominal del agregado grueso se selecciona el valor del porcentaje medio de aire atrapado con la siguiente tabla.

Tabla 8. Porcentaje medio de aire atrapado

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado
Pulgadas	mm	
3/8	9.51	3.0
1/2	12.50	2.5
3/4	19.10	2.0
1	25.40	1.5
1 1/2	38.10	1.0
2	50.8	0.5
3	76.1	0.3

Luego, se estima la cantidad de agua por medio del TMN del árido grueso, % de aire y revenimiento seleccionado.

 Tabla 9. Contenido de agua por m³ de Hormigón.

AGUA EN LITROS POR METRO CÚBICO DE HORMIGÓN				
TMN agregado grueso	% de aire estimado	Asentamiento (cm)		
		3 a 5	8 a 10	15 a 18
3/8"	3.0	205	225	240
1/2"	2.5	200	215	230
3/4"	2.0	185	200	210
1"	1.5	180	195	205
1 1/2"	1.0	160	175	185
2"	0.5	155	170	180

Una vez determinada la cantidad de agua, se plantea una relación agua cemento para una resistencia deseada, gracias a la siguiente tabla del método ACI 211.1.

Tabla 10. Relación a/c para resistencia media a compresión.

Relación a/c	RESISTENCIA MEDIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) A LOS 28 DÍAS
	Hormigón sin aire incluido
0.30	450
0.33	420
0.36	390
0.40	350
0.44	315
0.49	280

0.54	245
0.60	210
0.75	140
0.86	105

Teniendo este valor, se puede calcular la cantidad de cemento.

Tabla 11. volumen de grava por m³ de hormigón.

TMN agregado grueso	VOLUMEN DE GRAVA SECA Y COMPACTADA POR UNIDAD DE VOLUMEN DE HORMIGÓN			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72

En la tabla anterior se determina el volumen de grava seca compactada por unidad de volumen de hormigón, para diferentes módulos de finura de la arena. Se multiplica el volumen por su masa unitaria para hallar la masa por metro cubico de hormigón.

Una vez con todos los volúmenes calculados se hacen las correcciones de humedad en base a la absorción de los agregados fino y grueso para la muestra patrón, teniendo como resultado la dosificación final de los materiales.

El faltante para completar el metro cubico de hormigón será el volumen del agregado fino o arena a agregarse en la mezcla.

La dosificación empleada se encuentra como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En esta dosificación se redujo la relación agua/cemento para incrementar la resistencia en una pequeña cantidad, debido a que se iba a trabajar también con agregados reciclados y no se conocía la afección de dichos agregados, se procuró ser conservador en el diseño y manejarse con un margen de seguridad.

3.2.3. ELABORACIÓN DE MEZCLAS.

Una vez con los materiales debidamente caracterizados, limpios y considerados dentro de los parámetros para la mezcla de hormigón se los seca porque a consideración del autor,

se logra mantener un mejor control de la humedad y absorción con los materiales en estado seco.

Con respecto al material reciclado, se debe analizar la cantidad de material fino para la determinación de un proceso de lavado o no del mismo, con la finalidad de mejorar las propiedades del agregado y de la mezcla. Para esto es importante el correcto almacenamiento de los materiales para que no se contaminen en laboratorio o en campo y se evite utilizar recursos como el agua para su lavado.

Para las mezclas, sea la patrón o las que incluyen agregados reciclados siempre se va a llevar el mismo procedimiento, para generar un proceso sistematizado y poder evitar incluir variables, al igual que mejorar los parámetros de control. En base a los estudios de Tapia (2018) se demuestra que con la porcelana el mejor porcentaje de sustitución del agregado natural por agregado reciclado es en un 30% dejando así una relación de 70% agregado natural y 30% agregado reciclado. En base a este estudio para hormigones de alto desempeño, se decidió adjudicarse esa relación como óptima y también probar su inversa, siendo esta 30% agregado natural y 70 % agregado reciclado para así comparar dos extremos y encontrar relaciones entre desempeño y comportamiento con los distintos materiales.

La muestra patrón no contará con agregados reciclados, siendo esta una mezcla de hormigón hidráulico estándar convencional.

El proceso de mezclado se lleva a cabo una vez que, todos los materiales de una mezcla estén debidamente pesados y listos para ser introducidos en la concretera del Laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca. La concretera deberá estar húmeda y escurrida para no alterar la relación agua/cemento. Se mezcla por un minuto todo el agregado grueso y la mitad del agua, al finalizar este tiempo se añade el agregado fino, el cemento y el restante de agua; se mezcla esta ocasión por dos minutos.

Finalmente, al detener la concretera, con la ayuda de una cuchareta se desciende todo el material a una bandeja metálica limpia y húmeda para proceder con el relleno de los 6 cilindros de medidas 10 x 20 cm. normados ASTM C470, destinados a determinar las características del hormigón endurecido.

El llenado de los cilindros deberá hacerse cumpliendo con todos los pasos previos como el correcto engrasado y apretón de los pernos, para evitar la filtración de agua y garantizar

hermeticidad. La colocación de hormigón en el molde se lo hace de igual manera por capas y varillado. El varillado debe ser fuerte pero no debe penetrar la capa anterior a la recién colocada, o tocar la base del molde. Al finalizar las tres capas se enrasa y se da el acabado liso en la superficie, se lo hermetiza con la ayuda de material plástico para evitar la evaporación de agua y se almacenan los moldes en un lugar fresco, evitando exponerlo a condiciones climáticas desfavorables como lluvia, viento o calor excesivo.

Después de 24 horas se desencofran de los moldes las probetas cilíndricas, y se procede al curado, sumergiendo la totalidad de las especies en agua limpia. Ensayar las probetas en los tiempos adecuados, siendo estos a sus 7, 14 y 28 días para la determinación de sus propiedades de resistencia a compresión y tracción indirecta. Normalmente se debe tener una buena planificación de tiempos basada en los días hábiles del laboratorio. En esta investigación por motivos de tiempo algunos de los ensayos no se pudieron programar de la mejor manera por lo que los tiempos de curado en algunas muestras ensayadas tienen variaciones de uno o dos días con respecto a los 7, 14 y 28 días de curado.

Es importante manejar un código o etiquetado adecuado de las probetas de hormigón, para la identificación y manejo de datos, al igual que para su correcto procesamiento y representación de resultados por lo que para esta investigación nos manejamos con los siguientes etiquetados a las muestras.

Tabla 12. Etiquetado y Contenido de las mezclas de hormigón.

Mezcla	Contenido	Etiqueta
M1	Mezcla Patrón 1	MP1
M2	Mezcla Patrón 2	MP2
M3	70% grava - 30% porcelana sin lavar	PSL30
M4	30% grava - 70% porcelana sin lavar	PSL70
M5	70% grava - 30% cerámica sin lavar	CSL30
M6	30% grava - 70% cerámica sin lavar	CSL70
M7	70% grava - 30% porcelana lavada	PL30
M8	30% grava - 70% porcelana lavada	PL70
M9	70% grava - 30% cerámica lavada	CL30
M10	30% grava - 70% cerámica lavada	CL70
M11	70% grava - 30% vidrio	V30
M12	30% grava - 70% vidrio	V70

3.2.4. ENSAYO DE MUESTRAS.

Las muestras en estado endurecido son analizadas para determinar las propiedades mecánicas del hormigón mediante los ensayos normados que se mencionan a continuación para cada caso.

3.2.4.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN

Resistencia a compresión simple a los 7, 14 y 28 días de curado, en base a la norma NTE INEN 1573 (ASTM C39).

3.2.4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN

Ensayo de resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos a los 7, 14 y 28 días de curado, en base a la norma ASTM C496.

Una vez realizados los ensayos en el hormigón endurecido, y determinadas sus resistencias, es posible generar diagramas de relación entre las propiedades mecánicas para las distintas muestras y entre ellas, sobre todo con la muestra patrón, con el objetivo de establecer la factibilidad de su uso en la construcción en base a su desempeño.

3.2.4.3. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Para el ensayo de la resistividad eléctrica, primeramente, se debe calibrar el equipo, para lo cual se conectan los dos electrodos entre si y se ejecuta el comando de calibración, con el fin de corregir la caída o pérdida de potencia, dada por la resistencia de los cables empleados para transmitir la corriente. Si no se realiza este procedimiento los ensayos contendrán un margen de error en la medición.



Ilustración 13. Calibración de Equipo de Resistividad Eléctrica

Una vez terminada la calibración se procede a realizar el ensayo, el equipo utilizado fue proporcionado por el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Cuenca. Para la medición se la realiza con el método directo, el cual utiliza dos placas de cobre de la

misma sección que la sección transversal de las probetas cilíndricas, estas placas se las coloca en ambos extremos de la probeta. Para evitar las imperfecciones al contacto que ocasione la presencia de aire, se utiliza un material de acople entre la placa y la superficie del elemento. Una vez con las placas aplicadas se las afirma con cinta aislante y se procede a conectar los electrodos para realizar la medición el cual nos da el valor de la resistencia eléctrica.



Ilustración 14. Probeta cilíndrica de hormigón con placas de cobre.

La limitación para realizar este ensayo es la falta de personal calificado para realizarlo y la disponibilidad tanto de técnicos, como de equipos del laboratorio, por lo que solo se puede realizar este ensayo a una probeta cilíndrica de cada mezcla y todos los ensayos fueron realizados en la misma fecha por lo que existe una variación entre los días de curado de cada espécimen. Para verificar los valores de medición se hace el ensayo con las dos polaridades positivo-negativo y negativo-positivo.



Ilustración 15. Ensayo de Resistividad Eléctrica.

El equipo de medición proporciona el valor de la Resistencia eléctrica la cual debe ser introducida en la siguiente ecuación para obtener la resistividad eléctrica.

$$\rho = \frac{R * A}{L}$$

Ecuación 13

- Donde:**
- R= Resistencia eléctrica (Ω)
 - ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega.cm$)
 - L = Distancia entre electrodos (cm)
 - A= Sección transversal del elemento (cm^2)

3.2.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL.

Para la evaluación ambiental se hace uso de las herramientas calificadoras y calculadoras, mediante las cuales con sus distintos procesos brindan certificaciones o calificaciones, al igual que una muestra clara de las emisiones de CO₂ y huellas de carbono generadas por el impacto de las obras civiles. Como herramientas de calificación se emplearán: LEED y GreenRoads, mientras que PaLATE se aplica como herramienta calculadora.

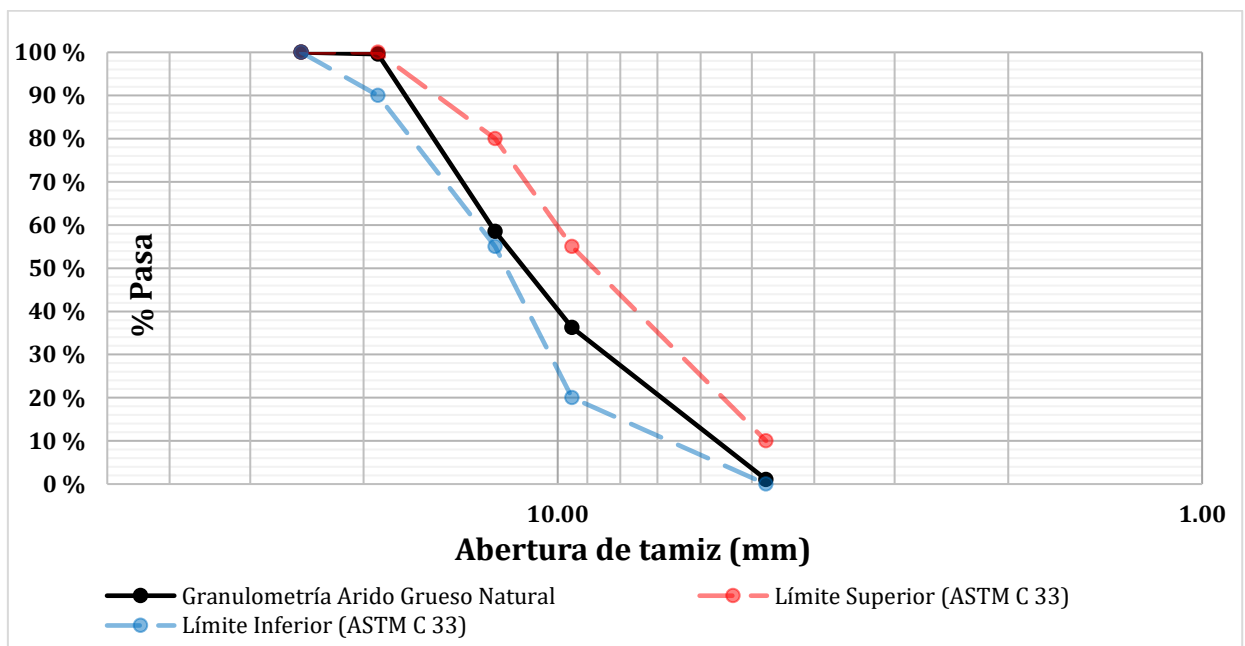
Para la evaluación ambiental se toma de referencia la mezcla que contiene 30 % agregado natural y 70 % agregado reciclado para obtener un mejor resultado de sostenibilidad ante la mezcla patrón.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

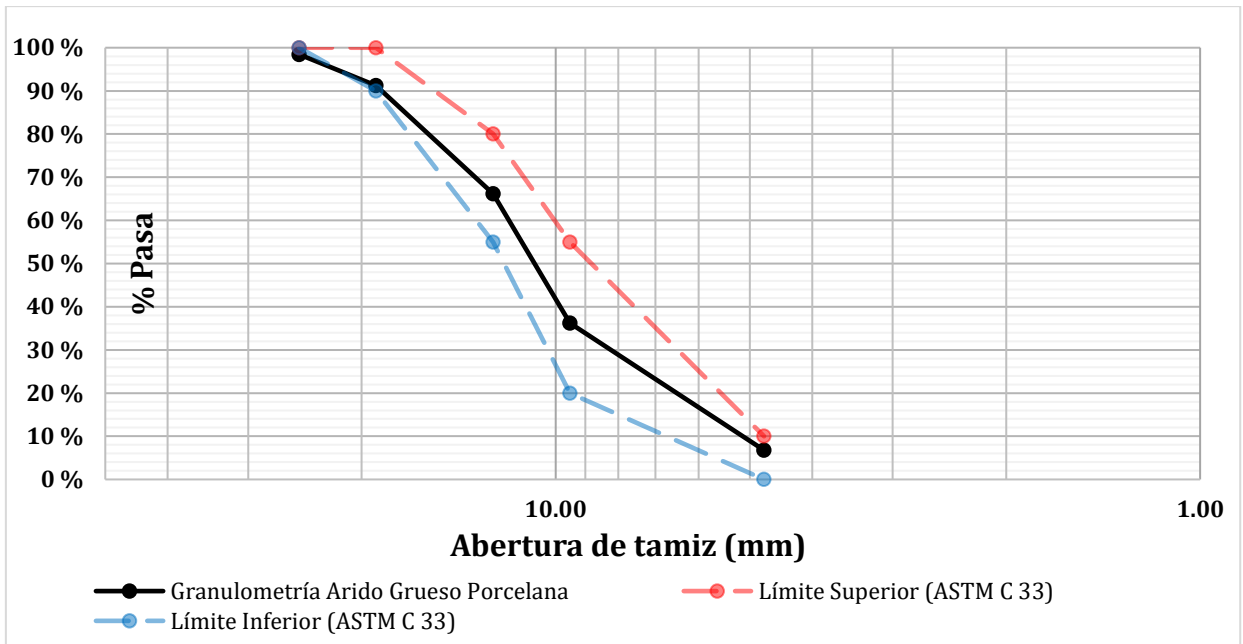
4.1.1. GRANULOMETRÍA.

En la Gráfica 1. Curva granulométrica del agregado grueso natural. se presenta la distribución granulométrica del agregado grueso mineral, la curva se encuentra dentro de los límites establecidos en la normativa ASTM C33, teniendo un tamaño máximo nominal del agregado $\frac{3}{4}$ ". Con dicho agregado se diseñó la mezcla patrón.

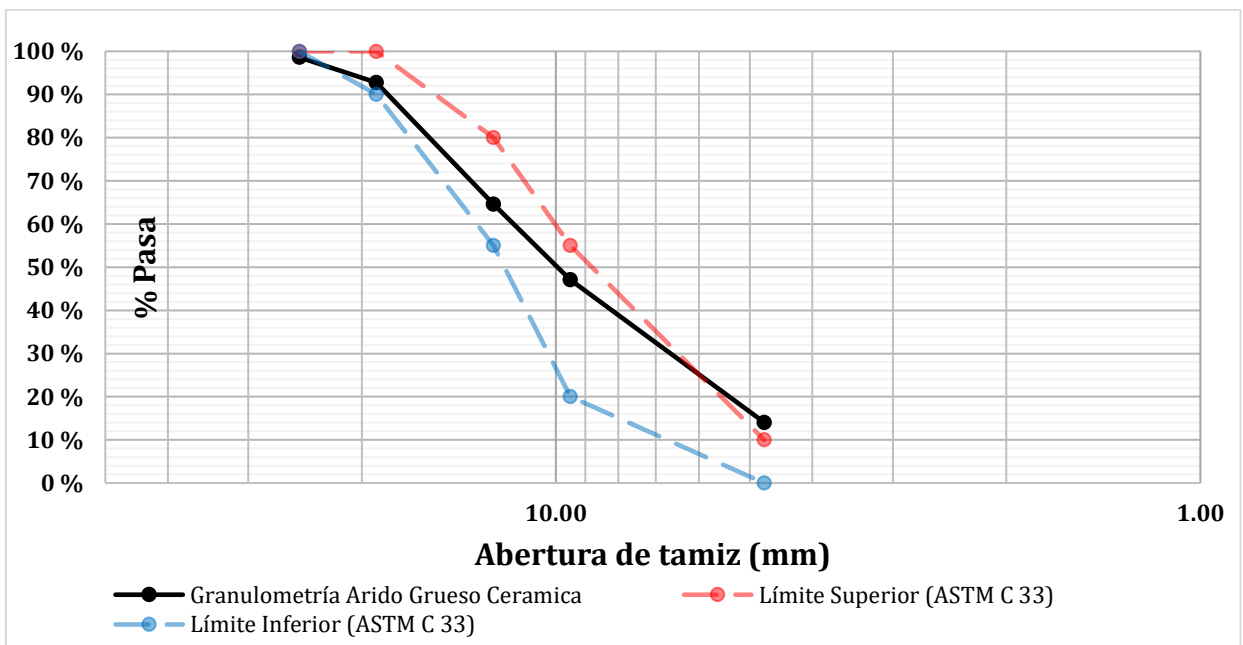


Gráfica 1. Curva granulométrica del agregado grueso natural.

De igual forma en las siguientes gráficas se presentan las curvas granulométricas de los agregados gruesos reciclados, bajo los mismos límites de la ASTM C33. Mediante el tamizado del agregado reciclado se pudo observar que, por la trituration, se presenta una gran cantidad de materiales finos en condiciones de polvo, por lo que se procedió a descartar el material pasante del tamiz N° 4, obteniendo que es aprovechable un 80% del material triturado como agregado grueso.



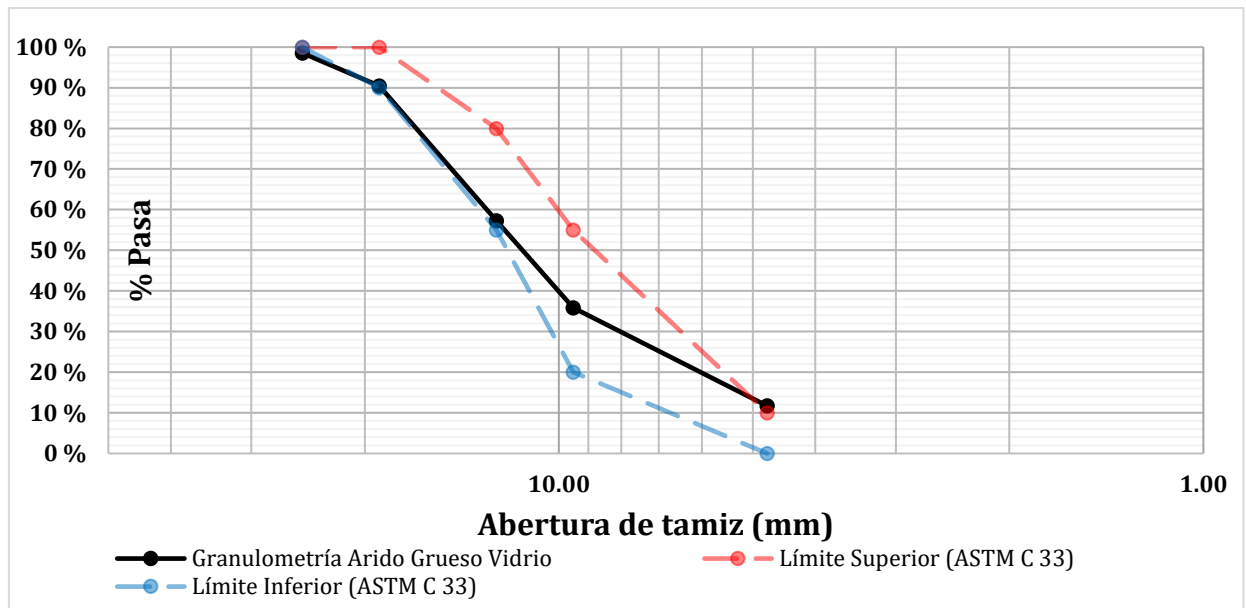
Gráfica 2. Curva granulométrica de porcelana triturada como agregado grueso.



Gráfica 3. Curva granulométrica de cerámica triturada como agregado grueso.

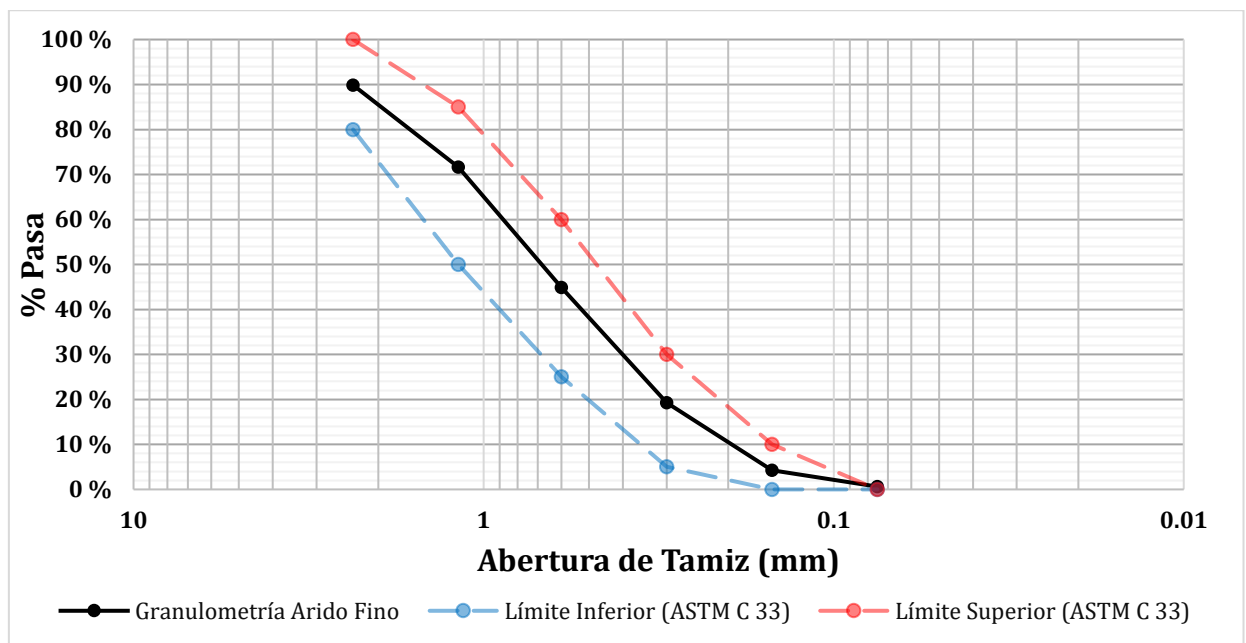
La Gráfica 2. Curva granulométrica de porcelana triturada como agregado grueso. presenta una granulometría ubicada dentro de los límites de la norma, por lo cual no presenta problemas. La granulometría de la cerámica triturada representada en la Gráfica 3. Curva granulométrica de cerámica triturada como agregado grueso., se encuentra dentro de los límites, pero sobrepasa en una pequeña cantidad los niveles de materiales finos, pero resulta no ser un excedente representativo. Gráfica 4. Curva granulométrica

de grueso vidrio triturado como agregado grueso. permite observar que los agregados de vidrio también cumplen la norma.



Gráfica 4. Curva granulométrica de grueso vidrio triturado como agregado grueso.

La curva granulométrica del agregado fino también se encuentra dentro los límites permitidos de la normativa ASTM C33 como se presenta en la Gráfica 5. Curva Granulométrica del agregado fino., por lo que se la considera apta para el diseño de mezclas de hormigón.



Gráfica 5. Curva Granulométrica del agregado fino.

El módulo de finura del agregado fino es de 2.70, según Neville & Brooks (2010) el rango aceptable del módulo de finura es entre 2.3 a 3.1, por lo que nuestro agregado fino se

encuentra dentro del rango recomendable y caracterizado como una arena gruesa según (Niño Hernández, 2010).

4.1.2. DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN.

Con los datos obtenidos en laboratorio se aplican las ecuaciones: Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3; mencionadas con anterioridad para el cálculo de las densidades de los agregados gruesos, mientras que para el agregado fino se emplean las ecuaciones: Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6. Para la absorción de los agregados finos y gruesos empleamos la Ecuación 7.

4.1.2.1. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS.

Tabla 13. Densidades y Absorción de los Agregados Gruesos en Kg/m³

	Agregado Grueso Natural	Cerámica triturada	Porcelana Triturada	Vidrio triturado
Densidad relativa (SH) (Kg/m³)	3044	2597	2959	2522
Densidad relativa (SSS) (Kg/m³)	3096	2810	3016	2522
Densidad aparente (Kg/m³)	3210	3302	3141	2523
Absorción (%)	1.69	8.20	1.96	0.03

Tabla 14. Densidades y Absorción de los Agregados Gruesos en g/cm³

	Agregado Grueso Natural	Cerámica triturada	Porcelana Triturada	Vidrio triturado
Densidad relativa (SH) (g/cm³)	3.04	2.60	2.96	2.52
Densidad relativa (SSS) (g/cm³)	3.10	2.81	3.02	2.52
Densidad aparente (g/cm³)	3.21	3.30	3.14	2.52
Absorción (%)	1.69	8.20	1.96	0.03

Se puede observar que el agregado más resistente es al agregado natural, presentando aproximadamente una densidad entre 1.1 y 1.2 veces mayor a la de los agregados reciclados. La densidad de todos los agregados se encuentran entre los valores promedios que indica Kosmatka & Wilson (2016), cuales están entre 2.4 y 2.9, siendo aptos para ser empleados en hormigones. Para la cerámica se esperaban valores bajos de densidad, al contrario, el lote ensayado presentó una buena densidad estando por encima de 2.4. Para el vidrio al no tener otro ensayo para determinar su densidad se realizó el mismo

procedimiento que para el resto de materiales, pero con dificultad debido a que los materiales deben ser llevados a estado SSS y en este caso su absorción es casi nula.

En lo que respecta a absorción el agregado natural presenta un 1.69 %, que nuevamente bajo el criterio de Kosmatka & Wilson (2016), esta correcto ya que los valores oscilan entre 0.5 % a 2 %. La porcelana en su ficha técnica proporcionada por GRAIMAN nos indica que cumple con la norma ISO 13006:2018, la cual indica que la absorción debe ser menor al 0.5 % por pieza individual, pero en esta investigación dicho valor se ve alterado ya que se trituro a la porcelana brindándole mayor superficie expuesta para absorción, al igual que se consideró al material sin lavar por los que cuenta con material fino adherido a su superficie, por lo que su incremento a un valor de 1.96 % se encuentra dentro de lo esperado. La cerámica triturada presenta una absorción de 8.2 %, lo que significa que es 4.85 veces mayor a la del agregado natural, valor que sobrepasa evidentemente los rangos recomendados, siendo este un material en cual la incrustación de materiales finos, y la retención de humedad es realmente elevada lo que afecta directamente a la resistencia de la mezcla.

4.1.2.2. DENSIDAD DEL ÁRIDO FINO.

Los resultados obtenidos del ensayo de densidad para el agregado fino se expresan en la Tabla 15 y Tabla 16 en diferentes unidades.

Tabla 15. Densidad y Absorción de agregado fino en Kg/m³

Densidad relativa (SH) (Kg/m³)	2487
Densidad relativa (SSS) (Kg/m³)	2582
Densidad aparente (Kg/m³)	2749
Absorción (%)	3.82

Tabla 16. Densidad y Absorción de agregado fino en g/cm³

Densidad relativa (SH) (g/m³)	2.49
Densidad relativa (SSS) (g/m³)	2.58
Densidad aparente (g/m³)	2.75
Absorción (%)	3.82

En base al criterio de Niño Hernández (2010), tenemos que nuestro agregado grueso por su densidad se trata de una arena gruesa, la cual es ideal para la realización de hormigón.

También este autor indica que su absorción debería estar entre 2 % a 6 %, rango en el cual encaja nuestro agregado fino presentando una absorción de 3.82 %.

4.1.3. MASA UNITARIA.

La masa unitaria del agregado grueso natural es 1503.51 Kg/m^3 , es calculada a partir de las Ecuación 8. Y la cual se encuentra dentro del rango aceptable que es entre 1200 a 1750 Kg/m^3 (Kosmatka & Wilson, 2016).

Tabla 17. Masa Unitaria Agregado Grueso Natural

ARIDO+MOLDE (G)	20856.3	Kg
MOLDE (T)	6235	Kg
VOLUMEN MOLDE (V)	0.009725	m^3
Masa Unitaria	1503.51	Kg/m^3

4.1.4. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

Debido a la distribución granulométrica de los materiales, se la clasifica como una granulometría tipo B para este ensayo. Hecho por el cual su carga abrasiva corresponde a 11 esferas las cuales representan una masa de $4584 \pm 25 \text{ gr}$.

Debido al tipo B la norma también indica que: para este ensayo se deben tomar $5000 \pm 10 \text{ gr}$, sumando las cantidades entre una cierta configuración de tamices. Siendo 2500 gr que pasen el tamiz $\frac{1}{2}$ y se retengan en el $\frac{3}{4}$, y otros 2500 gr que pasen el tamiz $\frac{3}{4}$, pero se retengan en el $\text{N}^{\circ}4$.

Tabla 18. Porcentajes de degradación del agregado grueso.

Agregado Grueso	Natural	Cerámica triturada	Porcelana Triturada	Vidrio triturado
Peso Inicial (g)	5005	5000.6	5002.8	5001.3
Peso Final (g)	4743	4537.5	4651.6	4171
% de desgaste	5.23%	9.26%	7.02%	16.60%

Se puede observar que los materiales más adecuados para trabajar en un hormigón durable son el agregado natural y la porcelana triturada, presentando una degradación mucho menor al vidrio y levemente menor a la cerámica. Una vez más la porcelana demuestra mejores propiedades que la cerámica siendo una alternativa más viable que brinda mayor seguridad y garantía. Los valores de degradación deben ser menores al 25% para ser aceptados en el hormigón (Kosmatka & Wilson, 2016). Por lo tanto, todos los agregados cumplen dicha recomendación.

4.2. DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.

Para la mezcla final considerada como mezcla patrón se consideró en la dosificación una relación $a/c = 0.51$, en la siguiente tabla se especifican los pesos de los materiales empleados para 1 m^3 de mezcla de hormigón.

Tabla 19. Dosificación de la muestra patrón para 1 m^3 sin correcciones de humedad.

Material	Peso por 1 m^3 (Kg)	Porcentaje %
Agregado Grueso	947	39.5
Agregado Fino	922	38.5
Agua	178	7.4
Cemento	349	14.6
Total	2396	100

4.3. ELABORACIÓN DE MEZCLAS.

Al comprobar que todos los materiales cumplan con las propiedades requeridas para ser empleados en la elaboración de hormigones, basadas tanto en normativas como en recomendaciones bibliográficas, se procede a obtener el diseño final de la muestra patrón y las modificaciones a la misma con los agregados reciclados.

En total se fundieron 12 mezclas, de cada una se obtuvieron 6 probetas cilíndricas de $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, dando así un resultado de 72 especímenes en total. El volumen de diseño y las diferentes proporciones de agregados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 20. Volumen requerido para 6 probetas cilíndricas.

Elemento	Cantidad	Medidas de espécimen (cm)		volumen	
Cilindros	6	$\phi = 10$	$h=20$	0.0094248	m^3
			Desperdicio	20	%
			Volumen de diseño	0.011310	m^3
				11.31	dm^3

Tabla 21. Dosificación de la muestra patrón para 1 m^3 con correcciones de humedad.

Material	Peso por 1 m^3 (Kg)	Porcentaje %
Agregado Grueso	947.2	37.2
Agregado Fino	921.5	36.2
Agua	229.24	9
Cemento	449.48	17.6

Total	2547.42	100
--------------	----------------	------------

La dosificación para el volumen de las 6 probetas cilíndricas se presenta a continuación:

Tabla 22. Dosificación de Muestra Patrón para volumen de diseño.

Material	Peso para 11.31 dm³ (Kg)
Agregado Grueso	10.71
Agregado Fino	5.08
Agua	2.59
Cemento	10.42
Total	28.8

Tabla 23. Dosificación de mezcla 70% AG natural – 30% Ag reciclado para volumen de diseño.

Material	Peso para 11.31 dm³ (Kg)
Agregado Grueso Natural 70%	7.50
Agregado Grueso Reciclado 30%	3.21
Agregado Fino	5.08
Agua	2.59
Cemento	10.42
Total	28.8

Tabla 24. Dosificación de mezcla 30% AG natural – 70% Ag reciclado para volumen de diseño.

Material	Peso para 11.31 dm³ (Kg)
Agregado Grueso Natural 30%	3.21
Agregado Grueso Reciclado 70%	7.50
Agregado Fino	5.08
Agua	2.59
Cemento	10.42
Total	28.8

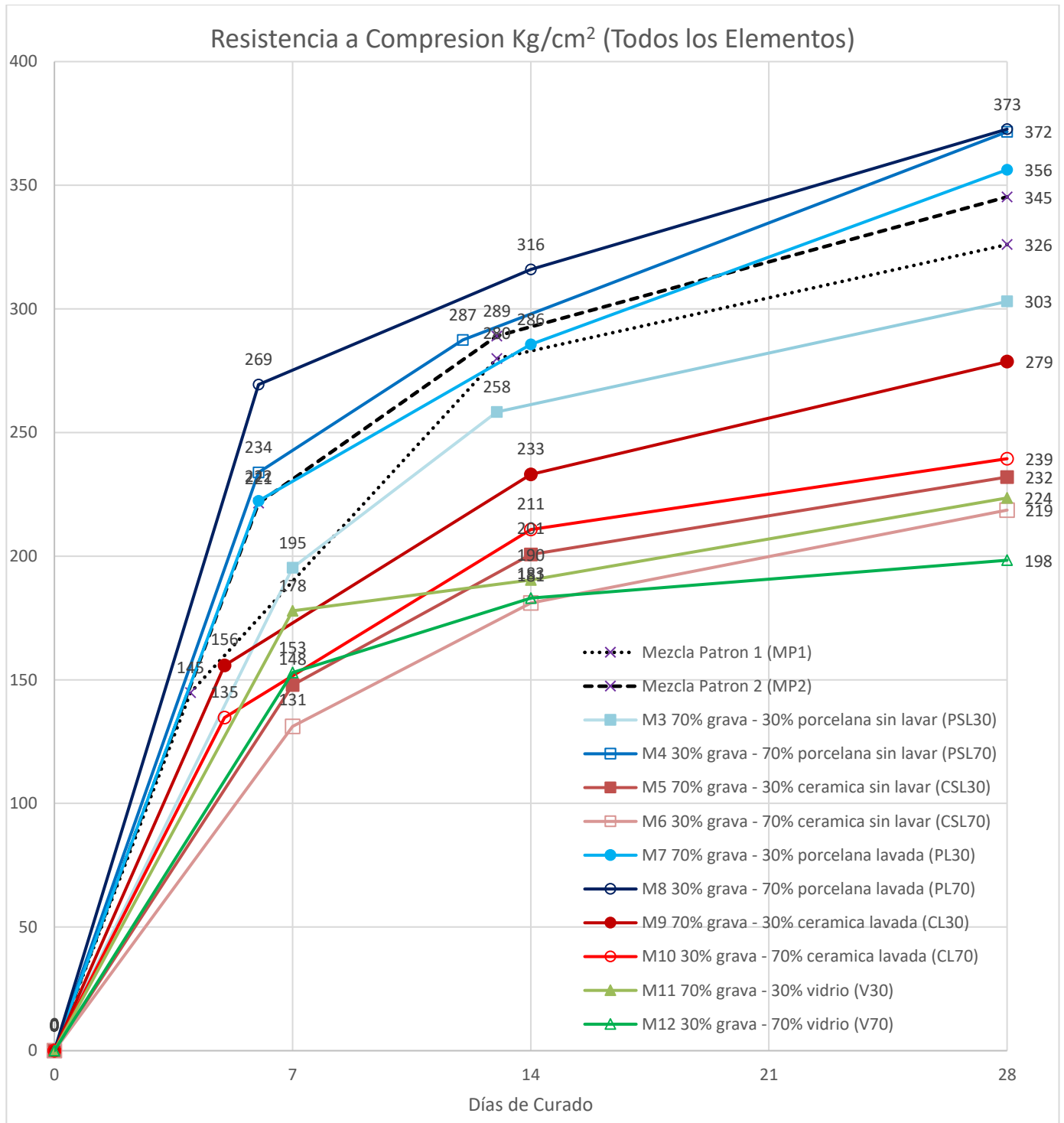
Para las mezclas M1 y M2 se aplicó la dosificación expresada en la Tabla 22. Para las mezclas impares es decir las mezclas: M3, M5, M7, M9 y M11, se empleó la dosificación

de la Tabla 23. Mientras que para las mezclas pares: M4, M6, M8, M10 y M12, se utilizó la tercera dosificación indicada en la Tabla 24. Cada ficha de mezcla se detalla en anexos.

4.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.

Gracias a los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio, se pudieron procesar sus datos para generar curvas de resistencias respectivamente al igual que gráficas para resistividad eléctrica.

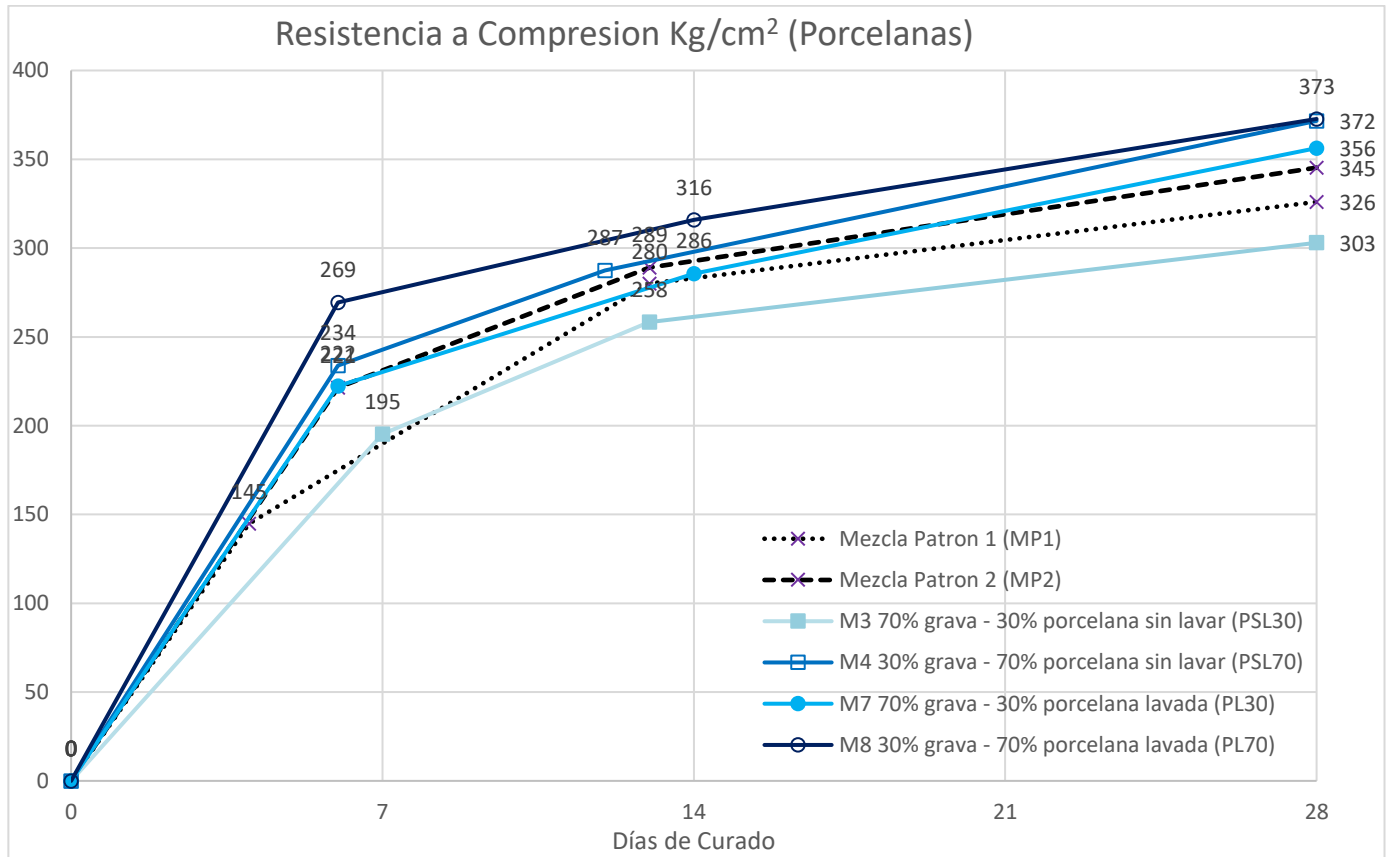
4.4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.



Gráfica 6. Resistencias de probetas cilíndricas de hormigón a Compresión.

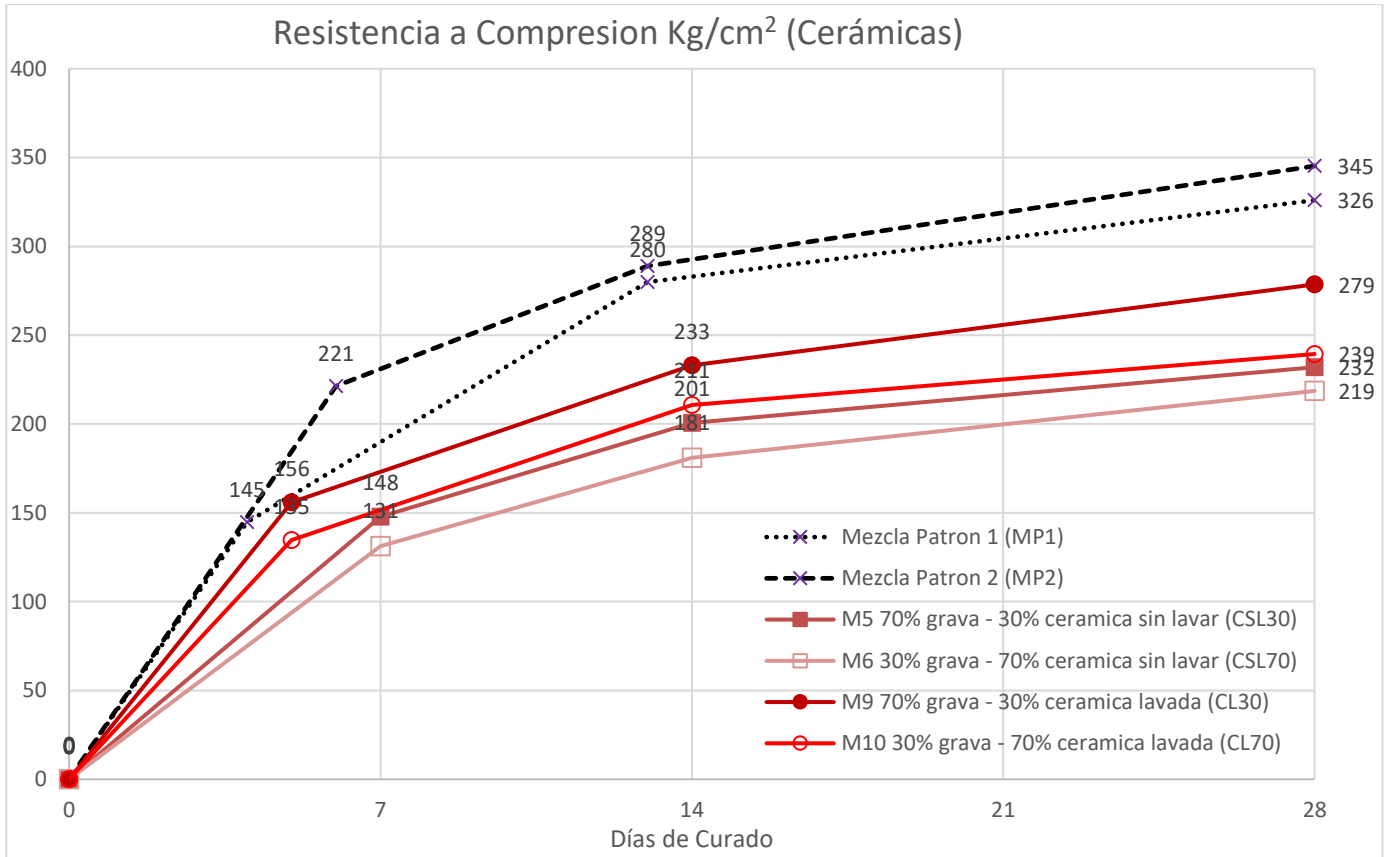
Como se presenta en la gráfica anterior, las resistencias varían desde los 198 Kg/cm² aproximadamente hasta los 372 Kg/cm², calificando a algunos hormigones como pobres y a otros como hormigones de resistencias estándares o convencionales.

Para la mejor interpretación de los resultados se separó en varias graficas agrupando las curvas con su tipo de material reciclado y las mezclas patrón, además de separarlas por su proceso de lavado y sin lavar más la mezcla patrón.

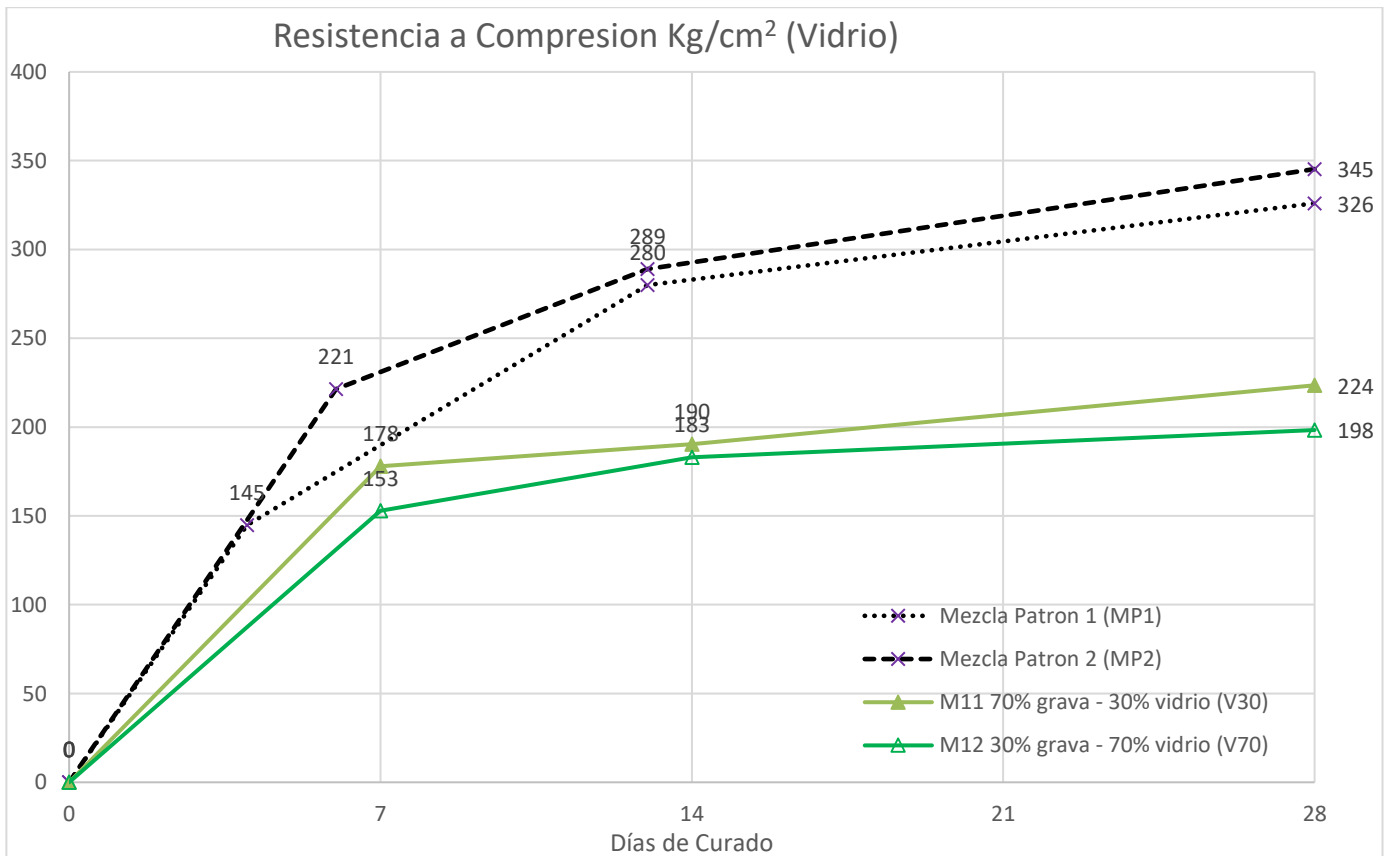


Gráfica 7. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de porcelana.

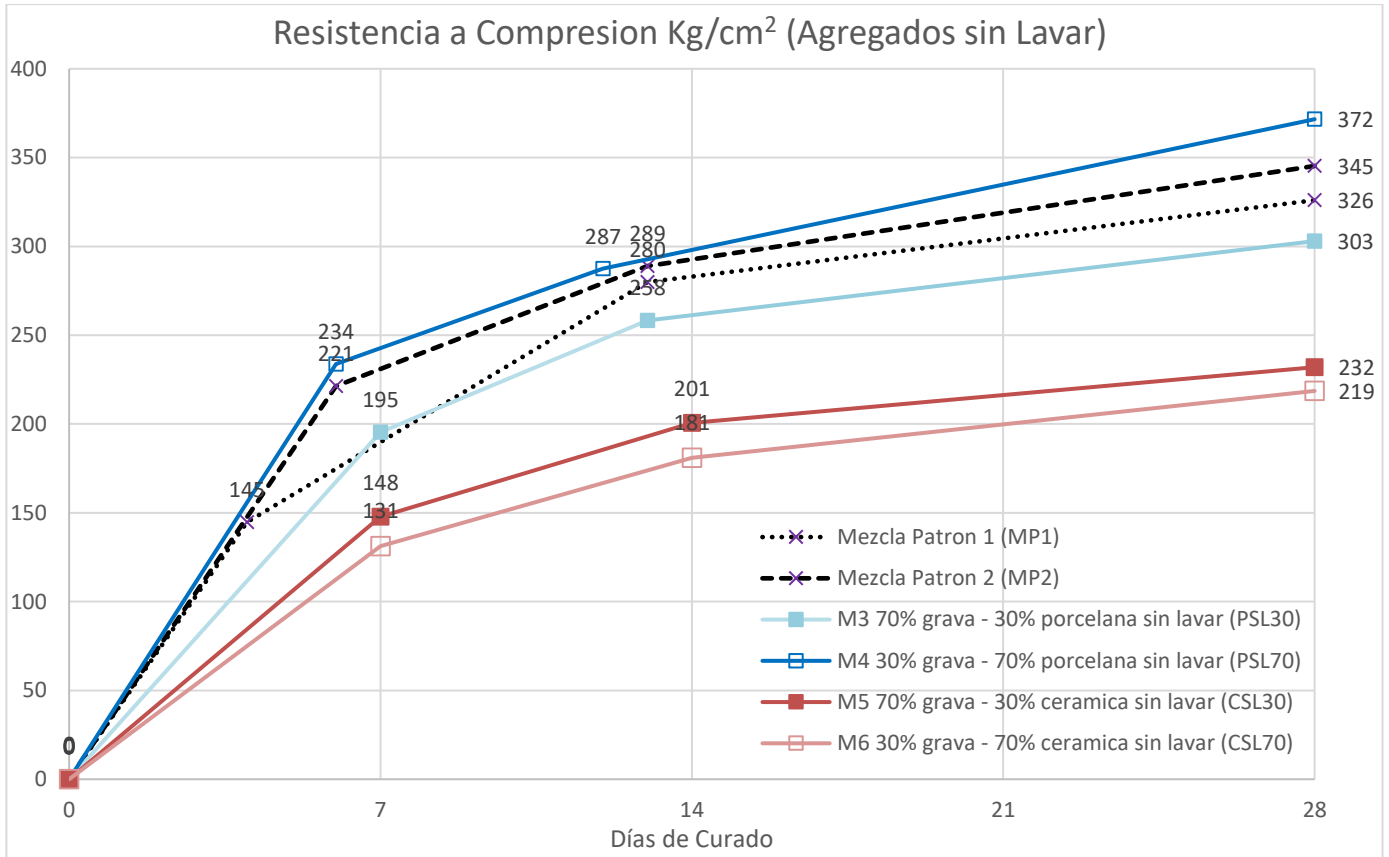
Como se puede observar en la Gráfica 6 aproximadamente el 90% de las mezclas pueden ser denominadas como hormigones estructurales debido a que sobrepasan los 210 Kg/cm² que expresa la NEC que es la Normativa Ecuatoriana de la Construcción. Las mezclas que mejor se desempeñan en el ensayo son la PL70, PSL70, PL30, PSL30 y además las mezclas patrón que en promedio alcanzan los 335 Kg/cm². De igual forma es evidente que el material con un bajo desempeño es el vidrio como agregado grueso, presentando una resistencia de 198 Kg/cm² en la M12 o definida como V70 y sobrepasando de forma mínima con 219 Kg/cm² en su mezcla M11 o V30.



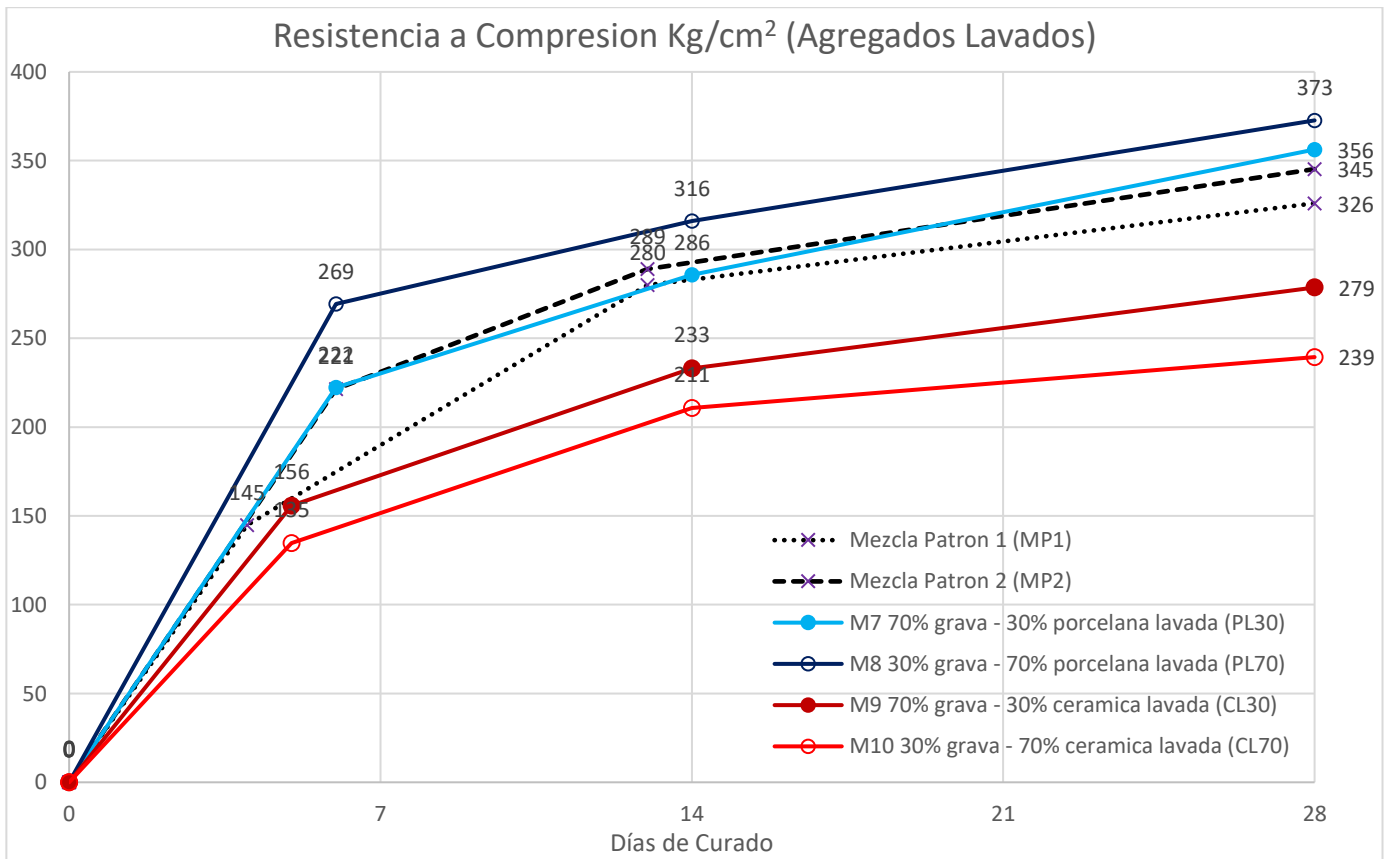
Gráfica 8. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de cerámica.



Gráfica 9. Resistencias de hormigón a compresión con inclusión de vidrio.



Gráfica 10. Resistencias de hormigón a compresión con agregados reciclados sin lavar.



Gráfica 11. Resistencias de hormigón a compresión con agregados reciclados lavados.

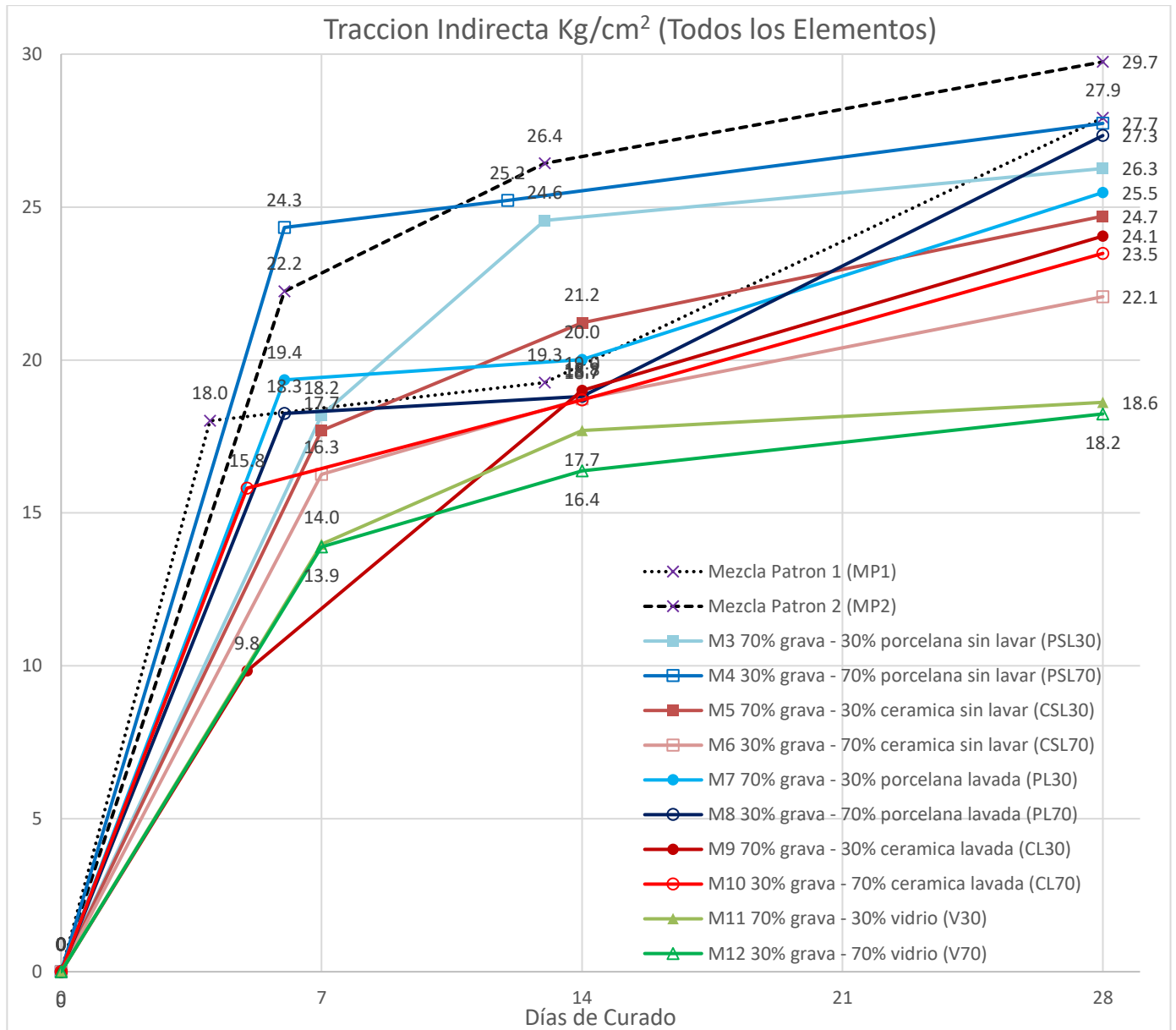
En base de las gráficas anteriores se puede decir que, la porcelana tiene un buen desempeño ya que es el material que más asemeja su comportamiento a la mezcla patrón e inclusive incrementa su resistencia un 10%, esto se debe a su forma angulosa por el triturado, buena densidad y su baja absorción.

Se puede ver una mejoría en los resultados debido al proceso de lavado de los agregados en las mezclas con cerámica, esto se debe a que los poros expuestos se llenan de polvo en la trituración y al lavarlos se disminuye el porcentaje de impurezas, lo que refleja en su resistencia. El proceso de lavado representa un mejoramiento de 6 % en la mezcla M10 e incluso en el caso de la M9 mejoro en un 20% con respecto a la M5. De igual forma las resistencias obtenidas con la inclusión del material cerámico disminuyen la resistencia del hormigón de su patrón desde un 16 % hasta un 35 %. Para el caso de la porcelana no resulta ser muy significativo e influyente el proceso de lavado del agregado reciclado, ya que este material es más resistente que la cerámica, por lo tanto su desgaste en el proceso de trituración produce menos finos, al igual que su baja porosidad no permite que estos se adhieran en gran cantidad, garantizando que su influencia sea baja y posiblemente para futuros ensayos se descartaría el proceso de lavado en el caso específico de la porcelana, esto a su vez dependiendo del lote, fabricante y procedencia.

Los resultados de compresión para las mezclas con inclusión de vidrio, son las que presentan una drástica disminución de resistencia, determinando que la incorporación de este material como agregado grueso es poco alentador debido a que la resistencia final del hormigón no cumple los requisitos mínimos para ser calificado como hormigón estructural, o los sobrepasa con un 5 %, lo cual representa un margen de error muy ajustado que en procesos de obra puede verse afectado dicho rendimiento y convertirse en un riesgo para los usuarios. La reducción de la resistencia final a los 28 días de curado de las especies que contienen vidrio comparadas con la muestra patrón es de aproximadamente un 40 %, por lo que seguramente su análisis de costo beneficio resultara desfavorable debido a las cantidades de cemento que se usan para un tan bajo desempeño.

4.4.2. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.

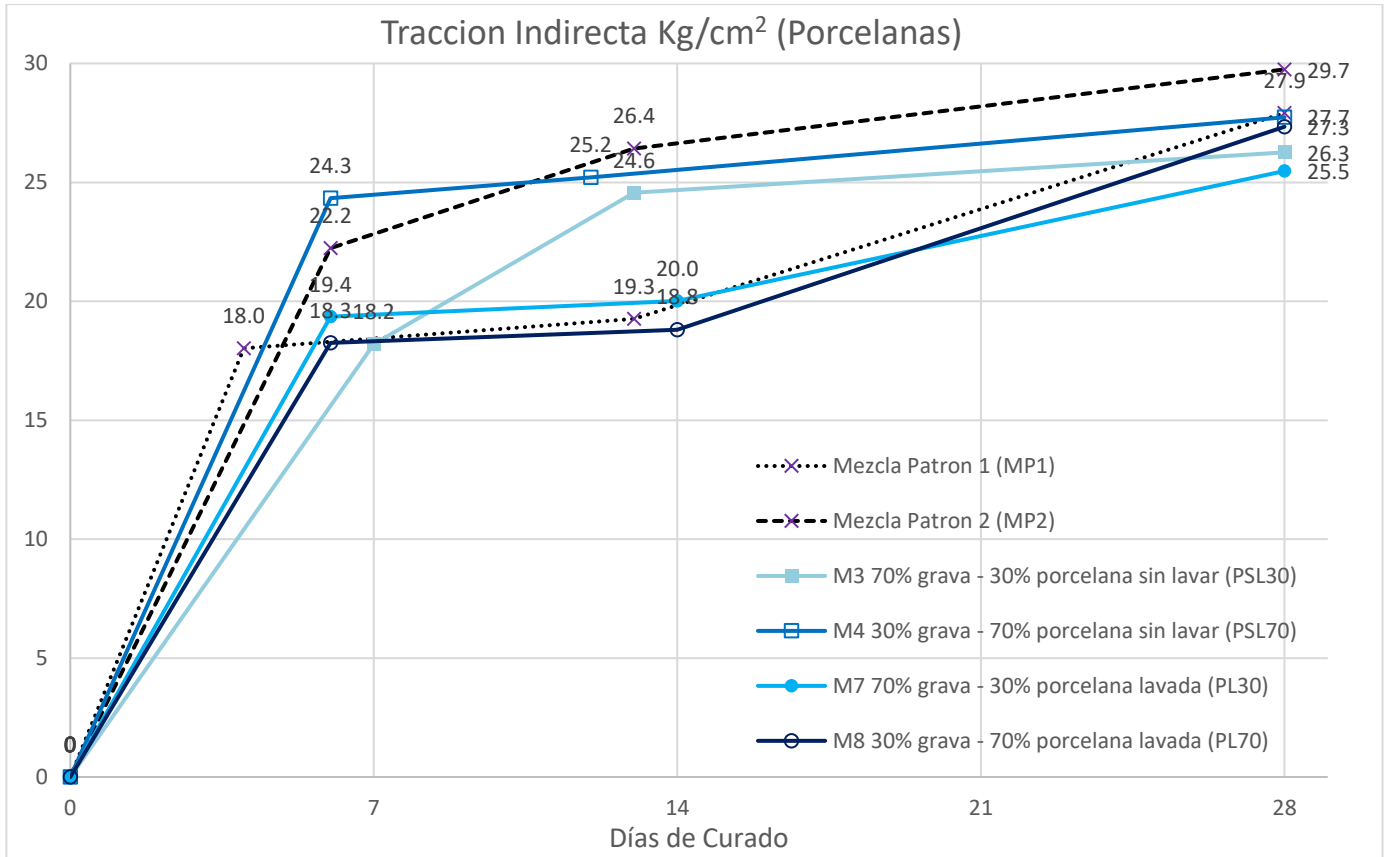
De la misma forma que para compresión, los resultados de los ensayos de tracción indirecta son presentados en la Gráfica 12. Donde se pueden observar los diferentes desempeños de las alternativas y la variación entre sus resistencias finales como en edades tempranas.



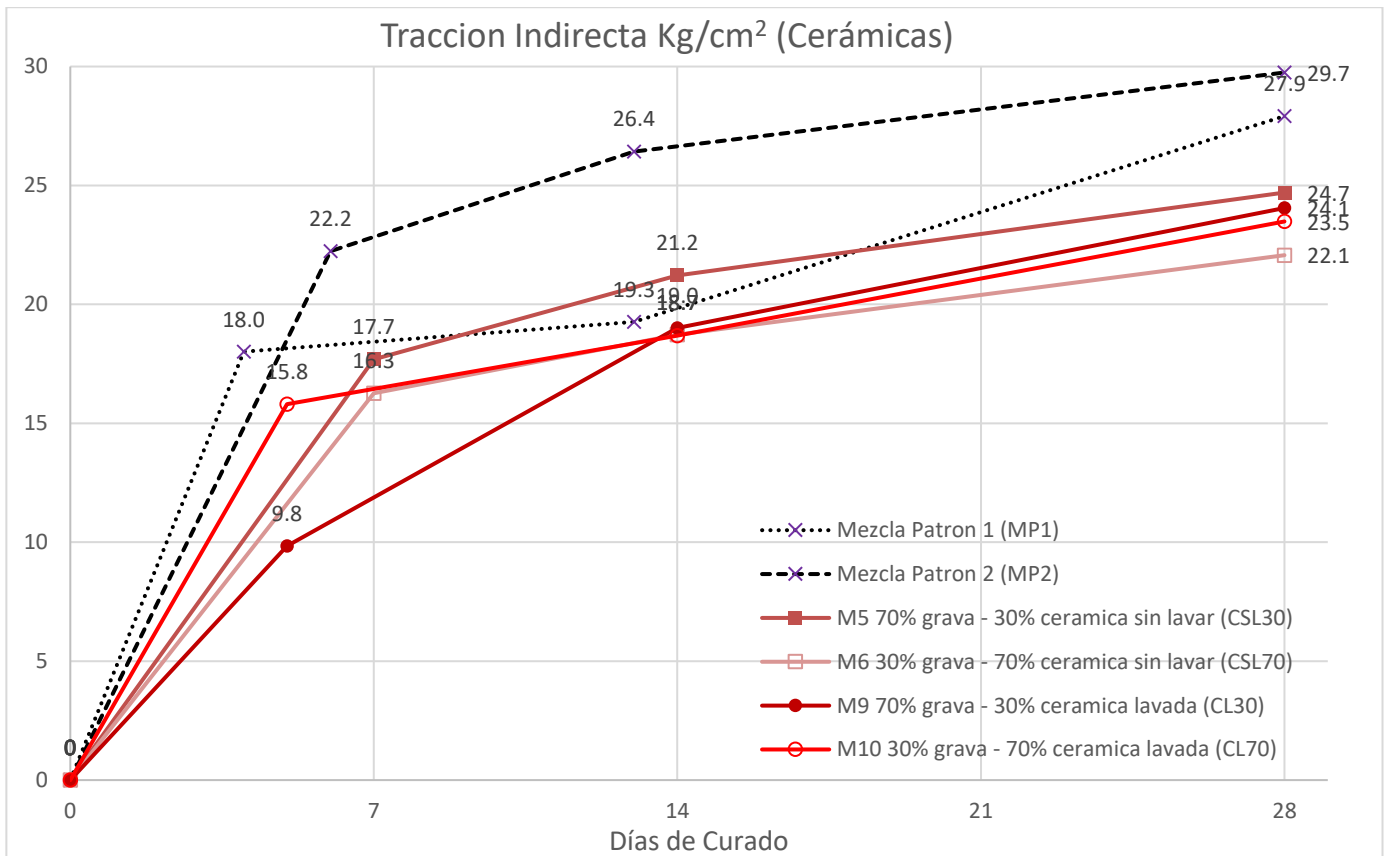
Gráfica 12. Resistencias de probetas cilíndricas de hormigón a Tracción.

En base a la Gráfica 12 podemos comprobar que solo un 60% de las resistencias finales se hallan dentro de los rangos normales que definen Neville & Brooks (2010), siendo estos entre 25 Kg/cm² y 31 Kg/cm². También se observa que aproximadamente las resistencias finales a tracción indirecta representan un 9% de las resistencias finales de compresión.

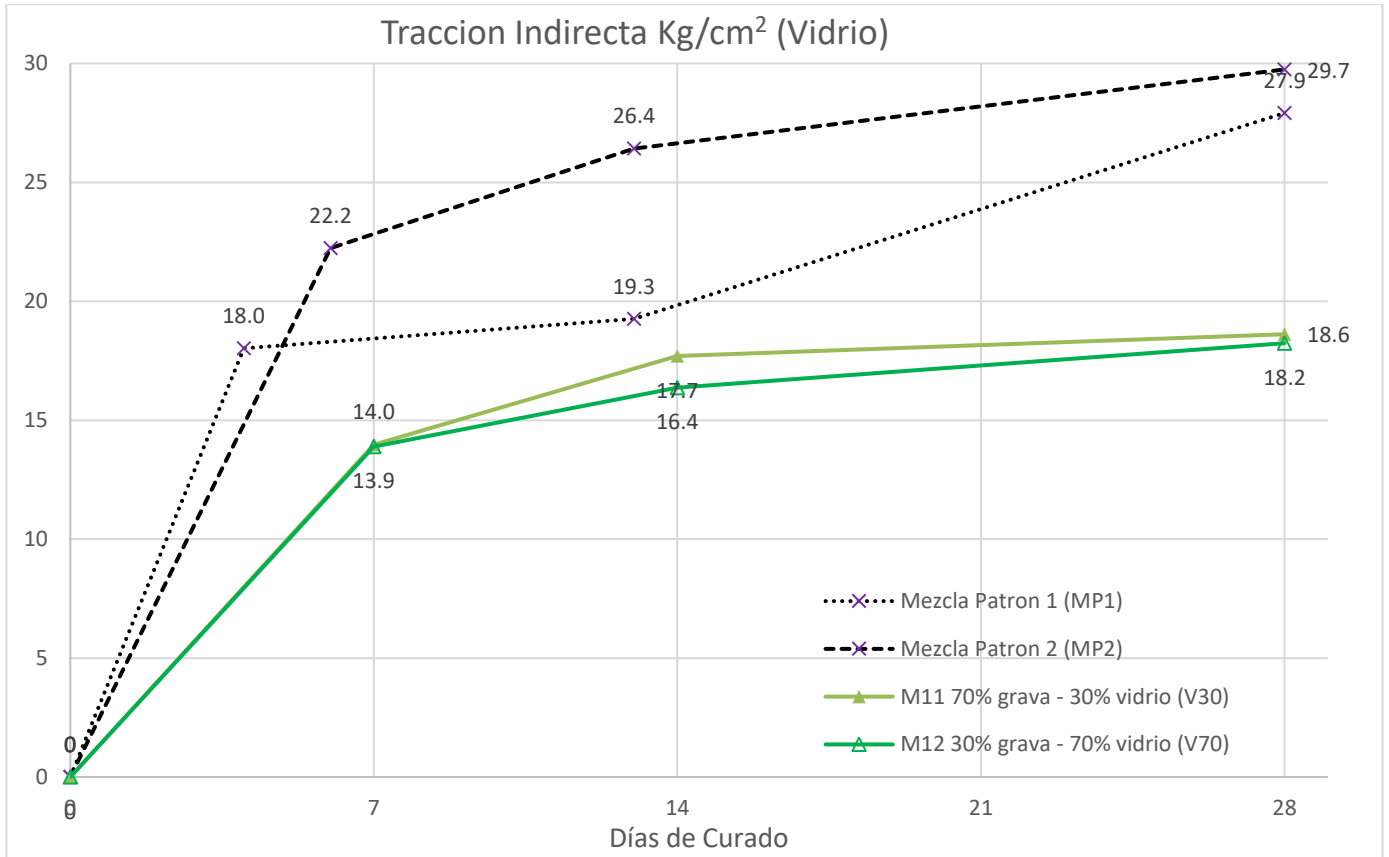
Las mezclas que brindan mejores resultados en el ensayo: son las mezclas patrón y las mezclas que incorporan porcelana. Una vez más se ve reflejado el buen desempeño de las mezclas con contenido de porcelana y agregados naturales en una proporción 70-30 respectivamente, que comparadas con el mejor resultado (29.7 Kg/cm²) correspondiente a la mezcla MP2, diferencian en su resistencia un 10%. Cabe recalcar que todas las mezclas que incluyen porcelana superan los 25 Kg/cm².



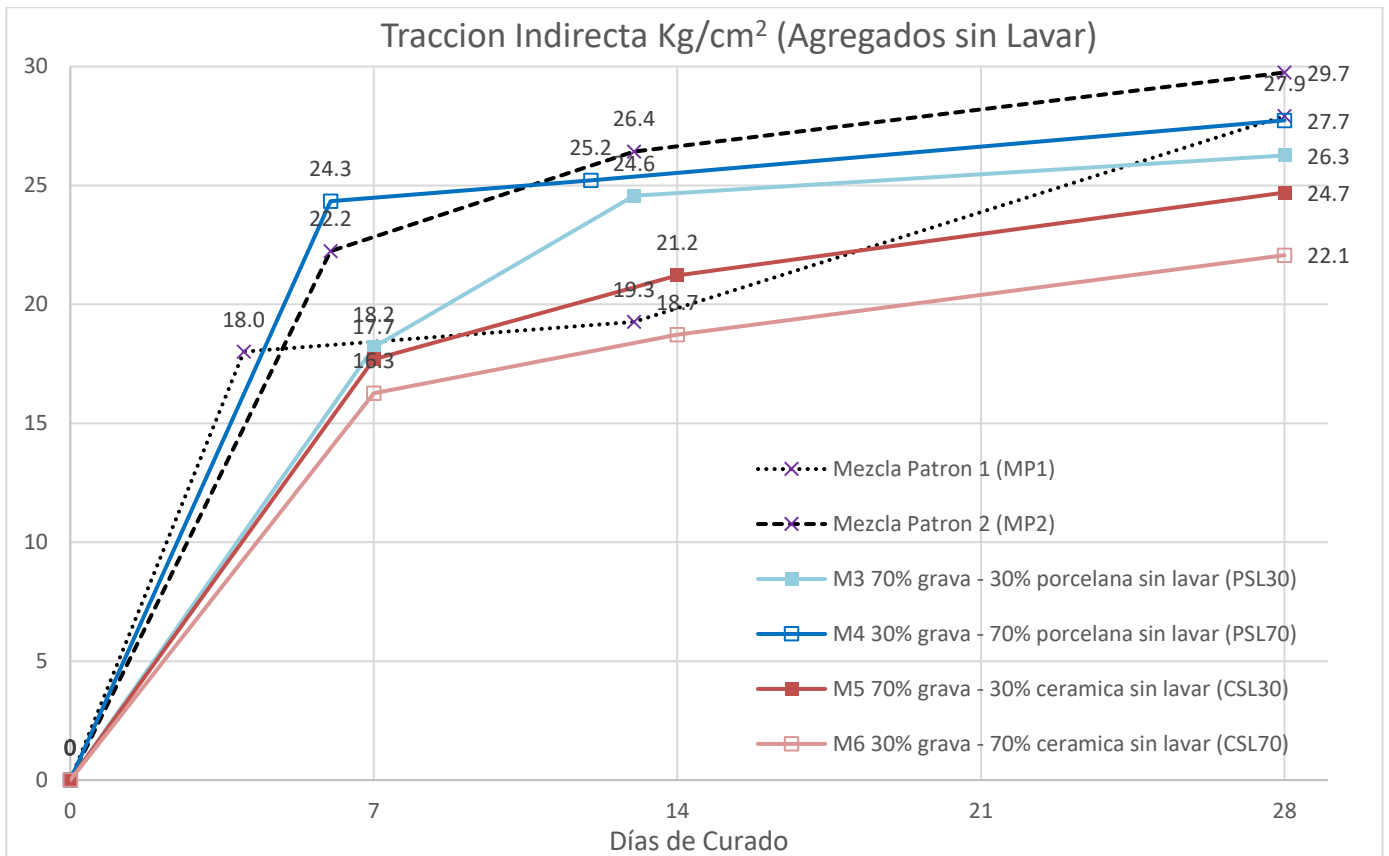
Gráfica 13. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de porcelana.



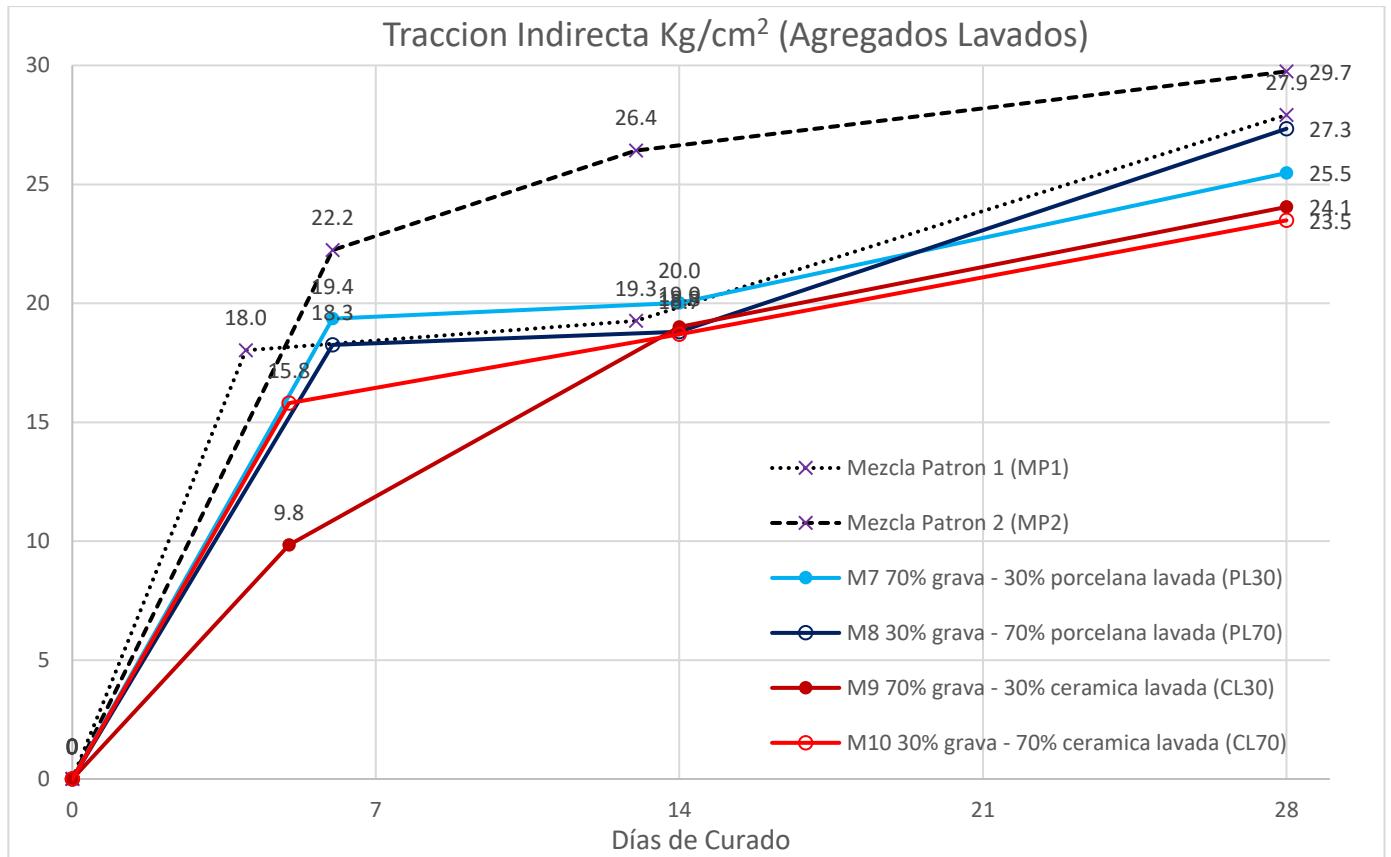
Gráfica 14. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de cerámica.



Gráfica 15. Resistencias de hormigón a tracción con inclusión de vidrio.



Gráfica 16. Resistencias de hormigón a tracción con agregados reciclados sin lavar.



Gráfica 17. Resistencias de hormigón a tracción con agregados reciclados lavados.

Con la representación de las gráficas anteriores se esclarece que la influencia del lavado, no es alta como se hubiera esperado en los resultados de tracción indirecta, ensayo donde principalmente el agregado es más influyente que la pasta. Las muestras sin lavar presentan menores resistencias que las mezclas con agregados lavados, pero dicha diferencia estadísticamente no es significativa.

Debido al tipo de ensayo, el agregado es sometido a mayores esfuerzos internos que la mezcla, por lo que, si se ve una afección en las mezclas que incluyen agregados reciclados comparados con las mezclas patrón, esto se debe a la cara esmaltada o terminada, que se presenta en las de cerámicas y porcelanas, dichas superficies generan planos de falla, donde la mezcla pierde adherencia y por lo tanto resistencia.

El mismo efecto se ve reflejado en las mezclas con vidrio e inclusive es mucho mayor, ya que el vidrio al ser prácticamente liso, genera planos de falla más grandes repercutiendo en resistencias mucho menores, además que al ser un material de poca resistencia también falla a cortante, con la inclusión de material ambas mezclas quedaron fuera del rango oscilatorio de resultados, alcanzando los 18.2 y 18.6 Kg/cm² de resistencia final.

Gracias a la observación de la forma de fallo de las probetas con materiales reciclados, se planteó un análisis que contemple una comparación entre los planos de falla del espécimen y su resistencia a compresión a los 28 días de curado.

Para lo cual se tomaron fotografías de las probetas falladas y con herramientas computacionales se introdujo en ellas una malla de medición para cuantificar el área de fallo por adherencia producida por las caras lisas. La malla es de 200 cm^2 , igual que la sección de las probetas en vista frontal, la malla está dividida en cuadrados de $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ cada uno, estableciendo una grilla de pixeles de 0.25 cm^2 .

Este proceso fue realizado en 4 probetas debido: a sus materiales y su tipo de falla, dando como resultado una relación entre su área de fallo sobre su área total y este a la vez es comparado con su resistencia final a compresión.

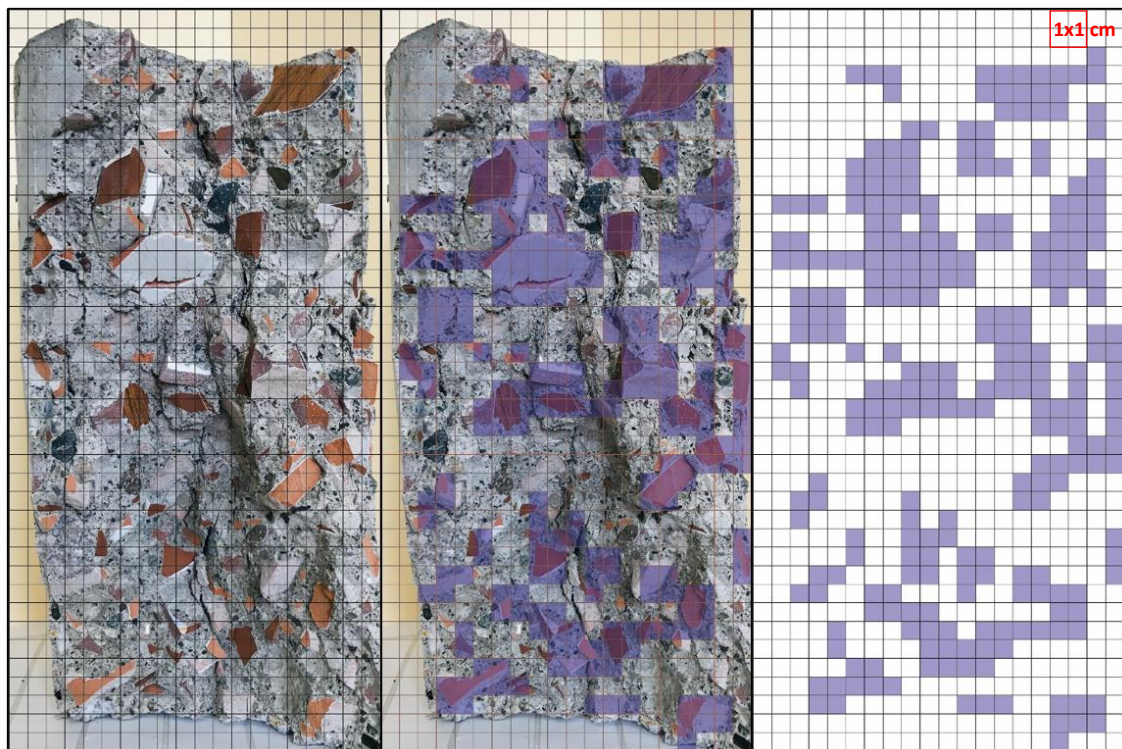
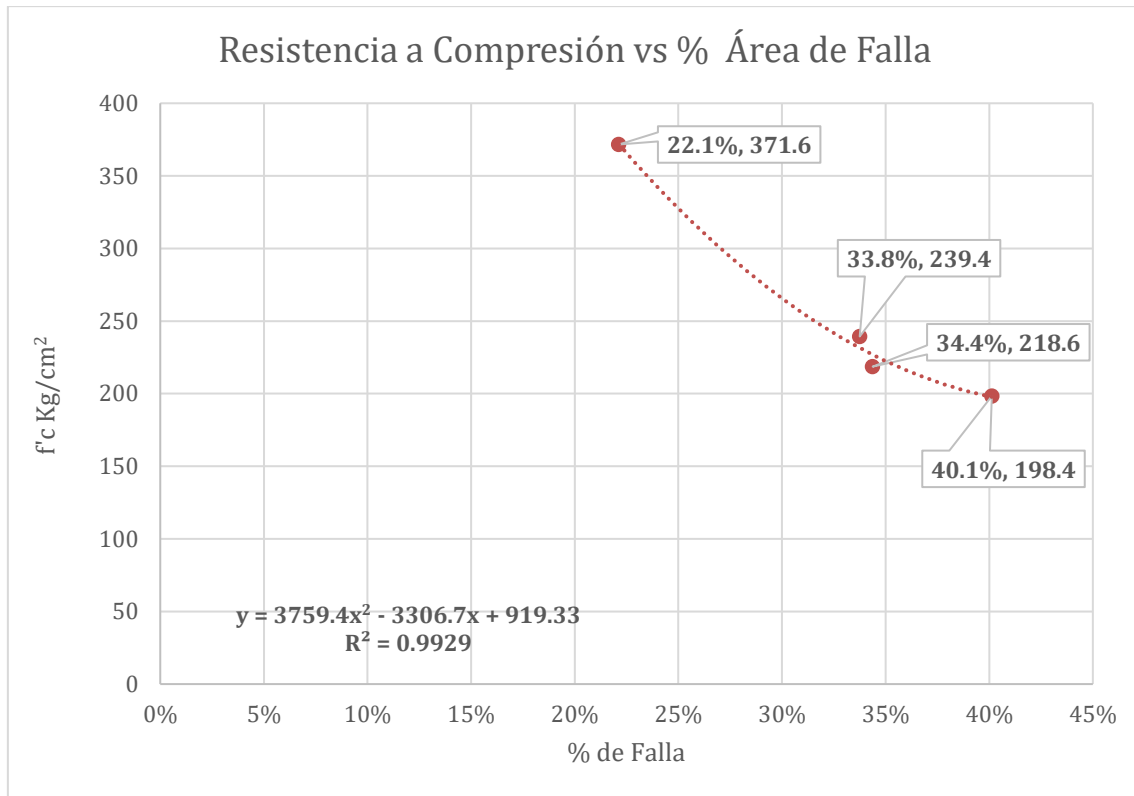


Ilustración 16. Análisis de Áreas de Fallo en mezcla M10 (CL70).

Tabla 25. Resultados de Análisis de Áreas de Fallo.

Muestra Analizada	Material	# pixeles de falla	Área de pixeles fallados cm^2	Área total cm^2	AF/AT (%)	f_c (Kg/cm^2)
M4-PSL70	Porcelana	177	44.25	200	22.1%	371.6
M6-CSL70	Cerámica	275	68.75	200	34.4%	218.6
M10-CL70	Cerámica	270	67.5	200	33.8%	239.4
M12-V70	Vidrio	321	80.25	200	40.1%	198.4



Gráfica 18. Relación resistencia a compresión vs Porcentaje de área de falla

La Gráfica 18 posee una gran importancia ya que demuestra que, a mayor área de fallo por caras lisas del agregado, menor es la resistencia de la mezcla. De donde también se puede deducir que, con una menor incorporación de agregados reciclados con caras esmaltadas, se puede mejorar la resistencia para lo cual se debería en una futura investigación probar con más porcentajes de relación entre agregado natural y agregado reciclado, con el fin cuantificar la afección y brindar una ecuación o porcentaje óptimo de inclusión de agregado reciclado en base a su área de fallo por caras lisas.

4.4.3. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

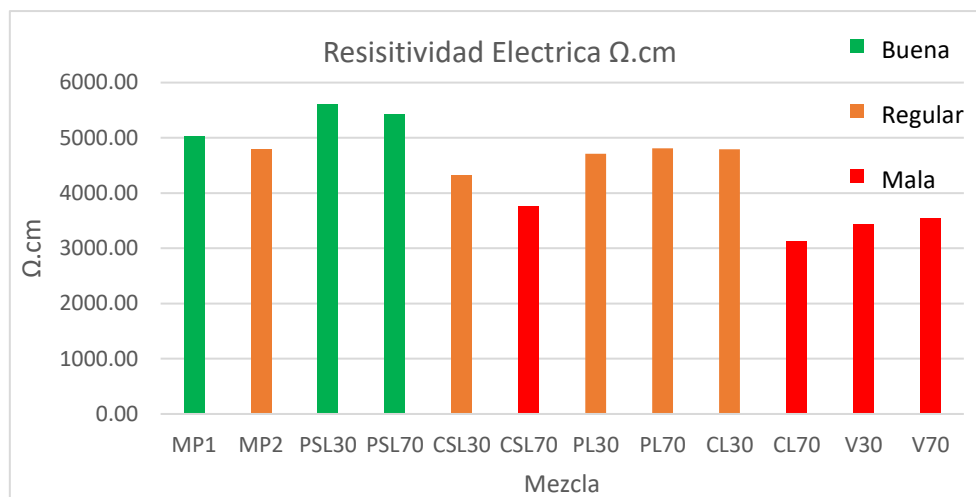
Para los ensayos de resistividad no se pudo realizar las mediciones a los mismos días de curado de las muestras, debido a la disponibilidad del equipo y del personal que realiza el ensayo, motivo por el que se realizó una sola medición a una especie de cada mezcla, obteniendo su resistividad en ambos sentidos de positivo a negativo y viceversa, tomando como resultado el promedio.

Es importante recalcar que el ensayo para cada muestra fue realizado con las probetas en estado Saturado Superficialmente Secas (SSS), para mantener las condiciones de medición constantes.

Tabla 26. Resultados de Resistividad Eléctrica

Mezcla	Días de Curado	Resistividad $\Omega.cm$
MP1	24	5027
MP2	24	4791
PSL30	18	5596
PSL70	17	5419
CSL30	12	4320
CSL70	12	3754
PL30	11	4712
PL70	11	4811
CL30	10	4791
CL70	10	3130
V30	7	3432
V70	7	3548

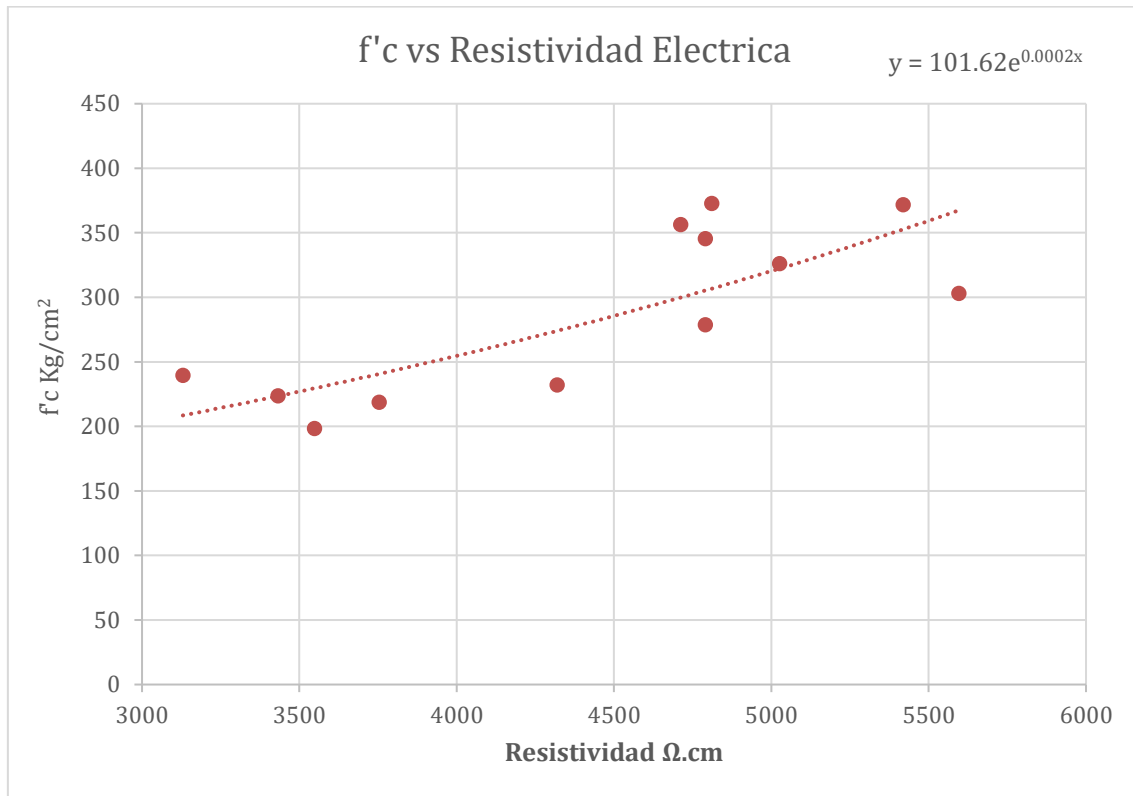
Con los datos de la Tabla 26 se construyó la Gráfica 19.



Gráfica 19. Resistividad Eléctrica de las mezclas de hormigón.

En la gráfica anterior se clasifican a las resistividades eléctricas como: Bueno, Regular y Mala. Esto fue definido en comparación con sus resultados de compresión y el tipo de material de la mezcla. La resistividad está sumamente ligada al contenido de humedad en las probetas por lo que a mayor contenido de agua menor esfuerzo hace la onda para transmitirse y por ende menor resistividad. Con respecto a la durabilidad y $f'c$, se produce que, a menor resistividad eléctrica, menor resistencia a compresión y menor durabilidad tiene el hormigón. Se da debido a que en edades tempranas los procesos de hidratación del cemento no están totalmente completados, por lo que aun las muestras presentan bajas resistencias a compresión reflejando en su alta humedad y en su baja resistividad eléctrica.

Relacionando la resistividad eléctrica de cada probeta con su respectiva resistencia final a compresión obtenemos la siguiente gráfica.



Gráfica 20. Relación entre Resistencia a Compresión y Resistividad Eléctrica.

A pesar de haber realizado el ensayo a mezclas con diferentes composiciones y en distintos días de curado, se puede observar que el comportamiento es el esperado, reflejando que, a mayores valores de resistividad, corresponden mayores valores de resistencia a compresión.

4.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL.

4.5.1. GREENROADS

Mediante el checklist online que ofrece Greenroads se pudo establecer que, en una etapa de planeamiento para una infraestructura vial de pavimento rígido, el uso de agregados reciclados parciales como sustitutos del agregado grueso en mezclas de hormigón, aporta con 31 puntos de los 40 puntos necesarios para que el proyecto sea acreditado y certificado con el nivel Bronce. La mezcla patrón tiene una puntuación de 19 puntos, lo que indica que ambientalmente, nuestra alternativa con material reciclado sí está contemplando el parámetro de sostenibilidad.

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name * Proyecto de Titulacion	City, State/Province, Country Cuenca	Project Manager Pablo Vasquez
Project Budget (million USD) <input type="text"/>	Current Status Planning	

Target Score: Minimum Project Requirements not met <input type="text"/> Bronze Silver Gold Evergreen Requirements: No Email Send a complete copy of this checklist to yourself. Your email <input type="text"/> <input type="button" value="SEND"/> <input type="button" value="Print"/>	Materials & Design Attempting My Score	Creativity & Effort Attempting My Score
	MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points Y 1	CE-1 Educated Team 1-2 points Y 2
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points Y 1	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points Y 1	
MD-3 Environmental Product Declarations 2 points Y 2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points Y 5	
MD-4 Health Product Declarations 2 points Y 2	CE-4 Local Values 1-3 points <input type="text"/> <input type="text"/>	
MD-5 Local Materials 1-5 points Y 5		
MD-6 Long-Life Design 1-5 points <input type="text"/> <input type="text"/>		

Ilustración 17. Checklist para certificación Greenroads de mezcla patrón.

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name * Proyecto de Titulacion	City, State/Province, Country Cuenca	Project Manager Pablo Vasquez
Project Budget (million USD) <input type="text"/>	Current Status Planning	

Target Score: Minimum Project Requirements not met <input type="text"/> Bronze Silver Gold Evergreen Requirements: No Email Send a complete copy of this checklist to yourself. Your email pablo.vasquezv@ucuenca.e <input type="button" value="SEND"/> <input type="button" value="Print"/>	Materials & Design Attempting My Score	Creativity & Effort Attempting My Score
	MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points Y 4	CE-1 Educated Team 1-2 points Y 2
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points Y 5	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points Y 5	
MD-3 Environmental Product Declarations 2 points Y 2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points Y 5	
MD-4 Health Product Declarations 2 points Y 2	CE-4 Local Values 1-3 points <input type="text"/> 1	
MD-5 Local Materials 1-5 points Y 5		
MD-6 Long-Life Design 1-5 points <input type="text"/> <input type="text"/>		

Ilustración 18. Checklist para certificación Greenroads de mezcla con agregados reciclados.

Es importante detallar que los puntos obtenidos en ambos casos corresponden únicamente a dos de las ocho categorías de acreditación, lo cual es un aporte significativo

medioambientalmente ya que se pueden mejorar levemente otros parámetros de otras categorías del proyecto y conseguir una certificación medioambiental.

4.5.2. PALATE V2.2

Los datos que fueron insertados se basaron para 1m^3 de hormigón, y se tomó la dosificación de la Tabla 21, dicha dosificación cuenta con correcciones de humedad y se consideró al agregado reciclado con valores de cero para su transporte y costo de producción ya que dicho material ya cumplió su ciclo de vida.

Tabla 27. Entrada de datos en PaLate v2.2 para hormigón con mezcla patrón.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site	
	Unit	tons/CY	CY	tons	One-Way Only	
					Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Grava Redondeada	2.32	0.41	0.95	20	Truck
	Arena	1.90	0.48	0.92	20	Truck
	Agua	0.84	0.27	0.23	0	Truck
	Cemento	1.27	0.35	0.45	15	Truck
	Total: PCC to site	1.95		3	0	Truck

Tabla 28. Resultados de PaLate v2.2 para hormigón con mezcla patrón.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.8	404
	Materials Transportation	0.1	7
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.8	404
	Materials Transportation	0.1	7
	Equipment	0.0	0
Total		2.9	411

Tabla 29. Entrada de datos en PaLate v2.2 para hormigón con mezcla de agregados reciclados.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site	
	Unit	tons/CY	CY	tons	One-Way Only	
					Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Grava Redondeada	2.32	0.12	0.28	20	Truck
	Arena	1.90	0.48	0.92	20	Truck
	Agua	0.84	0.27	0.23	0	Truck

Cemento	1.27	0.35	0.45	15	Truck
Agregado Reciclado	1.99	0.00	0.00	0	Truck
Total: PCC to site	1.95		2	0	Truck

Tabla 30. Resultados de PaLate v2.2 para hormigón con mezcla de agregados reciclados.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	398
	Materials Transportation	0.1	5
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	398
	Materials Transportation	0.1	5
	Equipment	0.0	0
Total		2.7	403

Tabla 31. Resumen de Resultados PaLate

Tipo de Mezcla	Para 1 m ³		Para 16 m ³		Para 100 m ³		Para 6000 m ³	
	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)
Patrón	2.9	411	45.8	6574	286.4	41089	17183.8	2465344
Hormigón Reciclado	2.7	403	44	6448	274.9	40303	16493.2	2418157
Diferencia	0.2	8	1.8	126	11.5	786	690.6	47187

De acuerdo a los resultados cuantitativos de impacto ambiental obtenidos con la herramienta PaLate, se puede percibir que la mezcla patrón consume más energía y emite una mayor cantidad de gases que las mezclas que incorporan agregados reciclados. En cuanto a la energía se puede ver que en un año existe un ahorro de 690.6 GJ gracias a la alternativa con áridos reciclados, lo que representa el consumo de 500 focos de 100 watts encendidos por cinco meses. De igual forma las emisiones de CO₂e disminuyen al final del año para un volumen de 6000 m³ de hormigón, en un total de 47187 Kg gracias a la alternativa reciclada, lo que equivale a que cada año 5 vehículos livianos estándares dejen de circular.

4.5.3. LEED v4

Tabla 32. Checklist LEED v4 de mezcla patrón.

6	0	0	Materiales y Recursos		13
Sí			Prerreq	Almacenamiento y Recolección de Productos Reciclables	Obligatorio
Sí			Prerreq	Planificación de la Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	Obligatorio
1		0	Crédito	Reducción del Impacto del Ciclo de Vida del Edificio	5
2		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Declaración Ambiental de Productos	2
1		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Fuentes de Materias Primas	2
1		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Ingredientes de los Materiales	2
1		0	Crédito	Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	2
1	0	0	Innovación		6
1		0	Crédito	Innovación	5
0		0	Crédito	LEED Accredited Professional	1
7	0	0	TOTALES		Puntos posibles: 110

Certificado: de 40 a 49 puntos, **Plata:** de 50 a 59 puntos, **Oro:** de 60 a 79 puntos, **Platino:** de 80 a 110

Tabla 33. Checklist LEED v4 de mezcla con agregados reciclados.

13	0	0	Materiales y Recursos		13
Sí			Prerreq	Almacenamiento y Recolección de Productos Reciclables	Obligatorio
Sí			Prerreq	Planificación de la Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	Obligatorio
5		0	Crédito	Reducción del Impacto del Ciclo de Vida del Edificio	5
2		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Declaración Ambiental de Productos	2
2		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Fuentes de Materias Primas	2
2		0	Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Ingredientes de los Materiales	2
2		0	Crédito	Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	2
5	0	0	Innovación		6
5		0	Crédito	Innovación	5
0		0	Crédito	LEED Accredited Professional	1
18	0	0	TOTALES		Puntos posibles: 110

Certificado: de 40 a 49 puntos, **Plata:** de 50 a 59 puntos, **Oro:** de 60 a 79 puntos, **Platino:** de 80 a 110

Para una certificación LEED destinada a la evaluación de nuevas construcciones de edificios, son necesarios 40 puntos como mínimo, de los cuales solo la categoría de Materiales y Recursos puede otorgar 13 puntos, lo que significa un 30 %. La categoría de Innovación brinda 6 puntos posibles, por lo que sumadas las dos estas categorías representan un 45 % de puntos para la certificación. La mezcla patrón alcanza los 7 puntos, mientras que la alternativa al incorporar agregados reciclados logra obtener una calificación de 18 puntos. Lo que indica que, si se presenta una mejoría medio ambiental por el uso de agregados reciclados, y el uso de estos aproxima al proyecto a una certificación medioambiental reconocida a nivel mundial.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Los agregados gruesos naturales y los agregados reciclados como la porcelana, la cerámica y el vidrio, cumplen la normativa ASTM C33 al igual que lo hace el agregado fino, siendo este el caso de una arena gruesa.

El agregado grueso natural presenta la mejor densidad con 3.04 gr/cm^3 siendo entre 1.1 y 1.2 veces mayor que la de los agregados reciclados. La absorción de los materiales reciclados en el caso de la porcelana y la cerámica exceden el 1.69 % de absorción del agregado grueso natural siendo 1.15 y 4.85 veces más alta respectivamente, esto se debe al proceso de triturado que aumenta la superficie específica y la cantidad de finos.

En cuanto a la degradación del agregado grueso se determina que los materiales más adecuados para trabajar en hormigones, son el agregado natural y la porcelana triturada, ya que los materiales que presentan un mayor desgaste son la cerámica (9.26 %) y el vidrio (16.60 %) lo que puede afectar la durabilidad del hormigón.

5.2. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Para la mezcla patrón la relación $a/c=0.51$ funcionó correctamente, aunque en las tablas indicaban un valor igual a 0.55 para esta relación, se trabajó con un margen de seguridad y se redujo la relación esperando resistencias ligeramente mayores, estando claro que las tablas de diseño ya por si son conservadoras.

La mezcla posee una buena trabajabilidad, pero la inclusión de la cerámica por su alta absorción procede a consumir agua que estaba destinada a la hidratación del cemento por lo que en base a los ensayos se recomienda que se hagan correcciones por absorción en base al porcentaje de este material y no al del agregado grueso natural.

5.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Bajo los ensayos respectivos realizados a los 7, 14 y 28 días de curado, se llega a la conclusión que el 90 % de las mezclas pueden ser denominadas como hormigones estructurales al sobrepasar los 21 MPa. que indica la NEC. El mejor desempeño en los ensayos de compresión y tracción se encuentra vinculado a la incorporación de la porcelana en ambas relaciones de inclusión 70-30 y 30-70. Se define por desempeño a la mezcla PL70 como dosificación óptima.

Acerca del lavado de los materiales reciclados después de su proceso de trituración, se evidencia que no hay resultado conclusivo cuando el material tiene baja absorción, pero en materiales como la cerámica si es influyente dicho proceso, no altamente significativa, pero si afecta en la mezcla sobre todo cuando se trabaja a compresión.

El desempeño del vidrio como agregado grueso en mezclas de hormigón, no presenta buenos resultados, esto se debe a la baja adherencia por su superficie lisa y la poca resistencia del material.

Como conclusión del análisis de áreas de fallo se logró demostrar que, a mayor porcentaje de caras lisas en el agregado, se presenta un mayor porcentaje de áreas de fallo que repercute directamente en la resistencia final del hormigón.

Gracias al ensayo no destructivo de resistividad eléctrica se confirmó los resultados obtenidos en las pruebas de resistencias y se corrobora que a mayor contenido de agua menor resistividad. Con respecto a la resistividad y la resistencia a compresión, se deduce que, a menor resistividad eléctrica, menor resistencia a compresión. Es importante destacar que la edad del hormigón influye en los valores de resistividad especialmente en edades tempranas.

5.4. EVALUACIÓN AMBIENTAL

La implementación de los agregados reciclados dentro de mezclas de hormigón para proyectos viales, tiene su significancia al ser evaluados con la herramienta Greenroads, que acredita al proyecto con 31 puntos de los 40 requeridos para la acreditación Bronce, mejorando los 19 puntos que obtuvo la muestra patrón.

El beneficio para nuevos proyectos estructurales por el uso de los agregados reciclados sea: vidrio, cerámica o porcelana, representa un 45% de los puntos para una certificación LEED, lo que representa un aporte significativo, ya que únicamente se está contemplando dos de sus ocho categorías.

Con el uso de la herramienta PaLate se cuantificó el impacto ambiental que se produce con las alternativas presentadas, donde se percibe que para la realización de 6000 m³ de hormigón, se ahorran 690.6 GJ de energía y se reduce la emisión de 47187 Kg de CO_{2e} a la atmosfera.

REFERENCIAS

- AGN. (2018, septiembre 29). Menos de la mitad de hogares ecuatorianos clasifica residuos, según encuesta. Recuperado de <https://ww2.elmercurio.com.ec/2018/09/29/menos-de-la-mitad-de-hogares-ecuatorianos-clasifica-residuos-segun-encuesta/>
- Aguas Barreno, J. R. (2015). *Hormigón translúcido con fibra de vidrio y cuarzo* (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Civil.).
- Aguilar, C., Muñoz, M. P., & Loyola, O. (2011). Utilisation of recycled concrete as replacing of coarse aggregate for the concrete manufacturing. *Revista Ingeniería de Construcción*, 20(1), 35-44.
- Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), 41-47.
- Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, 1(2), 91. <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Aranda Usón, A., & Zabalza Bribián, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Zaragoza (España: Prensas de la Universidad de Zaragoza).
- ASTM, D. (2004). 422. Standard test method for measurement of particle size analysis of soils. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- ASTM C 496. Método de prueba estándar para Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.
- Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V., & Godes, B. (2011). Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. *Informes de la Construcción*, 63(522), 71-81.
- Bignozzi, M. C., & Sacconi, A. (2012). Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast alkali silica reaction (ASR). *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1141-1148.
- Caram, J. (2012). *El Impacto Ambiental de los Materiales de Construcción*.
- Carrión Sarmiento, S. M., & Guambaña Chérrez, R. S. (2018-10-25). *Tesis*. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31517>
- Greenroads. (2018). *GreenRoads*. Recuperado de <https://www.greenroads.org/2831/project-checklist-v2.html?>

- Guerra, I., Vivar, I., Llamas, B., Juan, A., & Moran, J. (2009). Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. *Waste Management*, 29(2), 643-646. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.018>
- Holcim Ecuador S.A. (2015). Holcim Fuerte. Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general.
- INEN (1987) 154: Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas.
- INEN. (2010). 694: Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología. NTE
- INEN (2011) 696: Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- INEN. (2010). 856: Áridos. determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del árido fino.
- INEN. (2010) 857: Áridos, Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
- INEN (2010) 858: Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.
- INEN (1982) 872: Áridos para hormigón. Requisitos.
- INEN (2010) 1573: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.
- INEN (2011) 1576: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de espécimen para ensayo.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2016). Design and control of concrete mixtures (Sixteenth edition). Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2013). MATERIALES PARA INGENIERIA CIVIL. (Segunda). Madrid: NIELSEN BOOKDATA.
- Mora Abril, D. B. (2014). Hormigones con agregados cerámicos: caracterización del hormigón resultante de utilizar el desecho de la industria cerámica de la ciudad de Cuenca como agregado grueso (Master's thesis).
- Muench, S., Anderson, J., Hatfield, J., Koester, J., Söderlund, M., & Weiland, C. (2011). Greenroads Manual v1. 5. Seattle, WA: University of Washington.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). Concrete technology (2. ed). Harlow: Prentice Hall.
- Niño Hernández, J. R. (2010). Tecnología del concreto: materiales, propiedades y diseño de mezclas ; [3a ed. revisada y actualizada por: Ing. Jairo René Niño Hernández. Bogotá, D.C., Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.



- Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181-2189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>
- Ramírez, A. (2002). La construcción sostenible. *Física y sociedad*, 13, 30-33.
- Rodríguez, F., & Fernández, G. (2010). Ingeniería sostenible: nuevos objetivos en los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 25(2), 147-160.
- Sabnis, G. M. (Ed.). (2011). *Green building with concrete: Sustainable design and construction*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Tapia Argudo, C. F. (2018). *Hormigones alternativos de alto desempeño con el uso de desechos de porcelana como agregado grueso* (Bachelor's thesis).
- U.S. Green Building Council. (2018). LEED V4. Recuperado de LEED website: <https://new.usgbc.org/leed>
- Yam, J. L. C., Carcaño, R. S., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. 8.

ANEXOS.
Anexo 1. Granulometría Agregado Grueso Natural.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido(gr)	Peso retenido acumulado(gr)	%retenido	%rete. Acumulado	%Pasa
1 "	25.00	0.00	0.00	0.00	0	100.00
3/4"	19.00	20.50	20.50	0.41	0.41	99.59
1/2"	12.50	2053.20	2073.70	41.11	41.52	58.48
3/8"	9.50	1108.70	3182.40	22.20	63.72	36.28
4	4.75	1759.40	4941.80	35.23	98.94	1.06
Fondo	0.00	52.80	4994.60	1.06	100	0.00
Total (4994.60				

Anexo 2. Granulometría Agregado Grueso Cerámica.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido(gr)	Peso retenido acumulado(gr)	%retenido	%rete. Acumulado	%Pasa
1 "	25.00	77.60	77.60	1.55	2	98.45
3/4"	19.00	359.00	436.60	7.19	8.75	91.25
1/2"	12.50	1253.10	1689.70	25.10	33.85	66.15
3/8"	9.50	1494.10	3183.80	29.93	63.77	36.23
4	4.75	1470.40	4654.20	29.45	93.23	6.77
Fondo	0.00	338.10	4992.30	6.77	100	0.00
Total (gr)		4992.3				

Anexo 3. Granulometría Agregado Grueso Porcelana.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido(gr)	Peso retenido acumulado(gr)	%retenido	%rete. Acumulado	%Pasa
1 "	25.00	69.60	69.60	1.39	1	98.61
3/4"	19.00	291.40	361.00	5.83	7.22	92.78
1/2"	12.50	1409.60	1770.60	28.20	35.43	64.57
3/8"	9.50	872.00	2642.60	17.45	52.87	47.13
4	4.75	1653.50	4296.10	33.08	85.96	14.04
Fondo	0.00	701.90	4998.00	14.04	100	0.00
Total (gr)		4998				

Anexo 4. Granulometría Agregado Grueso Vidrio.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido(gr)	Peso retenido acumulado(gr)	%retenido	%rete. Acumulado	%Pasa
1 "	25.00	72.60	72.60	1.45	1	98.55
3/4"	19.00	404.10	476.70	8.08	9.54	90.46
1/2"	12.50	1658.00	2134.70	33.17	42.71	57.29
3/8"	9.50	1070.60	3205.30	21.42	64.12	35.88
4	4.75	1208.20	4413.50	24.17	88.29	11.71
Fondo	0.00	585.10	4998.60	11.71	100	0.00
Total (gr)		4998.6				

*Anexo 5. Granulometría Agregado Fino.*

Tamiz	Abertura(mm)	Peso Ret (gr)	Pes. Ret. acum (gr)	% retenido	%Ret. Acum	%pasa
#8	2.36	50.60	50.60	10.12	10.12	89.88
#16	1.18	91.30	141.90	18.26	28.38	71.62
#30	0.6	133.60	275.50	26.72	55.10	44.90
#50	0.3	128.00	403.50	25.60	80.70	19.30
#100	0.15	75.10	478.60	15.02	95.72	4.28
#200	0.075	18.30	496.90	3.66	99.38	0.62
Fondo		2.40	499.30	0.48	99.86	0.14
Total (gr)		499.30				

Requisitos de resistencia		
$f'c$	240	kg/cm ²
$f'c$	24	Mpa
Relacion a/c		
Hormigon no aireado		
a/c	0.51	
Valor de arido grueso por volumen		
Modulo de finura	2.70	
TMN	3/4	
Volumen de arido grueso compactado (Tabla 7.5)	0.63	
Densidad arido grueso	3044.76	kg/m ³
Absorcion	0.017	
masa unitaria	1503.51	kg
ARIDO GRUESO	947.21	kg/m³
Contenido porcentual de aire		
Tabla 2.6	2	%
Grado de asentamiento		
maximo	7.5	cm
minimo	2.5	cm
promedio	7.5	cm
Agua de diseño		
Tabla 7.8	205	kg/m ³
Reduccion de agua	27	kg/m ³
AGUA	178	kg/m³
Cantidad de cemento		
Cemento calculado	349.02	kg/m ³
Cemento para diseño	349	kg/m³
Densidad cemento	2.9	g/cm ³
	2900	kg/m ³
Cantidad de arena		
Volumen aire	0.02	m ³
Volumen agua	0.178	m ³
Volumen cemento	0.120	m ³
Volumen arido grueso	0.311	m ³
Volumen arena	0.371	m ³
Densidad arena	2486.78	kg/m ³
ARENA	921.50	kg/m³
Absorcion	0.0382	

Anexo 6. Tabla Resumen de la Mezcla 1.

Mezcla 1	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
----------	--------------	-----------	------------	------------	----------------



	4236.31	2160.52	8684.94	8927.28	0
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm2)
	19/7/2019	20/7/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	27/7/2019	3/8/2019	17/8/2019		17/8/2019
Especie:	Mezcla Patrón 1 (MP1)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1.1	24/7/2019	4	11373.8	144.82	falla esquina
1.2	2/8/2019	13	21985.8	279.93	falla esquina
1.3	16/8/2019	27	25604.2	326.00	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1.4	24/7/2019	4	5660.4	18.02	Falla fuera de líneas
1.5	2/8/2019	13	6051.9	19.26	
1.6	16/8/2019	27	8770	27.92	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	24	1280	5026.55	
-/+	13/8/2019	24	1280	5026.55	

Anexo 7. Tabla Resumen de la Mezcla 1.

	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5930.83	3024.72	12158.9	12498.2	0
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm2)
	19/7/2019	20/7/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	27/7/2019	3/8/2019	17/8/2019		17/8/2019
Especie:	Mezcla Patrón 2 (MP2)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
2.1	26/7/2019	6	17389.6	221.41	Falla compresión
2.2	2/8/2019	13	22698.4	289.01	
2.3	16/8/2019	27	27118.6	345.28	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
2.4	26/7/2019	6	6987.3	22.24	
2.5	2/8/2019	13	8302.6	26.43	
2.6	16/8/2019	27	9345.4	29.75	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	24	1220	4790.93	
-/+	13/8/2019	24	1220	4790.93	

Anexo 8. Tabla Resumen de la Mezcla 3.

Mezcla 3	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	7498.91	3213.82
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	25/7/2019	26/7/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	2/8/2019	9/8/2019	23/8/2019		23/8/2019
Especie:	M3 70% grava - 30% porcelana sin lavar (PSL30)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	2/8/2019	7	15340.5	195.32	
2	8/8/2019	13	20287.3	258.31	
3	23/8/2019	28	23796.2	302.98	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	2/8/2019	7	5715.9	18.19	
5	8/8/2019	13	7717.3	24.56	
6	23/8/2019	28	8250	26.26	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	18	1420	5576.33	
-/+	13/8/2019	18	1430	5615.60	

Anexo 9. Tabla Resumen de la Mezcla 4.

Mezcla 4	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	3213.82	7498.91
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	26/7/2019	27/7/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	3/8/2019	10/8/2019	24/8/2019		24/8/2019
Especie:	M4 30% grava - 70% porcelana sin lavar (PSL70)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	2/8/2019	6	18367.5	233.86	
2	8/8/2019	12	22575.5	287.44	
3	24/8/2019	28	29186.9	371.62	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	2/8/2019	6	7644.5	24.33	
5	8/8/2019	12	7921.9	25.22	
6	24/8/2019	28	8713.5	27.74	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	17	1380	5419.25	
-/+	13/8/2019	17	1380	5419.25	

Anexo 10. Tabla Resumen de la Mezcla 5.

Mezcla 5	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	7498.91	3213.82
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm ²)
31/7/2019	1/8/2019	6	10x20	78.54	
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	8/8/2019	15/8/2019	29/8/2019		29/8/2019
Especie:	M5 70% grava - 30% cerámica sin lavar (CSL30)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	7	11613.1	147.86	
2	15/8/2019	14	15763.3	200.70	
3	29/8/2019	28	18220.4	231.99	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	7	5558.3	17.69	
5	15/8/2019	14	6665.9	21.22	
6	29/8/2019	28	7760.3	24.70	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	12	1100	4319.69	
-/+	13/8/2019	12	1100	4319.69	

Anexo 11. Tabla Resumen de la Mezcla 6.

Mezcla 6	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	3213.82	7498.91
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm ²)
31/7/2019	1/8/2019	6	10x20	78.54	
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	8/8/2019	15/8/2019	29/8/2019		29/8/2019
Especie:	M6 30% grava - 70% cerámica sin lavar (CSL70)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	7	10302.7	131.18	
2	15/8/2019	14	14219.7	181.05	
3	29/8/2019	28	17170.7	218.62	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	7	5107.1	16.26	
5	15/8/2019	14	5884.3	18.73	
6	29/8/2019	28	6933	22.07	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	12	955	3750.28	
-/+	13/8/2019	12	957	3758.13	

Anexo 12. Tabla Resumen de la Mezcla 7.

Mezcla 7	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	7498.91	3213.82
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	1/8/2019	2/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	9/8/2019	16/8/2019	30/8/2019		30/8/2019
Especie:	M7 70% grava - 30% porcelana lavada (PL30)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	6	17463.1	222.35	
2	16/8/2019	14	22437.3	285.68	
3	29/8/2019	27	27982.4	356.28	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	6	6080	19.35	
5	16/8/2019	14	6288.3	20.02	
6	29/8/2019	27	8003.6	25.48	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	11	1200	4712.39	
-/+	13/8/2019	11	1200	4712.39	

Anexo 13. Tabla Resumen de la Mezcla 8.

Mezcla 8	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	3213.82	7498.91
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	1/8/2019	2/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	9/8/2019	16/8/2019	30/8/2019		30/8/2019
Especie:	M8 30% grava - 70% porcelana lavada (PL70)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	6	21160.6	269.43	
2	16/8/2019	14	24816.1	315.97	
3	30/8/2019	28	29271.1	372.69	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	6	5735.2	18.26	
5	16/8/2019	14	5909.1	18.81	
6	30/8/2019	28	8588.7	27.34	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	11	1220	4790.93	
-/+	13/8/2019	11	1230	4830.20	

Anexo 14. Tabla Resumen de la Mezcla 9.

Mezcla 9	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	7498.91	3213.82
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	2/8/2019	3/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	10/8/2019	17/8/2019	31/8/2019		31/8/2019
Especie:	M9 70% grava - 30% cerámica lavada (CL30)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	5	12239.8	155.84	
2	17/8/2019	14	18302.1	233.03	
3	31/8/2019	28	21881.7	278.61	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	5	3090.9	9.84	
5	17/8/2019	14	5970.2	19.00	
6	31/8/2019	28	7555.8	24.05	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	10	1220	4790.93	
-/+	13/8/2019	10	1220	4790.93	

Anexo 15. Tabla Resumen de la Mezcla 10.

Mezcla 10	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	3213.82	7498.91
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	2/8/2019	3/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	10/8/2019	17/8/2019	31/8/2019		31/8/2019
Especie:	M10 30% grava - 70% cerámica lavada (CL70)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	8/8/2019	5	10579.3	134.70	
2	17/8/2019	14	16552.4	210.75	
3	31/8/2019	28	18803.4	239.41	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	8/8/2019	5	4965.6	15.81	
5	17/8/2019	14	5872.0	18.69	
6	31/8/2019	28	7378.3	23.49	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	10	797	3129.81	
-/+	13/8/2019	10	797	3129.81	

Anexo 16. Tabla Resumen de la Mezcla 11.

Mezcla 11	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	7498.91	3213.82
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	5/8/2019	6/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	13/8/2019	20/8/2019	3/9/2019		3/9/2019
Especie:	M11 70% grava - 30% vidrio (V30)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	13/8/2019	7	13971.4	177.89	se le hizo resistividad
2	20/8/2019	14	14952.9	190.39	
3	3/9/2019	28	17556.8	223.54	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	13/8/2019	7	4389.9	13.97	
5	20/8/2019	14	5559.1	17.70	
6	3/9/2019	28	5848.3	18.62	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	7	874	3432.19	
-/+	13/8/2019	7	874	3432.19	

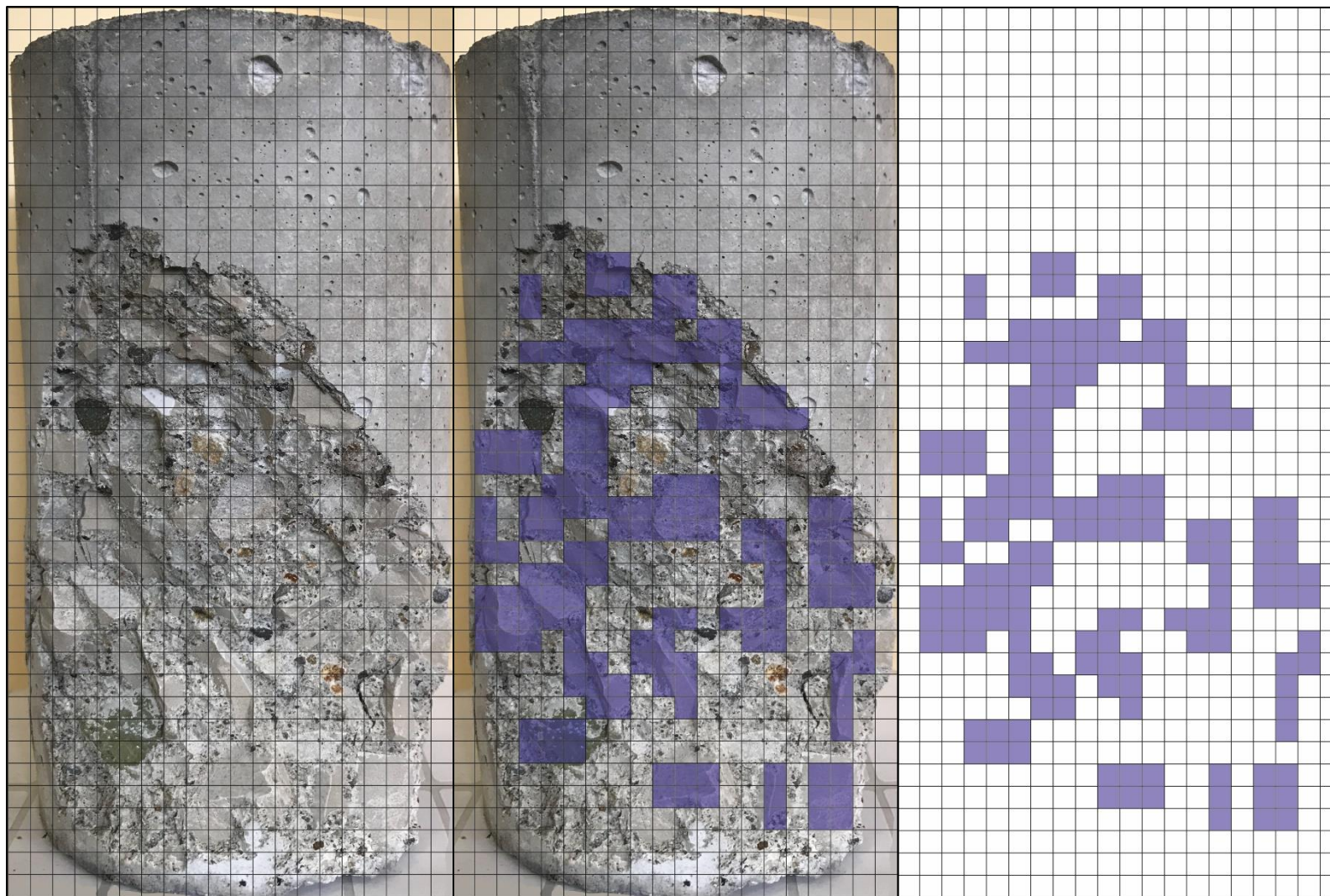
Anexo 17. Tabla Resumen de la Mezcla 12.

Mezcla 12	Cemento (gr)	Agua (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Reciclado (gr)
	5083.57	2592.62	10421.93	3213.82	7498.91
	Fundición	Curado	Probetas	Dimensiones (cm)	Área (cm²)
	5/8/2019	6/8/2019	6	10x20	78.54
A/C	Ensayos hormigón Endurecido				
0.51	7	14	28		Resistividad Eléctrica
	13/8/2019	20/8/2019	3/9/2019		3/9/2019
Especie:	M12 30% grava - 70% vidrio (V70)				
Compresión					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
1	13/8/2019	7	12010.4	152.92	
2	20/8/2019	14	14373.1	183.00	
3	3/9/2019	28	15578.8	198.36	
Tracción Indirecta					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Carga Máxima	Resistencia	Observaciones
4	13/8/2019	7	4362.6	13.89	
5	20/8/2019	14	5144.1	16.37	
6	3/9/2019	28	5729.4	18.24	
Resistividad Eléctrica					
Probeta	Fecha de ensayo	Días	Resistencia Ω	Resistividad Ω.cm	Observaciones
+/-	13/8/2019	7	903	3546.07	
-/+	13/8/2019	7	904	3550.00	

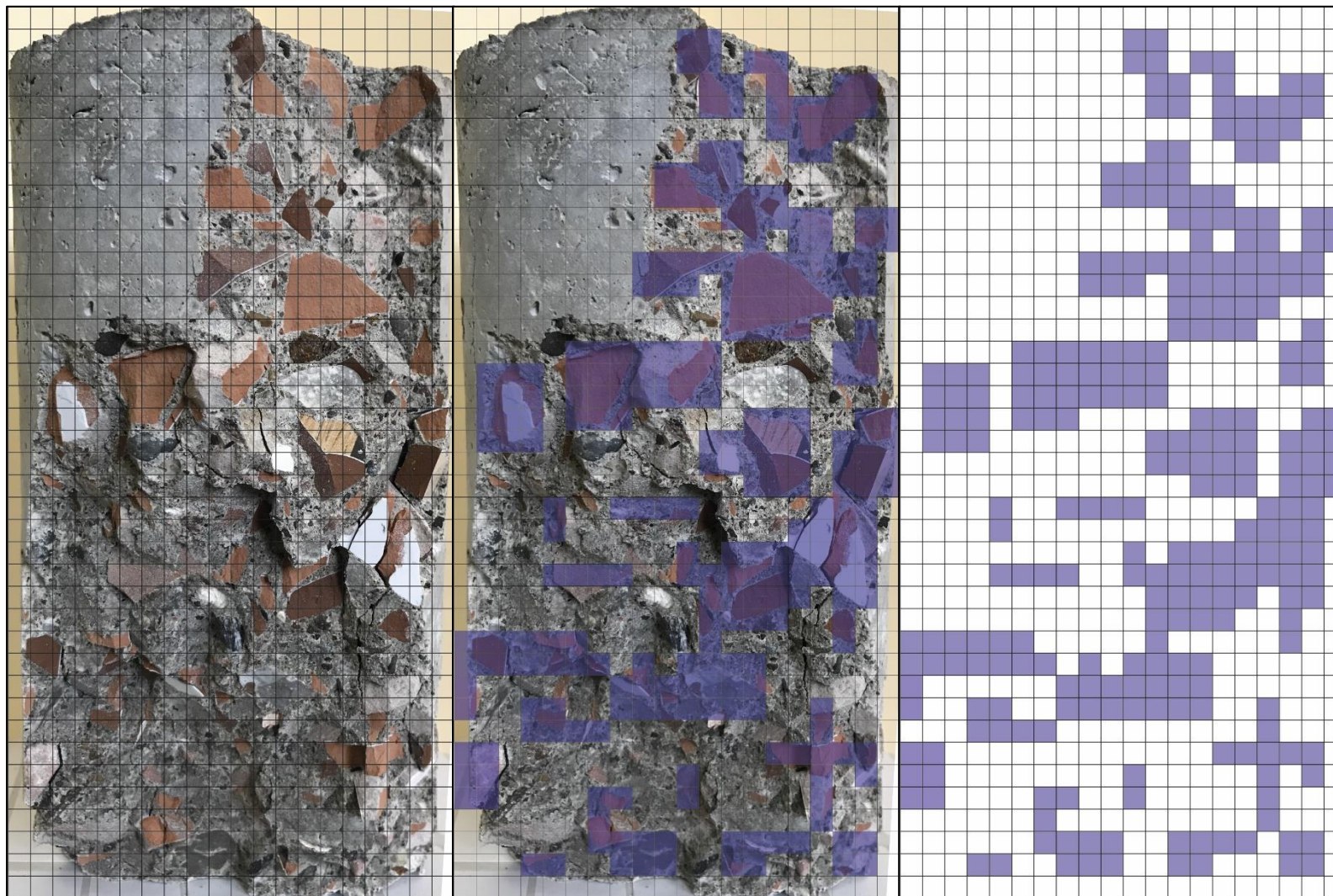
Anexo 18. Tabla Resumen de Resistencias.

Muestra	días	R compresión Kg/cm ²	R tracción Kg/cm ²	días	Resistividad Ω.cm
Mezcla Patrón 1 (MP1)	4	145	18.0	24	5026.55
	13	280	19.3	24	5026.55
	28	326	27.9		
Mezcla Patrón 2 (MP2)	6	221	22.2	24	4790.93
	13	289	26.4	24	4790.93
	28	345	29.7		
M3 70% grava - 30% porcelana sin lavar (PSL30)	7	195	18.2	18	5576.33
	13	258	24.6	18	5615.60
	28	303	26.3		
M4 30% grava - 70% porcelana sin lavar (PSL70)	6	234	24.3	17	5419.2
	12	287	25.2	17	5419.25
	28	372	27.7		
M5 70% grava - 30% cerámica sin lavar (CSL30)	7	148	17.7	12	4319.69
	14	201	21.2	12	4319.69
	28	232	24.7		
M6 30% grava - 70% cerámica sin lavar (CSL70)	7	131	16.3	12	3750.28
	14	181	18.7	12	3758.13
	28	219	22.1		
M7 70% grava - 30% porcelana lavada (PL30)	6	222	19.4	11	4712.39
	14	286	20.0	11	4712.39
	28	356	25.5		
M8 30% grava - 70% porcelana lavada (PL70)	6	269	18.3	11	4790.93
	14	316	18.8	11	4830.20
	28	373	27.3		
M9 70% grava - 30% cerámica lavada (CL30)	5	156	9.8	10	4790.93
	14	233	19.0	10	4790.93
	28	279	24.1		
M10 30% grava - 70% cerámica lavada (CL70)	5	135	15.8	10	3129.81
	14	211	18.7	10	3129.81
	28	239	23.5		
M11 70% grava - 30% vidrio (V30)	7	178	14.0	7	3432.19
	14	190	17.7	7	3432.19
	28	224	18.6		
M12 30% grava - 70% vidrio (V70)	7	153	13.9	7	3546.07
	14	183	16.4	7	3550.00
	28	198	18.2		

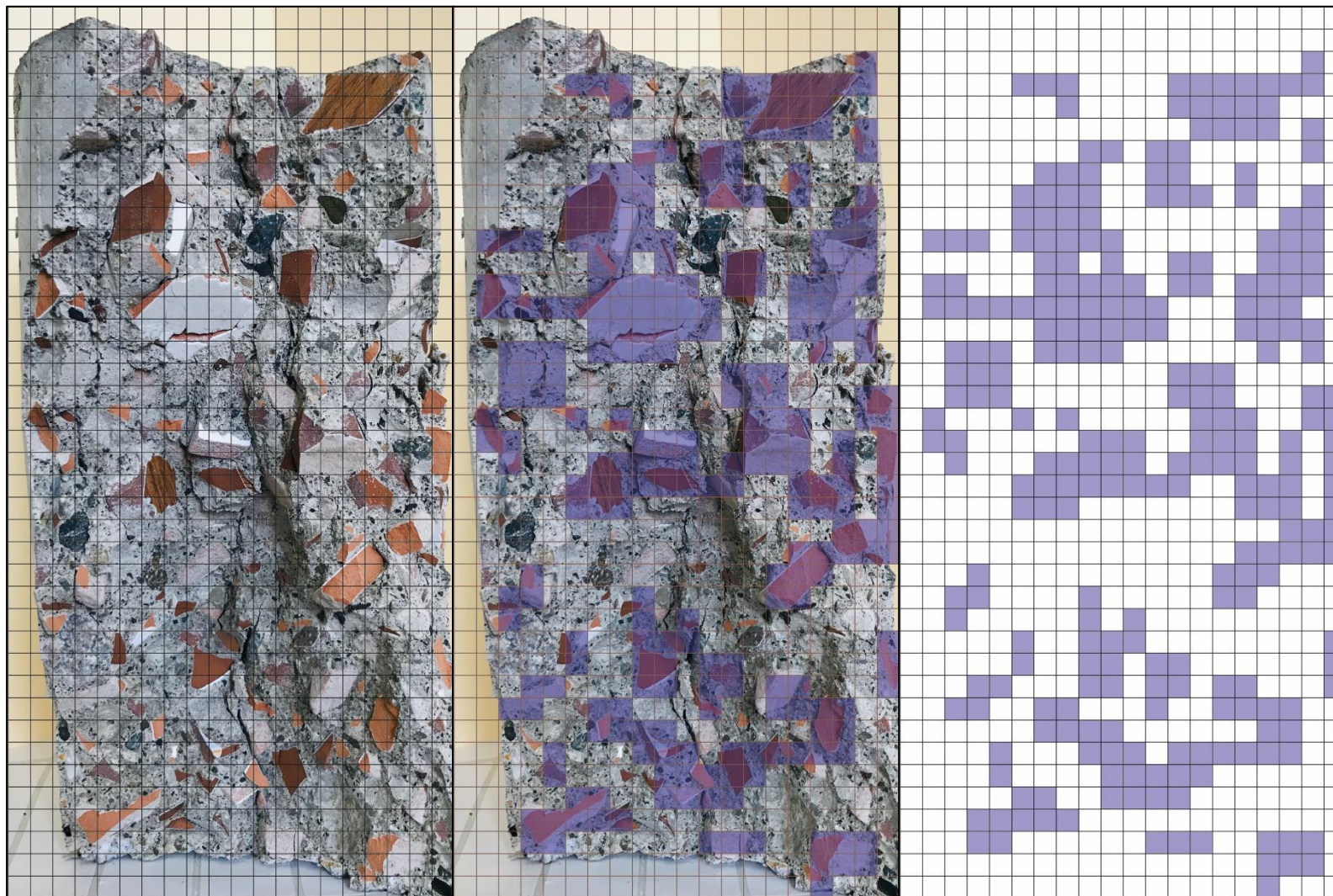
Anexo 19. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 4.



Anexo 20. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 6.



Anexo 21. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 10.



Anexo 22. Análisis de Áreas de Falla Mezcla 12.

