ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE AGREGADOS GRUESOS DE HORMIGÓN DEMOLIDO, RECUPERADOS CON DOS PROCESOS DE JIGS DE AGUA.

Autora: Monica Mariana Davila Lima

Tesisna para la obtención del Máster en Ingeniería de los Recursos Naturales

Director: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Universitat Politécnica de Catalunya

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa. EPSEM

Barcelona, septiembre 2024.

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Máster en Ingeniería de los Recursos Naturales

Trabajo Final de Master

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE AGREGADOS GRUESOS DE HORMIGÓN DEMOLIDO, RECUPERADOS CON DOS PROCESOS DE JIGS DE AGUA

Autora: Monica Mariana Davila Lima

Director: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Manresa, Catalunya. España. Septiembre, 2024

Abstract

Construction and demolition waste (CDW) represents one of the largest sources of waste in Europe, with over 800 million tons generated annually. The European Union has implemented various policies to improve the management of this waste, promoting the recycling and reuse of materials, such as recycled aggregates, in new construction projects. These initiatives aim to reduce environmental impact and foster a circular economy in the construction sector. Additionally, the construction sector generates the highest flow of waste in the European Union, reinforcing the need to implement efficient and sustainable recycling methods to decrease the demand for natural resources. In this context, the present study evaluated the feasibility of recovering coarse concrete aggregates through a two-stage jiggs concentration process. For the experiment, conventional concrete (C16/20) was prepared in the laboratory, crushed in a jaw mill, and then sieved to obtain material fractions between 5 and 20 mm, which were considered as coarse aggregates. The concentration process was conducted in a jigging system with water, facilitating the separation of particles with different densities. The tests performed included measurements of specific density and apparent density in both dry and wet states. The shape factor, water absorption, and the content of condensed cement paste in the particles were also evaluated. The specific density was measured using the water immersion method, while the apparent density was determined by filling a cylinder with dry aggregates and then weighing it. Water absorption was assessed by submerging the aggregates in water for 24 hours and measuring the weight difference between the dry and saturated aggregates. The shape factor of the aggregates was determined by measuring 200 samples. The results demonstrate the effectiveness of the two-stage jiggs method for recovering coarse aggregates with properties similar to natural aggregates. The recovered aggregates could potentially be used as partial substitutes in concrete production, contributing to greater sustainability in construction and reducing the demand for natural.

Resumen

Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan una de las mayores fuentes de desechos en Europa, con más de 800 millones de toneladas anuales. La Unión Europea ha implementado diversas políticas para mejorar la gestión de estos residuos, promoviendo el reciclaje y la reutilización de materiales, como los agregados reciclados, en nuevas construcciones. Estas iniciativas buscan reducir el impacto ambiental y fomentar una economía circular en el sector de la construcción. Además, el sector de la construcción es el que presenta el mayor flujo de residuos en la Unión Europea, lo que refuerza la necesidad de implementar métodos de reciclaje eficientes y sostenibles para disminuir la demanda de recursos naturales. En este contexto, el presente estudio evaluó la viabilidad de recuperar agregados gruesos de hormigón mediante un proceso de concentración jiggs en dos etapas sucesivas. Para el experimento, se utilizó concreto convencional (C16/20), preparado en laboratorio, triturado en un molino de mandíbulas, y luego tamizado para obtener fracciones de material entre 5 y 20 mm, considerados como agregados gruesos. El proceso de concentración se llevó a cabo en un sistema de jigues con agua, que facilitó la separación de las partículas con diferentes densidades. Las pruebas realizadas incluyeron mediciones de densidad específica y densidad aparente tanto en estado seco como húmedo, factor de forma, la absorción de agua y el contenido de pasta de cemento condensada en las partículas. Para medir la densidad específica, se utilizó el método de inmersión en agua, mientras que la densidad aparente se determinó mediante el llenado de un cilindro con los agregados secos y luego pesados. La absorción de agua se evaluó sumergiendo los agregados en agua por 24 horas y midiendo la diferencia de peso entre los agregados secos y los saturados. El factor de forma de los agregados fue determinado mediante la medición de 200 muestras. Los resultados de las pruebas demuestran la efectividad del método jiggs de agua de dos etapas para recuperar agregados gruesos con propiedades similares a los agregados naturales. Los agregados recuperados posiblemente pueden utilizarse como sustitutos parciales en la producción de hormigón, contribuyendo a una mayor sostenibilidad en la construcción y reduciendo la demanda de recursos naturales.

Índice de Contenidos

Abstract **3**

Resumen **4**

Índice de Contenidos **5**

Índice de Figura **8**

Índice de Tabla **9**

Índice de Gráficos **10**

Glosario **11**

Capítulo I: Introducción **12**

Justificación de la Investigación ***13***

Problema de Investigación ***14***

Antecedentes (evolución histórica del tema) ***14***

Aspectos legales del RCD en España. ***15***

Ley Nacional de Residuos 10/1998 y Ley 22/2011 vigente 15

Real Decreto 105/2008 sobre Residuos de Construcción y Demolición 15

Capítulo II: Objetivos **15**

Objetivo General ***15***

Objetivos Específicos ***15***

Capitulo III: Marco Teórico **16**

Aspectos de reutilización de RCD ***16***

- Reducción del consumo de recursos naturales: 16
- Disminución de la generación de residuos: 16
- Reducción de las emisiones de carbono: 16
- Promoción de la economía circular: 16

Composición del RCD 17

Costos Asociados a la Gestión de RCD 17

Oportunidades Económicas Derivadas de la Gestión de RCD.....17

Propiedades del Hormigón 18

Equipo de Jig.....18

Concentración gravimétrica 18

El jig: Un proceso clásico y eficiente de separación de minerales.....18

Fundamentos teóricos de los jigs.....21

Teoría hidrodinámica del jigs:.....22

La Sedimentación Diferencial 22

Teoría de la energía potencial 22

Factor de forma.....23

Densidad…….24

Absorción de agua.....25

Capítulo IV: Metodología de la investigación 26

Material Preparación.....26

Proceso de jigging 28

Caracterización de materiales.....30

Prueba de distribución densimétrica 30

Análisis de la constitución del sustrato del hormigón.....32

Prueba de distribución granulométrica.....32

Proceso Factor de forma.....32

Proceso para la obtención de Densidad específica (OD), densidad específica saturada (SSD), densidad aparente (OD), densidad aparente saturada (SSD) y absorción de agua. 34

Densidad Aparente - Material seco 35

Capítulo IV: Resultados y discusiones 36

Prueba de Distribución Granulométrica *36*

Prueba de Distribución Densimétrica *36*

Constitución del sustrato de hormigón *37*

Prueba de Concentración del jig *38*

Caracterización Física del Material *41*

Análisis de propiedades físicas *41*

Tendencias Futuras **47**

Capítulo VI: Conclusiones **47**

Capítulo VII: Referencias Bibliográficas **48**

Índice de Figura

Figura 1.- Jig primitivo del año 1556: (10) 14

Figura 2.- Composición general (5%), de los residuos de construcción y demolición generados en la Unión Europea según categoría de residuo, 2017 (12,16) 17

Figura 3.- Esquema de jigg de agua, en la separación de particulas por densidad (4) 20

Figura 4.- Esquema de algunos dispositivos tipo pistón y diafragma (20) 21

Figura 5.- Posición del centro de masa en un sistema binario (21) 23

Figura 6.-Bloques de hormigones estructurales convencionales (16/20 Mpa) usados en el experimentos y fabricados siguiendo la instrucción de hormigón estructural EHE/08 26

Figura 7.- Trituradora de mandíbulas Wedag Española SA 27

Figura 8.- Material generación diagrama de flujo de generación de material antes de iniciar el proceso de jigging 28

Figura 10.- Jig de agua (A), Conducto de agua (B), Cámara. (C), Agua se bombea desde el pistón (D), Motor (E). 29

Figura 11.- El diagrama de flujo de los procesos de jigging de dos etapas se utiliza para concentrar los agregados del hormigón 30

Figura 12.- Agregados en la solución de sales de politungstanato de sodio 31

Figura 13.- Solución de Politungstanato de Sodio 31

Figura 14.- Material >5mm y <20mm 33

Figura 15.- Figura xx, Medición para determinar el factor de forma.(longitud y espesor) con un pie de rey manual Connex de 120mm. 33

Figura 16.- Muestra humeda 34

Figura 17.- Muestra seca 35

Figura 18.- Diagrama de flujo de las pruebas de jig y balance de masa de la prueba jigging 39

Índice de Tabla

Tabla 1.- Distribución de tamaños de hormigón (16/20 MPa) triturado en un tamaño máximo de 20mm. 36

Tabla 2.- Materiales analizados después del proceso de jigging 41

Tabla 3.- Análisis de los parámetros físicos de los materiales generados a partir del proceso de jig (C1 y C2), el hormigón utilizado al inicio del proceso para el análisis de concentración (CO), y los agregados naturales (AN) normalmente utilizados en la industria.....41

Índice de Gráfico

Grafico 1.- Distribución de densidad de hormigón generado después de la conminación, material en el rango de tamaño de partículas 5 × 20mm. 37

Grafico 2.- Contenido de pasta de cemento, agregados finos, y agregados gruesos contenido en diferentes rangos de densidad. Hormigón en el rango granulométrico 5 × 20mm. 38

Grafico 3.- (A) Factor de Forma × Contenido de Pasta de Cemento 43

Grafico 4.- (B) Densidad Específica × Contenido de Pasta de Cemento 43

Grafico 5.- (C) Densidad Aparente × Contenido de Pasta de Cemento 44

Grafico 6.- (D) Densidad Específica Saturada (SSD) × Contenido de Pasta de Cemento 44

Grafico 7.- (E) Densidad Aparente Saturada (SSD) × Contenido de Pasta de Cemento 44

Grafico 8.- (F) Absorción de Agua × Contenido de Pasta de Cemento 45

Grafico 9.- Distribución densimétrica del hormigón en su constitución inicial (CO), los agregados naturales 46

Glosario

AN = agregados naturales

AR = agregados reciclados

C1 = Materiales densos concentrados generados a partir del proceso de jigging primario

C2 = Material final concentrado después del proceso de jigging secundario

CO = Hormigón utilizado al inicio del proceso

DM1 = Material denso 1

DM2 = Material denso 2

DM3 = Material denso 3

EEA = Agencia Europea del Medio Ambiente

FM1 = Material de alimentación 1

FM2 = Material de alimentación 2

FM3 = Material de alimentación 3

g = gramos

h= hora

LM1 = Material ligero 1

LM2 = Material ligero 2

RCD = Residuos de construcción y demolición

UE = Unión Europea

Capítulo I: Introducción

La industria de la construcción, pilar fundamental del desarrollo económico mundial, enfrenta un desafío apremiante, por su significativo impacto ambiental. El acelerado crecimiento urbano y la demanda constante de infraestructuras han llevado a un consumo desmedido de recursos naturales y a una elevada emisión de gases de efecto invernadero [1, 2, 3]. Ante este escenario, la búsqueda de soluciones sostenibles se ha convertido en una prioridad global.

La producción de materiales de construcción, en particular el concreto, representa una fracción considerable de este impacto. En este contexto, el reciclaje de materiales de construcción surge como una estrategia prometedora para mitigar los impactos ambientales de la industria [4]. Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan una fuente abundante de materiales que pueden ser reutilizados, reduciendo la demanda de recursos naturales y disminuyendo la cantidad de residuos enviados a vertederos y eliminación irregular de material. Entre los componentes de los RCD, los agregados gruesos recuperados del hormigón presentan un gran potencial para su reutilización en nuevas formulaciones de concreto. Sin embargo, la presencia de contaminantes y la variabilidad en sus propiedades físicas limitan su aplicación directa [5].

Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan una parte considerable de los desechos generados en la Unión Europea, generándose más de 2.100 millones de toneladas tanto en actividades económicas como domésticas. El último informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) señala que los desechos de construcción y demolición totalizaron 374 millones de toneladas en la UE en 2016 [6].

Para abordar este problema, el Parlamento Europeo estableció la Directiva Europea 2008/98/CE en 2008, con el objetivo de estandarizar la gestión y reducir la generación de residuos sólidos, incluyendo los RCD. Esta directiva, junto con regulaciones nacionales, como la francesa, busca fomentar el reciclaje del 70% de los RCD generados [7].

Sin embargo, la presencia de contaminantes en los RCD y la adecuación de las características del material para usos más avanzados, como el empleo como áridos en nuevas formulaciones de hormigón, han sido desafíos significativos. Estos contaminantes pueden afectar negativamente propiedades fundamentales de los agregados, como su distribución de tamaño, forma, densidad y absorción de agua, limitando su aplicación en nuevas formulaciones de concreto [8].

El proceso de jigging, una técnica de separación por densidad, se ha mostrado como una herramienta eficaz para mejorar la calidad de los agregados reciclados. Al concentrar la fracción densa de los RCD, el jig permite obtener un material con características más homogéneas y aptas para su uso en la producción de hormigón.

La separación por gravedad, específicamente el jig, ha emergido como una técnica prometedora para el beneficio de agregados reciclados (AR). El jigging, que se basa en la oscilación vertical de un lecho granular para estratificar y

separar materiales según su densidad, ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. Si bien el jig hidráulico (con agua) es una técnica conocida, el jig seco (con aire) ha ganado interés debido a su capacidad para eliminar eficazmente contaminantes como papel, madera y yeso sin requerir agua en el proceso. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el jig seco presenta desafíos como el remezcla del lecho a altas velocidades de aire y los efectos de pared, lo que limita la pureza de los agregados obtenidos y restringe su uso en aplicaciones de alto desempeño como el hormigón estructural. En este contexto, el trabajo se enfoca en evaluar las propiedades físicas de los agregados recuperados por el método jig de agua, en dos etapas [9,10].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de recuperar agregados gruesos de hormigón, a través del método de concentración jigging, en dos etapas sucesivas, para ser utilizados, como sustitutos parciales de los agregados naturales en nuevas formulaciones de hormigón. Para ello, se analizarán en detalle las propiedades físicas de estos agregados, como la distribución granulométrica, forma, densidad y absorción de agua, y se evaluará su influencia en las propiedades del hormigón. Se espera que este estudio contribuya al avance del conocimiento sobre el reciclaje de materiales de construcción y brinde información valiosa para la industria de la construcción, los tomadores de decisiones y los investigadores interesados en la sostenibilidad ambiental.

Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica por la imperiosa necesidad de desarrollar alternativas sostenibles en la industria de la construcción, que reduzcan la explotación de recursos naturales y minimicen la generación de residuos [11]. La recuperación y valorización de agregados gruesos del hormigón, a través del método jigging, estos han estado presentes en los procesos de separación de materiales desde el siglo XV (figura 1), hasta la actualidad, representando una oportunidad prometedora para alcanzar estos objetivos [10]. Al caracterizar en detalle las propiedades físicas y químicas de estos agregados reciclados, se busca determinar su potencial como materia prima en la producción de hormigón, estableciendo los límites y condiciones para su utilización. Esta investigación no solo contribuye a la economía circular, al cerrar el ciclo de vida de los materiales de construcción, sino que también fomenta la innovación tecnológica en el sector, al explorar nuevas aplicaciones para los residuos de construcción y demolición. Además, al garantizar la calidad y el rendimiento de los agregados recuperados, se contribuye a la seguridad y durabilidad de las estructuras construidas.

***Figura 1**.- Jig primitivo del año 1556: (10)*

Problema de Investigación

¿Cómo influye la aplicación del método jigging en dos etapas sucesivas en la calidad y propiedades de los agregados gruesos recuperados del hormigón, y en qué medida estos agregados mejorados pueden ser utilizados como sustitutos parciales de los agregados naturales en la producción de concreto, garantizando así la sostenibilidad y durabilidad de las futuras construcciones?

Antecedentes (evolución histórica del tema)

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) ofrecen una oportunidad única para fomentar la circularidad en la economía. Sin embargo, para aprovechar al máximo este potencial, es necesario comprender la heterogeneidad de sus propiedades. A través de una caracterización exhaustiva, podemos identificar las fracciones de los RCD que pueden ser recicladas y reutilizadas como nuevos materiales de construcción, reduciendo así la demanda de material primario y promoviendo un modelo de construcción más sostenible [12].

Producir AR con propiedades similares a las del AN ha sido un desafío, ya que los métodos de reciclaje actuales tienen dificultades para eliminar contaminantes como cerámica y mortero, cuya presencia perjudica las propiedades de los AR. En el estudio de Gschwenter [13], se probó una ruta de procesamiento que consiste en una separación de dos etapas en jig hidráulico, con el objetivo de producir AR a partir de una muestra representativa de residuos de construcción y demolición brasileños. Todos los flujos de materiales generados en las pruebas se caracterizaron en términos de

composición, distribución de tamaño, densidad, índice de forma y absorción de agua. Los resultados indicaron la posibilidad de producir un AR de alta calidad, que contenga más del 99,5% de masa de hormigón, con propiedades adecuadas para reemplazar el AN en la producción de hormigón nuevo.

Aspectos legales del RCD en España.

España ha desarrollado dos documentos legislativos principales y planes de gestión de residuos que se centran en la gestión de residuos de Construcción y Demolición:

Ley Nacional de Residuos 10/1998 y Ley 22/2011 vigente: La Ley Nacional de Residuos 10/1998, que estuvo en vigor hasta el 30 de junio de 2011, ha sido sustituida por la actual Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados (Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados). Esta ley sirve como mecanismo para incorporar la Directiva Marco de Residuos (DMA) en el marco legal nacional, cubriendo todos los aspectos de la gestión de residuos en diversos sectores de residuos [14].

Real Decreto 105/2008 sobre Residuos de Construcción y Demolición: El Real Decreto 105/2008, en vigor desde el 14 de febrero de 2008 (Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición), aborda específicamente la ordenación de la Construcción y Residuos de Demolición (RCD). Este decreto describe las regulaciones y directivas relativas a la producción y gestión de CDW. Sus principales objetivos son priorizar la prevención, la reutilización, el reciclaje, diversos métodos de valorización y garantizar que todos los residuos reciban un tratamiento adecuado, promoviendo en última instancia el desarrollo sostenible dentro del sector de la construcción [15].

Capítulo II: Objetivos

Objetivo General

Evaluar y comparar las propiedades físicas de los agregados gruesos recuperados de hormigón demolido utilizando dos procesos de separación por jig de agua, con el fin de determinar su eficiencia para su reutilización en la fabricación de hormigón nuevo.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los agregados gruesos de hormigón demolido antes del proceso de separación:

Realizar un análisis de las propiedades físicas iniciales de los agregados gruesos obtenidos de hormigón demolido: Distribución densimétrica, distribución granulométrica, densidad específica, densidad aparente, factor de forma y pasta de cemento.

2. Evaluar la evolución de las propiedades físicas de los agregados gruesos después de cada proceso de separación con

las dos diferentes concentraciones, en su forma seca y húmeda: Analizar las propiedades físicas de los agregados gruesos tras ser procesados por el jig de agua con cada una de las dos concentraciones, enfocándose en la mejora de características como tamaño, forma, densidad, absorción de agua y resistencia a la fragmentación.

3. Comparar la eficiencia de las dos concentraciones utilizadas en el proceso de separación por jig de agua: Comparar los resultados obtenidos de los procesos con ambas concentraciones en términos de la calidad de los agregados recuperados, en base a los parámetros físicos estudiados.

Capitulo III: Marco Teórico

Aspectos de reutilización de RCD

La demanda global de agregados para construcción ha impulsado una intensa actividad extractiva, generando significativos impactos ambientales como la degradación de ecosistemas, la contaminación del agua y el consumo energético. Ante este escenario, la reutilización de los RCD como agregados en el concreto se presenta como una alternativa sostenible y eficiente.

La generación de RCD es abundante y su gestión representa un desafío ambiental. Sin embargo, estos residuos pueden convertirse en un recurso valioso si se procesan adecuadamente. Los agregados reciclados de los RCD ofrecen diversas ventajas:

- **Reducción del consumo de recursos naturales:** Al utilizar agregados reciclados, se disminuye la demanda de recursos primarios como agregados gruesos y finos, contribuyendo a la conservación de los ecosistemas y reduciendo la presión sobre los entornos naturales.
- **Disminución de la generación de residuos:** La reutilización de los RCD reduce el volumen de residuos destinados a los vertederos, mitigando los problemas ambientales asociados a su disposición final, como la contaminación del suelo y del agua.
- **Reducción de las emisiones de carbono:** La producción de agregados reciclados generalmente requiere menos energía que la extracción y procesamiento de agregados naturales, lo que conlleva una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Promoción de la economía circular:** La reutilización de los RCD fomenta una economía circular, donde los materiales se mantienen en uso el mayor tiempo posible, reduciendo la dependencia de nuevos recursos y minimizando la generación de residuos.

La composición de los agregados RCD es variada y puede incluir agregados naturales recubiertos de cemento, así como otros materiales como asfalto, cerámica y tejas. A pesar de esta variabilidad, los avances tecnológicos han permitido

desarrollar sistemas de separación eficientes que eliminan contaminantes y garantizan la calidad de los agregados reciclados [16].

Composición del RCD

Los agregados reciclados RA se componen de materiales que se reciclan de diversas fuentes, como hormigón, mampostería, ladrillos, carreteras, etc. La composición de los RA depende en gran medida de las fuentes de las que se deriva, que pueden variar según la ubicación. En diferentes países, los principales materiales de construcción utilizados pueden ser diferentes; por ejemplo, algunos países pueden usar ladrillos cocidos como material de construcción principal, mientras que otros pueden usar mampostería y madera [16].

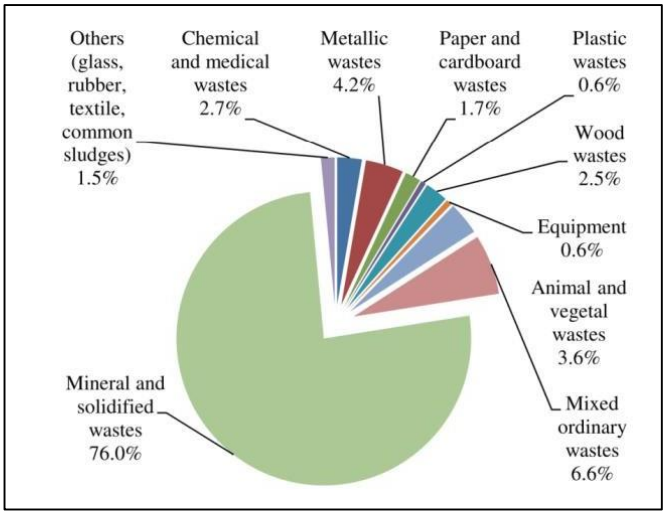


***Figura 2**.- Composición general (5%), de los residuos de construcción y demolición generados en la Unión Europea según categoría de residuo, 2017 (12,16)*

Costos Asociados a la Gestión de RCD

Costos de eliminación*:* El vertido de RCD en rellenos sanitarios o instalaciones de reciclaje implica costos significativos para los generadores de residuos, como contratistas y constructores. Estos costos se ven influenciados por factores como la distancia al sitio de disposición final, el tipo de material y las regulaciones locales.

Costos de transporte*:* El traslado de los RCD desde las obras de construcción hasta los puntos de disposición final genera gastos de transporte, que se incrementan con la distancia y el volumen de residuos.

Costos de cumplimiento normativo*:* Las regulaciones ambientales cada vez más estrictas imponen obligaciones a los generadores y gestores de RCD. El incumplimiento de estas normas puede resultar en multas y sanciones económicas considerables.

Oportunidades Económicas Derivadas de la Gestión de RCD

Recuperación de recursos: Los RCD contienen una gran cantidad de materiales valiosos como hormigón, metales y madera, que pueden ser recuperados y reutilizados en nuevos productos. La venta de estos materiales reciclados

genera ingresos adicionales y reduce la necesidad de adquirir nuevos recursos.

Beneficios ambientales: La gestión adecuada de los RCD contribuye a la protección del medio ambiente y a la conservación de recursos naturales. Esta imagen positiva puede atraer a clientes y consumidores interesados en productos y servicios sostenibles, lo que a su vez genera beneficios económicos a largo plazo.

Economía circular: La promoción de una economía circular, donde los materiales se reutilizan y reciclan en lugar de desecharse, ofrece beneficios económicos a largo plazo. Reduce la dependencia de los recursos naturales, disminuye los costos de producción y crea nuevas oportunidades de negocio.

Desarrollo local: La inversión en infraestructuras de gestión de RCD y en la promoción de la economía circular puede contribuir al desarrollo económico local, generando empleo y mejorando la calidad de vida de las comunidades. Ejemplos:

- Hormigón reciclado: El hormigón triturado puede utilizarse como agregado en nuevas mezclas de hormigón, reduciendo la necesidad de extraer nuevos materiales y generando ahorros en los costos de producción.
- Metales recuperados: Los metales como el acero y el cobre pueden ser separados de los RCD y vendidos a fundiciones para su reciclaje, generando ingresos significativos.
- Madera reciclada: La madera recuperada de los RCD puede ser utilizada para producir paneles de madera aglomerada, compost o biomasa para energía.

La gestión de los RCD ofrece una oportunidad única para combinar la protección del medio ambiente con el desarrollo económico. Al adoptar prácticas sostenibles y aprovechar el potencial de los materiales reciclados, las empresas y las comunidades pueden obtener beneficios económicos a largo plazo y contribuir a un futuro más sostenible [17, 18].

Propiedades del Hormigón

Equipo de Jig

Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es una técnica fundamental en la industria minera y de procesamiento de minerales. Su principio básico, basado en la diferencia de densidad, la convierte en un método eficiente y versátil para la obtención de concentrados de alta pureza. A pesar de sus limitaciones, la concentración gravimétrica sigue siendo una tecnología relevante y en constante evolución [19].

El jig: Un proceso clásico y eficiente de separación de minerales

El jig es una técnica de concentración de minerales que se basa en la diferencia de densidad entre las partículas

que componen una mezcla mineral. Consiste en someter un lecho de partículas a movimientos pulsantes en un medio fluido, generalmente agua, lo que provoca que las partículas más densas se hundan y se separen de las más ligeras, formando capas o estratos. Este proceso se lleva a cabo en un equipo llamado jig, que consta de una camara, un criba, un mecanismo de pulsación y sistemas de alimentación y descarga. Los movimientos pulsantes, generados por diferentes mecanismos (pistones, diafragmas o aire comprimido), provocan la estratificación y clasificación de las partículas. El jig es una técnica antigua que ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo. Su versatilidad, simplicidad y robustez la han convertido en un método ampliamente utilizado en la industria minera. Puede aplicarse a una amplia variedad de minerales y tamaños de partículas, y es especialmente útil en etapas de preconcentración y concentración.

El jig se utiliza en diversas etapas de los procesos de beneficio de minerales, como la preconcentración, concentración y clasificación. Existen diversos tipos de jig, clasificados según su mecanismo de pulsación (pistón, diafragma, aire) y otros factores.

En los últimos años, el jigging ha encontrado aplicaciones en la industria de reciclaje. Su capacidad para separar materiales de diferentes densidades la hace adecuada para recuperar metales preciosos y otros materiales valiosos de residuos electrónicos y otros materiales reciclados.

A pesar de su larga historia y versatilidad, el jigging enfrenta desafíos debido a la creciente complejidad de los minerales y la necesidad de reducir el consumo de agua. Sin embargo, también existen oportunidades para su desarrollo y aplicación: La aplicación de conceptos de física granular puede mejorar la comprensión de los procesos fundamentales que ocurren en los jigs, la implementación de tecnologías como la visión artificial y el análisis de datos multivariados puede permitir un control más preciso y eficiente de los jigs y la búsqueda de alternativas a el jigging tradicional que utilicen menos agua es una prioridad [20].

Aunque sus orígenes se remontan a la antigüedad, la descripción más detallada de este proceso se encuentra en la obra de Georgius Agricola, "De Re Metallica", publicada en el siglo XVI. En esos tiempos, los jigs eran simples cestas perforadas que se sumergían manualmente en agua. Sin embargo, con la llegada de la Revolución Industrial y la incorporación de sistemas hidráulicos como las bombas de pistón y émbolo, los jigs evolucionaron hacia equipos mecánicos más eficientes, estableciendo la base de los equipos modernos.

En esencia, el jigging aprovecha la fuerza de gravedad y los movimientos pulsantes para separar los minerales, convirtiéndola en una técnica fundamental en la industria minera.

Los jiggs hidráulicos son equipos diseñados para separar minerales según su densidad. Funcionan mediante un recipiente dividido en dos secciones: una donde se coloca la mezcla de minerales sobre una malla o crivo, y otra que alberga

el mecanismo de pulsación. Este mecanismo genera movimientos oscilatorios en el agua, provocando que las partículas más densas se hundan y se separen de las más ligeras. La configuración básica de un jig hidráulico incluye un recipiente, un criba y un mecanismo de pulsación. Este último puede ser un émbolo, un diafragma o un sistema de aire comprimido, y su función es generar las ondas pulsantes necesarias para la separación de las partículas, como lo muestra en la siguiente figura:

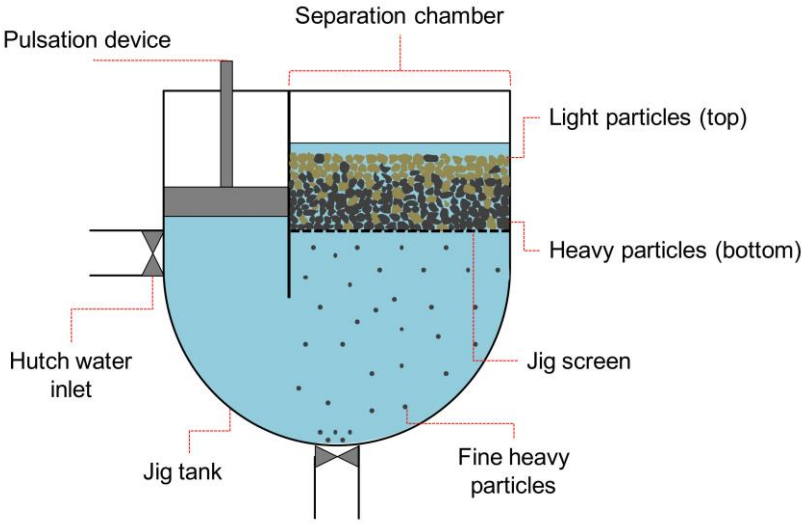


***Figura 3**.- Esquema de jigg de agua, en la separación de particulas por densidad (4)*

Los jigs hidráulicos se utilizan para separar partículas de diferentes densidades en un proceso continuo. El material a tratar se alimenta a un extremo del jig y se distribuye sobre una pantalla inclinada. A medida que las partículas pasan a través del equipo, son sometidas a ciclos repetidos de expansión y compactación, lo que promueve la estratificación. El objetivo es dividir el lecho de partículas en dos zonas distintas: una zona superior de material ligero y una zona inferior de partículas densas. La altura de separación, conocida como "punto de corte", depende del contenido y rendimiento deseados del producto final. Los jiggs industriales presentan una gran variedad de diseños, cada uno con características únicas. Estas diferencias se deben a múltiples factores, como la forma del tanque, el sistema que genera las pulsaciones, la forma en que se mueve el material dentro del equipo, cómo se extrae el producto concentrado y el método para controlar la separación [4].

Sampaio y Tavares [10] proponen una clasificación simplificada de los jigs, basándose en tres criterios principales: si el tamiz es fijo o se mueve, cómo se saca el concentrado y cómo se generan las pulsaciones del material. Esta clasificación nos ayuda a entender mejor la diversidad de estos equipos y sus aplicaciones."

Los jigs hidráulicos son equipos fundamentales en la concentración de minerales, operando bajo el principio de la separación por densidad. Su funcionamiento se basa en la generación de pulsaciones en un lecho de partículas, lo que provoca que las más densas se hundan y se separen de las más ligeras. Existen diversos tipos de jigs, clasificados principalmente por su mecanismo de pulsación: los de pistón, diafragma y aire. La extracción del producto pesado se puede realizar a través del tamiz o por encima de él, siendo esta última controlada por dispositivos de descarga equipados con sensores. Para mantener un punto de corte preciso, se emplean métodos como la flotación y sensores electromagnéticos o ultrasónicos. Los sensores radiométricos ofrecen una mayor precisión al permitir rastrear cambios de densidad durante el ciclo de pulsación. La geometría del recipiente, el tipo de tamiz y el sistema de control de la separación también influyen en el rendimiento del jigs. En resumen, los jigs hidráulicos son equipos versátiles y adaptables, cuya elección depende de las características del mineral a tratar y de los requerimientos específicos de cada proceso de concentración [20].

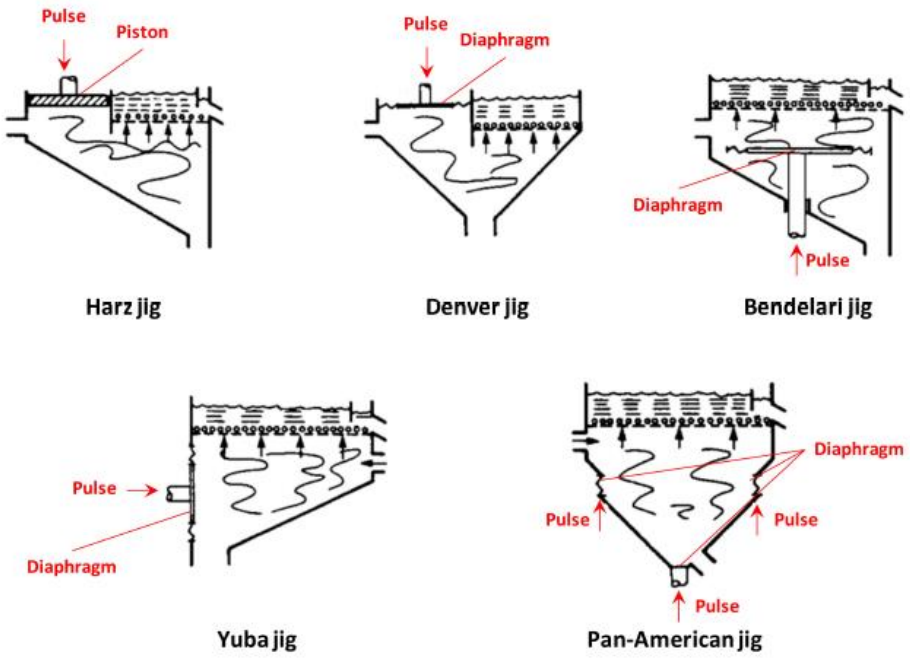


***Figura 4**.- Esquema de algunos dispositivos tipo pistón y diafragma (20)*

Fundamentos teóricos de los jigs

A pesar de la gran relevancia del proceso y de las investigaciones sobre el tema que ya abarcan más de un siglo, todavía no existe un consenso en la descripción teórica cuantitativa del jigging. Esto se debe a la gran complejidad de este proceso, en el que la hidrodinámica del sistema es continuamente variable. Algunos autores (Burt, 1984; Kelly y Spottiswood, 1982) consideran admirable que los jigs funcionen tan bien, a pesar del escaso conocimiento del proceso y del todavía limitado uso de herramientas de control automático. Aún así, existen al menos dos teorías que explican varios

aspectos de la estratificación vertical en el jigging. Una de ellas, la teoría hidrodinámica, intenta describir el jigging basándose en el comportamiento de partículas individuales en el fluido, mientras que la otra, se basa en la teoría de la energía potencial; que describe el comportamiento del lecho en su conjunto [19].

Teoría hidrodinámica del jigs:

La teoría hidrodinámica clásica considera inicialmente el movimiento de una partícula individual en la cama de la plantilla y luego la relaciona con el movimiento de todas partículas juntas. Esta fue la primera teoría del jigging propuesta, y aunque Investigadores como Rittinger (1870) y Richards (1908) han sentado las bases, Antoine Marc Gaudin fue quien lo sintetizó en su texto clásico (Gaudin, 1939). Gaudín sugirió que la estratificación podría describirse como el resultado de la combinación de tres mecanismos principales: sedimentación retardada diferencial, aceleración diferencial en inicio de caída y consolidación intersticial de partículas durante la succión [10].

La Sedimentación Diferencial

La sedimentación diferencial es un fenómeno físico que describe el movimiento de partículas sólidas a través de un fluido bajo la influencia de la gravedad. Cada partícula, al ser inmersa en un fluido, experimenta una fuerza de flotación y una fuerza gravitacional. La resultante de estas fuerzas determina la velocidad a la que la partícula se desplaza hacia el fondo del recipiente [37].

Esta velocidad, conocida como velocidad terminal, depende de diversos factores, entre los que destacan:

- Tamaño de la partícula: Las partículas más grandes sedimentan más rápidamente debido a la mayor fuerza gravitacional que experimentan.
- Densidad de la partícula: Las partículas más densas sedimentan más rápido que las menos densas, ya que la fuerza gravitacional es mayor.
- Densidad del fluido: Un fluido más denso ofrece mayor resistencia al movimiento de las partículas, disminuyendo la velocidad de sedimentación.
- Viscosidad del fluido: La viscosidad del fluido también influye en la velocidad de sedimentación, ya que un fluido más viscoso ofrece mayor resistencia al movimiento de las partículas.
- Forma de la partícula: Partículas no esféricas pueden experimentar fuerzas de arrastre adicionales debido a su forma, lo que afecta su velocidad de sedimentación.

Teoría de la energía potencial

FW Mayer propuso una descripción alternativa de la estratificación del jig. Indicó que existe una diferencia en la energía potencial gravitacional entre los estados totalmente mezclado y estratificado con respecto a la densidad, y que esta

diferencia en la energía potencial es verdaderamente responsable de la estratificación en el jigging.

La teoría, llamada teoría de la energía potencial jigging, puede ilustrarse considerando una mezcla binaria simple y dos estados ideales del lecho de partículas (Figura 5) [21]:

- Partículas perfectamente homogéneas de diferentes tamaños y densidades antes de la estratificación (I); y
- Partículas perfectamente estratificadas de diferentes densidades (II).

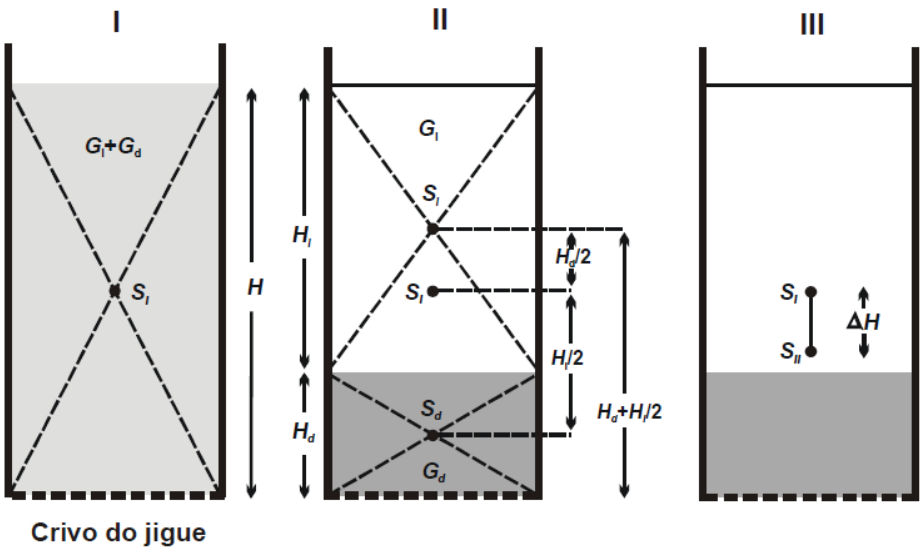


Figura 5.- Posición del centro de masa en un sistema binario (21)

Factor de forma

El factor de forma de los agregados reciclados de residuos de RCD es un parámetro crucial que influye significativamente en las propiedades del concreto. Los agregados de los RCD suelen presentar formas irregulares, con ángulos y superficies rugosas que afectan negativamente la unión con la pasta de cemento. A diferencia de los agregados naturales, como la piedra triturada o la grava, que tienen formas más redondeadas y uniformes, los agregados de los RCD presentan un factor de forma más alto [22,23].

Esta irregularidad se debe a la diversidad de materiales que componen los RCD, resultando en partículas con formas angulares y múltiples caras de fractura. Aunque algunos estudios reportan formas similares a los agregados naturales, otros indican formas más agudas en los RCD [24]. Los índices de forma y aplanamiento de los RCD suelen ser similares a los de los agregados naturales, con algunas excepciones donde se reportan valores ligeramente superiores en los RCD [25], lo que podría facilitar su uso en la producción de concreto.

El factor de forma de los agregados influye directamente en la resistencia de los materiales y en su comportamiento en una mezcla de concreto. Según estudios [25], la resistencia a la tracción y la energía de ruptura de las partículas están

directamente relacionadas con su forma.

El proceso de trituración juega un papel fundamental en la definición del factor de forma de los agregados. Las trituradoras de impacto, por ejemplo, producen partículas con una distribución de tamaños más uniforme y menor tendencia a la laminación [13, 16].

La forma laminar de los agregados puede afectar negativamente el empaquetamiento de las partículas en el concreto y la adhesión entre estas y la pasta de cemento, lo que puede comprometer la resistencia y durabilidad del material. Por lo tanto, es fundamental controlar el factor de forma de los agregados durante el proceso de producción, especialmente cuando se utilizan RCD como materia prima.

Para mejorar el desempeño del hormigón elaborado con RCD, se han propuesto diversas estrategias. La trituración y el cribado son técnicas comunes para modificar la forma y el tamaño de los agregados, acercándolos a las características de los agregados naturales. Además, los ajustes en el diseño de las mezclas, como la modificación de la relación agua-cemento y el uso de aditivos, pueden ayudar a compensar los efectos negativos de la irregularidad de los agregados [26].

Comprender y controlar el factor de forma de los agregados CDW es esencial para optimizar su uso en proyectos de construcción. La investigación en esta área se ha centrado en evaluar y mejorar el factor de forma de los agregados CDW.

Densidad

La densidad es una propiedad fundamental de los agregados que influye significativamente en el comportamiento del concreto. Los agregados reciclados de RCD presentan densidades menores que los agregados naturales debido al contenido de pasta de cemento porosa. Esta disminución en la densidad se atribuye principalmente a la presencia de mortero de cemento, que reduce la densidad del material [26, 27].

El rango de densidad de los agregados reciclados suele estar entre 2,2 g/cm³ y 2,6 g/cm³, mientras que los agregados naturales presentan valores generalmente más altos, comprendidos entre 2,62 y 2,80 g/cm³. La densidad del agregado resultante se ve afectada por diversos factores, como el origen del material, el tamaño de partícula, la resistencia del concreto original y el contenido de mortero adherido [28].

Estudios han mostrado que agregados RCD provenientes de concretos de alta resistencia tienen menor densidad que los de concretos normales, debido a la presencia de aditivos como cenizas volantes y humo de sílice. También se observa un aumento de densidad con el incremento del tamaño de partícula.

La densidad afecta significativamente las propiedades del hormigón resultante. Una menor densidad puede comprometer la resistencia y durabilidad del concreto, ya que influye en la compactación de la mezcla y en la adhesión

entre los agregados y la pasta de cemento. Además, la variabilidad en la densidad de los RA, debido a la diversidad de materiales reciclados (como hormigón, mampostería y cerámica), dificulta la dosificación precisa de las mezclas y puede afectar la homogeneidad del material final.

La densidad aparente, que considera el volumen de los poros, también es un parámetro importante. Una mayor densidad aparente generalmente indica un mayor contenido de sólidos y puede mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. Sin embargo, una densidad excesiva puede dificultar la trabajabilidad de la mezcla. Por lo tanto, es fundamental lograr un equilibrio adecuado entre la densidad aparente y la trabajabilidad para obtener un hormigón con las características deseadas.

En el caso de los agregados de roca reciclados, la densidad aparente está estrechamente relacionada con la resistencia y la estabilidad del material. Una mayor densidad aparente suele indicar una mayor resistencia a la compresión y una mejor durabilidad, lo cual es especialmente importante en aplicaciones como la construcción de carreteras.

La densidad y la densidad aparente son propiedades fundamentales que deben considerarse al utilizar agregados reciclados. La variabilidad de estos parámetros en los RA, en comparación con los áridos naturales, exige un control riguroso de la calidad y una adecuada caracterización de los materiales para garantizar el desempeño de las estructuras de hormigón.

Absorción de agua

La absorción de agua es una propiedad fundamental que condiciona la durabilidad de los materiales de construcción, especialmente cuando se utilizan agregados reciclados (RA). A diferencia de los áridos naturales, con una absorción de agua típicamente entre 0,5% y 1,5%, los RA presentan valores significativamente más altos, a menudo alcanzando el 12%. Esta mayor absorción se debe a la presencia de mortero adherido, que aumenta la porosidad y la permeabilidad del agregado [29].

La alta permeabilidad permite que el agua penetre en la matriz del hormigón, reaccionando con los hidróxidos de calcio y debilitando la estructura. Esto puede conducir a una reducción de la resistencia, durabilidad y vida útil del concreto. Además, la absorción de agua excesiva puede afectar negativamente el proceso de hidratación del cemento, resultando en un hormigón con propiedades mecánicas inferiores [30].

La capacidad de absorción de agua de los RA varía según factores como el contenido de pasta de cemento, el tamaño de partícula y la composición del material original. El proceso de absorción ocurre principalmente en los primeros minutos de inmersión, alcanzando el 80% de su capacidad en 5 minutos. Esta rápida absorción implica una menor trabajabilidad del concreto elaborado con este material, requiriendo mayores cantidades de aditivos para compensar esta

pérdida [31].

La variabilidad en la composición de los RA, debido a la diversidad de materiales reciclados, también representa un desafío. Esta heterogeneidad puede influir en la absorción de agua y en otras propiedades del agregado, dificultando su uso en aplicaciones estructurales. Por lo tanto, es fundamental caracterizar los RA de manera detallada para evaluar su potencial de reutilización y garantizar el desempeño a largo plazo de los materiales de construcción que los incorporan [31].

Capítulo IV: Metodología de la investigación

En este capítulo se describen las etapas de los procedimientos experimentales adoptados en el presente trabajo, el cual se divide en 2 procesos de jigging, además de las pruebas de caracterización física realizadas a los materiales. La metodología usada se basa en el artículo publicado por (Teixeira et al., 2022) [32].

Material Preparación

En la siguiente Figura 6 se muestra los bloques de hormigones estructurales convencionales (16/20 Mpa) usados en el experimentos y fabricados siguiendo la instrucción de hormigón estructural EHE/08 [33]:

***Figura 6**.-Bloques de hormigones estructurales convencionales (16/20 Mpa) usados en el experimentos y fabricados siguiendo la instrucción de hormigón estructural EHE/08*

El material fue sometido inicialmente a la rotura manual para adaptarse a la capacidad de entrada de la trituradora de mandíbula configurada con una parte superior de tamaño de 20mm, la Figura 7, muestra la trituradora de mandíbulas que se utilizó durante las pruebas de trituración del hormigón:

***Figura 7**.- Trituradora de mandíbulas Wedag Española SA*

Después de triturarlo, el material fue tamizado en un rango de 20 a 5mm (emulando el proceso que se lleva a cabo en las plantas de reciclaje de RCD) para generar el material utilizado en las pruebas. El material menor a 5 mm fue separado y no será utilizado en este estudio; el material de más de 20 mm se recirculó al proceso de trituración. La Figura 8 muestra el proceso de trituración al que fue sometido el material para generar el material utilizado en el trabajo.

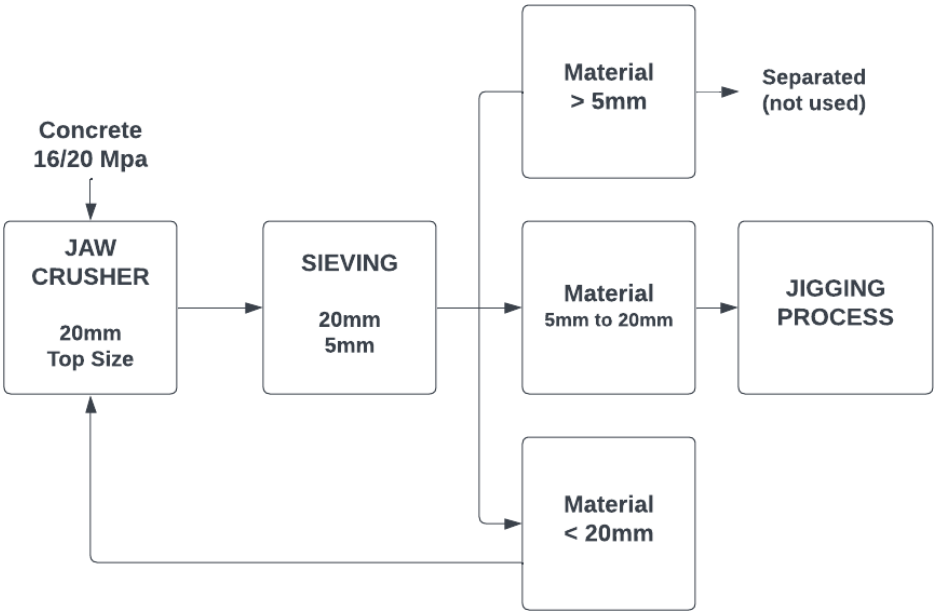


***Figura 8**.- Material generación diagrama de flujo de generación de material antes de iniciar el proceso de jigging*

Proceso de jigging

Las pruebas se realizaron en un jig de agua diseñado en escala de laboratorio. La Figura 9 muestra una imagen del dispositivo que fue usado en las pruebas. El dispositivo utilizado es un jig de pistón que utiliza agua como fluido de separación por densidad en el proceso de concentración. Accionado por el motor (E), el agua se bombea desde el pistón (D) desde el conducto de agua (B) hasta la cámara del jig. (A—ampliada en la imagen), donde se coloca el material. En la cámara del jig, el agua impulsada por el pistón entra en contacto con el material que proporciona la expansión y contracción del lecho, lo que permite la estratificación del material en capas. La energía, la figura (C) controla el funcionamiento. Las pruebas se realizaron con una frecuencia de 35 pulsos por minuto, a máximo amplitud de 14 centímetro de el pistón, y una duración 3 mín.

***Figura 9**.- Jig de agua (A), Conducto de agua (B), Cámara. (C), Agua se bombea desde el pistón (D), Motor (E).*

Luego de cada prueba, el material se retira manualmente de la parte superior de la cámara del jig, según las capas previamente definidas y se coloca a secar en una estufa a 70°C durante 24 h para eliminar la humedad y posteriormente realizar las pruebas de caracterización.

Prueba de Concentración de jig

La primera etapa de jigging se lleva a cabo por duplicado, el primero (FM1) y la segunda (FM2). Durante el proceso primario, se generaron dos materiales livianos (LM1 y LM2) con 50% de volumen del material, que se separó, y se generó, un concentrado primario, un material más denso (DM1 y DM2) que representa el otro 50% del volumen de material que se insertó en la cámara del jigging. Los dos lotes de jigging se llevaron a cabo para generar suficiente material para la prueba de jigging de segunda etapa y para confirmar el replicabilidad del proceso. En la segunda etapa del jigging se mezclaron DM1 y DM2, generando el material de alimentación de la segunda etapa de jigging (FM3), y luego del procesamiento, se generaron dos materiales, el material final concentrado, una parte densa (DM3) que representa el 33% del volumen, y un material más ligero (LM3), que representa el 66% del volumen de la cámara de jig que también fue separado y no será usado en este trabajo. La Figura 10 demuestra el diagrama de flujo de los procesos de jigging de dos etapas que se llevaron a cabo para concentrar el concreto.

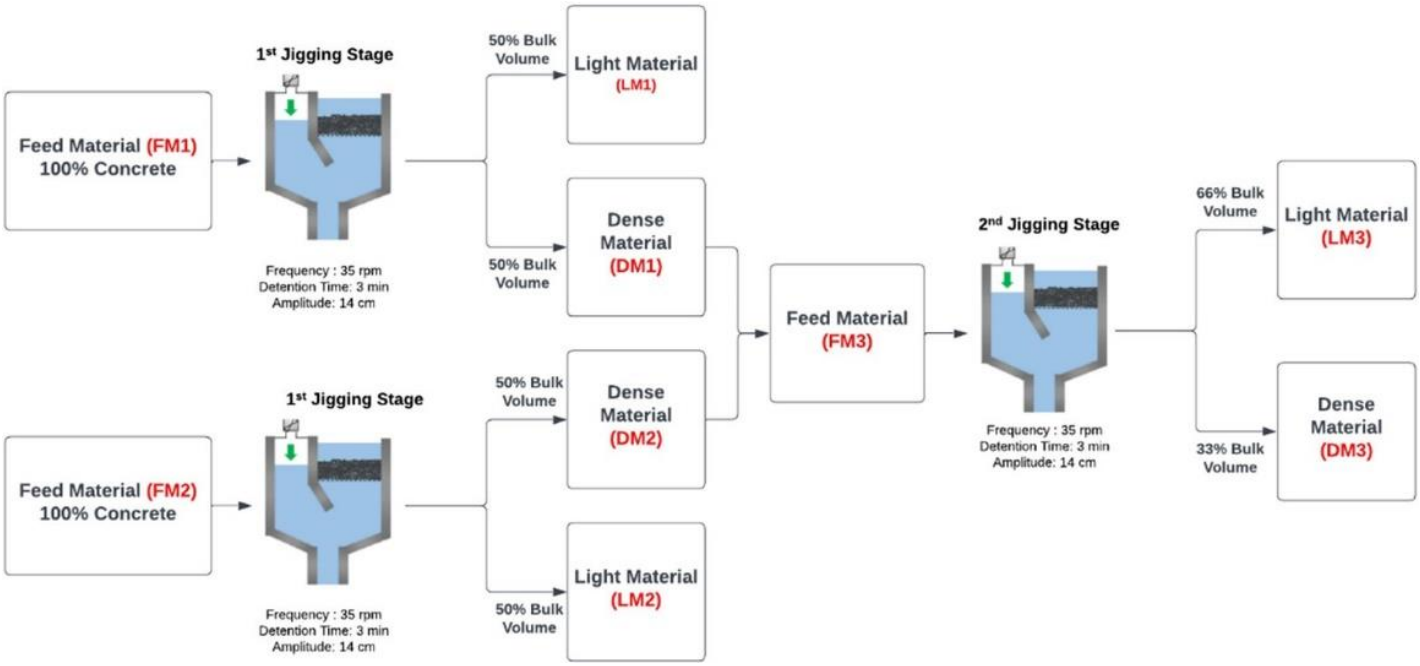


***Figura 10**.- El diagrama de flujo de los procesos de jigging de dos etapas se utiliza para concentrar los agregados del hormigón*

Las pruebas de caracterización física se realizaron sobre el hormigón insertado en la alimentación del material (FM1 y FM2), para obtener las características de los materiales que fueron insertado en el proceso de jigging después del triturado, en los materiales más densos que se generaron después la primera etapa (DM1 y DM2), y en el material denso (DM3), que está compuesto por los agregados recuperado luego de la segunda etapa de jigging.

Caracterización de materiales

Prueba de distribución densimétrica

El hormigón generado, en el rango de tamaño de 5 a 20 mm, fue sometido a una distribución densimétrica con prueba de hundimiento y flotación en las densidades de 2,4 g/cm^3, 2,5 g/cm^3, 2,55 g/cm^3, 2,6 g/cm^3, 2,65 g/cm^3, 2,7 g/cm^3, 2,75 g/cm^3, y 2,8 g/cm^3, como se muestra en la Figura 11:

***Figura 11**.- Agregados en la solución de sales de politungstanato de sodio*

La prueba se llevó a cabo usando una solución de Politungstanato de sodio, como se presenta en la Figura 12:

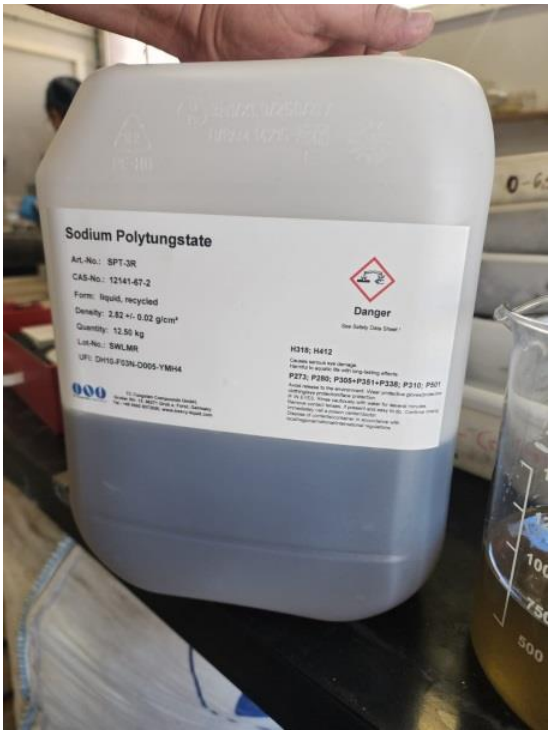


***Figura 12**.- Solución de Politungstanato de Sodio*

Las muestras de hormigón se separaron en los siguientes rangos de densidad: $\rho < 2{,}4$ g/cm^3, $2{,}4 < \rho < 2{,}5$ g/cm^3, $2.5 < \rho < 2{,}55$ g/ cm^3, $2{,}55 < \rho < 2.6$ g/ cm^3 , $2.6 < \rho < 2.65$ g/cm^3, $2.65 < \rho < 2.7$ g/ cm^3, $2.7 < \rho < 2{,}75$ g/ cm^3, $2{,}75 < \rho < 2.8$ g/ cm^3, y $\rho > 2.8$ g/ cm^3. La densidad de las soluciones se midió con un densimetro manual Anton Paar (DMA 35).

Análisis de la constitución del sustrato del hormigón

Para comprender la constitución del hormigón utilizado en los experimentos, cada uno de los rangos densimétricos que se obtuvieron fue sometido fue sometido a una prueba de digestión con ácido sulfúrico, para cuantificar el contenido constituyente de agregados finos (<5 mm), agregados gruesos (>5 mm), y pasta de cemento. La prueba de disolución se realizó con la metodología definida por Akbarnezhad y Alabama et al [33].

El hormigón se secó, se pesó y se colocó en una solución de ácido sulfúrico a una concentración de 3 molar o más alto. Utilizando una mezcladora circular, el hormigón se dejó sumergido en el ácido durante 8h y se lavó para eliminar la pasta de cemento disuelta. El procedimiento se repitió hasta que se disolvió toda la pasta de cemento. Después de que la pasta de cemento se hubo disuelto completamente, los agregados restantes se secaron en un horno durante la noche y se tamizaron a través de un tamiz de 5 mm para cuantificar el peso restante de agregados gruesos (<5 mm) y agregados finos (>5 mm). La cantidad de pasta de cemento disuelta viene dada por la diferencia entre la cantidad de agregados recuperados al final del proceso, en comparación con el peso del material que ingreso al proceso.

Prueba de distribución granulométrica

La distribución granulométrica (tamaño de partícula) del material se determinó analizando el material retenido en los tamices con tamaños de 20 mm, 12,5 mm, 8 mm y 5 mm, y no se analizaron los agregados finos tamaños menores a 5mm.

Proceso Factor de forma

La prueba de factor de forma se realizó mediante la norma EN 933-4 [34]. Pruebas para Geométrico Propiedades de Agregados. Parte 4: Determinación de Partícula Forma—Forma Índice. británico Normas Institución: Londres, Reino Unido, 2009.

En total, se seleccionaron 200 muestras de agregados proporcionales a las fracciones de masa de los rangos 9,5 x 12,7mm y 12,7 x 19,5mm. La norma se utiliza para realizar el análisis de factor de forma para agregados gruesos. Para llevar a cabo el análisis se realiza una distribución del tamaño de partícula de los agregados en el rango de tamaño de 9,5 x 12,7mm y 12,7 x 19,5mm, eliminando materiales con tamaños de partículas inferiores a 9,5mm. A continuación, la Figura 11, se puede observar parte de la muestra:

***Figura 13**.- Material >5mm y <20mm*

Posteriormente, se seleccionaron 200 partículas diferentes en proporción al peso de los materiales retenidos en cada rango granulométrico. Los agregados seleccionados se miden por la parte longitudinal más grande y su espesor más pequeña con un calibrador, tal como se muestra en la Figura 14:

***Figura 14**.- Figura xx, Medición para determinar el factor de forma.(longitud y espesor) con un pie de rey manual Connex de 120mm.*

El factor de forma es dado por la media de la relación entre las dos mediciones. El factor de forma de los materiales

interfiere directamente en los valores de densidad aparente, lo que modifica la dinámica de la concentración del material en el proceso del jigging, así como las características físicas del ajuste del material.

Proceso para la obtención de Densidad específica (OD), densidad específica saturada (SSD), densidad aparente (OD), densidad aparente saturada (SSD) y absorción de agua.

Debido a las fracciones densimétrica y al contenido de pasta de cemento presente en cada una de las etapas de concentración del material, es necesario el análisis del material en su estado saturado. La pasta de cemento, por su porosidad y menor densidad que los agregados, modifica los valores de los parámetros según la saturación del material. Los valores de densidad aparente y específica en sus formas saturadas en agua y secas al horno y se midió la absorción de agua mediante ASTM C127-07 [35], para comprender la influencia de la presencia de pasta de cemento en los agregados.

El procedimiento recomendado por la norma es el siguiente: Secar la muestra de prueba en el horno a una temperatura constante de 110 ± 5°C, enfriar al aire en temperatura ambiente durante 1 a 3h para muestras de prueba de tamaño máximo nominal de 37,5 mm (11/2pulg.), o más tiempo para tamaños mayores hasta que el agregado se haya enfriado a una temperatura que sea cómoda de manejar (aproximadamente 50 °C). Posteriormente, sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente por un período de 24 $\pm$ 4h, esto se muestra en la Figura 15:

***Figura 15**.- Muestra humeda*

Se sacó la muestra de prueba del agua, se envolvió en un paño absorbente hasta se eliminaron toda el agua visible. Se limpió las partículas más grandes individualmente. Se determinó la masa de la muestra de prueba en condición de superficie seca saturada. Se registran estas y todas las masas posteriores a 0,5 g o al 0,05% de la masa de la muestra más cercanos, lo que sea mayor. Sacar el aire, se coloca inmediatamente la muestra seca en un recipiente y se determina su

masa aparente en agua a 23 ± 2.0°C.

Densidad Aparente - Material seco

La muestra de prueba se seca en el horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, se enfría al aire a temperatura ambiente durante 1 a 3 h, o hasta que el agregado se haya enfriado a una temperatura que sea cómoda para manejar (aproximadamente 50 °C), y se determina la masa, la siguiente Figura 16 presenta la muestra seca para la prueba:

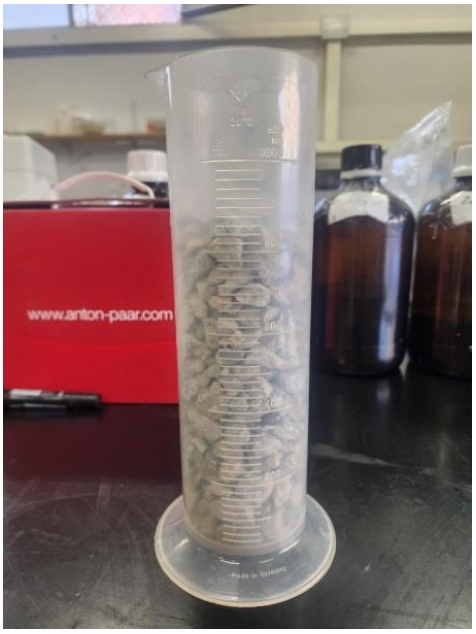


***Figura 16**.- Muestra seca*

Las ecuaciones usadas para determinar los valores son las siguientes:

Densidad específica (OD) (kg/ m^3)

997,5 A/ (B - C) (1)

Densidad específica (SSD) (kg/m^3)

997,5 B/ (B - C) (2)

Densidad aparente (OD) (kg/m^3)

997,5 A/ (A - C) (3)

Agua de absorción (%)

[(B - A) /A] × 100 (4)

dónde

A = masa secada al horno, gramo;

B = masa saturada-superficialmente-seco prueba muestra en aire, gramo

C = masa aparente de saturado prueba muestra en agua, gramo.

La ecuación determina que la masa específica del material es:

$\gamma = C/B-A+C$

dónde:

γ = masa específica del árido reciclado (kg/dm³ o g/cm³);

A = masa de muestra + recipiente + agua + placa de vidrio (g);

B = masa del recipiente + agua + placa de vidrio (g);

C = masa de la muestra secada al horno (g).

Capítulo IV: Resultados y discusiones

Prueba de Distribución Granulométrica

En la tabla 1 se presenta los valores de distribución granulométrica del hormigón después del proceso en la mandíbula trituradora. La mayor parte del material (67,2% por peso) son agregados gruesos en el rango de tamaño de partícula entre 5 y 20mm. Después de la trituración, el hormigón convierte el 32,8% en material fino (0 x 5 mm). Este fino material está compuesto básicamente de la pasta de cemento y agregados finos (arena) que se separan de los agregados gruesos debido a la diferencia de resistencia de la pasta de cemento y las partículas de agregado. Este material no fue analizado en este trabajo. Las partículas gruesas están compuestas por agregados totalmente liberados, partículas de pasta de cemento mezcladas con arena que no fueron trituradas en el proceso de trituración, y agregados adheridos con la pasta de cemento.

Distribución del tamaño del hormigón	<5 mm (%)	5/8 mm (%)	8/12.5 mm (%)	12.5/20 mm (%)	Total (%)
Hormigón 16/20	32,8	14,7	26,6	25,9	100
	32,8		67,2		100

***Tabla 1**.- Distribución de tamaños de hormigón (16/20 MPa) triturado en un tamaño máximo de 20mm.*

Prueba de Distribución Densimétrica

En la prueba de hundimiento y flujo se utilizaron las siguientes densidades: 2,4 g/cm^3, 2,5 g/cm^3, 2,55 g/cm^3, 2,6 g/cm^3, 2,65 g/ cm^3, 2,7 g/ cm^3, 2,75 g/cm^3 y 2,8 g/ cm^3. El Grafico 1 muestra la masa retenida en los diferentes rangos de densidad en el hormigón en el hormigón en el rango de tamaño de partícula de 5 × 20mm.

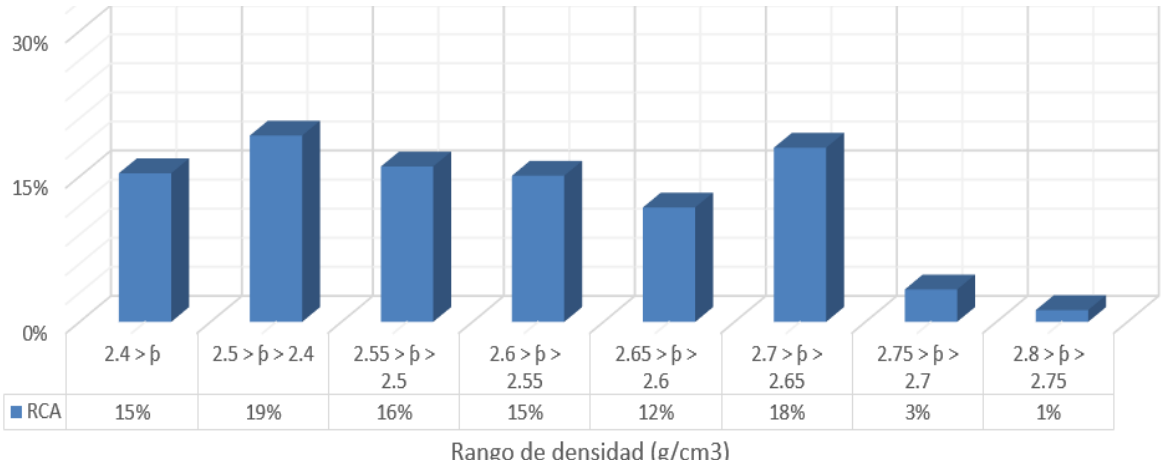


***Grafico 1**.- Distribución de densidad de hormigón generado después de la conminación, material en el rango de tamaño de partículas 5 × 20mm.*

El hormigón estudiado presenta una gran variación de densidad, debido principalmente a las características del mecanismo de trituración y de los componentes del hormigón. Normalmente, 16/20MPa está compuesto por tres partes de agregados grueso (partículas mayores de 5 mm y de alta densidad), dos partes de agregados finos (partículas menores que 5mm, conocida como arena) y una parte de cemento (material menos denso que contiene partículas con mayor densidad, formando el hormigón en su formulación). Partículas con densidad menor que 2,6g/cm^3 están compuestas por una mezcla pasta de cemento y agregados finos, o agregados gruesos con pasta de cemento adherida. La adhesión de la pasta de cemento modifica negativamente de forma directa la densidad específica, porosidad, el factor de forma y la absorción de agua del material, imposibilitando su recirculación en nuevas formulaciones de hormigón.

Teniendo en cuenta las porciones >2,65 g/cm^3, >2,7 g/cm^3, >2,75 g/cm^3 y >2,8 g/cm^3, se muestra en el Grafico 1, 34% del material tiene una densidad superior a 2.6 g/cm^3, este material está compuesto por agregados gruesos totalmente liberados y agregados gruesos con una fina capa de cemento adherida. Debido la diferencia de resistencia entre la pasta de cemento y los agregados gruesos, la fractura del hormigón tiende a ocurrir en la interfaz de los materiales, lo que provoca la liberación del agregado. Debido a su bajo contenido de pasta de cemento, este material tiende a tener características similares a los agregados naturales, lo que posiblemente permita su reutilización. En el presente trabajo, el objetivo es recuperar el material con una densidad superior a 2,6g/cm^3. y analizar es propiedades en comparación de los agregados naturales.

Constitución del sustrato de hormigón

Las formulaciones de hormigón (16/20MPa) utilizan normalmente una mezcla de arena (Agregados finos: <5mm agregados gruesos: > 5mm <20mm), cemento y agua (pasta de cemento). Con el objetivo de conocer los contenidos de cada material existente en cada granulometría generada, se realizó una prueba de disolución. Las masas retenidas en cada rango densimetrico se sometieron a digestión con ácido clorhídrico para conocer la composición de cada parte del hormigón. El Grafico 2 muestra los valores obtenidos

para cada material en cada rango de densidad correspondiente.

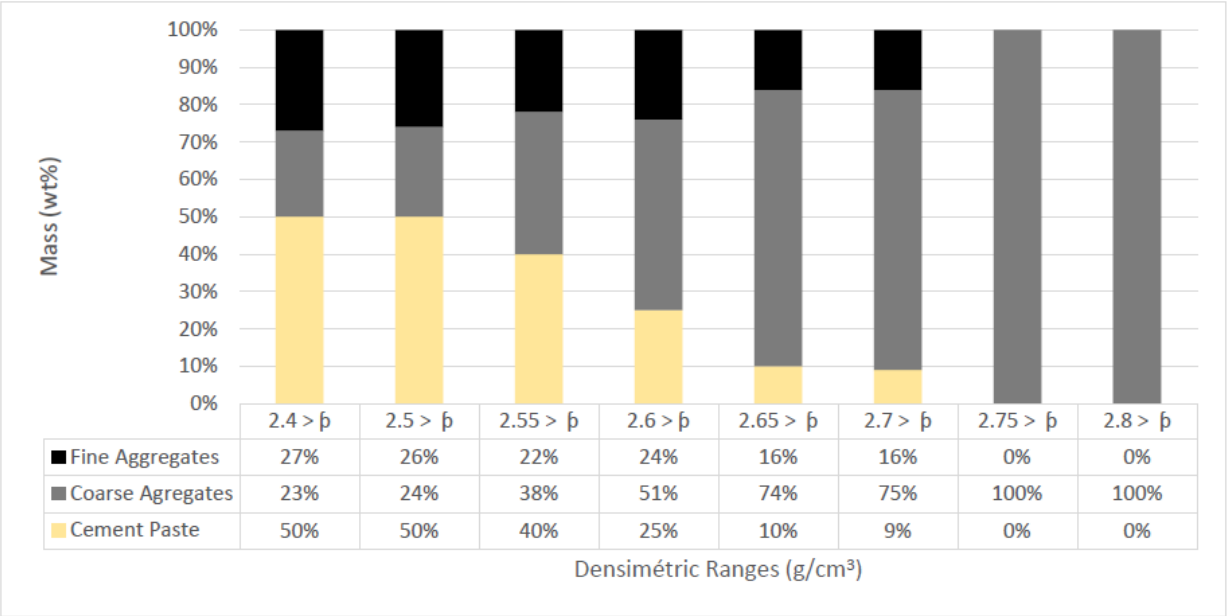


***Grafico 2**.- Contenido de pasta de cemento, agregados finos, y agregados gruesos contenido en diferentes rangos de densidad. Hormigón en el rango granulométrico 5 × 20mm.*

Las fracciones densimétricas presentaron los valores de sus constituyentes como se esperaba. Las fracciones con una densidad superior a 2,7 g/cm^3 fueron considerados agregados gruesos completamente liberado. Cabe mencionar que los agregados finos no presentan grado de liberación debido a estar completamente mezclado con la pasta de cemento. Las facciones densimétricas con densidades inferiores que 2,6g/cm^3 tienen un alto contenido de pasta de cemento y agregados finos, lo que contribuye a reducir la densidad del material. Los rangos densimétricos de 2,6 < þ < 2,65g/cm^3 y 2.65 < þ < 2.7g/cm^3 tener un alto contenido de agregados gruesos, 74% y 75%, respectivamente; Además, la proporción de agregados finos mezclado con pasta de cemento es más alta que las fracciones menos densa, lo que contribuye a aumentar la densidad del material.

Prueba de Concentración del jig

Cabe mencionar que los procesos del jigging (agua o aire) son dispositivos usado alrededor el mundo y se basan por la diferencia de densidad y tamaño de los materiales presente en el lecho (separación de partículas más densas de las menos densas). Observando el grafico 2 y la teoría básica de jigging, se dimensionaron las pruebas de jig (altura de cortes en el lecho de jigging) y proporcionar la concentración de materiales con densidad mayor a 2,6g/cm^3, para analizar si es posible generar material con características similares a los agregados naturales utilizados en la industria.

La Figura 17 muestra el flujo de masa correspondiente al proceso de jigging de dos etapas que se propuso en el documento. La figura demuestra la cantidad de material que se insertó en las etapas de jigging y su contenido de partículas con una densidad > 2,6g/cm^3. También se demuestra el contenido de materiales destinados a la eliminación y materiales

concentrados para la recuperación de agregados. La primera etapa de jigging se llevó a cabo por duplicado para verificar la replicabilidad del proceso de jigging en la generación de materiales con características similares y para generar material suficiente para la segunda etapa de jigging. La primera etapa se llevó a cabo con dos materiales de alimentación diferentes FM1 y FM2.

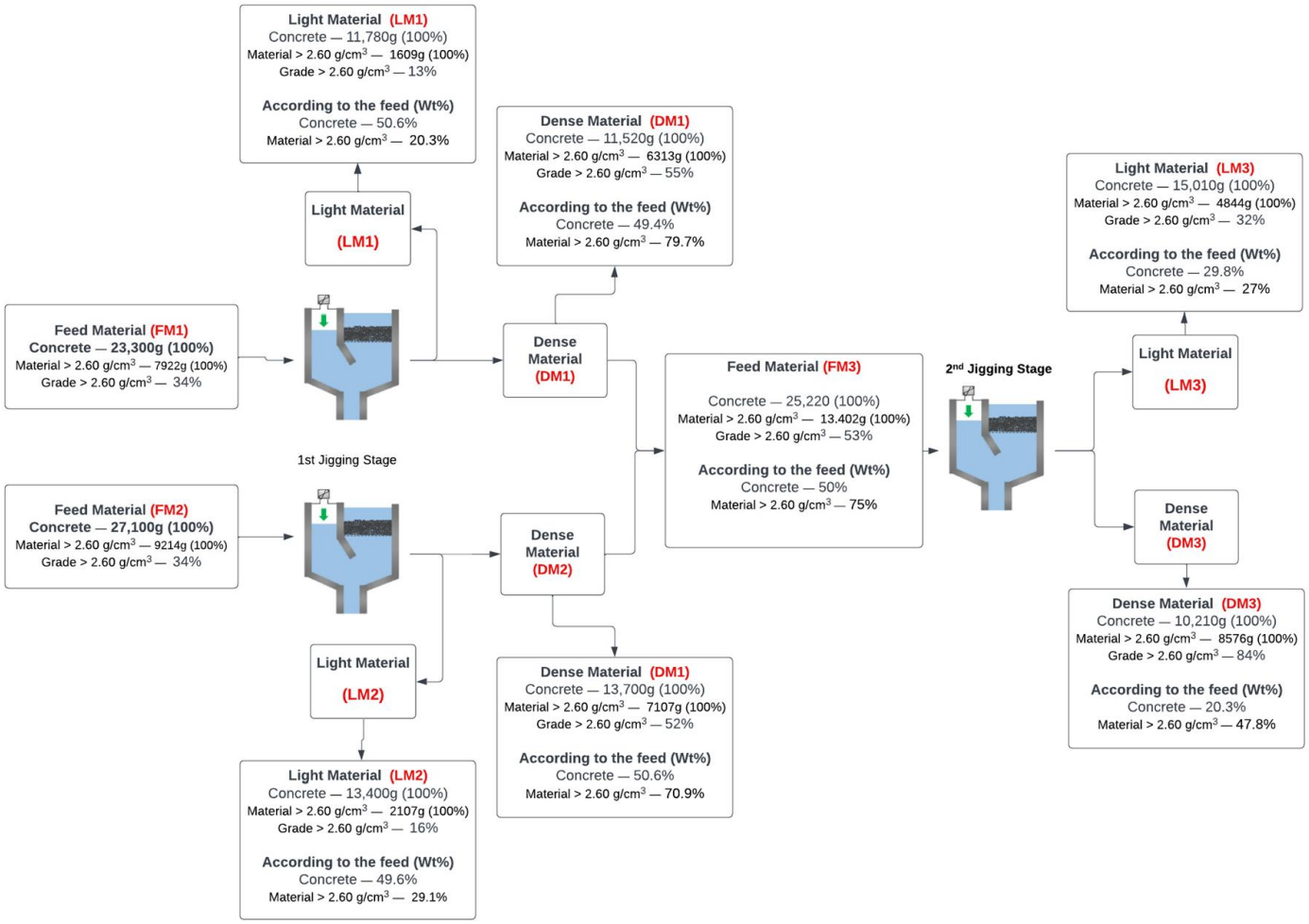


***Figura 17**.- Diagrama de flujo de las pruebas de jig y balance de masa de la prueba jigging*

El material d alimentación 1 (FM1) comprende 23.300 g de hormigón con un contenido de 34 % de materiales con una densidad mayor que 2,6 g/ cm^3 (como se muestra en el Grafico 2) presentado 7.922g de este material denso. El proceso se realizó con una altura de lecho de 18cm. FM1, después del jigging, generó dos materiales diferentes, un material ligero (LM1) y un material denso (DM1). LM1 representa el 50% (volumen aparente) del lecho de jigging y tiene 11.780g de material con un contenido del 13% del material con una densidad mayor a 2,6g/cm^3, el material representa el 50,6% (en peso) del material que se insertó en el FM1 y concentra el 20,3% del material denso inicial FM1. Este material está compuesto por partículas de pasta de cemento y agregados finos con pasta de cemento adherida al material, que normalmente presenta una baja densidad, alta porosidad y alta absorción de agua, lo que hace inviable la recirculación. El

DM1 representa el 50% restante (volumen bruto) de la carga, que se separa al fondo de la cámara del jig. Con una masa de hormigón de 11.520g, y 55% de éste a una densidad superior a 2,6g/cm^3, el DM1 representa el 49,4% del material introducido en el FM1 y concentra 79,7% del material denso introducido en la carga. Este material (DM1) está compuesto por partículas de agregados completamente liberados y agregados con una fina capa de pasta de cemento.

El material de alimentación 2 (FM2) comprende de 27.100g de hormigón con a contenido de 34% de materiales con una densidad mayor a 2,6g/cm^3, presentando 9.214g de este material denso. El proceso se realizó con una altura de lecho 20cm. El FM2 luego del jigging generó dos materiales, un material ligero (LM2) y un material denso (DM2). LM2 representa el 50% (volumen a granel) del lecho de jigging y tiene con 13.400g de hormigón, con un contenido de 16% de material con una densidad mayor de 2,6g/cm^3; el material representa el 49,6% (en peso) del material que fue insertado en el FM2 y concentra el 29,3% del material denso. DM2 representa el 50% restante (volumen a granel) del alimento, que se separa en el fondo de la cámara de la plantilla. Con una masa de 13.700g de hormigón, y un 52% de éste con una densidad superior a 2,6g/cm^3, DM2 representa el 50,6% del material insertado en FM2 y concentra el 70,9% del material denso insertado en la alimentación. El DM1 y DM2 tener características similares en sus componentes.

Los materiales ligeros (LM1 y LM2) fueron separados y posteriormente dirigido a recirculación para recuperar el denso material presente. Los materiales densos (DM1 y DM2) fueron retirados y dirigidos a la segunda etapa de jigging. Se analizaron las propiedades físicas (densidad específica, densidad aparente, densidad especifica saturada, saturado a granel densidad, forma factor, y agua absorción) eran analizado del material denso mixto (FM3) para comparación y análisis de la progresión de los valores del parámetro durante el proceso de jigging.

Material de alimentación 3 (FM3) está compuesto de 25.220g de hormigón preconcentrado, con un contenido contenido de 53% de materiales con una densidad mayor a 2,6g/cm ^{3}, presentando 13.402g de material denso. El proceso se llevó a cabo con una altura de lecho de 18cm. El FM3 luego del jigging generó dos materiales, un material ligero (LM3) y un material denso (DM3). El LM3 representa el 66% (volumen a granel) del lecho de jigging y tiene 15.010g de hormigón con un contenido del 32% del material con una densidad superior a 2,6g/cm^3. El material representa el 29,8% (en peso) del material que se insertó en la primera etapa de jigging y concentra 27% del material denso. El DM3 representa el 34% restante (volumen a granel), que se separa al fondo de la cámara de jigging, tiene 10.210g de hormigón, y tiene a contenido de 84% de material con una densidad mayor a 2,6 g/cm^3. El DM3 representa el 20,3% del material insertado en la primera etapa de jigging y concentra el 47,8% del material denso insertado en la prueba.

Los materiales ligeros (LM3) fueron separados y luego mezclado (LM1 y LM2) para recirculación, para recuperar el denso material presente. Los materiales densos (DM3) se recogieron y se dirigieron para realizar análisis físicos. Las

propiedades físicas (densidad específica, densidad aparente, densidad específica saturada, densidad aparente saturada, factor de forma, absorción de agua, distribución densimétrica y contenido de pasta de cemento) donde se analizó el DM3 para comparación y análisis del material generado al final del proceso.

Caracterización Física del Material

Luego del proceso de jigging, los materiales generados fueron enviados para análisis físico. Se analizaron las propiedades físicas (densidad específica, densidad aparente, densidad específica saturada, densidad aparente saturada, factor de forma, absorción de agua y contenido de pasta de cemento) del hormigón utilizado al inicio del proceso (CO), los materiales densos concentrados generados a partir del proceso de jigging primario (C1), el material final concentrado después del proceso de jigging secundario (C2) y los agregados naturales (AN) utilizados en la industria de la construcción, para compararlos con los materiales generados. La Tabla 2 presenta cada material que fue analizado.

Materiales	Código
Hormigón después del proceso de trituración	CO
Material concentrado generado en la primera etapa de jig (DM1 y DM2)	C1
Material concentrado generado en la segunda etapa de jigg (DM3)	C2
Agregados naturales utilizados en la industria	NA

***Tabla 2**.- Materiales analizados después del proceso de jigging*

Análisis de propiedades físicas

En la Tabla 3 presenta los valores analizados de cada uno de los materiales concentrados de los procesos de jigging realizados (C1 y C2), así como el material al inicio del proceso (CO) y natural Agregados (AN).

Materiales	Densidad Especifica (OD) (g/cm^3)	Densidad Aparente (OD) (g/cm^3)	densidad específica saturada (SSD) (g/cm^3)	densidad aparente saturada	Absorción de agua (%)	Factor de forma	Pasta de cemento (%)
CO	2,59	1,37	2,47	1,35	4,73	2,19	46%
C1	2,62	1,38	2,57	1,37	3,2	2,07	30%
C2	2,66	1,38	2,6	1,37	1,2	2,07	15%
NA	2,67	1,47	2,65	1,41	0,72	2,09	0%

***Tabla 3**.- Análisis de los parámetros físicos de los materiales generados a partir del proceso de jig (C1 y C2), el hormigón utilizado al inicio del proceso para el análisis de concentración (CO), y los agregados naturales (AN) normalmente utilizados en la industria*

En la Tabla 3 se muestran los valores medidos de las principales características definidas por Brito y Saikia [19] como los parámetros que más influyen en las propiedades fundamentales de los agregados para su uso en hormigón. En función de la concentración del material con las etapas de jigging, se puede observar un aumento en el valor de la densidad específica y aparente observado tanto en su forma seca y como en la forma saturada. La densidad es uno de los parámetros fundamentales de los agregados y es importante para diseñar mezclas de hormigón y controlar varias propiedades del hormigón resultante. La densidad del agregado RCD es menor que la de los agregados naturales. Esto se debe a la existencia de una pasta de cemento porosa y menos densa en los agregados de RCD. Debido a su origen y tamaño, los agregados de RCD pueden tener diferentes densidades dependiendo de la cantidad de pasta de mortero adherida [19]. La CO tiene una densidad específica de 2,59g/cm^3, mientras que el C2 tiene 2,66g/cm^3, acercándose al valor de 2,67g/cm^3 observado en AN. Se observa un aumento en los valores de densidad mientras que el valor de concentración de la pasta de cemento disminuye de acuerdo con las etapas de concentración del proceso de jigging. El procesamiento de jig elimina los materiales menos densos, formados básicamente por pasta de cemento. La densidad aparente del agregado de RCD también es más bajo que la de los agregados naturales. La densidad aparente de los agregados RCD generalmente está en el rango de 1150–1400kg/m^3 con algunas excepciones [19]. Ferreira et al. [36] explican que el valor más bajo de densidad aparente que se observa a partir de agregado reciclado de RCD comparado con AN se debe a la mayor porosidad en el agregado RCD. La absorción de agua, al contrario de lo observado en los resultados de densidad, está directamente relacionado con el contenido de pasta de cemento medido en los materiales. La capacidad de absorción de agua del agregado RCD es más alta que el del agregado natural (que es menos del 1% para casi todos los agregados actuales), ya que el agregado RCD está compuesto de pasta de cemento, que es poroso por naturaleza y, por lo tanto, puede absorber altas cantidades de agua [19]. Cuanto mayor sea el contenido de la pasta de cemento, mas poroso es el material, y en consecuencia absorberá más. agua debido a su porosidad. El CO tiene una absorción de agua del 4,73%, en C1 se observa una absorción de agua del 3,2%, mientras que C2 tiene solo 1,2%, valor cercano al obtenido en AN, que midió 0,72% de absorción de agua. De Juan [37], En un estudio realizado en España, reporta que la absorción de agua de NA puede variar entre 0 y 4%, mientras que para la pasta de cemento que se encuentra adherida al agregado, se encuentra entre 16 y 17%, proporcionando una mayor absorción de agua de RA a partir de RCD, que varía entre 0,8 y 13%, con un promedio de 5,6%. La investigación [36, 38], propone que se añada a la mezcla de hormigón una cantidad extra de agua correspondiente al agua absorbida por el AR y describe un método de manejo del material para compensar el agua de mezcla mediante el remojo previo del AR para estandarizar la relación agua/cemento en las formulaciones de hormigón. El factor de forma de los materiales también está directamente relacionado con el contenido de masa de cemento, debido a la aleatoriedad en la fractura de los materiales

con menor densidad (compuestos por masa de cemento y agregados finos); el factor de forma presenta valores mayores en CO al compararse con los valores medidos en C1 y C2 y los agregados naturales (AN) que no tienen masa de cemento adherida. Etxeberria et al. [39], informaron sobre los índices de forma de los agregados de CDW y afirmaron que la mejor forma de los agregados de CDW facilitó su uso para la producción de hormigón.

Los Gráficos 3 – 8 presentan las correlacionan las características probadas con el contenido de pasta de cemento y define la relación entre dichas características.

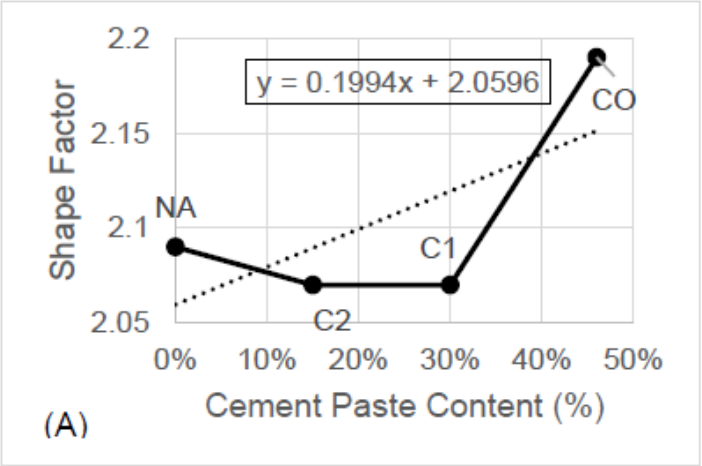


***Grafico 3**.- (A) Factor de Forma × Contenido de Pasta de Cemento*

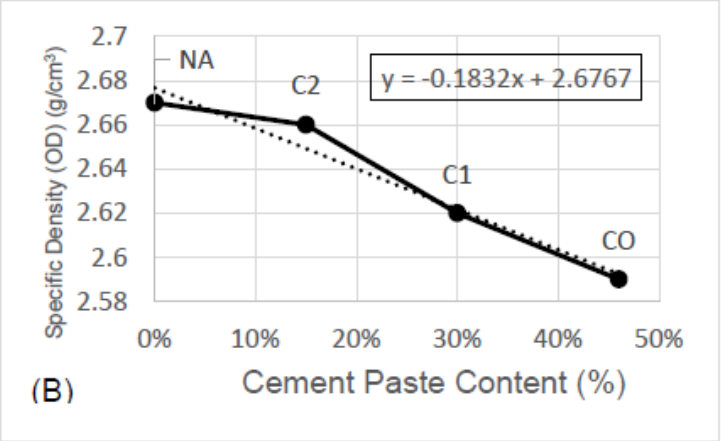


***Grafico 4**.- (B) Densidad Específica × Contenido de Pasta de Cemento*

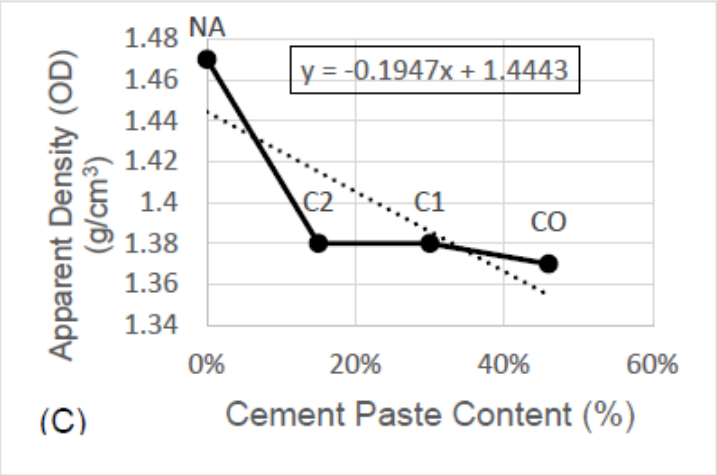


***Grafico 5**.- (C) Densidad Aparente × Contenido de Pasta de Cemento*

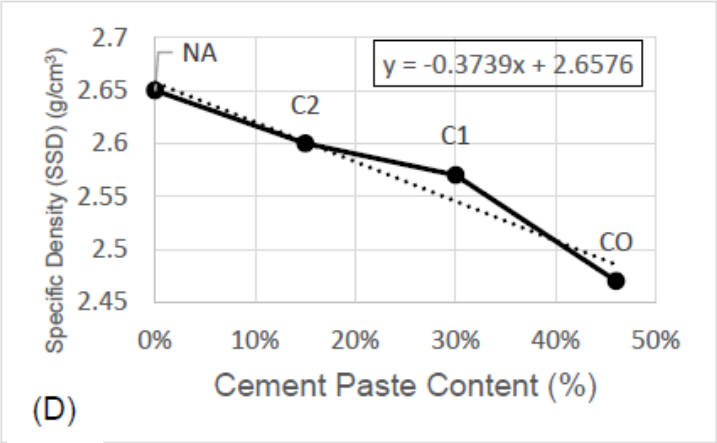


***Grafico 6**.- (D) Densidad Específica Saturada (SSD) × Contenido de Pasta de Cemento*

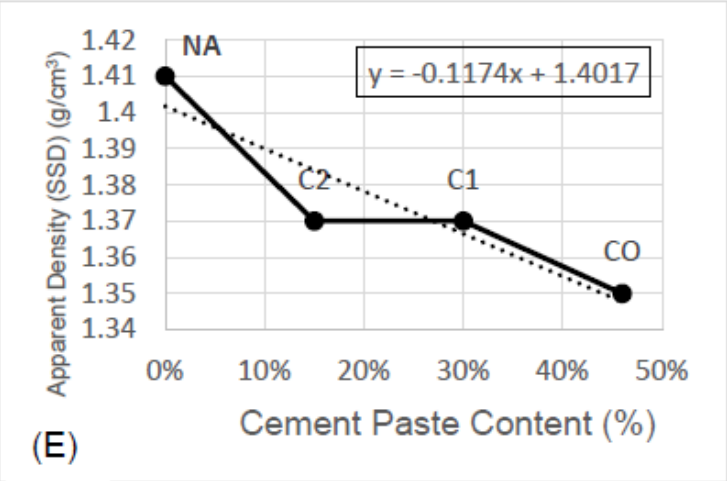


***Grafico 7**.- (E) Densidad Aparente Saturada (SSD) × Contenido de Pasta de Cemento*

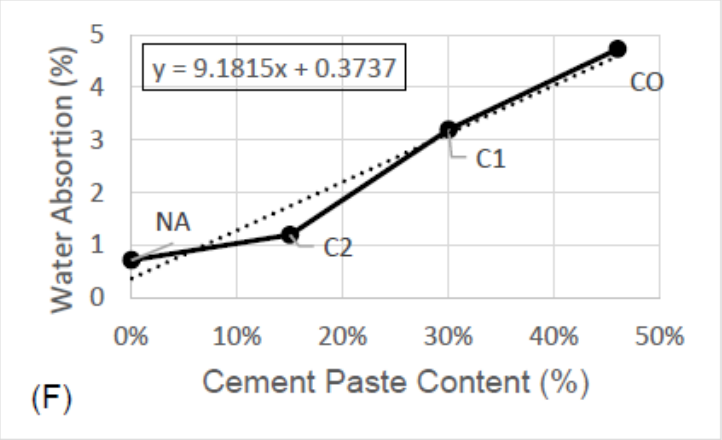
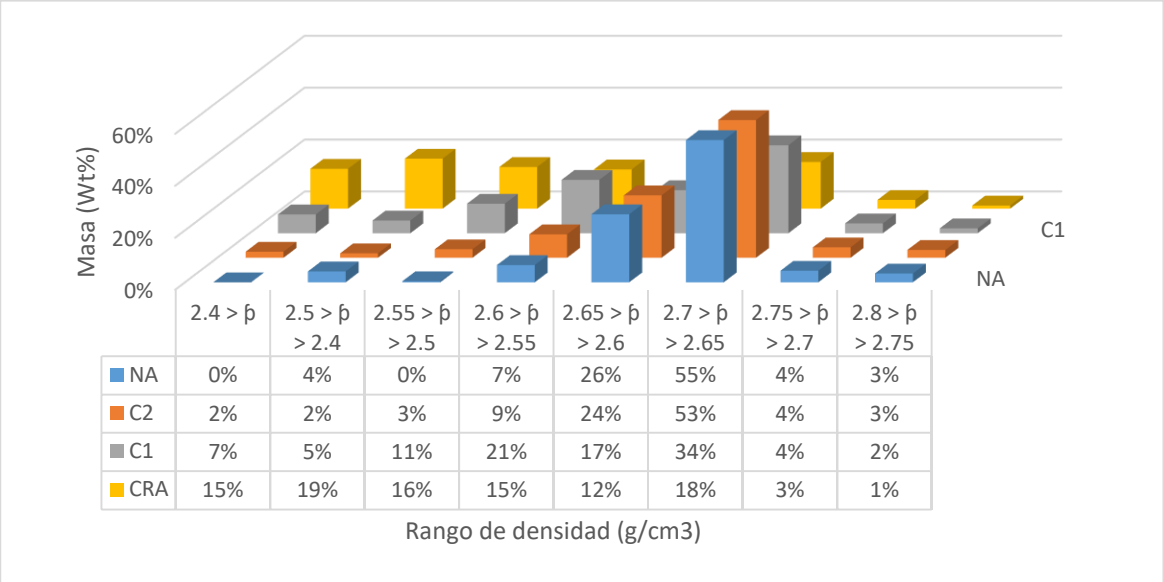


***Grafico 8**.- (F) Absorción de Agua × Contenido de Pasta de Cemento*

Teniendo en cuenta las nuevas formulaciones de concreto, las relaciones entre los materiales en su estado desaturado son de mayor relevancia. El análisis de los materiales en su estado saturado es importante debido a la modificación de proporciones y del concreto en su estado fresco (trabajabilidad y endurecimiento del concreto) y posteriormente en su estado endurecido (durabilidad, resistencia, fatiga y otras propiedades). De acuerdo a lo observado en el Grafico 9, el contenido de pasta de cemento interfiere directamente en las características del agregado y consecuentemente en las proporciones necesarias para la fabricación del concreto, siendo necesario la adición de más agua o cemento en las formulaciones para adecuar las proporciones y características. En la Figura 10 se muestran las distribuciones densimétricas de los materiales mostrados en la Tabla 2 se compara la composición densimétrica de los materiales generados y la similitud del material concentrado con los agregados naturales.



	2.4 > þ	2.5 > þ > 2.4	2.55 > þ > 2.5	2.6 > þ > 2.55	2.65 > þ > 2.6	2.7 > þ > 2.65	2.75 > þ > 2.7	2.8 > þ > 2.75
NA	0%	4%	0%	7%	26%	55%	4%	3%
C2	2%	2%	3%	9%	24%	53%	4%	3%
C1	7%	5%	11%	21%	17%	34%	4%	2%
CRA	15%	19%	16%	15%	12%	18%	3%	1%

Grafico 9.- *Distribución densimétrica del hormigón en su constitución inicial (CO), los agregados naturales*

La distribución densimétrica de los materiales analizados demuestra una gran variación densimétrica en el hormigón en su forma inicial (CO) con una distribución homogénea entre los valores obtenidos en materiales más livianos (2,4 g/cm3 < þ < 2,6 g/cm3) y materiales más densos (2,6 g/cm3 < þ < 2,8 g/cm3). A partir de la primera etapa de jigging donde se genera el primer material concentrado (C1), se observa una disminución en el contenido de materiales livianos y un aumento en el contenido de materiales densos. Al observar los valores obtenidos a partir del material generado en la segunda etapa de jigging (C2), los valores son similares a los valores obtenidos a partir de agregados naturales, debido a la remoción de materiales livianos que se ubican en la parte superior de la cámara de jigging durante ambas etapas. En C2, se observa una pequeña presencia de material liviano (2,4 g/cm3 < þ < 2,5 g/cm3); La presencia de este material se debe a que las partículas que quedan atrapadas dentro del material denso concentrado en la segunda etapa de jigging en el fondo de la cámara de jigging, no logran desplazarse a la parte más alta del lecho de jigging donde se encuentra el material liviano, siendo imposible su remoción. El C2 presenta 84% de material con una densidad > 2,6 g/cm3, muy cercano a los agregados naturales que presentan 88% de material en el mismo rango granulométrico, y una distribución densimétrica similar a la encontrada en el AN.

Tendencias Futuras

Analizando los materiales generados y la posibilidad de recuperar agregados presentes en hormigones con características muy similares a los agregados naturales, es necesario analizar el uso de estos materiales en nuevas formulaciones de hormigones para validar los parámetros observados en el trabajo. La formulación de probetas de hormigón y el análisis de las características que la inserción de estos materiales generados puede aportar a los nuevos hormigones son de suma importancia para la validación del método de concentración de RCD. Aunque el proceso de jigging es ampliamente utilizado alrededor del mundo, el método de concentración de agregados con el proceso de jigging es una nueva posibilidad que está siendo sugerida por este trabajo, por lo que es necesaria una planta a escala piloto para validar el proceso a niveles industriales.

Capítulo VI: Conclusiones

En conclusión, el proceso de separación llevado a cabo en dos etapas ha permitido obtener un material concentrado con una alta proporción de partículas densas, lo cual lo hace adecuado para su utilización en aplicaciones específicas.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad del proceso de jigging como una técnica eficaz para la recuperación de agregados de residuos de construcción y demolición (RCD). El jigging ha demostrado ser capaz de separar de manera eficiente las partículas de RCD según su densidad, obteniéndose agregados con características granulométricas y mineralógicas adecuadas para su utilización en la producción de hormigón.

Los resultados obtenidos en este estudio revelan una relación inversa entre la densidad y la absorción de agua de los materiales analizados. Mientras que la densidad aumentó progresivamente a lo largo del proceso de jigging debido a la eliminación de partículas menos densas, la absorción de agua disminuyó significativamente. Esta tendencia se explica por el hecho de que la pasta de cemento, componente de menor densidad y mayor porosidad en los materiales de construcción, es la principal responsable de la absorción de agua. Al eliminar las partículas con mayor contenido de pasta de cemento a través del proceso de jigging, se reduce considerablemente la porosidad del material y, en consecuencia, su capacidad de absorber agua. Los valores de absorción de agua obtenidos para C2, que se acercan a los del material natural (AN), corroboran la eficacia del jigging en la mejora de esta

propiedad. Estos resultados sugieren que el proceso de jigging no solo permite obtener agregados con una densidad adecuada para su uso en hormigón, sino que también contribuye a mejorar la durabilidad del material final al reducir su susceptibilidad a la penetración de agua, lo cual es fundamental para garantizar la vida útil de las estructuras de hormigón.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian una estrecha relación entre el factor de forma de las partículas, el contenido de pasta de cemento y la eficacia del proceso de jigging. Las partículas con mayor contenido de pasta de cemento, como las presentes en el material original (CO), tienden a presentar un factor de forma más elevado debido a su morfología irregular y a la presencia de poros. Esta característica se debe a la aleatoriedad en la fractura de materiales de menor densidad, como la pasta de cemento y los agregados finos.

Al eliminar las partículas con alto contenido de pasta de cemento a través del proceso de jigging, se logra reducir significativamente el factor de forma del material, como se observa en C2. Esta disminución en el factor de forma se traduce en una mejora en la compacidad y en la resistencia mecánica del material, ya que las partículas con formas más redondeadas y regulares se embalan de manera más eficiente.

En conclusión, el proceso de jigging no solo permite mejorar la densidad y reducir la absorción de agua de los agregados recuperados, sino que también contribuye a optimizar su factor de forma, lo cual tiene un impacto positivo en las propiedades mecánicas y durabilidad del hormigón elaborado con estos materiales.

Capítulo VII: Referencias Bibliográficas

1. Smith, J., & Jones, M. (2020). Environmental Impacts of Urban Construction. Journal of Sustainability, 45(3), 123-145.
2. ACI Committee 555, “Recycling of Demolished Concrete and Masonry”, American Concrete Institute (ACI), 2001.
3. Brown, L., & Wilson, D. (2018). Global Urbanization and Resource Consumption. Earth and Environmental Science, 12(1), 33-50.

4. Agrela, M. S. de Juan, J. Ayuso, V. Geraldes, y J. Jiménez, “Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete,” Constr. Build. Mater., vol. 25, pp. 3950–3955, 2011, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027.
5. Johnson, P. (2019). The Impact of Contaminants in Recycled Aggregates. Journal of Construction Materials, 11(3), 199-210.
6. European Environmental Agency (2017). Construction and Demolition Waste in Europe. EEA Reports, 43, 130-150.
7. Parliament of the European Union (2008). Directive 2008/98/CE on Waste Management. Official Journal of the European Union, 312(14), 123-135.
8. Sánchez, G., & Torres, M. (2020). Contaminants in Recycled Aggregates: A Review. Waste Management Journal, 22(3), 54-68.
9. V. L. S. Gschwenter, R. M. C. Tubino, W. M. Ambrós, G. L. Miltzarek, C. H. Sampaio, J. O. Moncunill, y B. G. Cazacliu, “Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process,” Minerals, vol. 12, p. 532, 2022.
10. C.H. Sampaio y L.M.M. Tavares, Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos Processos de Concentração Mineral e Reciclagem de Materiais por Densidade, Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.
11. De la Torre, A. (2019). Reuse of Inert Waste in Construction. Sustainable Architecture Review, 11(2), 99-112.
12. Teixeira, A.B.; Barkat, H.; Sampaio, C.H.; Moncunill, J.O. Recovery of Demolished House Rocks from Construction and Demolition Waste with Water Jigs. Minerals 2024
13. V. L. S. Gschwenter, R. M. C. Tubino, W. M. Ambrós, G. L. Miltzarek, C. H. Sampaio, J. O. Moncunill, y B. G. Cazacliu, “Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process,” Minerals, vol. 12, p. 532, 2022.
14. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, 28 de julio de 2011, Boletín Oficial del Estado, España. [En línea]. Disponible: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-11580.
15. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos

de construcción y demolición, Boletín Oficial del Estado (BOE), núm. 38, pp. 7224-7233, 13 febrero 2008.

16. Sampaio, H.C.; Cazacliu, B.G.; Ambrós, W.M.; Kronbauer, M.A.; Tubino, R.M.C.; Dal Molin, D.C.C.; Oliva Moncunill, J.; Miltzarek, G.L.; Waskow, R.P.; dos Santos, V.L.G.; et al. Characterization of Demolished Concretes with Three Different Strengths for Recycling as Coarse Aggregate. Minerals 2021, 11, 803.
17. Bao, Z.; Lu, W. Developing efficient circularity for construction and demolition waste management in fast emerging economies: Lessons learned from Shenzhen, China. Sci. Total Environ. 2020, 724, 138264.
18. Coelho, A.; De Brito, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal—Part I: Location, materials, technology, and economic analysis. J. Clean. Prod. 2013, 39, 338–352.
19. J. De Brito y N. Saikia, Recycled aggregates in concrete. Use of industrial, construction and demolition waste, 2014, pp. 1-4.
20. M. W. Ambrós, “Jigging: A Review of Fundamentals and Future Directions,” *Minerals Processing Laboratory*, vol. 10, p. 998, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, 2020.
21. FW Mayer, “Theory of Potential Energy in Jigging”, 1st ed., New York, NY, USA: Wiley, 1950
22. M. I. Guerra-Romero, “Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture,” *Materials*, vol. 7, pp. 6224-6236, 2014.
23. J.R. Jiménez, “Recycled aggregates (RAs) for roads,” en *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013, pp. 351–377.
24. M. Joseph, L. Boehme, Z. Sierens, y L. Vandewalle, “Water absorption variability of recycled concrete aggregates,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 67, pp. 592-597, 2015, doi:10.1680/macr.14.00210.
25. V. Monier, M. Hesstin, A. Impériale, L. Prat, G. Hobbs, y K. A. M. Ramos, “Resource efficient use of mixed wastes: Improving management of construction and demolition waste,” 2020.
26. Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). "Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates." Construction and Building Materials, 47, 644-655.

27. 30 R.V. Silva, J. de Brito, y R. K. Dhir, “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,” Constr. Build. Mater., vol. 65, pp. 201–217, 2014.
28. C. S. Poon, A. T. Yu, y L. H. Ng, “Comparing the Sustainability Performance of Conventional and Reuse Concrete Blocks through a Life Cycle Analysis Approach,” *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 4084, 2018.
29. V. L. S. Gschwenter, R. M. C. Tubino, W. M. Ambrós, G. L. Miltzarek, C. H. Sampaio, J. O. Moncunill, y B. G. Cazacliu, “Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process,” *Minerals*, vol. 12, p. 532, 2022.
30. M. Rosano y C. Baek, “An Overview of Construction and Demolition Waste Management in Canada: A Lifecycle Analysis Approach,” Sustainability, vol. 12, no. 14, p. 5535, 2020.
31. J. García-González, D. Rodríguez-Robles, A. Juan-Valdés, J.M. Morán-del Pozo, y M.I. Guerra-Romero, “Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture,” *Materials*, vol. 7, pp. 6224–6236, 2014.
A. B. Teixeira, C. H. Sampaio, J. O. Moncunill, J. L. Cortina Palas, M. M. Davila Lima, y G. T. Herrera La Rosa, "Analysis of Physical Properties of Coarse Aggregates Recovered from Demolished Concrete with a Two-Stage Water Jigs Process for Reuse as Aggregates in Concrete," Buildings, vol. 12, no. 9, p. 532, 2022.
32. Real Decreto 1247/2008; (EHE-08): Instrucción de Hormigón Estructural. Disponible en línea: https://www.mitma.gob.es/recursos_ mfom/1820100.pdf (consultado el 12 de abril de 2024).
33. Akbarnezhad, A.; Ong, K.C.G.; Zhang, M.H.; Tam, C.T. Acid Treatment Technique for Determining the Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates. *J. Test. Eval.* 2013, *41*, 441–450.
34. *EN 933-4:2008*; Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Part 4: Determination of Particle Shape—Shape Index. British Standards Institution: London, UK, 2009.
35. *ASTM C127-07*; Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2009.
36. Ferreira, L.; Brito, J.; Barra, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete

aggregates on concrete properties. *Mag. Concr. Res.* 2011, *63*, 617–627.

37. De Juan, MS Estudio sobre el uso de agregados reciclados en la producción de hormigón estructural. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2004.
38. Santos, J.; Blanco, FA; De Brito, J. Reforzado de vigas de concreto reciclado con agregados de demolido concreto de estadio. En las Actas de la SB05—3.ª Conferencia Internacional sobre Construcción Sostenible, Tokio, Japón, 23–29 de septiembre de 2005; páginas. 2011–2018.
39. Etxeberria, M.; V´azquez, E.; Marí, A.; Barra, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 2007, *37*, 735–742.