

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DIGITALIZACIÓN DE LA DEMOLICIÓN SELECTIVA PARA MAXIMIZAR LA CIRCULARIDAD DE LOS MATERIALES

Estudiante	<i>Padrones, Ligeró, Julen</i>
Director	<i>San José, Lombera, José Tomás</i>
Departamento	<i>Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales</i>
Curso académico	<i>2021/2022</i>

Bilbao, 24 de febrero del 2022

Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimientos a:

Proyecto ICEBERG, acrónimo de Innovative Circular Economy Based solutions demonstrating the Efficient recovery of valuable material Resources from the Generation of representative End-of-Life building materials, Horizon 2020, GA 869336.

DIGIDEMO: Demostración de la digitalización del proceso de demolición (Proyectos de ecodiseño y demostración en economía circular y de eco innovación estratégica, 2020, Ihobe, Gobierno Vasco y Fondos FEDER)

MCI, AEI, EU and ERDF (PID2021-124203OB-I00, RTI2018-097079-BC31 y 10.13039/501100011033) y al grupo de investigación SAREN (IT1619-22, Gobierno Vasco)

Y en especial a:

José Tomás San José Lombera, director de este TFM.

David García Estévez y Verónica García Cortés, compañeros en Tecnalía.

Resumen

La demanda de generación de nuevos espacios hace que la demolición sea necesaria, es por lo que la generación de residuos de construcción y demolición es más que notable. Debido a la creciente y urgente concienciación mundial sobre el medio ambiente, se han de considerar prácticas eficientes en la gestión de estos residuos. La correcta dirección para lograr esto último es lograr la circularidad de los materiales desde el diseño hasta su nuevo destino como material reciclado. El primer paso para lo anterior, y del que trata en este proyecto, es la digitalización de la demolición selectiva para, entre otros, realizar un cálculo de Residuos de construcción y demolición que serán generados. Todo ello con el fin de maximizar la circularidad de los materiales involucrados.

En este proyecto se analizan las posibilidades de digitalización de edificios, desde la captura de la realidad, hasta la generación de la geometría, se analizan también las posibilidades de estimación o cálculo de residuos de demolición. Tras esto, se propone una solución para la digitalización y cálculo de residuos de construcción y demolición generados que se aplica en un caso de estudio real por primera vez. De esta manera, se comparan el cálculo realizado con un método de estimación de generación de residuos de construcción y demolición utilizado de forma habitual en trabajos de demolición en el País Vasco.

Palabras Clave: Demolición selectiva, circularidad, digitalización, RCD.

Laburpena

Espazio berriak sortzeko eskariaren ondorioz, beharrezkoa da eraistea; horregatik, eraikuntza eta eraispén-hondakinen sormena oso nabarmena da. Ingurumenarekiko mundu-mailako kontzientziazioa gorakorra eta premiazkoa denez, hondakin horien kudeaketan jarrera eraginkorragoak hartu behar dira. Azken hori lortzeko norabide egokia materialen zirkulartasuna lortzea da, diseinutik materialaren birziklapenararte. Aurrekoaren eta proiektu honetan aztertzen denaren lehen urratsa eraispén selektiboa digitalizatzea da, besteak beste, sortuko diren eraikuntza eta eraispén-hondakinen kalkulua egiteko. Hori guztia, materialen zirkulartasuna maximizatzeko.

Proiektu honetan eraikinak digitalizatzeko aukerak aztertzen dira, errealitatea atzematetik hasi eta geometria sortzeraino, eta eraispén-hondakinak zenbatesteko edo kalkulatzeko aukerak ere aztertzen dira. Horren ondoren, sortutako eraikuntza eta eraispén-hondakinak digitalizatzeko eta kalkulatzeko irtenbide bat proposatzen da, azterketa kasu erreal batean lehen aldiz aplikatzen dena. Horrela, egindako kalkulua Euskal Autonomia Erkidegoan eraispén-lanetan erabili ohi den eraikuntza eta eraispén hondakinen sorrera zenbatespen-metodoarekin alderatzen da.

Gako-hitzak: Eraispén selektiboa, zirkulartasuna, digitalizazioa, EEH.

Summary

The demand for the generation of new spaces makes demolition necessary, which is why the generation of construction and demolition waste is more than remarkable. Due to the growing and urgent global environmental awareness, efficient practices in the management of these wastes have to be considered. The right direction to achieve the last one is to achieve the circularity of the materials from the design to its new destination as recycled material. The first step for the above, and what this project is about, is the digitalization of selective demolition to, among others, calculate the construction and demolition waste that will be generated. All this in order to maximize the circularity of the materials involved.

In this project the possibilities of building digitalization are analysed, from the capture of reality to the generation of geometry, the possibilities of estimation or calculation of demolition waste are also analysed. After this, a solution for the digitization and calculation of generated construction and demolition waste is proposed and applied in a real case study for the first time. In this way, the calculation is compared with a method of estimation of CDW generation commonly used in demolition works in the Basque Country.

Keywords: Selective demolition, circularity, digitization, CDW.

Índice

1. MEMORIA.....	10
1.1. Introducción	10
1.1.1. Contexto	10
1.2. Objetivos y alcance del trabajo	10
1.3. Beneficios que aporta el trabajo	11
1.4. Estado del arte	11
1.4.1. Demolición y Circularidad	12
1.4.2. Demolición selectiva, deconstrucción.....	14
1.4.3. Técnicas de demolición selectiva	15
1.4.4. Demolición, aspectos legales	22
1.5. Análisis de alternativas.....	25
1.5.1. Digitalización: captura de realidad y geometría.	25
1.5.2. Creación del modelo.	28
1.5.3. Inventario y estimación de los RCD generados.....	29
1.6. Descripción de la solución propuesta.	31
1.6.1. Descripción del caso de estudio.....	32
1.6.2. Captura de realidad y geometría.....	32
1.6.3. Creación del modelo (BIM4DW).	34
1.6.4. Cuantificación de RCD.	36
2. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	39
2.1. Descripción de procedimientos.....	39
2.1.1. Captación de realidad.....	39
2.1.2. Revisión e identificación de elementos.....	40
2.1.3. Edición BBDD y modelado en BIM4DW	43
2.1.4. Técnicas de demolición seleccionadas en BIM4DW	45
2.2. Cálculos y análisis de resultados	46
2.2.1. Precisión del Scanner	46
2.2.2. BBDD edición y generación de elementos	48
2.2.3. Estimación de RCD mediante EEH Aurrezten.....	50
2.2.4. Cálculo de RCD mediante BIM4DW.....	52
2.2.5. Comparación EEH Aurrezten vs BIM4DW y análisis.....	53
3. CONCLUSIONES	60
4. BIBLIOGRAFÍA	62
5. ANEXO I	64
6. ANEXO II	65

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Materiales peligrosos comunes</i>	17
<i>Tabla 2: Tipología general de materiales en cerramientos y estructuras en función del tipo de obra</i>	21
<i>Tabla 3: Comparación de dimensiones reales vs obtenidas en estancias 1 y 2.</i>	48
<i>Tabla 4: Parámetros de cálculo para forjados. BBDD.</i>	49
<i>Tabla 5: Parámetros de cálculo para muros exteriores. BBDD.</i>	50
<i>Tabla 6: Datos generales de la obra.</i>	51
<i>Tabla 7: Resultados de la estimación de la cantidad de RCD realizada con la herramienta EEH Aurrezten.</i>	51
<i>Tabla 8: Cantidades de RCD obtenidos mediante el cálculo realizado en BIM4DW.</i>	52
<i>Tabla 9: Resultados de la estimación realizada mediante EEH Aurrezten y el cálculo realizado mediante BIM4DW.</i>	54
<i>Tabla 10: Resultados y diferencia porcentual agrupando áridos y metales.</i>	56
<i>Tabla 11: Resultados en % de cada fracción sobre su total.</i>	57

Índice de ilustraciones:

<i>Ilustración 1: Vertido de RCD.</i>	13
<i>Ilustración 2: Deconstrucción de las instalaciones del Parque de Atracciones de Artxanda, Bilbao.</i>	14
<i>Ilustración 3: Limpieza de elementos contaminados. Fresado de suelos.</i>	18
<i>Ilustración 4: Repicado de azulejos contaminados para evitar la contaminación de la fracción pétreo tras la demolición</i>	19
<i>Ilustración 5: Demolición selectiva de cerramientos y estructuras, segregación en origen.</i>	22
<i>Ilustración 6: Estudio de la estación Penn de Nueva York mediante LiDAR.</i>	26
<i>Ilustración 7: Fotogrametría, mapa generado a partir de fotografías desde múltiples posiciones con dron.</i>	27
<i>Ilustración 8: Comparación de imágenes a través de tiempo de vuelo y nube de puntos.</i>	28
<i>Ilustración 9: Segmentación.</i>	29
<i>Ilustración 10: Edificio de tipología semi-industrial utilizado como caso de estudio.</i>	32
<i>Ilustración 11: Mapeador portátil 2D FARO Scanplan.</i>	33
<i>Ilustración 12: Herramienta web BIM4DW, pestaña inicial: información del proyecto.</i>	34
<i>Ilustración 13: Sección de modelado en BIM4DW tras adjuntar los planos DXF y PNG obtenidos del escaneo.</i>	35
<i>Ilustración 14: Sección de modelado en BIM4DW. Bloques numerados de izquierda a derecha: Bloque 1: Menú vertical de pestañas (De arriba abajo: Información, dibujar, resumen de inventario, grupos corrientes, tratamientos y resultados). Bloque 2: Árbol de las diferentes plantas y elementos añadidos a cada una de ellas. Bloque 3: Modelado. Bloque 4: Menú de clasificación de los elementos.</i>	35
<i>Ilustración 15: BIM4DW pestaña: resumen del inventario.</i>	36
<i>Ilustración 16: BIM4DW pestaña: grupos.</i>	37
<i>Ilustración 17: BIM4DW pestaña: corrientes. De izquierda a derecha: Primero, grupos definidos. Segundo, proceso mediante el cual el grupo seleccionado será retirado, además de maquinaria, operarios, tiempos... Tercero confección de corrientes de residuos.</i>	37
<i>Ilustración 18: Orientaciones correcta e incorrecta de planos obtenidos a través del escaneo.</i>	39
<i>Ilustración 19: Cata realizada para la comprobación del espesor del forjado de la planta baja. Se obtiene que este es de 400mm.</i>	40
<i>Ilustración 20: Comprobación de la composición de los forjados. Bovedillas cerámicas dispuestas sobre semi-viguetas prefabricadas.</i>	41
<i>Ilustración 21: Boceto del forjado de las plantas 1, 2 y 3.</i>	42
<i>Ilustración 22: Boceto de los muros exteriores.</i>	43
<i>Ilustración 23: Modelado completo de la Planta 1 del edificio del caso de estudio.</i>	44
<i>Ilustración 24: Imagen obtenida del escaneo de la estancia a modo de isla rodeada por pasillo. El trazo continuo gris marca el pasillo.</i>	47

Ilustración 25: Imagen obtenida del escaneo de la estancia de dimensiones aproximadas 40 m x 8 m. ... 47

Ilustración 26: Captura del resumen de inventario del caso de estudio. 52

Ilustración 27: Estimación mediante EEH Aurrezten. Datos presentados en porcentaje sobre el total de la estimación. 58

Ilustración 28: Cálculo mediante BIM4DW. Datos presentados en porcentaje sobre el total de la estimación. 58

Ilustración 29: Planta baja de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo. 65

Ilustración 30: Primera planta de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo. ... 65

Ilustración 31: Segunda planta de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo. . 66

Ilustración 32: Tercera planta de la edificación. Área de 18 m². Plano obtenido a partir del escaneo..... 66

Acrónimos

<i>Acrónimo</i>	<i>Descripción</i>
<i>RCD</i>	<i>Residuos de Construcción y Demolición</i>
<i>LER</i>	<i>Lista Europea de Residuos</i>
<i>PCB</i>	<i>Policlorobifenilos</i>
<i>PCT</i>	<i>Policloroterfenilos</i>
<i>RAEE</i>	<i>Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos</i>
<i>EPS</i>	<i>Expanded Polystyrene</i>
<i>XPS</i>	<i>Extruded Polystyrene</i>
<i>PU</i>	<i>Poliuretano</i>
<i>EPI</i>	<i>Equipo de Protección Individual</i>
<i>EGR</i>	<i>Estudio de Gestión de Residuos</i>
<i>PGR</i>	<i>Plan de Gestión de Residuos</i>
<i>IFG</i>	<i>Informe Final de Gestión de Residuos</i>
<i>BIM</i>	<i>Building Information Modeling</i>
<i>BIM4DW</i>	<i>Building Information Modeling for Demolitions Wastes</i>
<i>LiDAR</i>	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
<i>IA</i>	<i>Inteligencia Artificial</i>
<i>DXF</i>	<i>Drawing Exchange Format</i>
<i>PDF</i>	<i>Portable Document Format</i>
<i>PNG</i>	<i>Portable Network Graphics</i>
<i>CAPV</i>	<i>Comunidad Autónoma del País Vasco</i>
<i>UTM</i>	<i>Universal Transversal de Mercator</i>
<i>CTE</i>	<i>Código Técnico de Edificación</i>

1. MEMORIA

1.1. Introducción

En la actualidad el constante crecimiento de la población mundial genera una demanda de espacio mayoritariamente en ciudades. Es por esto por lo que la generación de nuevos espacios para facilitar el crecimiento se hace necesaria. Ocupar nuevamente espacios pertenecientes a edificaciones antiguas beneficia también a la seguridad y eficiencia energética de las edificaciones. Esto último se traduce en reducción de gases de efecto invernadero, objetivo más que perseguido a nivel mundial.

Las anteriores son algunas de las razones que hacen necesarias la demolición de construcciones. Por lo tanto, de la misma forma, se pretende disminuir al máximo los impactos ambientales que estas generen. Para ello, se hace imprescindible aunar esfuerzos para mitigarlos. La dirección adecuada es la circularidad de los materiales desde el diseño hasta su reciclado para convertirse en un nuevo material. Para adoptar la estrategia de economía circular de la Unión Europea, el sector de la construcción se encuentra en la obligación de mejorar las prácticas de gestión de residuos. En este mismo rumbo se presenta la opción de demoler selectivamente con ayuda de la tecnología (digitalización) para culminar, en la medida de lo posible, la circularidad de los materiales.

Son diversas las opciones que existen para lo anterior, pero, todas ellas, coinciden en que una adecuada estimación de los residuos que serán generados es una buena forma de comenzar. Esto ayuda a una correcta gestión circular de los Residuos, que, tras adecuados tratamientos, dejarán de serlo para convertirse de nuevo en materiales.

1.1.1. Contexto

El trabajo se ha desarrollado en un contexto de Innovación e investigación de ámbito europeo. Concretamente ha crecido de la mano de proyectos a nivel de la Comisión Europea como los proyectos ICEBERG y Digidemo.

Digidemo es un proyecto que cuenta con el apoyo de la sociedad pública Ihobe del departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, ha sido seleccionado en la convocatoria 2020 del “Programa Eco innovación en Economía Circular”. Concretamente, este se centra en la Digitalización de la cuantificación de materiales del fin de vida de un edificio para una Gestión Óptima de Residuos de Demolición [1].

El proyecto ICEBERG, de manera similar, trata de proponer soluciones innovadoras basadas en la economía circular en el sector de la construcción. Proyecto que procura instaurar tecnologías y herramientas que aporten innovación para empujar al sector de la construcción a la adopción de la economía circular. Se crearán soluciones tales como: una herramienta de demolición inteligente respaldada por el modelado de información de construcción, un sistema de identificación por radiofrecuencia basado en la respuesta rápida y una plataforma digital de trazabilidad de los materiales de construcción que han llegado al final de su vida útil. También desarrollará tecnologías novedosas con el fin de producir materias primas secundarias de gran pureza a través de seis estudios de casos de circularidad en toda Europa. Estas tecnologías y herramientas impulsarán la confianza del mercado y la aceptación de los materiales de construcción que han llegado al final de su vida útil, ayudando así a cerrar el círculo [2].

1.2. Objetivos y alcance del trabajo

El primero de los objetivos consiste en el análisis de las diferentes soluciones de herramientas digitales para el escaneo en el ámbito de la minería urbana. Se pretenden analizar tres ámbitos:

1) las opciones de digitalización para la captura de realidad y geometría; 2) las posibilidades para la creación de un modelo digital de la edificación a demoler; 3) las distintas opciones para el inventario y cuantificación de RCD generados en dicha demolición.

Mediante el presente trabajo se aborda también comprobar la eficacia y utilidad de la digitalización de la demolición selectiva, a la hora de estimar la cantidad de residuos que se van a generar en un trabajo de demolición. Para ello, se empleará un caso real de demolición selectiva en el que se aplicará la solución propuesta en este trabajo.

En referencia al caso real, se realizarán un cálculo y una estimación de la cantidad de RCD que serán generados. El cálculo se realizará mediante la aplicación BIM4DW (herramienta de demolición inteligente diseñada para el proyecto ICEBERG). Y la estimación mediante el uso de la herramienta *EEH Aurrezten*, herramienta de apoyo al Decreto 112/2012 [3] de residuos de construcción y demolición. Enfrentando el cálculo y la estimación mencionadas, se obtendrán las conclusiones pertinentes acerca de las cantidades estimadas y las obtenidas mediante la aplicación de demolición inteligente. De esta forma, se pretende valorar la efectividad de la estimación de RCD realizada mediante la herramienta BIM4DW.

Dicha herramienta no solo cuenta con la capacidad de realizar la cuantificación de RCD que se prevé obtener, sino que BIM4DW será capaz de cuantificar los impactos ambientales, energéticos y económicos derivados del proceso de demolición diseñado. Para ello cuenta con la opción de contabilizar horas de trabajo de maquinaria y operarios, organizar la retirada de los residuos generados, contemplando el impacto derivado del transporte y posterior tratamiento. Todo ello con el objetivo de convertirse en una herramienta de mejora de la toma de decisiones a la hora de llevar a cabo una demolición. Se hace mención a estas funcionalidades de la aplicación para tomar perspectiva de la dimensión en la que se ubica el trabajo, pero estas últimas quedan fuera del alcance de este Trabajo de Fin de Máster.

1.3. Beneficios que aporta el trabajo

El trabajo presenta una base teórica resumida sobre deconstrucción o demolición selectiva que, junto con el análisis teórico de las opciones y tecnologías existentes para la digitalización selectiva, servirán de guía para futuros trabajos.

En referencia a los objetivos, se puede decir que uno de los mayores beneficios que aporta el trabajo es la aplicación del cálculo de generación de RCD en un caso real y su comparación con la estimada mediante la herramienta *EEH Aurrezten*. Pues, mediante esta comparación, se pretende comprobar la eficacia de la digitalización de la demolición selectiva, desde la digitalización del edificio hasta el cálculo de RCD producidos en su demolición. Independientemente de los resultados que se obtengan, el solo hecho de aplicar y estudiar por primera vez este (relativamente) novedoso método de digitalización para el sector de la demolición, seguramente arroje conocimientos e información valiosa que claramente son beneficios.

Cabe resaltar que, de la mano de proyectos como ICEBERG o Digidemo, aporta a estos su grano de arena en la dirección tan importante de la circularidad de los materiales desde el diseño hasta su reciclado para convertirse en un nuevo material.

1.4. Estado del arte

Para comenzar a analizar el contexto, es imprescindible entender las razones y/o necesidades que llevan a la decisión de demoler un edificio, construcción o infraestructura. Generalmente

estas razones son la prevención de riesgos y la generación de nuevos espacios que faciliten el crecimiento urbano, entre otras.

Con el paso del tiempo y la acción climática (inclemencias, etc.) una estructura es propensa a dañarse pudiendo llegar a suponer un peligro para la seguridad pública (riesgo de colapso, etc.). Llegado a cierto punto, los costes para su renovación pueden ser excesivos y la opción más viable sea la demolición.

Cabe destacar que la inestabilidad de la estructura no es el único motivo de seguridad por el que demoler una construcción, puede haber características peligrosas que, sin afectar la estructura, hagan que la mejor decisión sea derribarla. Entre estas características están las que hacen que la infraestructura, debido a su antigüedad, no cumpla con la normativa vigente de seguridad y salud. Esta normativa trata de evitar circunstancias de riesgo como incendios o la existencia de cañerías de plomo, fibras de asbestos, entre otras. Una vez que una edificación se declara peligrosa, la demolición pasa a ser la solución adecuada, frente a la renovación/rehabilitación [4].

Como se ha mencionado anteriormente, la generación de nuevos espacios es otra razón de peso que hace necesaria la demolición. En un contexto de crecimiento continuado de la población urbana, se espera que esta ascienda al 68% de la población total mundial para 2050 [5]. Dicho de otro modo, este proceso de renovación urbana (ya en marcha) requiere de la demolición de edificios para así proporcionar espacio a otros [6].

En definitiva, pueden darse ciertas circunstancias que hagan que la demolición se haga necesaria. Todo esto hace que los RCD sean el principal flujo de la generación de residuos en la sociedad moderna. La cantidad de RCD crece junto con la actual urbanización mundial. China, Estados Unidos y la Unión Europea son las tres mayores economías y los tres principales generadores de RCD [7]. En 2014, las actividades de construcción y demolición generaron más de 850 millones de toneladas de residuos en la Unión Europea. El sector de la construcción en la UE es el mayor productor de residuos en comparación con otros sectores económicos, representando el 35% de la generación total de residuos. Esto equivale a entre dos y cuatro veces el total de residuos domésticos producidos en Estados Unidos y Europa, respectivamente [8]. Esta situación es la que genera la reacción de gobiernos e instituciones en dirección a la gestión de RCD basada en la economía circular.

1.4.1. Demolición y Circularidad

Puede decirse que la interpretación de la economía circular, y por lo tanto su fundamento principal, está basada en la jerarquía de gestión de residuos 3R (la regla de las 3 erres: Reducir, Reutilizar y Reciclar). De manera idéntica, la jerarquía de gestión de RCD también está basada en la filosofía 3R, de modo que se considera estrategia ampliamente aceptable y aplicable para la gestión de RCD [9]. Pero, no solo eso, sino que ha sido reconocida como la forma más eficaz de gestionar los RCD [10].



Ilustración 1: Vertido de RCD [11].

Para conocer de qué manera es posible lo afirmado anteriormente, a continuación, se describe como cada una de las 3R contribuye a la efectiva gestión de RCD, así como los principales retos que puede suponer cada una de ellas.

1.4.1.1. Reducir

Siendo *la primera R*, se considera la prioritaria en el desarrollo de planes de gestión de RCD [10]. En este caso, hablando de la demolición, la forma de reducir la generación de RCD es evitar la propia demolición. Es por lo que se ha de valorar siempre la rehabilitación frente a la deconstrucción. Como se ha argumentado al inicio de este apartado, lo dicho no siempre es factible por lo que *Reducir* compete más a los residuos de construcción que a los de demolición (ajeno a los alcances del presente TFM).

Los retos o inconvenientes que se dan son: la falta de normas de diseño de edificaciones y una planificación urbana inadecuada [10]. Ambas cuestiones puedan ayudar a evitar o retrasar la demolición de una edificación para así reducir la generación de RCD.

1.4.1.2. Reutilizar

Esta segunda *R* se refiere a la práctica de utilizar los materiales más de una vez, tanto en su propósito original o cumpliendo otra función [10]. Varios tipos de materiales y productos de construcción pueden recuperarse de las obras de construcción, renovación y demolición, para luego venderse, almacenarse para su uso posterior, o incluso reutilizarse en otros proyectos (exceptuando, claro está, los residuos peligrosos). La manera más eficaz de promover la reutilización de RCD es emplear trabajadores cualificados para recoger y clasificar los RCD, incentivar de manera legal la reutilización de RCD, estandarizar diseños, materiales y tecnología de construcción, y, por último, desarrollar un mercado para el material reutilizado. Precisamente, el escaso desarrollo del mercado de RCD reutilizados, así como la falta de normas que faciliten la reintegración de RCD en la cadena de valor, son los principales obstáculos en pro de la reutilización [10].

1.4.1.3. Reciclar

La tercera *R* hace referencia a la transformación de los materiales para que puedan volver a ser utilizados. Varios materiales procedentes de las obras de demolición pueden reciclarse como el hormigón, metales, asfalto, madera, tejas, placas de yeso y cartón, entre otros. Su reciclaje supone un beneficio a la hora de mitigar las emisiones de efecto invernadero, pues se reduce la demanda de materias primas no renovables. Reduce también los vertidos, sus impactos ambientales y costes asociados [7]. Además, el reciclaje fomenta la creación de puestos de trabajo (algunos especializados) y la actividad económica (mayormente local). Existe gran mercado de materiales de construcción reciclados, se utilizan en carreteras, cimientos, terrenos deportivos y muros de protección acústica, entre otros [12].

Por el contrario, la dificultad del desarrollo de tecnologías de reciclaje y de productos reciclados a partir de RCD complican el propio reciclado [10]. Es imprescindible que los RCD reciclables tengan salida al mercado en forma de producto.

1.4.2. Demolición selectiva, deconstrucción

Hablar de circularidad de RCD, supone referirse a deconstrucción o demolición selectiva, que no es otra cosa que: el conjunto de operaciones secuenciales cuidadosamente planificadas y coordinadas, dirigidas a separar y clasificar los materiales de un edificio. Esta solución contribuye a aumentar considerablemente el aprovechamiento de materiales y productos (potenciando su reutilización), así como la disminución de las fracciones destinadas a vertedero.

El Objetivo principal de la demolición selectiva es mejorar la clasificación en origen para asegurar un alto nivel de pureza de los materiales que se vayan a someter a procesos de reciclaje. De esta manera se consigue incrementar la demanda del mercado sobre estos productos reciclados. Así, de forma indirecta, se logra incrementar la circularidad de productos y recursos.



Ilustración 2: Deconstrucción de las instalaciones del Parque de Atracciones de Artxanda, Bilbao [13].

Como en todos los ámbitos, la demolición selectiva presenta también sus ventajas y desventajas. Referente a lo positivo cabe destacar la consecución de fracciones residuales de mayor pureza y calidad. Esto se traduce en un aumento del valor de los materiales y productos reciclados, así como en la disminución de la cantidad de residuos que acaban en vertedero y, por ende, en un menor impacto ambiental. Como ventaja también se encuentra la mejora en la gestión de

residuos peligrosos, es evidente que la deconstrucción facilita su localización y recogida. Esto deriva en una mejora en la prevención de riesgos a la hora de su manejo y tratamiento, al igual que la disminución del daño e impacto visual de las áreas afectadas por los vertidos. Para terminar con las ventajas, es destacable la generación de empleo que produce la demolición selectiva, además de la importante disminución de costes de gestión, tratamiento y vertido de los residuos obtenidos. Con todo ello, es fácil concluir que la segregación en origen, mediante la deconstrucción y las acciones *in situ* adecuadas, fomenta la posibilidad de que más del 90 % de los recursos que se hallan en las fracciones de residuos contribuyan a la circularidad.

Respecto a las desventajas, no es posible obviar el incremento del coste y tiempo que suponen las tareas de deconstrucción, aunque *a posteriori* se compense con la reducción de costes de tratamiento y la mayor calidad de los materiales recuperados (visión a ciclo de vida completo). El hecho de contar con más recursos personales hace que también aumenten los riesgos laborales. A todo lo aquí indicado mencionar el obstáculo de cómo los códigos de edificación, y la normativa sobre los materiales de construcción, no suelen ser de gran ayuda a la hora de introducir materiales reutilizados o reciclados [14].

1.4.3. Técnicas de demolición selectiva

Continuando con lo expuesto en el epígrafe anterior, en el presente, se van a detallar las etapas generales de los procesos para la deconstrucción y demolición selectiva, respectivamente.

Primero de todo, aunque evidente, cabe recalcar que, para realizar una demolición selectiva de manera exitosa, resulta indispensable llevar a cabo una planificación adecuada de las actividades de demolición. Pero, no solo eso, también se hace imperativo realizarla cumpliendo la separación en origen de los materiales. Mantenerlos separados desde el inicio dependerá de los recursos espaciales y personales de los que se disponga en la obra, así como de los costes o ingresos que se puedan producir de su separación o no. Esto es, una menor separación generará mayores costes de gestión de residuos, por ser residuos mezclados. Por el contrario, una mayor separación, además de disminuir los costes de gestión, mejorará la efectividad del reciclaje que, a su vez, se traducirá en una mayor calidad de los materiales que se obtengan.

Una buena planificación se deberá hacer considerando la tipología de la edificación (Residencial, Industrial, terciario y Obra Civil), el material de la estructura (hormigón, metálica, mixta, etc.) y la casuística de la edificación (antigüedad...).

Teniendo en cuenta lo anterior, el proceso de demolición selectiva puede desglosarse en las siguientes etapas (detalladas a continuación): trabajos previos, detección y gestión de residuos peligrosos, retirada y desmontaje de elementos que no formen parte de la estructura del edificio, desmantelamiento de las instalaciones (redes de calefacción, fontanería, electricidad, etc.), desmantelamiento de los elementos exteriores, falsos techos y revestimientos recuperables, desmantelamiento de los techos, cubiertas y divisiones interiores, demolición selectiva de cerramientos y estructuras. A continuación, en más detalle.

1.4.3.1. Trabajos previos:

La realización de trabajos anteriores a la demolición selectiva, tiene como objetivo principal consolidar la seguridad de los trabajadores y viandantes. Además, estas tareas están enfocadas también a la conservación del medio ambiente, así como a la circularidad de los materiales.

Las tareas esenciales que pueden componer los trabajos previos son cinco. Primeramente, la desconexión y retirada de las instalaciones (eléctricas, telefónicas, gas, etc.) y vaciado de depósitos de combustible. Segundo, apeo y apuntalamiento de forjados. Tercero, desinfección

de edificios singulares (si fuese pertinente). Cuarto, Instalación de medidas de protección colectivas. Quinto, finalmente, instalación de medios de evacuación de elementos y materiales.

1.4.3.2. Detección y gestión de residuos peligrosos:

Este es uno de los puntos clave en la demolición selectiva ya que la detección de amianto (fibras de asbestos), amén de otros residuos peligrosos, es obligatoria por ley. Es imprescindible completar los informes de identificación de residuos peligrosos.

Como se ha mencionado con anterioridad, la correcta planificación es esencial y es en el caso de la detección de los residuos peligrosos cuando esto más queda evidenciado. Generalmente se sigue un proceso que consta de las siguientes etapas:

- Investigación: búsqueda de materiales o elementos que puedan contener residuos peligrosos.
- Identificación: Toma de muestras y análisis de los residuos.
- Cuantificación: Redacción de informe cuantificando los residuos, su ubicación, tipología (código LER) y estado.
- Inventario: Incluyendo medidas preventivas para la salud y el medio ambiente.
- Plan de trabajo de la descontaminación.
- Tratamiento de residuos.

Se deben elaborar también procedimientos específicos de seguridad y medio ambiente que aseguren que todos los imprevistos están cubiertos.

A continuación, se muestra la Tabla 1, tabla resumen con los materiales peligrosos comunes que se pueden encontrar en edificaciones y en qué elementos constructivos pueden encontrarse:

Tipología de material peligroso	Elemento constructivo	
Suelo contaminado, ver Ilustración 3.	Cimentación	
Amianto en protección de estructuras metálicas (flocado).	Estructura	
Elementos estructurales de madera tratados con conservantes tóxicos.		
Aislamientos con sustancias potencialmente peligrosas.	Cerramientos	
Láminas de impermeabilización.	Cubierta	
Placas de fibrocemento.		
Tuberías y bajantes de fibrocemento o plomo.	Instalaciones	
Depósitos de fibrocemento.		
Amianto en calorifugado de tuberías.		
Policlorobifenilos (PCB) o policloroterfenilos (PCT) en transformadores eléctricos.		
Tubos fluorescentes y lámparas de vapor de mercurio.		
Detectores iónicos de humo susceptibles de generar radiaciones superiores a las admitidas.		
Pararrayos radiactivos.		
Espumógeno (En grandes instalaciones de protección contra incendios).		
Envases de diversos productos químicos.		
RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos).		
Depósitos o calderas de gasoil.		
Amianto en placas de falsos techos.		Acabados
Amianto en pavimentos vinílicos.		
Alquitranes		
Plomo en pinturas de revestimientos		

Tabla 1: Materiales peligrosos comunes [14].

Concretando sobre la gestión de residuos peligrosos, la legislación indica el tiempo máximo de su acopio en obra, así como la necesidad de notificación previa al traslado. Es imprescindible también utilizar los contenedores específicos para cada tipo, ya sea a la hora de su almacenamiento o transporte.

Respecto a las obligaciones de los productores de ellos se dan las siguientes cinco. Primera, la obligación de no mezclarlos. Segunda, envasarlos y etiquetarlos adecuadamente. Tercera, entregar a la autoridad competente (Comunidad autónoma) su registro. Cuarta, proporcionar toda la información necesaria, a las empresas autorizadas, para su adecuado tratamiento y gestión. Y última, informar a la administración de cualquier incidencia o anomalía.



Ilustración 3: Limpieza de elementos contaminados. Fresado de suelos [14].

1.4.3.3. Retirada y desmontaje de elementos que no formen parte de la estructura del edificio:

El objetivo principal de esta etapa es evacuar todos los elementos (recuperables y no) existentes en la obra, asegurando la mayor calidad posible. Independientemente de que los materiales o elementos sean reutilizables o no, se requiere su retirada de forma selectiva y segregada, al objeto de evitar la mezcla con otros materiales que vayan a ser reciclados, y su consiguiente contaminación.

Los elementos que se contemplan en esta fase son los equipos industriales, muebles, enseres, etc. De forma general, los elementos que no alteren las características resistentes de la estructura, elementos de acabado y decoración, coberturas de suelos, paredes o techos (plásticas o textiles), embellecedores y perfiles (plástico, metal o madera), elementos de carpintería (metal o madera), espejos, ventanas y puertas (vidrio).

Las pautas habituales durante esta etapa son; primero de todo, la retirada de los elementos que van a ser reutilizados, asegurando que se mantengan intactos. En segundo término, la retirada de los elementos que no van a ser reutilizados. Para facilitar el manejo de estos últimos se puede contemplar la reducción de su tamaño que, a su vez, se traduce en una mayor eficiencia en el transporte y, por lo tanto, en menor impacto ambiental. Cabe recalcar de nuevo cómo la segregación de los residuos en función de su tipología es esencial.

1.4.3.4. Desmantelamiento de las instalaciones:

Esta fase consiste en la retirada de todos los elementos relacionados con los suministros de servicios (instalaciones eléctricas, telecomunicaciones, conducciones de agua y gas, etc.). Comúnmente estos elementos los componen las conducciones de fluidos, cables, grifería o elementos de fontanería que estén a la vista. Así como los elementos empotrados que no condicionen la funcionalidad de la edificación. Este es el momento también de valorar el desmontaje de sanitarios, mobiliario de cocina... para mayor aprovechamiento de los materiales.

Ocasionalmente en esta ejecución no siempre es necesario retirar todos los elementos, pues existe maquinaria que facilita este trabajo a la hora de la demolición.

1.4.3.5. Desmontaje y gestión de revestimientos y cerramientos:

Al igual que en etapas previas, los objetivos principales de la presente son la retirada de los materiales o elementos que puedan ser reutilizados o reciclados, así como la minimización de la contaminación del residuo generado durante la demolición de la estructura.

Los procesos habituales que se contemplan en esta etapa son tres. Desmontaje del alicatado cerámico para la recuperación de azulejos de manera individual. Desmontaje de chapados de piedra, repicado de bovedillas y de mortero de las juntas de paramentos de piedra. Desmontaje de falsos techos de yeso y derribo de artesonados.

Es necesario recalcar que no siempre es imperativo retirar todos y cada uno de los elementos, puede darse el caso en el que un elemento no pueda ser reutilizado ni reciclado de forma individual. En este caso, y si el hecho de demolerlo con el resto del conjunto de la estructura no afectara negativamente a la fracción pétreo obtenida de la demolición, lo más eficiente sería la demolición conjunta. Puede darse también el caso en el que no sea posible practicar el desmontaje, pero que sí sea necesaria la retirada para no contaminar la fracción pétreo última. Es en este último caso en el que se debe realizar un derribo, repicado o arrancado. En ocasiones se encuentran superficies contaminadas que se deben eliminar para no contaminar la fracción pétreo, ver Ilustración 4.



Ilustración 4: Repicado de azulejos contaminados para evitar la contaminación de la fracción pétreo tras la demolición [14].

Respecto a la segregación en origen, como en el resto de las etapas, en esta también es algo básico el hecho de que, cada tipología de material, deba ser seleccionado y clasificado en su contenedor correspondiente para el posterior envío a planta de reciclaje o vertedero.

Es esta fase se debe prestar especial atención a las siguientes corrientes de materiales. Primeramente, hormigón y materiales cerámicos, esta es la fracción más abundante en masa, por lo que es importante mantenerla sin contaminar para que sea reciclable. Están presentes en paredes, revestimientos y alicatados. En caso de que sea posible su reutilización (baldosas, azulejos...) se realiza un desmontaje manual para su recuperación y, si las condiciones de la obra

así lo permiten, se realiza un rascado superficial y la retirada de cerámicos o yeso. La forma más habitual de realizar estos trabajos es manual mediante andamios, plataformas y herramientas.

Adicionalmente, el yeso. En porcentaje supone una cantidad muy pequeña, pero es un gran contaminante de la fracción pétreo debido a los sulfatos, limitando su uso como áridos en hormigón. Se encuentra en prefabricados y en acabados de paredes y techos (placas laminadas, molduras, enlucidos, proyectados...). Las placas de yeso se desmontan y separan de los perfiles metálicos y los enlucidos y revestimientos se rascan.

De otra parte, los aislantes (EPS, XPS, PU, lanas minerales). También en pequeñas cantidades en masa, pero se hace muy difícil su separación, toda vez que estén mezclados con la fracción hormigón o cerámicos. Estos últimos se encuentran en cámaras de aire, trasdosados, falsos techos... lo que dificulta su identificación, y que en ocasiones hace necesario realizar catas en tabiquería para su localización. En cuanto al aspecto de seguridad a la hora de su manejo, se hace necesario el uso de EPI para evitar la inhalación de fibras y su contacto con la piel, ojos y mucosas.

Por último, respecto al desalojo de los residuos, es también una actividad crítica ya que se ve altamente condicionada por el entorno de la obra, sobre todo en zonas residenciales o trama urbana. El espacio disponible, la contaminación acústica y el polvo pueden limitar de forma severa la manera en la que se ha de realizar esta actividad.

1.4.3.6. Demolición selectiva de cerramientos y estructuras:

Repitiendo lo expresado en previamente, el objetivo principal en este caso es priorizar la segregación de materiales sin comprometer la seguridad laboral, amén de maximizar la recuperación de los materiales. La manera de ejecutar el trabajo será priorizando la utilización de maquinaria con el fin de ahorrar tiempos, riesgos y costes.

De manera resumida, en la Tabla 2 se muestra un esbozo de la tipología general de materiales en cerramientos y estructuras en función del tipo de obra.

Tipo de obra	Cerramiento	Cubierta	Elementos estructurales (pilares, vigas, forjados y escaleras)
Edificación residencial	Ladrillo cerámico con revoco y enfoscados de mortero. En ocasiones fachadas de sillería de pedra natural . A partir de 1980: materiales de naturaleza plástica, junto con el ladrillo cerámico.	Teja de naturaleza cerámica	Principios siglo XX: Madera Menos común: muros de carga de fábrica de ladrillo y piedra . A partir 1950: Hormigón armado en los diferentes elementos estructurales
Edificación industrial	Ladrillo cerámico con revoco de mortero. A partir de 1970: Bloque de hormigón prefabricado. Metal.	Hasta 1950: Teja de naturaleza cerámica A partir de 1970: placas de fibrocemento	Siglo XX: Estructura metálica y de hormigón armado . A partir de 1970: Elementos prefabricados de hormigón armado .

Tabla 2: Tipología general de materiales en cerramientos y estructuras en función del tipo de obra [14].

La primera actividad a realizar antes de proceder con la demolición consiste en una inspección para así comprobar que todas las fases previas se han ejecutado de manera correcta. Esta es la forma de garantizar que, a la hora de demoler, no quede nada en el interior de la edificación que pueda poner en riesgo la seguridad de los trabajadores, así como la calidad de las diferentes corrientes de materiales que se vayan a obtener tras la demolición.

Al proceder con la demolición selectiva, se pueden realizar diferentes tareas como abatimiento de estructuras, desmontajes, demolición, voladura... tratando siempre de priorizar la segregación en origen como se ha mencionado con anterioridad. Incluso, llegado este punto en el que solo resten cerramientos y estructura por demoler, la segregación es de vital importancia, ya que la fracción que queda por derruir supondrá la mayor parte en masa. Lo anterior se aprecia en la Ilustración 5, en la que se ve cómo se lleva a cabo la segregación en origen creando fracciones de estructura metálica (parte derecha de la imagen), estructura de hormigón o fracción pétreo (centro de la imagen) y armadura (parte izquierda de la imagen).



Ilustración 5: Demolición selectiva de cerramientos y estructuras, segregación en origen [14].

En las operaciones de demolición primaria, como en la que se muestra en la Ilustración 5, siempre hay oportunidad de realizar operaciones de segregación en origen, independientemente de la tipología de la estructura (hormigón, metálica o mixta). Tras la demolición, aún *in situ*, existen técnicas para depurar o mejorar la calidad de los materiales obtenidos, entre las que se encuentran la separación de armaduras o las plantas móviles de machaqueo de hormigón. En relación con las plantas móviles, son equipos que necesitan gran espacio, no por sí mismas sino por lo que conlleva a su alrededor (maquinaria de carga y descarga, materiales cargados y descargados...). Cuestión esta última que recuerda la importancia de la planificación y preparación del espacio suficiente.

Por último, pero no menos importante, la trazabilidad. Acerca de la gestión de la documentación, como se verá en el próximo subapartado, la legislación exige llevar un registro de la trazabilidad de los residuos. Este control es trascendental, sobre todo si permite conocer en tiempo real el estado de cada una de las corrientes generadas. No solo a nivel de residuo, sino también hasta la creación de nuevos productos a partir de materiales reciclados. De esta forma se consigue simplificar el control de calidad de los nuevos materiales. Últimamente se está trabajando en soluciones que aporten en este sentido.

1.4.4. Demolición, aspectos legales

En cuanto al enfoque legislativo resulta trascendental destacar 3 escenarios. El primero es el europeo desde el que se fijan los objetivos que se transfieren después a los siguientes niveles, los ámbitos estatal y local. En la escala europea se consideran los RCD como una corriente prioritaria de residuos debido al enorme volumen de generación y gran capacidad de valorización de los recursos que los componen. Los planes de circularidad y las directivas de gestión de RCD a nivel europeo se centran en cerrar el ciclo de RCD para así lograr un entorno

construido más sostenible. La Directiva 2008/851 [15] del Parlamento Europeo y del Consejo establece el marco jurídico para el tratamiento de los residuos en la UE.

En referencia ahora al ámbito estatal. Se regula la producción y gestión de los RCD a través del Real Decreto 105/2008 [16]. En él se definen los RCD, así como las figuras del productor, poseedor y gestor de estos residuos y sus obligaciones. A nivel local, se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de rellenos a través del Decreto 49/2009 [17] y la producción y gestión de RCD en el País Vasco mediante el Decreto 112/2012 [3]. De forma resumida, el contenido destacable de este último es el siguiente: Definición de las obligaciones de los productores (la creación de una fianza para controlar la correcta gestión de los RCD), de los poseedores y gestores, fracciones a separar en obra y, finalmente, el desarrollo de actividades de valorización.

Un asunto destacable es la restricción y prohibición de descarga en vertedero. La directiva relativa a este aspecto (Directiva 1999/31/CE [18]), mediante actualizaciones y modificaciones, expresa que únicamente son admitidas en vertedero fracciones de rechazo procedentes de plantas fijas de valorización autorizadas. Es por esto por lo que no se aceptarán residuos valorizables en vertedero. Actualmente en el País Vasco se consideran valorizables: metales, RCD, vidrio, madera, envases, papel-cartón, cartuchos de tóner y tinta. A medida que se vayan demostrando nuevos procedimientos que garanticen la valorización de otros residuos, esta medida se irá ampliando.

Cabe destacar también ciertas diferencias mediante las cuales la legislación autonómica va un paso por delante de la estatal. Por medio del Decreto 112/2012 [3] ya mencionado, un mayor número de corrientes son obligadas a la separación en origen y los umbrales establecidos son más estrictos. De manera similar, administrativamente hablando, se obliga también a la presentación del Informe Final de Gestión (IFG) de residuos, informe que posteriormente será verificado externamente. Este Decreto también ofrece el cálculo de las fianzas administrativas e impuestos que confirman la gestión adecuada, así como ratios de generación de RCD para facilitar los cálculos de estimaciones de generación de residuos. También indica la obligatoriedad de la autorización por parte de la administración para todas las operaciones de gestión. Por medio de la Orden del 12 de Enero de 2015 [19] se especifican de manera detallada los criterios de fin de vida de los RCD, esto es, los materiales valorizados pierden la condición de residuos y pasan a ser productos. Este paso es clave para la generación de mercado de dichos materiales.

1.4.4.1. RCD: pertenencia y competencia.

Los documentos anteriormente mencionados incluyen las definiciones de productor y poseedor. El productor o promotor de la obra es el responsable último de los residuos generados en esta. El productor puede ser una entidad o persona diferente en función de la procedencia del residuo. El poseedor es la persona física o jurídica que posea los RCD y que no sea gestor de ellos, generalmente la empresa encargada de ejecutar la demolición.

En cuanto a las obligaciones o competencias del productor de los RCD, es importante destacar que es tarea obligada del productor preparar el documento de Estudio de Gestión de Residuos (EGR), posteriormente se profundiza sobre el contenido de éste. Respecto a las obligaciones del poseedor de residuos se encuentran; primeramente, la responsabilidad de separarlos en fracciones. En segundo término, la de mantener los residuos en condiciones adecuadas de higiene y seguridad evitando la mezcla de fracciones que impidan su posterior valorización y, tercero, la responsabilidad de hacerse cargo de los costes de gestión y entrega de la

documentación acreditativa para la gestión de los RCD. Las obligaciones de la tercera figura (gestor de residuos) son el registro de la cantidad, tipo, método de gestión y destino de los residuos/productos resultantes, así como la identificación de las partes implicadas (productor y poseedor) y de la procedencia de los residuos.

1.4.4.2. *Permisos y licencias:*

En caso de derribo total o parcial de un edificio resulta necesaria la Licencia de Obra Mayor (LOM). Al finalizar la obra de demolición se precisan los siguientes certificados. El de final de obra que acredita su fin, redactado por los técnicos de la dirección facultativa. El certificado de gestión de residuos que garantiza su correcta gestión, emitido por los gestores. El Informe Final de Gestión (IFG) de residuos en el que se recoge toda la información relacionada con la gestión de los RCD en obra.

Se profundiza ahora sobre los diferentes certificados mencionados pues se hace necesario subrayar su importancia: Estudio de Gestión de Residuos (EGR), el Plan de Gestión de Residuos (PGR) y el Informe Final de Gestión (IFG). Y así debe hacerse por ser documentos que forman parte de las obligaciones establecidas para las distintas partes expuestas en el Decreto 112/2012 [3], que regula la generación y gestión de RCD en País Vasco. El Real Decreto 105/2008 [16] obliga a la empresa promotora de la obra a la redacción de un EGR. De la misma manera establece que el contratista es quien debe realizar un PGR que deberá aprobarlo la promotora y la Dirección de Obra. El Decreto 112/2012 [3] obliga también al promotor a que, una vez la obra esté finalizada, realice un IFG donde, como se ha mencionado anteriormente, acreditará la gestión realizada con los RCD. A continuación, se muestra, resumidamente, sus contenidos más relevantes.

EGR: (Decreto 112/2012 [3] Anexo I) En primer lugar debe incluir una estimación de la cantidad (t y m³) de residuos que se generarán en la obra de forma orientativa (con sus correspondientes códigos LER), así como el inventario de residuos peligrosos que serán generados. Deberán aparecer también las medidas para la prevención de residuos y su separación en obra. Además, se indicarán las operaciones de valorización o eliminación a las que se enviarán los RCD generados. De igual modo, se describirán las instalaciones planificadas para la separación, manejo, almacenamiento y el resto de las operaciones de gestión de residuos en obra. Se incluirá también la previsión del coste de la gestión de los RCD.

PGR: Son cuatro los contenidos obligatorios es este documento: Las medidas de prevención para minimizar la generación de RCD; las operaciones de reutilización, valorización o eliminación que concretan el destino de los RCD; las acciones para la separación de RCD que superen el límite de separación obligatoria y, finalmente, los planos del parque de residuos para su gestión.

IFG: (Decreto 112/2012 [3] Anexo III) En este documento se deben incluir los datos generales y de ubicación de la obra, así como los datos de la persona productora y la poseedora del residuo. También la información detallada sobre el emplazamiento de la obra, del mismo modo que la información sobre el tipo de obra, modo de actuación y tipo de estructura. Igualmente, se deberá detallar la información relativa a la retirada de materiales con contenido en amianto. Se incluirá también la tabla cuantitativa con las cantidades reales de RCD obtenidos.

1.4.4.3. *Auditoría predemolición:*

Además de los documentos explicados anteriormente, cabe destacar la auditoría predemolición. Con la ayuda de este documento, se consigue un proyecto de demolición selectiva auditado previamente por agentes externos a la obra. Principalmente, está enfocado a que el propietario del edificio a demoler tenga disponible información detallada (y fiable) sobre los componentes,

elementos constructivos y materiales que integran la edificación para que, de esta forma, pueda tomar decisiones precisas sobre los destinos finales de los materiales. Los objetivos principales de este documento son: evitar generar residuos innecesarios, permitir aumentar el reciclaje y la reutilización de componentes y, finalmente, maximizar el valor y uso sostenible de los materiales de construcción.

Esencialmente, la realización de una auditoria predemolición consta de varias actividades. Primeramente, se debe hacer un estudio documental de la edificación con el objetivo de conseguir información fiable de cómo es. Segundo, se debe realizar una visita con el objetivo de asegurar la inexistencia o identificación de sustancias peligrosas, así como de inventariar los materiales o elementos constructivos (estos últimos de forma optativa). Lo anterior debe realizarse del mismo modo aclarado en el EGR. Tercero, se deben desarrollar las recomendaciones sobre las posibles gestiones de los materiales que, *a posteriori*, servirán para planificar o seleccionar diferentes opciones de demolición, para que ayuden a decidir la manera óptima de gestionar los residuos. Por último se reportará el informe generado [14].

Respecto al auditor que realice el documento, es evidente que además de poseer conocimientos sobre la construcción, debe ser neutral e independiente. Todo ello con el fin de que los resultados que se obtengan sean veraces y aporten información útil.

1.5. Análisis de alternativas

A continuación, se analizan varias de las alternativas más convenientes respecto a los tres siguientes aspectos sobre la digitalización de la demolición selectiva: captura de realidad y geometría, creación del modelo de la edificación a deconstruir e inventario y estimación de RCD generados. Centrándose siempre en las soluciones que mejor se adapten al problema planteado.

1.5.1. Digitalización: captura de realidad y geometría.

En la actualidad apenas se encuentran edificios o construcciones que tengan su información digitalizada. Por ello se hace necesario capturar la información real para poder disponer de ella en formato digital. Esto se puede realizar de diferentes formas, algunas de estas soluciones se analizarán a continuación de manera cualitativa.

Previo a exponer las opciones tecnológicas es necesario conocer más a fondo el concepto BIM (Building Information Modeling) y Scan to BIM. *'BIM es un conjunto de tecnologías basadas en el uso compartido de modelos digitales que presentan las características físicas y funcionales de los edificios y las obras de ingeniería, permitiendo el intercambio de información en la cadena de valor de la industria de construcción, de forma que se pueda gestionar y tomar decisiones de forma colaborativa durante el ciclo de vida del activo construido, desde la concepción inicial hasta la rehabilitación o deconstrucción.'* [20]. Resumidamente, Scan to BIM es el proceso de captación y generación digital que se puede conseguir a través de escáneres láser y fotogrametría, entre otros. A partir de la nube de puntos que se genera en el proceso de captación se consigue la captura semiautomática de la edificación en 3D.

En cuanto a las opciones disponibles, a continuación, se analizan: el escaneo láser para la obtención de planos 2D o 3D, la visión estereoscópica y fotogrametría y, finalmente, el tiempo de vuelo. La técnica de escaneo por luz estructurada no se analiza por ser más adecuada para escaneo de objetos o figuras y no tanto de edificaciones o estancias.

1.5.1.1. Escaneo láser Obtención de planos 2D o 3D:

El escaneo láser proporciona información geométrica de una construcción con precisión milimétrica empleando un método breve. La manera en la que se representa esta información

es mediante una nube de puntos. La captación de estos puntos se consigue a través de la tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) que, a través de un láser pulsado, permite determinar la distancia entre el emisor y distintos puntos a lo largo de las superficies de la escena. (Ver Ilustración 6).



Ilustración 6: Estudio de la estación Penn de Nueva York mediante LiDAR [21].

De este modo se pueden obtener levantamientos reales de un terreno, o de edificios, en 3D de manera eficiente en cuanto al tiempo y nivel de detalle. La información reflejada es completa ya que permite la documentación de aspectos, superficies y niveles de detalle altos [22]. Todo esto conlleva relativamente grandes costes computacionales a la hora del manejo de la información digital generada.

A través del escaneo también se pueden obtener planos 2D de planta de los distintos niveles de un edificio o construcción. Esta estrategia suele ser utilizada para la creación de planos de evacuación. Este método, más simple y rápido que el escaneo para la obtención de planos en 3D, puede ayudarse de fotografías 360° para apoyar la captación de la información deseada. De este modo el procesamiento de los datos generados se realiza de manera más simple y rápida, puesto que la cantidad de información registrada es menor. Finalmente, mediante un software puede levantarse digitalmente el edificio o construcción, de manera completa, a partir de los planos de cada planta.

1.5.1.2. Visión estereoscópica y fotogrametría:

La visión estereoscópica imita la visión del ojo humano. Su fundamento, de manera resumida, es el siguiente: captura de las imágenes de la escena desde dos ángulos diferentes, posterior corrección y filtración para la localización de los bordes de los objetos y, finalmente, combinación de los píxeles de los dos grupos de imágenes que producen la profundidad 3D. Este método es relativamente sencillo y muy rentable; en contraposición, tiene menor valor ya que la calidad obtenida de la captura 3D es inferior. Su sencillez se basa en que no son necesarios láseres, proyectores o hardware complejo, exceptuando la o las cámaras [23].

Respecto a la fotogrametría, es una técnica a través de la cual se obtiene información geométrica, cuantificable de forma concisa, del medio físico a través de la fotografía. Esta se vale de más posiciones de la cámara que la estereoscopía, lo que lo convierte en el digitalizador

de tecnología 3D más completo [23]. Las múltiples posiciones de las imágenes pueden conseguirse con estructuras que monten múltiples cámaras, desde el aire situando el objetivo en aviones (fotogrametría aérea) o en drones (Ver Ilustración 7). Todo ello en la intención de facilitar el modelado de zonas o edificaciones con altura o de difícil acceso. Comparándolo con el método anterior es más complejo y costoso, aunque, como cabe esperar, los resultados obtenidos son de mayor calidad.

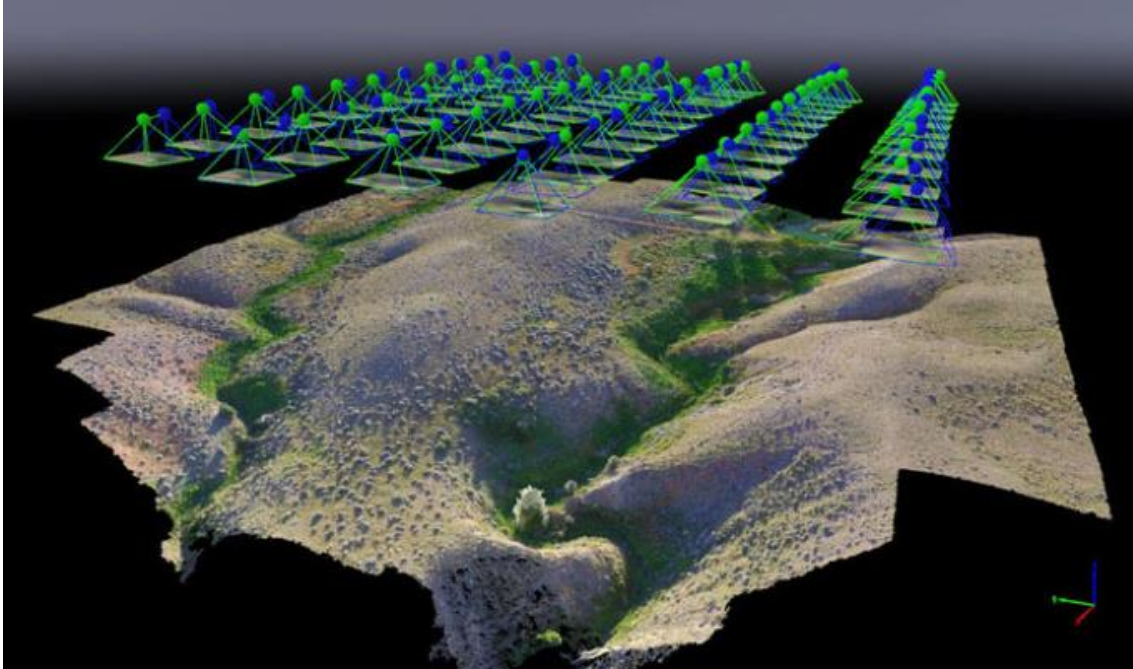


Ilustración 7: Fotogrametría, mapa generado a partir de fotografías desde múltiples posiciones con dron [24].

1.5.1.3. Tiempo de vuelo (escaneo de pulso láser):

Esta tecnología de escaneo 3D se basa en la emisión de un solo pulso de luz infrarroja de muy corta duración, en la medición del tiempo de retorno de éste a cada píxel del detector de la cámara. Este tipo de cámaras tienen una gran ventaja sobre el resto de las tecnologías de captación 3D, esencialmente por su capacidad de tomar la medición de una escena completa en una sola toma. Al contrario, los haces láser punto por punto (LiDAR), para posibilitar el escaneo, suelen requerir el movimiento del emisor mediante partes móviles, espejos giratorios o el propio movimiento de la persona que opere el sistema. Ver Ilustración 8 para una comparativa de imágenes generadas a través de estas dos tecnologías descritas. La tecnología de escaneo de pulso láser, combinada con datos de video, posibilita la creación de imágenes 3D a tiempo real permitiendo realizar seguimiento de los movimientos corporales y trazar planos de estancias, entre otros. Este método de escaneo 3D proporciona un nivel de calidad muy alto y sofisticado, por lo que puede ser costoso económica y computacionalmente hablando [25].

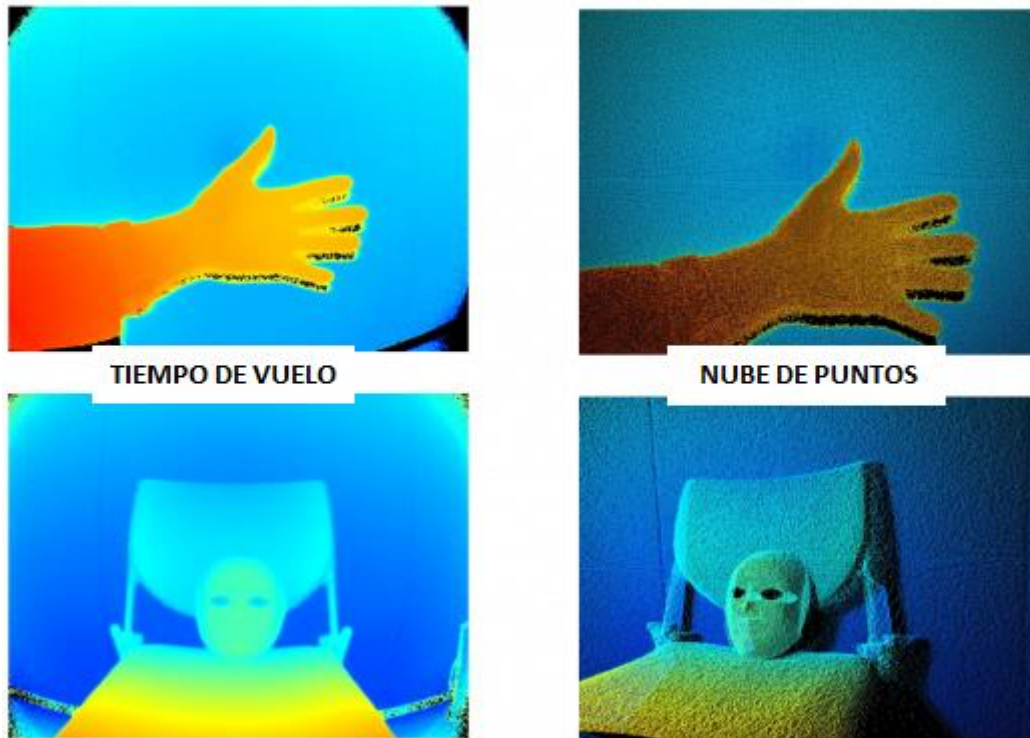


Ilustración 8: Comparación de imágenes a través de tiempo de vuelo y nube de puntos [26].

1.5.2. Creación del modelo.

Son diversas las opciones que existen a la hora de generar el modelo de la edificación. Generalmente se diferencian entre sí en la precisión obtenida respecto a la edificación, además de en el tiempo necesario para su obtención, normalmente estas dos inversamente proporcionales.

Por una parte, el prototipo puede crearse completamente de forma manual. Claro está, mediante software de modelado de información de construcción (BIM), a través del cual se obtendrá el modelo virtual del edificio en cuestión. Dicho modelo es construido situando los objetos que lo componen en un espacio virtual. Esos objetos pueden representar elementos no físicos como áreas, niveles o habitaciones; o elementos físicos como puertas, paredes, suelos o ventanas. Esta manera de generar el modelo virtual no requiere de ninguna tarea adicional, aunque si de un software de modelado BIM (a menudo costoso). En contraposición, resulta imprescindible un gran conocimiento del edificio, cuestión que limita la utilidad de esta técnica a construcciones simples, pequeñas y proyectos de poco alcance.

Ligado a lo anterior, existe la posibilidad de realizar el prototipo de la construcción valiéndose de la asistencia tecnológica, al objeto de obtener la geometría del edificio. Concretando, esto se puede hacer ayudándose de dos maneras. Por un lado, importando archivos de nubes de puntos del propio edificio a demoler en una herramienta software BIM. Y, por otro lado, mediante archivos digitales 2D o 3D del edificio concreto, ya sea importándolos a un software BIM o en aplicaciones o herramientas similares. Valerse de archivos de nubes de puntos o archivos 2D o 3D de la edificación a la hora de realizar el modelo de forma manual es sin duda ventajoso. Esto proporciona gran cantidad de información que, seguro, resulta valiosa para el correcto modelado, además de agilizar la tarea. Eso sí, conseguir dichos archivos requiere de tareas previas de escaneo (o captura de realidad) con el propósito de digitalizar la información existente, lo que puede suponer un reto.

Por otra parte, se diferencia la opción de realizar lo descrito anteriormente de forma automatizada. Tras el escaneo o captura de la geometría del edificio en cuestión, de forma semiautomática, se obtiene la nube de puntos, imágenes 360°, etc. con el fin de captar la realidad de la forma más detallada posible. Ya de forma automática, con ayuda de inteligencia artificial (IA), es posible realizar la interpretación de los componentes del espacio. Para lo anterior surge la necesidad de segmentar y clasificar la información de la nube de puntos o imágenes. La segmentación de la nube de puntos o imágenes (ver Ilustración 9) consiste en separar y organizar los objetos con los mismos atributos o características homogéneas. Los criterios de homogeneidad pueden basarse en radiometría (color), en el supuesto de imágenes o posiciones en caso de datos láser (puntos), p.ej.: superficies planas. Esta cuestión posibilita la organización, parametrización y postprocesamiento de la información en elementos cuantificables. Es de esta forma como se conduce el proceso de modelización tridimensional de los edificios [27]. Este método, aún en desarrollo, además de requerir tareas previas de escaneo y fotografiado, puede ser tan preciso como costoso. Eso sí, una vez avanzado su desarrollo, la generación automática del modelo puede llegar a ser muy ventajosa según la necesidad de cada caso.

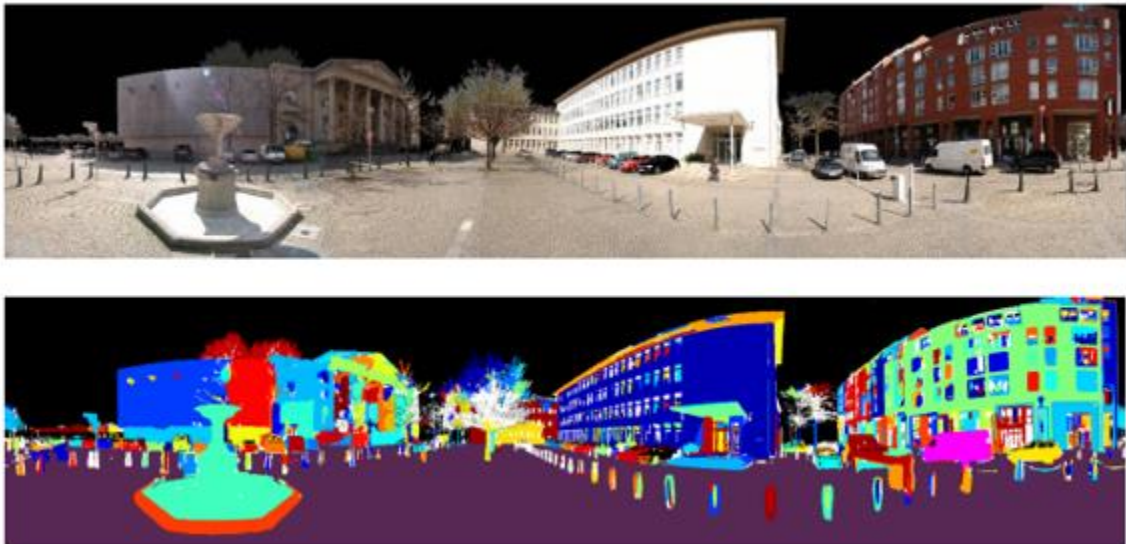


Ilustración 9: Segmentación [28].

1.5.3. Inventario y estimación de los RCD generados

Tras la creación del modelo toca conocer cuáles son los elementos y componentes que constituyen el edificio, así como los materiales que los conforman. De esta manera es posible conocer las diferentes corrientes de residuos que pueden ser generadas tras la deconstrucción. Para lograrlo es necesario inventariar o registrar los elementos y componentes del edificio. Como se verá más adelante, esto último no siempre será necesario ya que existen técnicas de estimación de RCD que no requieren inventariado de componentes.

Inventariar o registrar, en este caso, se refiere a conocer con el detalle necesario (y solo el necesario) cuales son los componentes de cada elemento (Forjados, paredes...). Por ejemplo, los diferentes componentes de cierto forjado pueden ser: vigas, viguetas, bovedillas, mortero de cemento, madera, terrazo, materiales aislantes...

Se van a diferenciar dos maneras de realizar el registro de componentes. La primera es realizar un inventariado completamente a mano. Esto es, valiéndose de conocimientos sobre elementos de construcción, realizar un listado de lo que haya en el edificio. Puede decirse que esta

estrategia está limitada únicamente a pequeños proyectos, no profesionales, pues el trabajo tedioso que supondría el inventariado a mano de una gran construcción lo haría inviable. El segundo modo consiste en realizar el inventariado partiendo de bases de datos. Estas bases de datos deben contener la información sobre los elementos más comunes en construcción (Tipos de forjados, paredes, muros, pilares...). De esta forma, partiendo de bases de datos sólidas, basta con acudir a ellas para poder realizar el inventario. Expresado de esta manera puede parecer algo sencillo, pero el gran reto se halla en generar, recopilar y alimentar de buena información dichas bases de datos.

A partir del inventariado (o no) y como ha quedado evidenciado en el apartado ‘Demolición, aspectos legales’, para cumplir los aspectos legales de un proyecto de demolición, se hace necesario un método de cuantificación de residuos. Método que se adapte a las necesidades, sea eficiente en tiempo y coste económico y, a la vez, ofrezca una adecuada precisión. Claro está, el objetivo de una apropiada estimación de RCD no es solo cumplir con los requerimientos administrativos y legales, sino que también favorece el registro de elementos y materiales. Y, en definitiva, facilitando el control de los residuos existentes para ayudar así a su correcta gestión en pro de la circularidad de los materiales.

Los métodos de estimación de RCD generados pueden resumirse en seis categorías [29]: método de visita al lugar, método basado en ratios de generación, método de análisis de vida útil, método de acumulación del sistema de clasificación, método de modelización de variables y métodos basados en BIM. En los siguientes subapartados se explican los más relevantes entre los anteriores mencionados.

1.5.3.1. Método de visita al lugar:

Aunque aparentemente simplista es uno de los métodos más realistas de cuantificación siempre y cuando se realice de forma adecuada. Es cierto que esta manera no es la más adecuada para estimar la generación de RCD a gran escala debido a la elevada cantidad de tiempo trabajo e inversión que requiere. Pero, a nivel de proyecto (pequeña escala), puede ser de gran utilidad [30]. Aunque requiere que la demolición haya sido realizada, este método también incluye el pesaje de los RCD directamente en el lugar [31], o la estimación de la forma de los materiales de desecho apilados [32]. También se recomienda contar con el consejo del personal profesional en la propia obra con el objetivo de afinar el cálculo [29].

1.5.3.2. Método basado en ratios de generación:

Este es uno de los métodos más populares para el cálculo de RCD. Puede ser implementado a pequeña, o gran escala, y tanto en actividades de construcción, de renovación o de demolición. Básicamente consiste en obtener la tasa de generación de residuos (kg/m^2 y m^3/m^2) para una tipología de edificios, una región y una fecha determinada.

En este grupo se encuentra, primeramente, el multiplicador per cápita, primera metodología de cuantificación de RCD documentada. Ésta calcula la media de RCD por persona y año para, después, extrapolar el valor a una región entera obteniendo así un valor estimado de forma sencilla. En contraposición, puede no ser efectivo ya que las actividades de generación de RCD pueden aumentar considerablemente, independientemente de la población.

En segundo término, se encuentra el cálculo basado en la superficie, este método es bastante polivalente ya que puede utilizarse, tanto a gran escala como a nivel de proyecto. Básicamente se obtienen valores en kg/m^2 , m^3/m^2 o t/m^3 a partir de visitas a la obra y consultas a proyectos similares, entre otros [29].

Basada en este método de ratios de generación, en la Comunidad Autónoma del País Vasco, se cuenta con la aplicación web EEH Aurrezten, que facilita el cálculo y verificación de los EGR, PGR e IFG, anteriormente mencionados. Esta es una de las técnicas, referidas con anterioridad, que no requieren de inventariado de componentes.

1.5.3.3. *Método de acumulación del sistema de clasificación:*

Este método ha sido ampliamente aplicado en los últimos años. Esencialmente consiste en un sistema de clasificación proporcionado por una plataforma para poder cuantificar los materiales especificados. Se sugieren hojas de cálculo o programas informáticos de bases de datos para facilitar la aplicación de este método [29].

1.5.3.4. *Métodos basados en BIM:*

De forma general, el enfoque de estos métodos BIM tiene como objetivo aumentar la precisión de la estimación de RCD generados, además de poder incluir la trazabilidad de los materiales desde su origen (residuo) hasta su final (producto). Los métodos BIM pueden ayudarse de otros métodos con el fin de aumentar su exactitud. Su obstáculo principal es la necesidad de contar previamente con el modelo BIM de la edificación a demoler.

El BIM, ha sido rápidamente adoptado en la industria de la construcción, gracias a lo cual, los modelos digitales estarán disponibles para la mayoría de los edificios en el futuro. En las nuevas edificaciones los modelos son creados en fase de diseño, para los edificios antiguos en cambio los modelos se crean para ayudar en labores de mantenimiento. La creación del modelo, en este último caso, se puede realizar con fotogrametría o escaneos laser (técnicas detalladas en el próximo subapartado). El modelo digital del edificio es una representación rica en datos, como se ha mencionado con anterioridad. Gracias a estos datos es posible extraer y procesar la información de los materiales y componentes de cada elemento de la edificación, para así abordarla posterior estimación de residuos. Ofrece la capacidad de realizar esto último de forma automática, rápida y precisa. Este sistema no solo sirve como herramienta de estimación de RCD, previa a obras de renovación o demolición, sino que puede servir también como herramienta para calcular las tasa de recuperación de residuos, así como la capacidad de transporte necesaria, entre otros [33].

Como se concluye en [30] acerca de la estimación de RCD, a la hora de estimar la cantidad de RCD, no solo se emplea un único método sino que la combinación de varios es la opción más exitosa. Según ese estudio, la metodología apropiada debe seleccionarse acorde a los objetivos de cuantificación y las condiciones realistas.

1.6. Descripción de la solución propuesta.

Una vez expuestas todas las opciones consideradas, este apartado desarrolla la solución propuesta. Primeramente, se aproxima la solución propuesta de forma genérica y, posteriormente, en el apartado *METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO*, se aclara cómo se ha aplicado ésta al caso de estudio seleccionado.

Como adelanto, y de forma introductoria, decir cómo el método empleado es el de utilizar un modelo 3D simplificado de la edificación. Para la creación de este modelo se parte de planos 2D a modo de plantilla. Dichos planos se obtienen mediante el escaneo de la edificación a demoler. Una vez generado el modelo 3D, y haciendo uso de una aplicación específica (BIM4DW), se procede con el inventariado y la estimación de RCD generados.

1.6.1. Descripción del caso de estudio.

Ante todo, una breve descripción de la edificación que se ha utilizado como modelo de estudio para este trabajo. Se trata de un edificio de tipología semi-industrial, data de la década de los 70-80 (s. XX) y está situado en la zona norte de la Península Ibérica. Es parte de una central termoeléctrica y está constituido de oficinas y talleres en sus diferentes plantas. Se trata de un edificio con estructura mixta de hormigón y acero, de 3 alturas, con una superficie de 12m x 20m encada planta, más una altura adicional (de planta aproximada 6m x 3m) que conecta con la edificación anexa (ver Ilustración 10). La superficie construida total es de 745.2 m², distribuida de la siguiente manera: planta baja de 12m x 20m y ‘caseta’ aneja de 2m x 2.6m, primera y segunda plantas de 12m x 20m y tercera de 6m x 3m.



Ilustración 10: Edificio de tipología semi-industrial utilizado como caso de estudio.

Más adelante, en el apartado Revisión e identificación de elementos, se detalla la descripción del edificio.

1.6.2. Captura de realidad y geometría.

Siguiendo el orden empleado en el apartado *Análisis de alternativas*, y tal y como ya se ha adelantado al inicio de esta sección, el método empleado para la captura de la realidad y la geometría se basa en el empleo de un escáner *mapeador* portátil (LiDAR) 2D manual (ver Ilustración 11) que puede generar, de forma rápida, planos 2D de los elementos verticales del

edificio. Dichos planos son visualizados en tiempo real, de forma automática, en un *smartphone* asociado a través de una aplicación para Android e iOS. Además, existe la opción de añadir sobre la marcha fotos y notas a una posición determinada. Esta sistemática puede ser útil para etiquetar materiales potencialmente peligrosos, o elementos con procesos de desmontaje específicos. Pero no solo fotos y notas, sino que, con el uso de una cámara de captura esférica, pueden asociarse también imágenes 360° a posiciones determinadas en el momento del escaneo; estrategia muy útil para inmortalizar estancias completas en una sola imagen.



Ilustración 11: Mapeador portátil 2D FARO Scanplan [34].

Algo a destacar sobre este dispositivo es su bajo peso. Con sus menos de 2kg (batería incluida) se hace bastante manejable. Aunque para escaneos prolongados en el tiempo puede parecer pesado, existe la posibilidad de fijar el Scanplan a una pértiga con ruedas. Este accesorio opcional puede ser útil para grandes áreas con superficies planas y sin obstáculos.

Los resultados medios, acerca de la velocidad de escaneo, muestran unos valores de 400m²/min para geometrías de edificio vacíos, y de escaneos de 200m²/min para edificios complejos. Tras finalizar el escaneo, es necesario optimizar el plano obtenido, este proceso se extiende por lo general entre 1 y 10 minutos dependiendo de la complejidad de este.

Por último, los planos 2D obtenidos pueden exportarse en varios formatos: DXF (para el caso de estudio), PDF u otros formatos compatibles para su visualización en línea, procesamiento posterior o, incluso, almacenamiento en la plataforma específica de FARO. Buscando la máxima compatibilidad, se seleccionan los archivos DXF por su idoneidad para representar geometrías con distancias escaladas. El formato de intercambio de dibujos (DXF) es un formato de archivo de datos CAD, desarrollado por Autodesk®, para permitir la interoperabilidad de datos entre AutoCAD®, y otros programas.

Como se mencionaba con anterioridad, cabe recordar que todos los pasos descritos se controlan y visualizan desde el *smartphone* asociado al dispositivo Scanplan, haciéndola través de la conexión física USB o Wifi. Los archivos exportados de un proyecto se almacenan en el *smartphone* según las preferencias del usuario y, posteriormente, se envían a un PC para su uso en la herramienta BIM4DW.

Dicho de otro modo, en lo que dura un paseo por la edificación el usuario obtiene un dibujo 2D, bastante detallado, en formato DXF, listo para ser importado desde la aplicación web. El resultado obtenido del escaneo no es adecuado para crear automáticamente un modelo BIM. Sin embargo, sí es lo suficientemente válido para el proceso de trazado en el que se basa la herramienta BIM4DW.

Es por todo lo anterior que se ha elegido esta opción: por su simplicidad, rapidez, además de por ofrecer un resultado con la calidad justa y necesaria.

1.6.3. Creación del modelo (BIM4DW).

La creación del modelo se hace mediante la herramienta en línea BIM4DW. Este software es una mejora de la herramienta BIM-SD del proyecto HISER [35]. Dicho software permite el modelado del edificio a demoler, empleando, a modo de guías, planos 2D de cada planta en formato DXF y PNG. En caso de no disponer de los planos, su obtención puede realizarse utilizando un escáner portátil como Faro Scanplan, descrito en el apartado anterior, u otra tecnología disponible.

El proceso de escaneo no es obligatorio ya que el usuario puede dibujar el modelo a mano alzada directamente en la herramienta sin la necesidad de añadir planos, pero no es recomendable. Una vez obtenido el plano 2D en formato DXF se debe iniciar sesión en la aplicación *BIM for Demolition Waste*.

Tras el inicio de sesión, se debe crear un nuevo proyecto de demolición rellenando primeramente la ventana inicial con los datos más relevantes de la edificación y el trabajo a realizar: nombre, dirección, descripción, tipo de trabajo, propósito de la edificación, tipo de estructura, fechas de construcción, alta inicio y fin, dirección y coordenadas. La introducción de dicha información no es obligatoria, aunque si recomendable (ver Ilustración 12).

The screenshot shows the initial form of the BIM4DW web application. The interface includes a top navigation bar with the 'iceberg' logo, 'PROYECTOS', 'compareBtn', and a 'Guardar' button. The user is logged in as 'admin'. The form is organized into three columns:

- Column 1:** Código* (text input), Nombre* (text input with 'Proyecto1'), Descripción* (text input with 'Demolición selectiva'), Tipo (dropdown menu with 'New construction'), Proposito (dropdown menu with 'Industrial'), Estructura (dropdown menu with 'mixed').
- Column 2:** Fecha de construcción (text input), Fecha de alta (text input with 'dd / mm / aaaa'), Fecha de inicio orientativa (text input with 'dd / mm / aaaa'), Fecha fin orientativa (text input with 'dd / mm / aaaa').
- Column 3:** Dirección* (text input), Ciudad* (text input), Código postal* (text input), Pais (dropdown menu with 'Afghanistan (افغانستان)'), Coordenadas (text input).

At the bottom, there is a 'Ficheros' section with a text input 'Por favor seleccione un archivo' and a blue button with three dots.

Ilustración 12: Herramienta web BIM4DW, pestaña inicial: información del proyecto.

Una vez creado el proyecto, en la pestaña “dibujar”, se debe añadir el/los archivos DXF y/o PNG obtenidos del proceso de escaneo (Ilustración 13). Como se explicaba con anterioridad, estos son los archivos guía para el modelado de la edificación. En la Ilustración 14 se detallan los diferentes bloques referentes a la pestaña de modelado.



Ilustración 13: Sección de modelado en BIM4DW tras adjuntar los planos DXF y PNG obtenidos del escaneo.

Después, se puede empezar con el modelado, dibujando el forjado y los elementos constructivos verticales, así como ventanas y puertas. Todo este proceso se aborda mediante el trazado basado en el croquis lineal 2D. Mientras se hace este proceso, y tras añadir cada elemento (Forjado, paredes, ventanas o puertas), se cataloga cada línea, definiendo el tipo de elemento que es y qué propiedades tiene. Para ello, la herramienta BIM4DW se alimenta de bases de datos que deben contener la información necesaria sobre los componentes y materiales que conforman cada elemento. Información mediante la cual, posteriormente, se calcula la cantidad de cada tipo de RCD producido en la demolición.

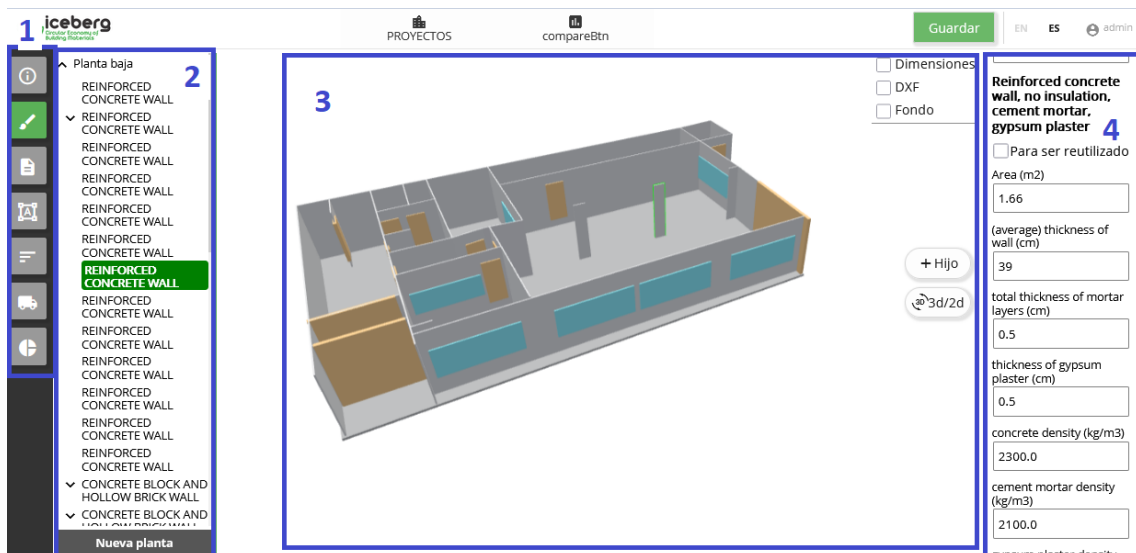


Ilustración 14: Sección de modelado en BIM4DW. Bloques numerados de izquierda a derecha: Bloque 1: Menú vertical de pestañas (De arriba abajo: Información, dibujar, resumen de inventario, grupos corrientes, tratamientos y resultados). Bloque 2: Árbol de las diferentes plantas y elementos añadidos a cada una de ellas. Bloque 3: Modelado. Bloque 4: Menú de clasificación de los elementos.

Ni que decir tiene que, la aplicación BIM4DW, cuenta con funcionalidades que ayudan a la hora de categorizar los elementos y componentes de una forma rápida. Esto se consigue propagando propiedades de unos elementos a otros de iguales características, ya sea en una misma planta o en distintas plantas del mismo proyecto, entre otras.

Como se comentaba en el apartado *Inventario y estimación de los RCD generados*, las bases de datos deben contener información lo suficientemente precisa sobre los elementos más comunes en construcción. La precisión de estas debe centrarse en los elementos que mayor cantidad (en masa) de residuos van a generar. Deben contemplar el mayor número de tipos de elementos posibles para cubrir la mayoría de los casos posibles. Aunque, cierto es, siempre existe la posibilidad de enriquecer las bases de datos añadiendo información que se crea necesaria para una correcta estimación de RCD.

Mediante esta opción elegida para la creación del modelo, se evitan las costosas alternativas de adquisición de licencias de Softwares BIM como Revit, siempre ventajoso para futuros usuarios. Aunque es cierto que crear una herramienta como BIM4DW requiere de gran trabajo y, además, debe ser alimentada con bases de datos sólidas para su correcto funcionamiento.

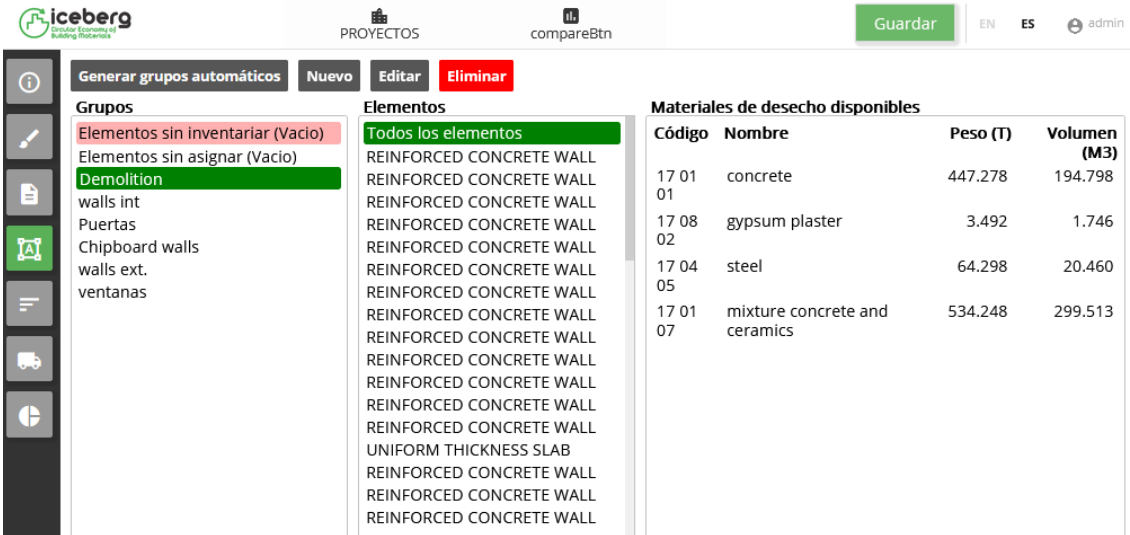
1.6.4. Cuantificación de RCD.

Tras el proceso de inventario, el siguiente paso consiste en la cuantificación de los Residuos. Para ello, primeramente, la herramienta BIM4DW muestra un resumen de los elementos del inventario. Este resumen muestra qué elementos se han añadido y qué cantidad de materiales (masa, número y volumen) se obtendrán de su demolición según los códigos LER. Cabe destacar que, en esta fase del diseño de la demolición, aún no se han creado las diferentes corrientes que serán generadas en función del tipo de desmantelamiento llevado a cabo. De modo tal que los datos mostrados en la Ilustración 15 son los correspondientes a los materiales de forma individual, segregados.

Código	Nombre	Cantidad	Peso (T)	Volumen (M3)
17 01 01	concrete	165	491.453	234.714
17 08 02	gypsum plaster	81	6.252	3.126
17 04 05	steel	71	65.849	25.402
17 02 01	wood	69	1.791	3.150
17 02 02	glass	39	0.992	0.399
17 04 07	metals	44	0.503	0.061
17 01 02	bricks	61	37.213	39.168
17 06 04	EPS	41	0.194	6.471
17 05 04	mineral wool	21	1.450	12.945
17 04 02	Aluminium	54	10.442	3.974
17 01 07	mixture concrete and ceramics	4	534.248	299.513

Ilustración 15: BIM4DW pestaña: resumen del inventario.

A partir de este punto se procede con la agrupación de los elementos, al objeto de crear los flujos de materiales que serán tratados. La propia herramienta realiza una primera agrupación automática de elementos en función de la manera en la que pueden ser tratados (a reutilizar, a desmontar o a demoler). A continuación, el usuario puede editar estos grupos, crear nuevos y mover los elementos de unos a otros según se requiera. De esta manera se generan los distintos flujos de residuos en función de los grupos creados. Además de mostrar la lista de elementos que componen el grupo, también se muestra el cálculo (volumen y masa) de los diferentes materiales que componen cada grupo (Ilustración 16).



Grupos

- Elementos sin inventariar (Vacio)
- Elementos sin asignar (Vacio)
- Demolition**
- walls int
- Puertas
- Chipboard walls
- walls ext.
- ventanas

Elementos

Todos los elementos

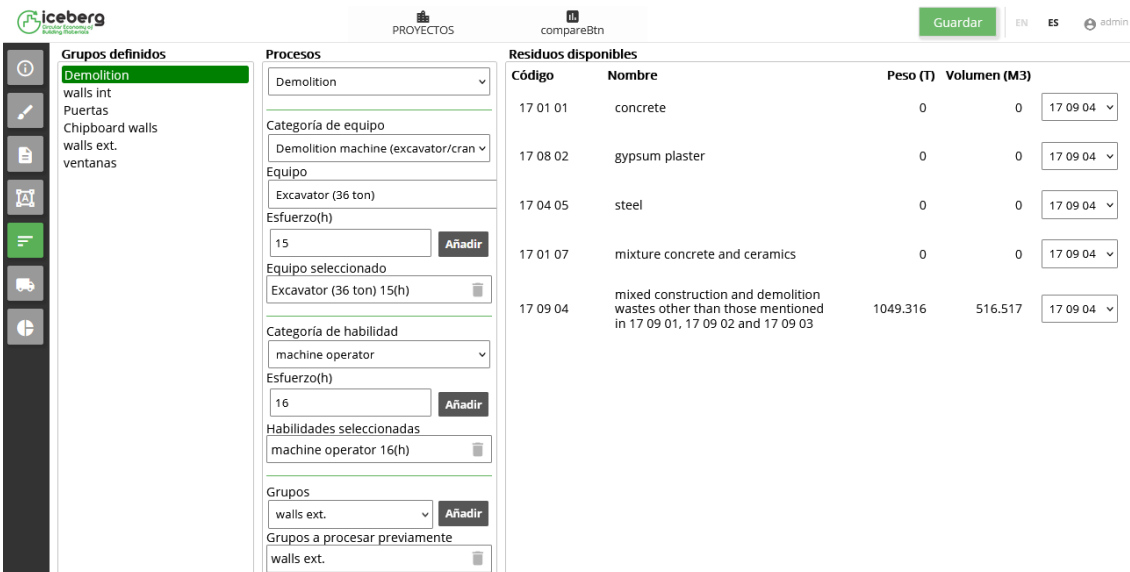
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
UNIFORM THICKNESS SLAB
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL
REINFORCED CONCRETE WALL

Materiales de desecho disponibles

Código	Nombre	Peso (T)	Volumen (M3)
17 01 01	concrete	447.278	194.798
17 08 02	gypsum plaster	3.492	1.746
17 04 05	steel	64.298	20.460
17 01 07	mixture concrete and ceramics	534.248	299.513

Ilustración 16: BIM4DW pestaña: grupos.

En el siguiente paso se define el proceso por el cual se elimina cada grupo y los flujos resultantes. Las opciones disponibles, coincidentes con las técnicas de demolición selectiva expuestas anteriormente en su apartado correspondiente, son el desmontaje, la retirada y la demolición. Cada tipo de elemento tiene, por definición, sus procesos posibles asignados en la Base de datos. Es por esto por lo que, siempre que sea posible, se ha de tratar de agrupar los elementos similares con el fin de facilitar el diseño de la demolición y la consiguiente generación de corrientes (Ilustración 17).



Grupos definidos

- Demolition**
- walls int
- Puertas
- Chipboard walls
- walls ext.
- ventanas

Procesos

Demolition

Categoría de equipo
Demolition machine (excavator/cran)

Equipo
Excavator (36 ton)

Esfuerzo(h)
15 **Añadir**

Equipo seleccionado
Excavator (36 ton) 15(h)

Categoría de habilidad
machine operator

Esfuerzo(h)
16 **Añadir**

Habilidades seleccionadas
machine operator 16(h)

Grupos
walls ext. **Añadir**

Grupos a procesar previamente
walls ext.

Residuos disponibles

Código	Nombre	Peso (T)	Volumen (M3)
17 01 01	concrete	0	0
17 08 02	gypsum plaster	0	0
17 04 05	steel	0	0
17 01 07	mixture concrete and ceramics	0	0
17 09 04	mixed construction and demolition wastes other than those mentioned in 17 09 01, 17 09 02 and 17 09 03	1049.316	516.517

Ilustración 17: BIM4DW pestaña: corrientes. De izquierda a derecha: Primero, grupos definidos. Segundo, proceso mediante el cual el grupo seleccionado será retirado, además de maquinaria, operarios, tiempos... Tercero confección de corrientes de residuos.

La cuantificación en sí se realiza a través de la herramienta BIM4DW, pero la esencia de la cuantificación está en las Bases de datos. Como se ha mostrado en el apartado *Inventario y estimación de los RCD* generados, las bases de datos contienen toda la información a cerca de: volúmenes, masas de los elementos y componentes constructivos.

A partir de este punto la aplicación BIM4DW cuenta con la posibilidad de cuantificar los impactos (ambientales, energéticos y económicos) derivados del proceso de demolición diseñado, tal y como se apuntaba en el apartado *Objetivos y alcance del trabajo*. Además, decir cómo la herramienta BIM4DW va a contar con la posibilidad de aplicar un proceso analítico jerárquico multicriterio, para la toma de decisiones, a la hora de seleccionar el tipo de demolición a realizar. No solo esto, sino que se pretende que este proceso sea automático. De esta forma la aplicación ofrecería distintas técnicas de demolición en función de los datos introducidos, con el fin de optimizar la acción según la importancia asignada a cada criterio. Estos criterios son: coste económico, duración del proyecto, circularidad de los materiales y emisiones de CO₂. Como se aclara al inicio, estas últimas líneas quedan fuera del alcance del presente TFM.

2. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se aclara la solución aplicada al modelo de estudio seleccionado. Debido a ser el primer caso al que se le ha aplicado este método, lógicamente, surgen peculiaridades y especificidades detalladas a continuación. Se procederá con la descripción del procedimiento llevado a cabo en orden temporal. Esto es, se utilizará la estructura expuesta en el apartado *Descripción de la solución propuesta*. Tras lo cual, se presentan los ‘cálculos’ realizados y el consiguiente análisis de resultados.

2.1. Descripción de procedimientos

Dispuestos en bloques, los procedimientos llevados a cabo son los siguientes: captación de realidad, revisión e identificación de elementos, edición de BBDD y modelado en BIM4DW y, finalmente, técnicas de demolición seleccionadas en BIM4DW.

2.1.1. Captación de realidad

El paso anterior a la captura de la geometría real del caso de estudio ha sido una inspección previa de las instalaciones. Inspección con el objetivo de familiarizarse con la edificación, sus plantas y sus diversas peculiaridades que pudiesen existir. Este reconocimiento del edificio planta por planta se ha utilizado también para establecer la estrategia de escaneo. Estrategia básica la del escaneo mediante el escáner FARO Scanplan que consta de los siguientes cuatro aspectos importantes.

Primero, instantes antes y después de pulsar el botón de inicio del escaneo se ha de mantener el dispositivo Scanplan lo más paralelo o perpendicular posible a una pared, siguiendo el mismo criterio en los distintos niveles del edificio. Esta es la forma de conseguir que los planos obtenidos como resultado queden alineados horizontal y verticalmente (Ilustración 18).

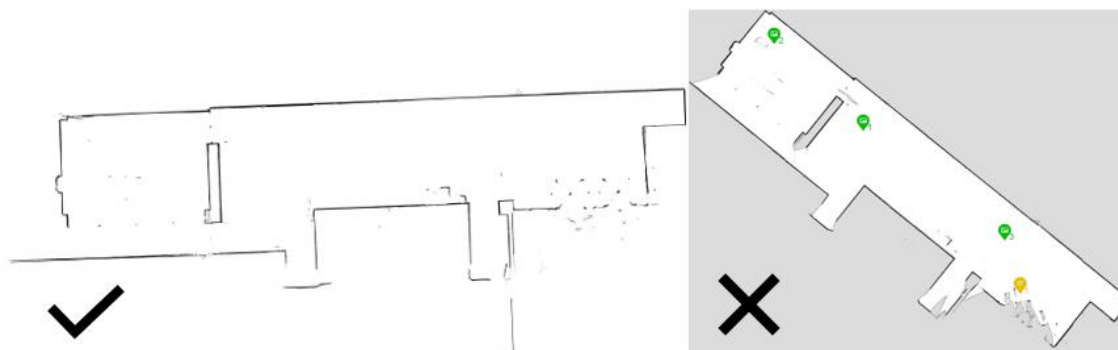


Ilustración 18: Orientaciones correcta e incorrecta de planos obtenidos a través del escaneo.

Segundo, se recomienda encarecidamente hacer uso de la opción “añadir punto de anclaje” que ofrece la herramienta de escaneo FARO Scanplan en la pantalla del teléfono inteligente vinculado. Añadiendo este punto de anclaje a una esquina del plano, y confirmando el mismo punto tras finalizar el escaneo, los resultados obtenidos mejoran en precisión.

Tercero, es recomendable girar siempre en el mismo sentido tras llegar a una puerta. Así se asegura mantener un orden y de escanear todas las estancias.

Y cuarto, es apropiado inmortalizar los elementos dudosos (material desconocido, zona en la que se hará una cata posterior...) para así disponer de dicha información en el futuro, ya sea mediante fotografías normales o imágenes 360° vinculadas a su posición exacta.

El este caso concreto, se han realizado fotografías en 360° en cada una de las estancias, además de decenas de imágenes. La decisión de este proceder es debida a la necesidad de inmortalizar todo al máximo, ya que el modelado del edificio no se iba a realizar en el mismo lugar y sí meses después. Esta ha sido la forma de asegurar y mantener la información. Los resultados obtenidos de los escaneos se muestran detalladamente en el Anexo II.

El tiempo dedicado a la captura de la realidad (escaneos y fotografías) ha sido de 13 minutos para la planta baja de 240 m², 7 minutos para la primera planta de 240 m², 14 minutos para la segunda planta de 240 m² y 2 minutos para la tercera planta de 18 m². Adicionalmente, se ha realizado un escaneo de la zona exterior con el fin de que quede reflejado el espesor de los muros exteriores. La duración de este último escaneo ha sido de 9 minutos siendo el tiempo total de escaneo del edificio de 59 minutos. Cabe aclarar que la tarea de escaneo y fotografías ha sido realizada por dos personas al mismo tiempo. Por otra parte, la optimización de los mapas se ha extendido 23 minutos. En cómputo global, el tiempo total para la inspección, escaneo y optimización de mapas ha sido de unas 4 horas.

2.1.2. Revisión e identificación de elementos

Tras la visita al lugar, y la captura de realidad, se ha procedido con la revisión de los planos y fotografías obtenidas, al objeto de identificar la composición y materiales de los distintos elementos que conforman la edificación. Más concretamente: forjados, pilares, muros, paredes, puertas y ventanas.

Debido a las circunstancias del proyecto, esta labor ha sido realizada en oficina, lejos del propio edificio a demoler y tiempo después de la visita y escaneo. Esto ha ocasionado que la labor de revisión haya sido menos ágil de lo esperado. Durante la revisión han surgido dudas sobre la composición de ciertos elementos que requerían de comprobaciones puntuales y catas en paredes y forjados (Ver Ilustración 19 e Ilustración 20). Para solucionarlas se ha contado con la asistencia del propio personal en obra. El tiempo dedicado a la revisión e identificación de elementos ha sido de unas 4 horas.



Ilustración 19: Cata realizada para la comprobación del espesor del forjado de la planta baja. Se obtiene que este es de 400mm



Ilustración 20: Comprobación de la composición de los forjados. Bovedillas cerámicas dispuestas sobre semi-viguetas prefabricadas.

Cabe destacar que no se ha recabado la información exacta acerca de todas las dimensiones de los elementos existentes (altura de ventanales, anchura de puertas...), esto supondría una labor excesivamente tediosa que, además, no aportaría información de gran valor. Se ha tratado de poner hincapié en detallar los elementos que mayor contribución en masa de RCD van a generar, estos son los forjados, muros y paredes. Cuando lo anterior no ha sido posible, se ha tratado de proponer valores coherentes basados en casos similares, contando siempre con el consejo de especialistas.

De esta manera, y haciendo uso de los planos impresos 2D obtenidos del escaneo, se ha procedido a ubicar e identificar la composición de los elementos constructivos existentes. Con el objetivo de plasmar información detallada, se han anotado también los elementos pertenecientes a la instalación de calefacción, iluminación, muebles, maquinaria industrial y elementos sanitarios.

En definitiva, a continuación, se muestra un resumen de los elementos constructivos existentes en el edificio utilizado para el caso de estudio. Esto se hace sin entrar en detalles acerca de su ubicación exacta.

2.1.2.1. Elementos constructivos

2.1.2.1.1. Forjados y cubierta

El forjado de la planta 0 o planta baja es un forjado de hormigón reforzado de espesor uniforme, se suponen 400 mm de espesor. El resto de los forjados del edificio están compuestos por una solera de terrazo, mortero de agarre y capa de hormigón de compresión sobre semi-viguetas dispuestas a 700 mm entre sí y bovedillas cerámicas de 180mm de espesor. Todo ello sobre vigas metálicas de perfil IPN (IPN 400, IPN 330 e IPN 300 en función de cada planta) dispuestas a 4 m entre sí (Ver Ilustración 21).

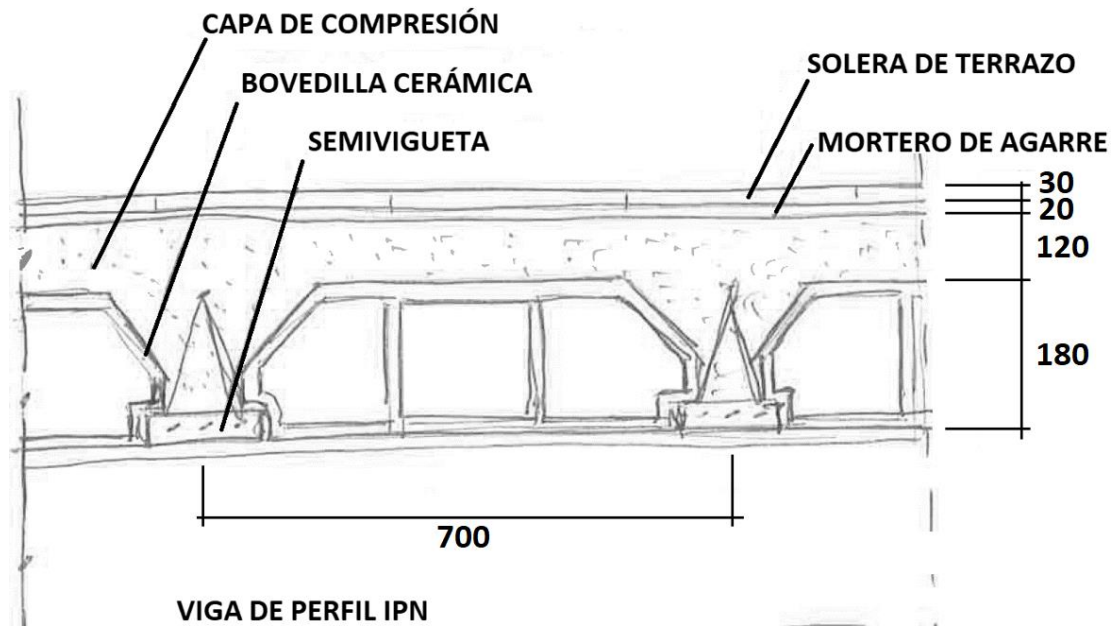


Ilustración 21: Boceto del forjado de las plantas 1, 2 y 3.

Siguiendo las recomendaciones del personal en obra, la cubierta del edificio se supone de idénticas características a las de los forjados de planta descritos arriba, con la diferencia de que esta cuenta con una chapa ondulada en su parte exterior.

2.1.2.1.2. Pilares

Hay 10 pilares de hormigón armado de 590 x 400 mm en la planta baja, 540 x 400 mm en la primera planta y 540 x 310 mm en la tercera.

2.1.2.1.3. Muros y paredes

Se encuentran 3 muros de carga de espesores 310 mm de hormigón armado con o sin revestimiento de mortero de cemento. El resto de las paredes exteriores están compuestas de las siguientes capas: chapa ondulada, aislamiento de lana de roca, bloques de hormigón, aislamiento de poliestireno expandido (EPS), ladrillo hueco y enlucido de mortero de cemento, según la disposición mostrada en la Ilustración 22.

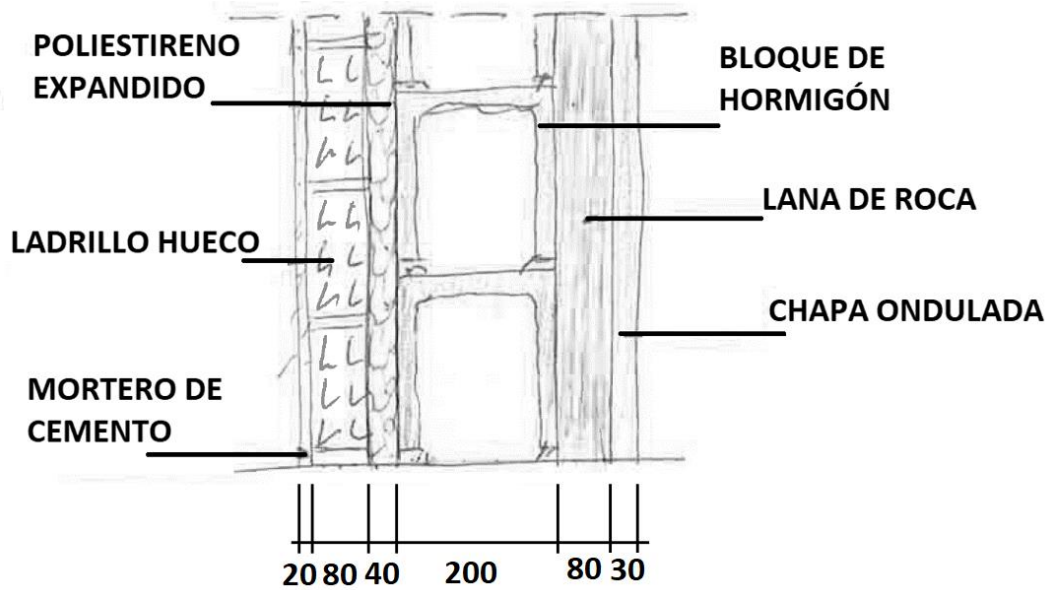


Ilustración 22: Boceto de los muros exteriores.

Las paredes interiores son de ladrillo hueco, con mortero de cemento, con o sin azulejos dependiendo de la estancia, y paredes de paneles de madera aglomerada sobre perfiles de aluminio.

2.1.2.1.4. Puertas y ventanas

En exteriores puertas metálicas y puertas metálicas con vidrio. En interiores puertas completas de madera, puertas de madera con vidrio, puertas de chapa de acero y de aluminio. En cuanto a las ventanas, todas ellas son de aluminio con vidrio simple.

2.1.3. Edición BBDD y modelado en BIM4DW

Tras la revisión, localización e identificación de los elementos y componentes que conforman la edificación, el siguiente paso lógico sería comenzar con el modelado. Esta vez, al ser el primer caso de estudio a través de la aplicación BIM4DW, ha sido necesario abordar varias cuestiones: una revisión exhaustiva, adaptación a BIM4DW, corrección de fallos y, finalmente, adición de elementos en las Bases de datos.

Como se ha mencionado con anterioridad, dichas bases de datos contienen información para el cálculo de volumen y masa de los materiales de distintos elementos propios de las edificaciones. Esto es, contando con las dimensiones de cada material presente en los distintos elementos, conociendo su densidad (real o aparente), se calculan volumen (real o aparente) y masa de cada componente. Para la identificación de todo ello, que tras demoler serán residuos, se utiliza la codificación de acuerdo con los códigos LER.

Entre los valores numéricos obtenidos mediante la base de datos, el de mayor fiabilidad y prioritario es el que corresponde a la masa de los RCD. Esto es debido a que el volumen de RCD generado, volumen aparente, depende de una serie de variables, tales como la metodología de generación de RCD (retirada manual, mediante maquinaria...), tenacidad de los elementos constructivos o, incluso, su forma.

Junto con la edición de las bases de datos, la actividad asociada al presente trabajo ha sido la asistencia al desarrollo de la herramienta BIM4DW, cuyo diseño requería de un cierto testeo y revisión, a modo de calibración primera, acordes con los siguientes objetivos. Primeramente,

confirmar el correcto funcionamiento de la adquisición de datos desde las BBDD, así como asegurar que los resultados mostrados son correctos. Y, en segundo término, disponer de una interfaz intuitiva y fácil de usar desde la introducción de datos, hasta la visualización de los resultados, pasando por el modelado y las distintas acciones a realizar en el diseño de la demolición selectiva.

Tras la generación del proyecto de demolición selectiva en el menú inicial de BIM4DW y la introducción de los datos en la primera de las pestañas (Ilustración 12), en la segunda de las pestañas, la correspondiente al modelado, se deben añadir las diferentes plantas del edificio, así como adjuntar sus correspondientes planos obtenidos de los escaneos realizados (Ilustración 14).

La siguiente fase (como antes se avanzaba) se constituye en el modelado del edificio. Primeramente, se ha definido la estrategia a seguir, estrategia dependiente del caso de estudio, por lo que puede no ser aplicable a otros edificios, a causa de las singularidades que este reporta. Aunque lo determinante es cómo aporta nociones básicas aplicables al resto de los casos futuribles.

La estrategia fundamental ha sido comenzar modelando (dibujando) los elementos del mismo tipo (p.ej. paredes de hormigón reforzado). De esta forma solo es necesario clasificar o definir su tipo de manera manual solo una vez, ya que después pueden propagarse (replicarse) sus propiedades al resto de elementos del mismo tipo. Cuestión esta que puede ser aplicada a forjados de un mismo tipo en distintas plantas o también a: paredes, puertas y ventanas; bien sea en la misma o en distintas plantas de un mismo proyecto. Con este proceder se pretende agilizar al máximo el proceso de modelado. Tras modelar y clasificar el forjado, paredes y añadir los “hijos” o componentes/elementos (puertas y ventanas) en cada una de las plantas, el modelado queda completo tal y como se aprecia en la Ilustración 23.

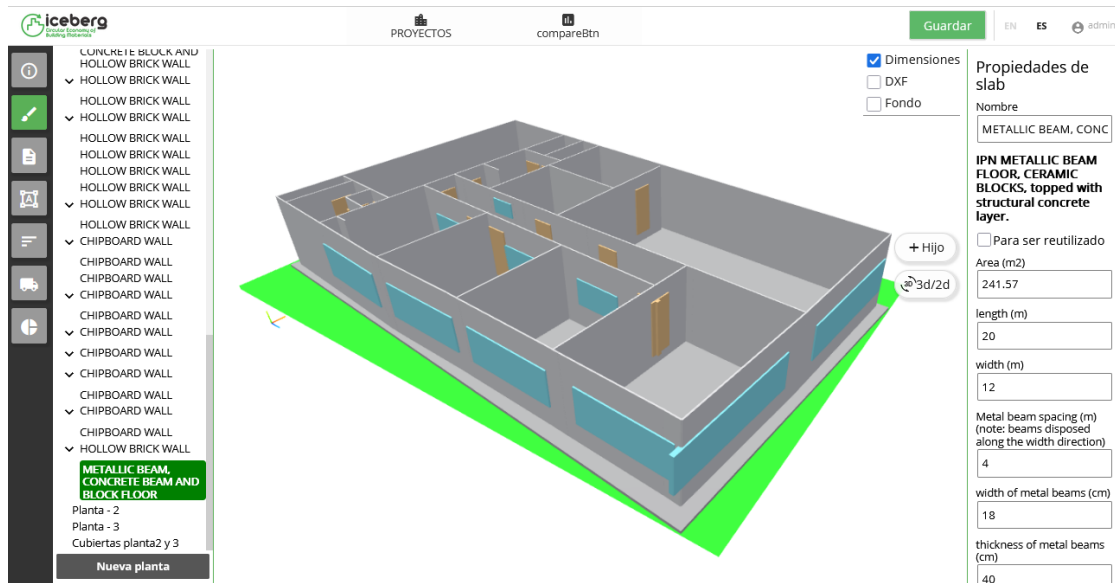


Ilustración 23: Modelado completo de la Planta 1 del edificio del caso de estudio.

Debido a que la aplicación BIM4DW se encuentra en fase de desarrollo, hay que aclarar que no se han modelado los elementos pertenecientes a las instalaciones de calefacción, iluminación, cableado, muebles, maquinaria o elementos industriales, elementos sanitarios, falsos techos y escaleras. Por lo tanto, téngase en cuenta cómo no serán cuantificados en la estimación de RCD.

Se asume que los elementos mencionados no suponen una gran aportación al montante de los residuos, aunque puede ser una fracción significativa.

2.1.4. Técnicas de demolición seleccionadas en BIM4DW

Habiendo finalizado el modelado se ha procedido a seleccionar las técnicas de demolición selectiva a emplear. Como se ha explicado en el apartado *Técnicas de demolición selectiva*, la manera en la que se lleve a cabo la deconstrucción determina las corrientes de residuo que son generadas. Esta tarea se realiza también a través de la herramienta BIM4DW. Primeramente, se deben agrupar los elementos en función de la forma en la que van a ser procesados. Los grupos generados para el caso de estudio son los siguientes: “puertas”, “ventanas”, “paredes de madera aglomerada”, “muros interiores”, “muros exteriores (no reforzados)”, “forjados” y “muros reforzados y pilares”.

Es cierto que las corrientes generadas no solo dependen de la modalidad de demolición llevada a cabo, sino de la segregación *‘in situ’*, en caso de que se practique. La herramienta de modelado contempla estas casuísticas por lo que permite modificar las corrientes que pueden ser generadas a partir de cada grupo. Esto se realiza en la pestaña *corrientes*, apartado *residuos disponibles* sección derecha de la Ilustración 17.

Las técnicas de demolición selectiva seleccionadas para cada grupo definido y los consiguientes flujos que son generados en cada uno de ellos son los siguientes:

El procedimiento elegido para la retirada de los grupos de “ventanas”, “puertas” y “paredes de madera aglomerada” ha sido el desmontaje. Siendo los materiales que componen estos elementos de fácil reciclabilidad, practicando el desmontaje adecuado se favorece una adecuada segregación de estos. Así, las fracciones obtenidas de estos tres grupos serían las siguientes (sus códigos entre paréntesis): Madera (17 02 01), Aluminio (17 04 02), Metales mezclados (17 04 07) y vidrio (17 02 02) procedentes de las puertas; Aluminio (17 04 02), vidrio (17 02 02) y metales mezclados (17 04 07) de las ventanas; Y madera (17 02 01) y aluminio (17 04 02) derivados de las paredes de paneles aglomerados de madera.

En cuanto al grupo de elementos “muros interiores”, está compuesto por los muros de Fábrica de ladrillo no estructural revestidos o no con baldosas, mortero de cemento o yeso. Por supuesto, de este grupo se excluyen los muros de carga o reforzados, los muros de fachada y las ya mencionadas paredes de madera aglomerada. Los muros pertenecientes a este grupo de elementos no contienen materiales de aislamiento que pudiesen ser susceptibles de separar de la fracción pétreo. Por lo tanto, el método seleccionado para la retirada de este grupo de elementos es la demolición. De esta forma, la fracción obtenida será Residuos mezclados de construcción y demolición (17 09 04). Esta contendrá mayoritariamente ladrillos, baldosas mortero de cemento y yeso.

Respecto al grupo “Muros exteriores”, este agrupa las fachadas no estructurales, los muros de hormigón reforzado quedan fuera de esta agrupación. Tal y como se aprecia en la Ilustración 22, estos muros están compuestos por materiales diversos como acero, materiales aislantes (EPS y lana mineral) y materiales cerámicos como ladrillo, bloques de hormigón y mortero de cemento. Tratándose de la fachada exterior y estando esta compuesta de distintos tipos de materiales, es factible la segregación de manera que se obtengan las siguientes fracciones: Acero (17 04 05) procedente de la chapa metálica externa. Materiales de aislamiento (17 06 04) a partir de la lana mineral y EPS. Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos sin sustancias peligrosas (17 01 07) derivado de los bloques de hormigón, ladrillos y revestimiento de mortero

de cemento, elementos que serán demolidos una vez separados los materiales aislantes y la chapa metálica.

Finalmente, los forjados, muros reforzados y pilares generarán las siguientes fracciones: fracciones de hormigón (17 01 01) y acero (17 04 05) en el caso de la demolición de los muros reforzados, los pilares y el forjado de losa de hormigón reforzado de la planta baja. Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos sin sustancias peligrosas (17 01 07) y acero (17 04 05) procedentes de la demolición del resto de forjados y cubierta del edificio.

Como se aprecia en los párrafos superiores, la reutilización de materiales no ha adquirido ninguna relevancia. Ya se explicaba en el apartado Demolición y Circularidad al inicio del documento, no siempre es factible la reutilización de los elementos. Incluso en casos en los que esta resultara factible por encontrarse los componentes en buen estado, las nuevas normativas pueden hacer que dichos elementos no sean reutilizables en nuevas edificaciones o remodelaciones. En el presente caso de estudio, la mejor elección no pasaba por reutilizar alguno de los elementos presentes en la edificación.

2.2. Cálculos y análisis de resultados

En este apartado se van a presentar los distintos cálculos o comprobaciones llevadas a cabo en el desarrollo del trabajo. Resumiendo, son los siguientes: comprobación de la precisión del scanner, generación de elementos en bases de datos, estimación de RCD mediante EEH Aurrezten, estimación de RCD mediante BIM4DW y la comparación de los resultados de los dos últimos.

2.2.1. Precisión del Scanner

A la hora de realizar el escaneo de una estancia se ha detectado que, dependiendo de su disposición o del recorrido seguido a la hora de escanear, pueden surgir fallos en la generación del plano. Los errores detectados han sido del estilo de paredes no coincidentes o pérdidas de paralelismo.

Tal y como se informa en la hoja del fabricante del escáner FARO Scanplan [34], la precisión en las mediciones menores a 3 m es de alrededor de 30 mm y en mediciones mayores a 3 m es menor del 1,5 %. Aunque, tal y como se aclara en el mismo documento, esto se cumple en condiciones específicas: superficies reflectantes de paredes cubiertas de papel blanco Kent. Dicho documento también aclara que: *'la precisión global depende de la eficacia del algoritmo de registro, la cual puede ser afectada por la geometría de los datos capturados. Los caminos largos sin cierres de ciclo, los pasos de cruce y diversas condiciones, tales como túneles estrechos y escaleras, que pueden disminuir la precisión.'*

En definitiva, estos errores de precisión pueden afectar a las dimensiones del plano y, por consiguiente, a la estimación de RCD generados. Ciertamente es que este tipo de fallos no es complicado detectarlos a simple vista tras la optimización del plano. Por lo tanto, son sencillos de solucionar repitiendo el escaneo. Aun así, se ha decidido realizar una comprobación de la precisión de las dimensiones en planos, aparentemente correctos, con el fin de asegurar que no se comenten fallos dimensionales que puedan afectar a la estimación de la cantidad de RCD.

Dicho lo anterior, se han realizado dos escaneos en zonas posiblemente conflictivas al generar los planos; pasillos estrechos, zonas alargadas, cierres de ciclo... La primera ha sido una zona con estancias a modo de isla Ilustración 24: Imagen obtenida del escaneo de la estancia a modo de isla rodeada por pasillo. El trazo continuo gris marca el pasillo. Ilustración 24 y la segunda una estancia amplia y alargada con dimensiones de hasta 40 m Ilustración 25. A primera vista, los

planos parecen correctos en cuanto a la forma general de la estancia, rectitud y paralelismo de las paredes.

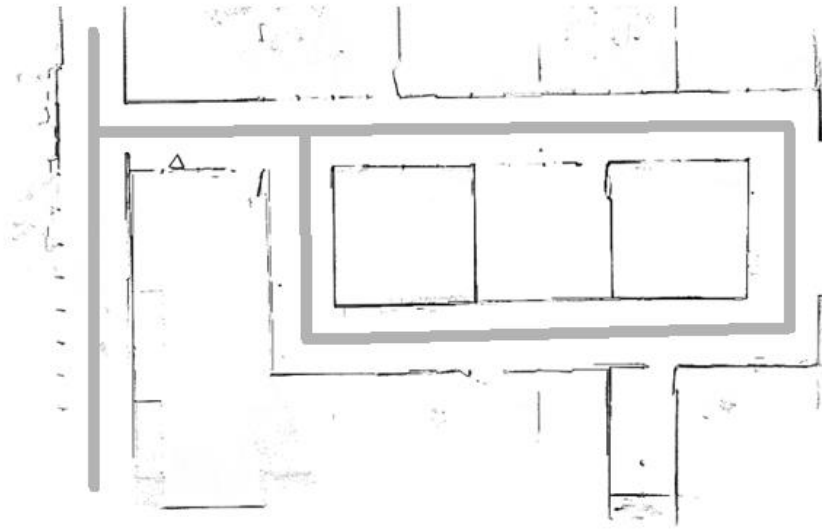


Ilustración 24: Imagen obtenida del escaneo de la estancia a modo de isla rodeada por pasillo. El trazo continuo gris marca el pasillo.

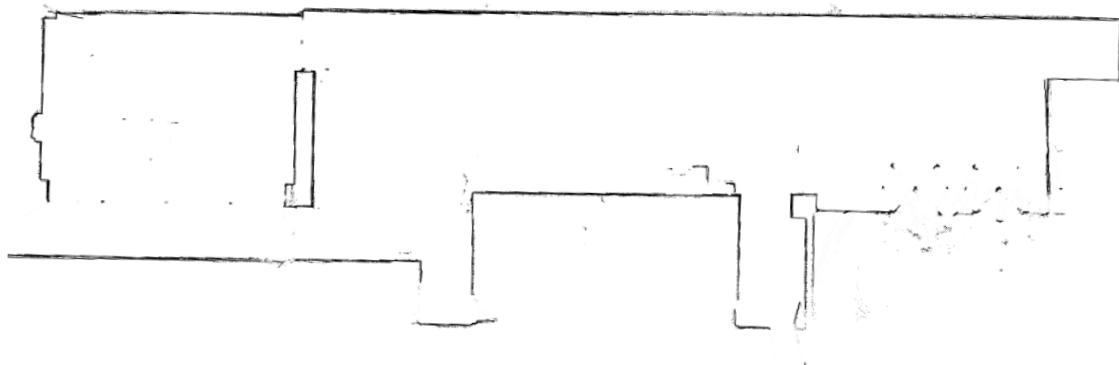


Ilustración 25: Imagen obtenida del escaneo de la estancia de dimensiones aproximadas 40 m x 8 m.

Para la comprobación de las dimensiones, se han chequeado las cotas de los planos obtenidos a través del escaneo (utilizando la herramienta BIM4DW) frente a las cotas reales tomadas con un medidor láser HILTI PD42 [36]. Medidor que cuenta con una precisión de 1 mm, una mínima distancia de medición 0,05 m y una máxima distancia de medición 200 m. Umbrales más que suficientes para la tarea requerida.

Se han ejecutado medidas en 9 cotas en el primero de los planos (estancia 1) y 8 en el segundo (estancia 2). Las diferentes cotas se han tomado en direcciones horizontales y verticales con el objetivo de detectar posibles fallos de precisión. El promedio de tres mediciones tomadas mediante el medidor láser, en cada uno de los distintos puntos seleccionados, se ha asumido como la dimensión real de cada cota. Hecho lo cual, se han medido los mismos puntos en el plano generado mediante la aplicación BIM4DW y se ha calculado el error de dicha longitud respecto de la real captada mediante el láser HILTI.

Los resultados se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y, en la columna ERROR (%), se aprecia cómo son escasos los valores de error que superan el 1.5 %, indicado por el fabricante, destacados en rojo. Sumado lo anterior a que los escaneos han sido realizados en condiciones reales y, además, teniendo en cuenta que la geometría global del escaneo puede verse afectada por la reflectividad de las superficies y las condiciones geométricas de las estancias, se consideran valores de error admisibles. Esto es, las dimensiones de la geometría obtenida mediante escaneo son correctas y no aportarán desviaciones

ESTANCIA 1					ESTANCIA 2				
		Dim. real (m)	Dim. BIM4DW (m)	ERROR (%)			Dim. real (m)	Dim. BIM4DW (m)	ERROR (%)
COTAS	1	24,040	24,047	0,03	COTAS	1	40,633	40,770	0,34
	2	19,186	18,988	1,03		2	27,669	27,673	0,02
	3	9,490	9,511	0,22		3	11,721	11,751	0,25
	4	9,540	9,549	0,09		4	9,345	9,480	1,44
	5	2,352	2,398	1,94		5	8,881	8,958	0,87
	6	2,354	2,376	0,92		6	1,971	2,003	1,61
	7	2,283	2,460	7,74		7	5,984	6,114	2,17
	8	2,266	2,336	3,07		8	2,294	2,273	0,90
	9	2,308	2,368	2,60					

Tabla 3: Comparación de dimensiones reales vs obtenidas en estancias 1 y 2.

significativas al cálculo de RCD.

2.2.2. BBDD edición y generación de elementos

Como se comentaba en apartados previos, las bases de datos que han sido utilizadas para el presente TFM tienen su origen en el proyecto HISER. Para este trabajo se han revisado, adaptado y corregido errores de cálculo de masa y volumen de RCD.

Tras haber analizado el edificio del caso de estudio, con la ayuda de profesionales en trabajos de demolición, se concluye que ha de ponerse el foco en los elementos o partes de la edificación que mayor montante de RCD generan: forjados, muros y paredes. Es decir, las BBDD deberían contemplar de forma adecuada los elementos que mayor cantidad de RCD generarían, pues grandes imprecisiones en estos elementos generarían desviaciones significativas en el cálculo de cantidades. Sin embargo, imprecisiones en elementos como puertas y ventanas son más asumibles debido a su menor peso relativo sobre la cantidad total de residuos.

Analizando los elementos existentes en las BBDD se ha detectado la necesidad de añadir líneas de elementos con el fin de cubrir algunos componentes del caso de estudio. Concretamente, nos referimos a los correspondientes a los forjados y a parte de los muros exteriores. Seguidamente se muestra el cálculo realizado para la estimación de RCD en la demolición de los elementos mencionados. El procedimiento es un simple cálculo de volumen (ya sea neto o aparente) de cada tipo de material existente en el elemento, y el posterior cálculo de la masa de cada uno de ellos multiplicando este valor por su densidad correspondiente (real o aparente).

Los forjados que no quedaban correctamente contemplados en las BBDD son los descritos en el apartado *Forjados* del presente documento (Ilustración 21). Para definir el forjado y el cálculo de materiales en la BBDD se ha simplificado el elemento de acuerdo con la forma en la que será demolido y, por consiguiente, a las corrientes de residuos que generará. Siendo un forjado, se

retirárase mediante demolición, por lo tanto, tal y como queda aclarado en el apartado 2.1.4, las siguientes corrientes serán generadas: acero (17 04 05 – Hierro y acero) y fracción pétreo (17 01 07 - Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos distintas de las especificadas en el código 17 01 06). Dicho de otro modo, para el análisis de la estimación de RCD se han diferenciado dos cálculos: el relativo al volumen y masa del acero y el relativo al volumen y masa de la fracción pétreo.

PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA FORJADOS		
Parámetro	Definición	Valor
a	Área (m ²)	<i>Del modelo</i>
y	Largo del forjado (m)	<i>Inspección</i>
b	Ancho del forjado (m)	<i>Inspección</i>
c	Distancia entre vigas metálicas (m) (Dispuestas a lo ancho del forjado)	<i>Inspección</i>
d	Ancho de las vigas metálicas (cm)	<i>Inspección</i>
e	Espesor de las vigas metálicas (cm)	<i>Inspección</i>
f	Distancia entre semi-viguetas (m) (Dispuestas a lo largo del largo del forjado)	<i>Inspección</i>
g	Ancho de semi-viguetas (cm)	<i>Inspección</i>
i	Espesor de semi-viguetas (cm)	<i>Inspección</i>
j	% en vol. De acero en viguetas metálicas.	3,42
k	espesor capas hormigón y cerámicos (cm)	<i>Inspección</i>
k	Densidad del hormigón (kg/m ³)	2300
m	Densidad del acero (kg/m ³)	7850
n	Densidad bruta de bovedillas cerámicas (kg/m ³)	1220

Tabla 4: Parámetros de cálculo para forjados. BBDD.

Para el cálculo del acero se ha contabilizado el presente en las vigas metálicas de perfil IPN y en el forjado de las semi-viguetas, este último como un porcentaje en volumen del total de las semi-viguetas (Tabla 4). De esta forma, mediante los datos geométricos obtenidos a través del escaneo, así como de los introducidos por el usuario a la hora de realizar la clasificación de los elementos (Tabla 4) en la herramienta BIM4DW, se calculan el volumen y masa existentes.

El procedimiento para el cálculo de la fracción pétreo es similar. En este caso se cuenta también con los datos de las densidades de los distintos materiales; densidad aparente de las bovedillas en función de su tamaño y densidad del resto de la fracción pétreo.

Los datos que se muestran en la Tabla 4, tal y como se aprecia en la columna ‘Valor’, pueden ser adquiridos automáticamente *del modelo*, introducidos por la persona encargada de realizar el modelado (*inspección*) o pueden estar predefinidos en la base de datos. Todos estos datos son editables por el usuario en la propia herramienta, cuestión nada recomendable, a no ser que se disponga de los datos exactos. Editarlos no es necesario ya que los valores predefinidos en la base de datos (densidad de materiales...) proceden de fuentes fiables: CTE, prontuarios o catálogos de los elementos constructivos.

En cuanto a los muros exteriores, de la misma manera, para definirlos en las BBDD se ha tenido en cuenta el método por el cual pueden ser retirados. En este caso, tratándose de fábrica no estructural y conteniendo distintos tipos de materiales (cerámicos, aislantes, metales), pueden ser desmantelados y segregados; razón por la cual debe mantenerse la información de cada componente sin realizar simplificaciones, de modo tal que se han calculado volúmenes y masa correspondiente a cada material constituyente de los muros exteriores: acero, lana de roca, hormigón, EPS, ladrillos y mortero de cemento. Por lo tanto, mediante los datos geométricos y las densidades de cada material (Tabla 5) se han calculado los volúmenes y masas de todos ellos.

PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA MUROS EXTERIORES		
Parámetro	Definición	Valor
a	Área (m ²)	<i>Del modelo</i>
c	Espesor total capas de bloques de hormigón (cm)	<i>Inspección</i>
d	Espesor total capas de ladrillo (cm)	<i>Inspección</i>
e	Espesor total capas de mortero de cemento (cm)	<i>Inspección</i>
f	Espesor del aislante de EPS (cm)	<i>Inspección</i>
g	Espesor del aislante de lana mineral (cm)	<i>Inspección</i>
h	Espesor total de la lámina metálica corrugada (mm)	<i>Inspección</i>
i	Densidad bruta del ladrillo de hormigón (kg/m ³)	875
j	Densidad bruta del ladrillo (kg/m ³)	950
k	Densidad del mortero de cemento (kg/m ³)	2100
l	Densidad de EPS (kg/m ³)	30
m	Densidad de la lana mineral (kg/m ³)	112
n	Masa de la chapa metálica (kg/m ²)	7,9

Tabla 5: Parámetros de cálculo para muros exteriores. BBDD.

Este es el procedimiento seguido a la hora de plasmar los elementos en la BBDD. De igual manera se ha creado el elemento para la cubierta del edificio y paredes de paneles aglomerados de madera, entre otros.

2.2.3. Estimación de RCD mediante EEH Aurrezten

Para realizar la estimación mediante la herramienta EEH Aurrezten, siguiendo su manual básico [37], es necesario introducir una serie de datos. Sobre el emplazamiento de la obra, el único dato que es imprescindible es el de la superficie construida, ver Tabla 6.

Respecto a la tipología de la obra, la información que es necesario incorporar es la siguiente: tipo de actuación (construcción, demolición, reforma o urbanización), uso (industrial, residencial o viales) y tipo de estructura (obra de fábrica, hormigón, metal o mixta).

Los datos introducidos para la estimación de RCD en el caso de estudio son los mostrados en la Tabla 6:

Superficie de la parcela (m ²)	245.2
Superficie total construida (m ²)	745.2
Tipo de actuación	Demolición
Uso	Industrial
Tipo de estructura	Mixta
N.º de plantas	4
N.º de sótanos	0

Tabla 6: Datos generales de la obra.

Tras la introducción de datos, la propia herramienta realiza la previsión de generación de RCD aplicando las correspondientes ratios, según se muestra en la Tabla 7.

LER	Material	Agrupación	Masa generada (t)	Vol. generado (m ³)
170101	Hormigón	Áridos	227,34	136,40
170103	Cerámicos	Áridos	138,11	138,11
170201	Madera	Madera	27,35	75,13
170202	Vidrio	Residuos no peligrosos	3,42	2,05
170203	Plásticos	Residuos no peligrosos	27,35	32,98
170302	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla<10%	Residuos no peligrosos	19,14	22,09
170407	Metales mezclados	Metales	157,26	157,26
170504	Tierra y rocas no contaminadas	Áridos	39,31	28,52
170802	Materiales de construcción a base de yeso	Residuos no peligrosos	6,84	11,72
170903	Otros residuos peligrosos	Residuos peligrosos	17,09	51,28
170904	Residuos mezclados de construcción y demolición	Residuos no peligrosos	17,09	20,51
200301	Basuras generadas por los operarios y basuras abandonadas en edificios a demoler	Residuos no peligrosos	3,42	5,70
Total			683,72	681,75

Tabla 7: Resultados de la estimación de la cantidad de RCD realizada con la herramienta EEH Aurrezten.

Previo a analizar los resultados es importante tener en cuenta, tal y como la propia herramienta EEH Aurrezten indica, que los resultados mostrados no son definitivos, pues son obtenidos a partir de una estimación realizada mediante ratios de generación de RCD.

En un breve análisis de los resultados de la estimación realizada mediante EEH Aurrezten se puede apreciar que, siendo un edificio de estructura mixta de hormigón y metal, parece lógico que las fracciones de 170101-Hormigón, 170103-Cerámicos y 170407-Metales mezclados sean las mayoritarias. Esta metodología realiza una estimación bastante genérica teniendo en cuenta incluso las basuras generadas por los operarios y las basuras abandonadas en edificios a demoler (20 03 01- Mezcla de residuos municipales).

Esta herramienta de estimación de generación de RCD en obras de demolición que proporciona Ihobe, no presenta la posibilidad de realizar segregaciones para agrupar de distintas formas las corrientes que se pudieran generar de la demolición del edificio.

2.2.4. Cálculo de RCD mediante BIM4DW

Tal y como se ha aclarado en apartados previos, una vez realizado el modelado e inventariado de los elementos y materiales del edificio, la herramienta muestra el resumen del inventario de manera bruta, esto es, los residuos se muestran separados según su código LER. En la Ilustración 26 se muestra el resumen de inventario del caso de estudio empleado. En las diferentes columnas se aprecian código y nombre de cada residuo, así como la cantidad de elementos que lo contienen, su masa y volumen.

Código	Nombre	Cantidad	Peso (T)	Volumen (M3)
17 01 01	concrete	165	599.126	281.529
17 08 02	gypsum plaster	81	2.760	1.380
17 04 05	steel	71	78.863	27.059
17 02 01	wood	69	1.791	3.150
17 02 02	glass	39	0.992	0.399
17 04 07	metals	44	0.503	0.061
17 01 02	bricks	61	37.213	39.168
17 06 04	EPS	41	0.194	6.471
17 05 04	mineral wool	21	1.450	12.945
17 04 02	Aluminium	54	10.442	3.974
17 01 07	mixture concrete and ceramics	4	534.248	299.513

Ilustración 26: Captura del resumen de inventario del caso de estudio.

Tras el diseño de la demolición selectiva según lo expuesto en el apartado Técnicas de demolición seleccionadas en BIM4DW, los flujos de residuos resultantes son los mostrados en la Tabla 8.

LER	Nombre	Agrupación	Masa (t)	Volumen (m³)
17 01 01	Hormigón	Áridos	339,605	147,984
17 01 07	Mezcla de hormigón y cerámicos	Áridos	797,012	441,691
17 02 01	Madera	Madera	1,791	3,15
17 02 02	Vidrio	Residuos no peligrosos	0,992	0,399
17 04 07	Metales mezclados	Metales	0,776	3,974
17 04 05	Acero	Metales	78,59	26,969
17 04 02	Aluminio	Metales	10,442	0,151
17 06 04	EPS y lana mineral	Residuos no peligrosos	1,644	19,416
17 09 04	Mezcla de RCD	Residuos no peligrosos	36,76	31,915
Total			1267,61	675,649

Tabla 8: Cantidades de RCD obtenidos mediante el cálculo realizado en BIM4DW.

En un primer vistazo a la tabla superior, es de destacar la gran cantidad de Áridos que se obtienen, concretamente la fracción 17 01 07 - Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos sin sustancias peligrosas, con una masa de 800 toneladas aproximadamente. La fracción de hormigón – 17 01 01 es también bastante significativa con 340 toneladas.

2.2.5. Comparación EEH Aurrezten vs BIM4DW y análisis

En este subapartado se procede con la comparación de los datos obtenidos a través de la herramienta de estimación de RCD generados en obras de demolición EEH Aurrezten y el cálculo realizado a través de la aplicación web BIM4DW. Como se aclaraba con anterioridad, los datos que van a ser comparados son los relativos a la masa (en toneladas) de los residuos,

Después de enfrentar los datos en la misma tabla (Tabla 9), primeramente, se comparan las diferentes corrientes de residuos que surgen o no de cada estimación. Seguido se equiparan las diferencias porcentuales en las distintas agrupaciones (Tabla 10), y finalmente se comparan las distintas fracciones de forma relativa respecto al total de los RCD.

2.2.5.1. Corrientes existentes

De lo más destacable sobre la Tabla 9 en un primer vistazo, es que las dos estimaciones no coinciden en los tipos de RCD generados. En la agrupación de áridos (17 01 y 17 05) la estimación realizada mediante EEH Aurrezten distingue entre las fracciones de hormigón, cerámicos y tierra y rocas no contaminadas, mientras que no contempla la fracción de mezcla de hormigón y cerámicos. La estimación realizada mediante BIM4DW en cambio, aúna los áridos en las fracciones de hormigón y mezcla de hormigón y cerámicos. Esto se debe a que en BIM4DW no se ha contemplado la completa segregación del hormigón y los cerámicos (procedente de la demolición de los forjados), ni la generación de residuos de tierra y rocas no contaminadas (17 05 04).

		Estimación EEH Aurrezten	Cálculo BIM4DW
LER	Material	Masa (t)	Masa (t)
170101	Hormigón	227,34	339,61
170103	Cerámicos	138,11	
170107	Mezcla de hormigón y cerámicos		797,01
170504	Tierra y rocas no contaminadas	39,31	
170201	Madera	27,35	1,79
170202	Vidrio	3,42	0,99
170203	Plásticos	27,35	
170302	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla<10%	19,14	
170407	Metales mezclados	157,26	0,78
170405	Acero		78,59
170402	Aluminio		10,44
170604	EPS y lana mineral		1,644
170802	Materiales de construcción a base de yeso	6,84	
170903	Otros residuos peligrosos	17,09	
170904	Residuos mezclados de construcción y demolición	17,09	36,76
200301	Basuras generadas por los operarios y basuras abandonadas en edificios a demoler	3,42	
Total		683,72	1267,61

Tabla 9: Resultados de la estimación realizada mediante EEH Aurrezten y el cálculo realizado mediante BIM4DW.

Siguiendo con las fracciones que EEH Aurrezten sí prevé y BIM4DW no, se encuentra la fracción de plásticos (17 02 03). Esto se debe a que los elementos añadidos en la fase de modelado del edificio no contienen plásticos. Como se aclaraba en el último párrafo del apartado Edición BBDD y modelado en BIM4DW, debido a que la aplicación se encuentra aún en fase de desarrollo, no se han modelado los elementos (que pueden contener plásticos) pertenecientes a las instalaciones de calefacción, iluminación, cableado, muebles, elementos industriales y falsos techos. Esta fracción que no existe en la estimación mediante BIM4DW, no supone una fracción significativa del total de RCD, ya que las 27,35 toneladas de plástico que se estiman mediante EEH Aurrezten, suponen un 4 % en masa del total estimado (Tabla 11) por la herramienta del gobierno vasco. Aun así, es una pequeña deficiencia que BIM4DW no contemple los elementos mencionados.

Algo similar ocurre con la fracción 17 03 02 - Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla<10%. En el modelado del caso de estudio en BIM4DW, no se han añadido elementos que puedan contener dicha fracción, aunque, *a priori*, no se contempla como deficiencia de BIM4DW, ya que en el edificio del caso de estudio no se encontraban suelos alquitranados que pudiesen contribuir a esta fracción. Además, en la estimación, dicha fracción consta de 19.14 toneladas, suponiendo solo un 2,8 % del total de RCD estimados (Tabla 11). Es normal que la estimación de EEH Aurrezten, que utiliza ratios de generación de RCD de forma genérica, estime fracciones de materiales que no se encontraban en el edificio a demoler.

En cuanto a la fracción de metales - 17 04, en la Tabla 9 se aprecia que la herramienta EEH Aurrezten no contempla separación alguna de estos, por lo que los unifica en la fracción 17 04 07 – Metales mezclados. En cambio, mediante la segregación diseñada en BIM4DW se observa que se generan fracciones correspondientes a 17 04 07 – Metales mezclados, 17 04 05 – Acero y 17 04 02 – Aluminio. Parecido ocurre con la fracción 17 06 04 – Materiales de aislamiento, que solo aparece en el cálculo realizado en la aplicación, la herramienta del Gobierno Vasco seguramente contemple esta fracción junto con los residuos mezclados de construcción y demolición (17 09 04).

Al igual que con la fracción 17 03 02 - Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla < 10%, con la fracción 17 08 02 – Materiales de construcción a partir del yeso, ocurre lo mismo. En la inspección del edificio no se han detectado elementos que contengan yeso, por lo que a la hora de modelar no se han añadido, es normal entonces que la cantidad calculada en BIM4DW para esta fracción sea nula. Además, dicha fracción de 6,84 toneladas solo supone el 1% del total de RCD estimados (Tabla 11).

Respecto a la fracción de residuos peligrosos o 17 09 03 - Otros RCD mezclados que contengan sustancias peligrosas, ocurre lo mismo. A la hora de realizar la inspección del edificio no se han detectado residuos peligrosos por lo que no se calculan residuos para esta fracción. A pesar de que esta fracción solo suponga un 2,5 % en masa del total estimado por EEH Aurrezten (Tabla 11), tratándose de residuos peligrosos no, puede obviarse y es por lo que su detección en la inspección del edificio es imperativa.

La última fracción mostrada en la Tabla 9 (20 03 01 – Mezclas de residuos municipales), corresponde a las basuras generadas por los operarios y basuras abandonadas en edificios a demoler. Esta fracción queda fuera del alcance del cálculo que realiza BIM4DW ya que es una fracción que solo es posible obtener su cantidad mediante estimación. Con 3,42 toneladas, supone una fracción ínfima, 0,5 % del total de los RCD estimados (Tabla 11).

2.2.5.2. Comparación por agrupaciones

En la próxima tabla (Tabla 10), se equiparan las corrientes o fracciones obtenidas como se ha hecho en la Tabla 9, pero esta vez las fracciones de áridos y de metales se muestran agrupadas (sumando sus valores) para facilitar la comparación. También, se ocultan las filas que por parte de EEH Aurrezten o BIM4DW no muestran resultados, el análisis de estas fracciones ya se ha realizado en los párrafos anteriores. En la última columna se muestran las diferencias porcentuales del cálculo realizado en BIM4DW respecto a los valores obtenidos en EEH Aurrezten. Cabe recalcar, que grandes diferencias porcentuales (positivas o negativas) no tienen por qué denotar errores en el cálculo, ya que los datos se están comparando con los de la estimación que se realiza a través de la herramienta que ofrece lhobe.

		EEH Aurrezten		BIM4DW	
LER	Material	Agrupación	Masa (t)	Masa (t)	Diferencia (%)
170101	Hormigón	Áridos, fracción pétreo no inerte	404,76	1136,62	180,81
170103	Cerámicos				
170107	Mezcla de hormigón y cerámicos				
170504	Tierra y rocas no contaminadas				
170201	Madera	Madera	27,35	1,79	-93,45
170202	Vidrio	Residuos no peligrosos	3,42	0,99	-70,99
170407	Metales mezclados	Metales	157,26	89,81	-42,89
170405	Acero				
170402	Aluminio				
170904	Residuos mezclados de construcción y demolición	Residuos no peligrosos	17,09	36,76	115,10
Total			683,72	1267,61	85,4

Tabla 10: Resultados y diferencia porcentual agrupando áridos y metales.

Comenzando esta vez el análisis por la última fila de la Tabla 10, los valores totales, la estimación mediante la aplicación de Ihobe, EEH Aurrezten, alcanza un total de 683,72 toneladas de RCD y el cálculo realizado a través de BIM4DW llega a 1.267,61 toneladas. En términos relativos, el valor obtenido de BIM4DW es porcentualmente un 84,4 % superior que el de su homólogo de EEH Aurrezten. Esto no indica que el cálculo realizado sea incorrecto, ya que, recordando lo ya expresado con anterioridad, EEH Aurrezten se basa en ratios de generación y BIM4DW en cálculos de las cantidades reales de material que contienen los elementos.

Para continuar con la comparación, en términos relativos, de las agrupaciones dispuestas en la Tabla 10, se analiza la agrupación de áridos, fracción pétreo no inerte. El valor obtenido a través de BIM4DW es un 180,81 % superior que el de su par de EEH Aurrezten. Esta diferencia, que parece desorbitada, proviene mayoritariamente de la fracción 17 01 07 – Mezcla de hormigón y cerámicos (Tabla 9) que aporta 797 toneladas a la fracción de áridos. Esta corriente tiene su origen en el grupo de elementos “forjados”, compuesta por la cubierta y los forjados de la edificación. Aunque la diferencia que tiene esta fracción con la estimada mediante la herramienta EEH Aurrezten parece exagerada, sería necesaria una comparación con los datos reales para concluir si es una desviación relevante o no.

Prosiguiendo con el análisis de la Tabla 10, las agrupaciones de madera y vidrio tienen una diferencia porcentual negativa del 93 % y 71 % respectivamente. En el caso de la madera, esta diferencia parece desmesurada ya que, en términos absolutos, suponen 25 toneladas de material. Esto puede deberse, en una parte, a que las puertas de madera del interior del edificio ya se habían retirado antes del momento del escaneo. Por lo tanto, los pasos de una estancia a otra se han modelado como “marco sin puerta” con la intención de no contabilizar material (madera) que no se encontraba en la edificación.

Respecto a la corriente de metales, la diferencia es de -42,89 %. Esta disimilitud, en parte, puede ser debida a que, para el cálculo en BIM4DW, no se han contemplado los elementos pertenecientes a las instalaciones de calefacción, iluminación, cableado, muebles, maquinaria o elementos industriales y falsos techos. Estos elementos están compuestos por materiales metálicos, entre otros, por lo que se presupone que habrían aportado material a esta fracción.

Por último, sobre los residuos mezclados de construcción y demolición, al tratarse de una fracción mezcla, no se puede deducir mucho, ya que el origen de los materiales que terminan en esa fracción pueden ser diversos. Además, 17,09 toneladas sobre las 683,72 toneladas del total de RCD estimados solo suponen un 2,5 % del total.

Para un mejor análisis de los resultados, a continuación, se examina la parte porcentual que supone cada corriente respecto a su total. Para ello se cuenta con la Tabla 11 y la Ilustración 27 e Ilustración 28 que grafican los datos de dicha tabla. Las comparaciones, de esta manera, adquieren mayor sentido debido a que se comparan los valores relativos de las corrientes de residuos respecto al montante total de cada método. De esta manera, se presupone cierta fiabilidad a la estimación realizada mediante EEH Aurrezten.

LER	Material	EEH Aurrezten		BIM4DW	
		Masa(t)	% del total	Masa(t)	% del total
170101	Hormigón	404,76	59,2	1136,6 2	89,67
170103	Cerámicos				
170107	Mezcla de hormigón y cerámicos				
170504	Tierra y rocas no contaminadas				
170201	Madera	27,35	4	1,79	0,14
170202	Vidrio	3,42	0,5	0,99	0,08
170203	Plásticos	27,35	4		
170302	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla<10%	19,14	2,8		
170407	Metales mezclados	157,26	23	89,81	7,08
170405	Acero				
170402	Aluminio				
170604	EPS y lana mineral			1,644	0,13
170802	Materiales de construcción a base de yeso	6,84	1		
170903	Otros residuos peligrosos	17,09	2,5		
170904	Residuos mezclados de construcción y demolición	17,09	2,5	36,76	2,9
200301	Basuras generadas por los operarios y basuras abandonadas en edificios a demoler	3,42	0,5		
Total		683,72	100	1267,6 1	100

Tabla 11: Resultados en % de cada fracción sobre su total.

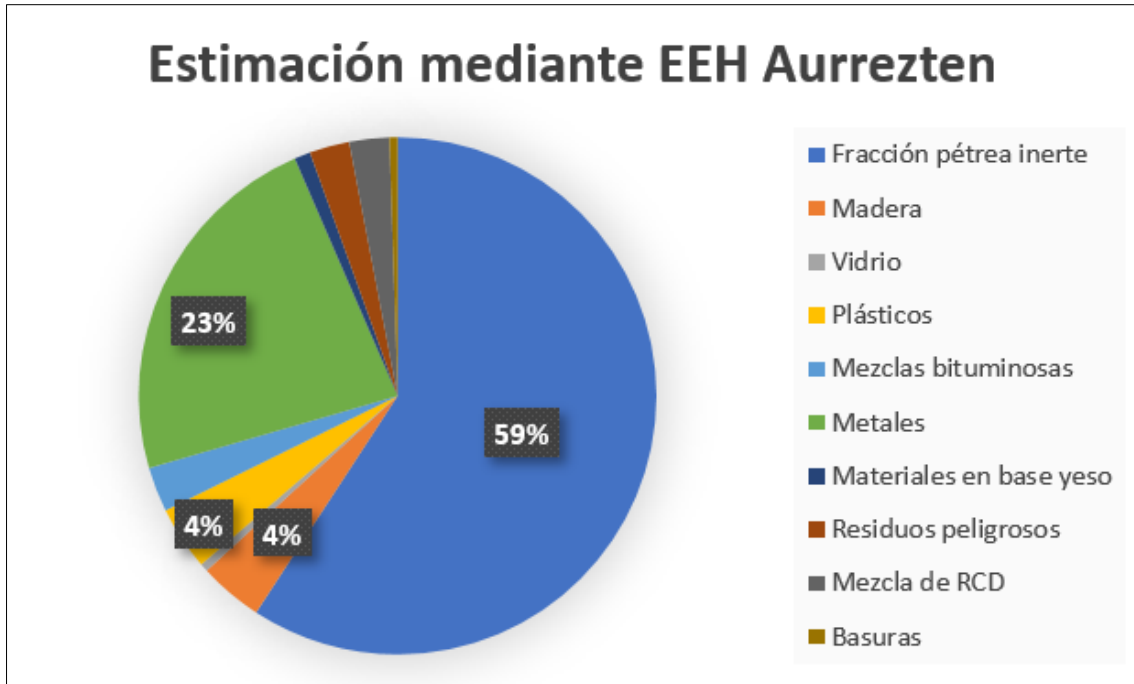


Ilustración 27: Estimación mediante EEH Aurrezten. Datos presentados en porcentaje sobre el total de la estimación.

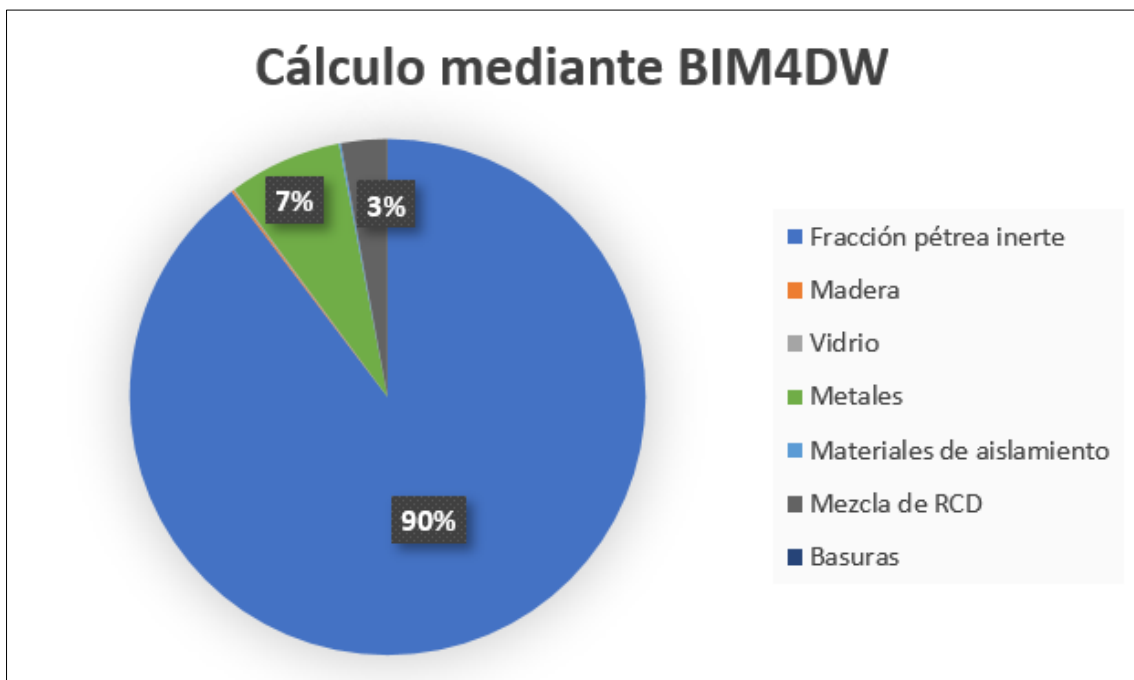


Ilustración 28: Cálculo mediante BIM4DW. Datos presentados en porcentaje sobre el total de la estimación.

En un primer vistazo a los dos gráficos, queda claro que el cálculo realizado mediante BIM4DW muestra un porcentaje excesivo de la fracción pétreo. El 90 % de los residuos calculados pertenecen a esta fracción, mientras que la estimación de la herramienta de Ihobe prevé un 60 %. En ambos métodos es la corriente que mayor masa aporta al montante de RCD, en este sentido el cálculo de BIM4DW es coherente ya que, es lo que cabe esperar en una demolición, que la fracción pétreo inerte sea la predominante. Que el porcentaje del montante de fracción pétreo inerte sea tan superior al de la estimación de la herramienta del Gobierno Vasco, significa que, o bien el cálculo se excede en dicha fracción, o se queda corto en el resto de las fracciones.

Analizando los datos absolutos podría decirse que el cálculo mediante BIM4DW se pasa en esta fracción.

La segunda corriente más cuantiosa coincide también en ambos métodos, esta es la de materiales metálicos. Pero esta vez sucede lo contrario, esto es, EEH Aurrezten estima que los metales supondrán un 23 % del total de RCD y BIM4DW en cambio, calcula un 7 %. Por una parte, el cálculo es correcto ya que, tratándose de una estructura mixta de hormigón y acero, lo habitual es que la segunda corriente mayoritaria sea la de los materiales metálicos. Por otra parte, un porcentaje del 7 % puede indicar déficit en el cálculo de metales. Como ya se analizaba en párrafos anteriores, se puede deber a que no se han contemplado los elementos pertenecientes a las instalaciones de calefacción, iluminación, cableado, muebles, maquinaria o elementos industriales y falsos techos.

Como se aprecia en los gráficos, a partir de la segunda corriente más cuantiosa, se acentúan las diferencias entre la estimación y el cálculo. En la estimación se encuentra la fracción de plásticos y madera con un 4 % del total cada una, mientras que el cálculo de BIM4DW devuelve un 3% para la fracción de mezcla de RCD.

3. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo a cerca de las tecnologías disponibles para la captación de la realidad y digitalización de la información. Todo ello enfocado al sector de la construcción, centrándose en trabajos de demolición. Tras el estudio de las opciones existentes: las disponibles para la digitalización y captura de realidad y geometría, y las diferentes formas que existen para la creación del modelo del edificio, queda claro que el abanico de opciones presente es muy amplio. Con esto se concluye que, la solución por la que se ha optado para el desarrollo del presente trabajo no es la única opción que puede resolver el asunto planteado.

A estas alturas, es imprescindible resaltar que el presente trabajo ofrece la primera aplicación de esta solución a un caso real. Esta pionera práctica, no solo ha servido para evaluar la eficacia y utilidad de la digitalización de la demolición selectiva calculando la cantidad de residuos que se van a generar en un trabajo de demolición, sino que, en el propio proceso descrito, se ha obtenido información muy valiosa para optimizar el proceso. Paso a paso siguiendo el proceso aplicado, se ha podido inferir lo siguiente:

Comenzando por el caso de estudio utilizado, la propia edificación en sí ha sido un prototipo más que adecuado. Esencialmente, por ser parte de un proyecto de demolición real, lo que ha hecho que se contara con el apoyo de profesionales del sector, aportando siempre la información necesaria y precisa para el adecuado discurrir del trabajo. El estrecho contacto con el sector de construcción y la institución pública Ihobe, ha facilitado la comprensión de las necesidades y problemáticas reales que son las que realmente impulsan proyectos y trabajos de este carácter.

Concretando sobre el trabajo llevado a cabo, en orden cronológico, se analizan las labores de inspección y el escaneo del edificio. Es importante subrayar que estos trabajos han sido realizados por personal no especializado en materiales de construcción, teniendo como aprendizaje que debe priorizarse la intervención en estas tareas de personal experto en arquitectura o materiales de construcción, pues se conseguirá una más rápida detección de los materiales de cada elemento, e igualmente de rápido será el volcado al documento del escaneo. Otra salida que puede concluirse de estos aprendizajes es cómo conviene que el modelado sea realizado por el mismo operador que aborde la inspección y el escaneo. Esto dificultaría la pérdida de información que se ha experimentado en esta primera ocasión.

Se concluye también cómo el modelado debe realizarse inmediatamente después del escaneo e *in situ*, a ser posible todo ello en una misma jornada de trabajo. De esta forma, existe siempre la posibilidad de consultar, en tiempo real, las dudas o aclaraciones que puedan surgir. Es importante también que dicha persona disponga de la capacidad (propia o ajena) de realizar catas en paredes, suelos o techos, con el fin de detectar materiales peligrosos o materiales ocultos a la vista. Solo de esta forma podrá realizarse un modelado adecuado.

Respecto al proceso de escaneo y a la rapidez de este, se ha detectado que las velocidades de este no han sido las esperadas de 200 m²/min. Esto ha sido debido a diversas razones, la primera está relacionada con la propia distribución de las estancias del edificio. Tal y como se aprecia en los planos obtenidos del escaneo en el Anexo II, las plantas no presentan zonas amplias y abiertas, sino que constan de diversas habitaciones que hacen que el proceso de escaneo se alargue en el tiempo. La segunda razón puede tener que ver con la inexperiencia en el propio proceso de escaneo, cabe destacar, que siendo el primer caso de estudio en el que se aplica este método, se ha dedicado tiempo extra a la recopilación casi total del edificio mediante

fotografías, esto ha supuesto también la ralentización del proceso. Esta labor será prescindible en próximos proyectos.

En cuanto a las BBDD, se ha experimentado como una desventaja el hecho de que exista la necesidad de añadir elementos a las bases de datos para que queden la mayoría de los tipos de componentes contemplados. Dicho lo cual, con la experiencia y uso de estas metodologías, se podrá concluir si (en realidad) es necesario que queden reflejados cada tipo de elemento y sus singularidades. Es posible que, para una buena predicción no sea necesario añadir nuevas líneas a las BBDD, aunque bien es cierto que es una opción prevista para que esté disponible en la propia herramienta BIM4DW. Aunque es reseñable que, tratándose de bases de datos robustas, puede haber aspectos en los que se encuentren incompletas, es por lo que se ha tratado de trabajar en su mejora y ampliación mediante las correcciones y adiciones de elementos. A medida que estas vayan siendo aplicadas en distintos proyectos, engrosarán la información que contengan ampliando sus capacidades.

Finalmente, se examinan los resultados obtenidos a partir de la comparación realizada entre la estimación de la herramienta EEH Aurrezten y el cálculo de la aplicación BIM4DW. Primeramente, es posible que las técnicas de demolición escogidas para el diseño de la deconstrucción en BIM4DW no sean realistas, ya que, dependiendo del caso no siempre existe la posibilidad de realizar ciertos procesos como, por ejemplo: el desmontaje de puertas y ventanas con el fin de obtener la mayor segregación posible. Lo anterior, ha ocasionado incoherencias entre las fracciones de residuos de los métodos utilizados. Asunto que era de esperar sabiendo que EEH Aurrezten se basa en ratios de generación y BIM4DW en el cálculo de los RCD. Segundo, como ha sido evaluado en el apartado *Comparación EEH Aurrezten vs BIM4DW y análisis*, en este primer ensayo de aplicación de BIM4DW a un caso real, se vislumbra que el método adquiere buen curso. Esto es, habiendo detectado sus posibles aspectos a mejorar, se concluye que puede estar a la altura en cuanto al cálculo de RCD se refiere.

Queda claro que el cálculo de RCD mediante el método propuesto (Captura de la realidad, Creación del modelo digital y cálculo de RCD generados), es una opción factible que ha de tenerse en cuenta en el futuro, ya sea con el objetivo de complementar la información obtenida a través de estimaciones de generación de RCD o incluso como único método de cálculo de RCD en demoliciones. A falta de contrastar las cantidades de RCD obtenidas en este trabajo con las cantidades reales producidas en la demolición del edificio, y entendiendo que sigue en desarrollo, se considera que este método será efectivo en la tarea para la que está diseñado.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ihobe - Noticias - Ihobe impulsa 26 proyectos ecoinnovadores de ecodiseño, remanufactura y economía circular de metales, plásticos y minerales». H2020 (accedido 10 de enero de 2022).
- [2] «Innovative Circular Economy Based solutions demonstrating the Efficient recovery of valuable material Resources from the Generation of representative End-of-Life building materials | ICEBERG Project | Fact Sheet | H2020 | CORDIS | European Commission». <https://cordis.europa.eu/project/id/869336/es> (accedido 10 de enero de 2022).
- [3] BOPV, «DECRETO 112/2012, de 26 de junio, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.», 10 de septiembre de 2012. <https://cutt.ly/oOX1GXB> (accedido 9 de noviembre de 2021).
- [4] «¿Por qué se realizan demoliciones? - Blog Alberich». <https://cutt.ly/7OX16BH> (accedido 2 de noviembre de 2021).
- [5] «68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs». <https://cutt.ly/pOX0xjK> (accedido 2 de noviembre de 2021).
- [6] M. S. Aslam, B. Huang, y L. Cui, «Review of construction and demolition waste management in China and USA», *J. Environ. Manage.*, vol. 264, p. 110445, jun. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110445.
- [7] K. Kabirifar, M. Mojtahedi, C. Wang, y V. W. Y. Tam, «Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review», *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121265, ago. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121265.
- [8] P. Villoria Sáez y M. Osmani, «A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union», *J. Clean. Prod.*, vol. 241, p. 118400, dic. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118400.
- [9] «Effective construction and demolition waste management assessment through waste management hierarchy; a case of Australian large construction companies | Elsevier Enhanced Reader». <https://cutt.ly/GOX0Hb0> (accedido 6 de noviembre de 2021).
- [10] «Construction and demolition waste management in China through the 3R principle | Elsevier Enhanced Reader». <https://cutt.ly/vOX065L> (accedido 6 de noviembre de 2021).
- [11] «Euskadi participa en un proyecto europeo para reciclar residuos de construcción y producir materiales para edificación», *ECOticias.com*. <https://cutt.ly/nOX2f66> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [12] S. Fatemi y R. Imaninasab, «Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials», *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 450-456, sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.117.
- [13] «Comienza la demolición de las grandes estructuras del parque de atracciones», *El Correo*, 21 de febrero de 2018. <https://cutt.ly/EOX2IBS> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [14] Ihobe, Tecnalia y Lezama Demoliciones, «- Agenda - Demolición selectiva y separación de residuos en obras de construcción». <https://cutt.ly/iOX2C28> (accedido 4 de noviembre de 2021).
- [15] *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos (Texto pertinente a efectos del EEE)*, vol. OJ L. 2018. Accedido: 10 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj/spa>
- [16] Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*, vol. BOE-A-2008-2486. 2008, pp. 7724-7730. Accedido: 9 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2008/02/01/105>

- [17] BOPV, «DECRETO 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos.», 25 de julio de 2012. <https://cutt.ly/nOX25sT> (accedido 11 de noviembre de 2021).
- [18] «BOE.es - DOUE-L-1999-81425 Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos.» <https://cutt.ly/DOX9suz> (accedido 22 de noviembre de 2021).
- [19] «ORDEN de 12 de enero de 2015, de la Consejera de Medio Ambiente y Política Territorial por la que se establecen los requisitos para la utilización de los áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición.», 7 de febrero de 2015. <https://cutt.ly/6OX9SNR> (accedido 22 de noviembre de 2021).
- [20] «Estándares en apoyo del BIM.pdf». Accedido: 12 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/XPpejyT>
- [21] «LiDAR, a tool for the “virtual world”», *Railway Track and Structures*, 8 de mayo de 2020. <https://cutt.ly/rOX3ls4> (accedido 2 de enero de 2022).
- [22] «Escáner 3D en arquitectura», *4D Metric Topografía, Laser Scanner y Digitalización 3D*, 25 de febrero de 2020. <https://cutt.ly/IOX4eIE> (accedido 15 de noviembre de 2021).
- [23] «Tipos de Escaneo 3D: Conoce la ciencia detrás de la digitalización tridimensional», *TRESDE*, 12 de abril de 2019. <https://cutt.ly/YOX4zX2> (accedido 13 de noviembre de 2021).
- [24] «¿Qué es el mapeo con lidar y la fotogrametría?» HispaDrones», *HispaDrones*, 30 de noviembre de 2019. <https://cutt.ly/toX4OuN> (accedido 2 de enero de 2022).
- [25] «Flash Lidar Sensor Tiempo de Vuelo (ToF) en los drones.», *Guía Drones*, 12 de diciembre de 2019. <https://cutt.ly/QOX7q4f> (accedido 13 de noviembre de 2021).
- [26] «TOF(Time Of Flight) Compact camera module using range measurement technology | TOKYO ELECTRON DEVICE AMERICA, INC.» <https://cutt.ly/toX7vrO> (accedido 2 de enero de 2022).
- [27] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, y S. L. Eddins, *Digital Image processing using MATLAB*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [28] S. Barnea y S. Filin, «SEGMENTATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA BY INTEGRATING RANGE AND IMAGE CONTENT», p. 6, 2008.
- [29] Z. Wu, A. T. W. Yu, L. Shen, y G. Liu, «Quantifying construction and demolition waste: An analytical review», *Waste Manag.*, vol. 34, n.º 9, pp. 1683-1692, sep. 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2014.05.010.
- [30] Y. Gao, Z. Gong, y N. Yang, «Estimation methods of construction and demolition waste generation: a review», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 189, p. 052050, nov. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/189/5/052050.
- [31] W. Lu, H. Yuan, J. Li, J. J. L. Hao, X. Mi, y Z. Ding, «An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China», *Waste Manag.*, vol. 31, n.º 4, pp. 680-687, abr. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.12.004.
- [32] «LAU, H., WHYTE, A., LAW, P., 2008. COMPOSITION AND CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION WASTE GENERATED BY RESIDENTIAL HOUSING PROJECT. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH (IJER), [online] 2(3), pp.261-268. Ava.pdf».
- [33] J. C. P. Cheng y L. Y. H. Ma, «A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning», *Waste Manag.*, vol. 33, n.º 6, pp. 1539-1551, jun. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.01.001.
- [34] «ScanPlan 2D Handheld Mapper». <https://cutt.ly/BOX70b3> (accedido 8 de enero de 2022).
- [35] «HISER PROJECT». <http://hiserproject.eu/> (accedido 24 de enero de 2022).
- [36] «Documentacion-ASSET-DOC-LOC-3111057.pdf». Accedido: 1 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/6Ppe4ac>
- [37] E. Aurrezten, «PAUTAS DE UTILIZACIÓN GENERAL», p. 22.

5. ANEXO I

Normativa aplicable:

- DECRETO 112/2012, de 26 de junio, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición .
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- DECRETO 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos.

6. ANEXO II

Planos obtenidos a partir de los escaneos realizados:



Ilustración 29: Planta baja de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo.



Ilustración 30: Primera planta de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo.

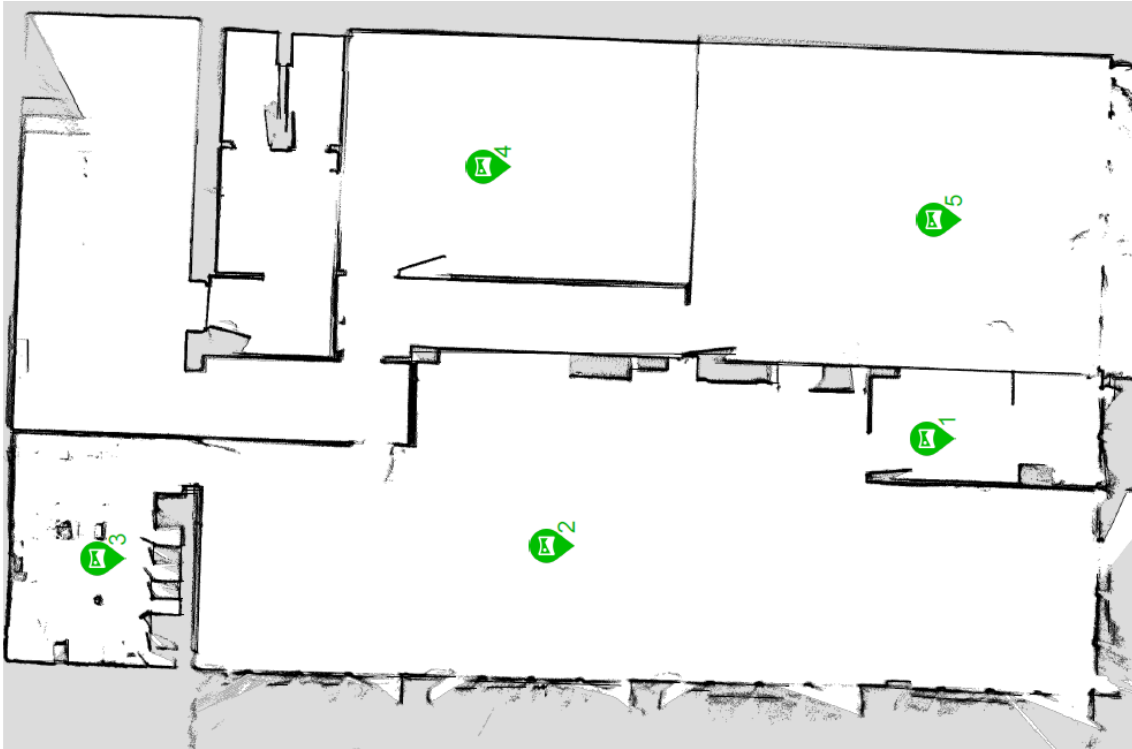


Ilustración 31: Segunda planta de la edificación. Área de 240 m². Plano obtenido a partir del escaneo.

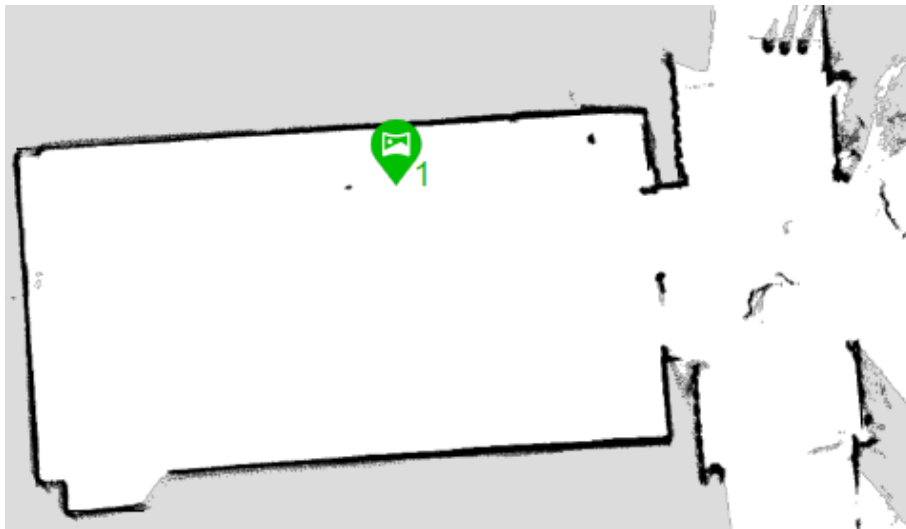


Ilustración 32: Tercera planta de la edificación. Área de 18 m². Plano obtenido a partir del escaneo.