



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UN PROTOCOLO PARA EL
MODELADO DE ESTRUCTURAS CON HISTORIC
BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM).

APLICADO AL CASO DE ESTUDIO DE LA IGLESIA SAN JUAN DEL
HOSPITAL EN LA CIUDAD DE VALENCIA

Presentado por

JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Para la obtención del

MÁSTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

Curso: 2017/2018

Fecha: 13/07/2018

Tutor: Alberto Domingo Cabo

Cotutor: Jorge García Valdecabres

DESARROLLO DE UN PROTOCOLO PARA EL MODELO DE ESTRUCTURAS CON HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM)

APLICADO AL CASO DE ESTUDIO DE LA IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL EN LA CIUDAD
DE VALENCIA

POR:

JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

DIRECTORES:

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO

Dr. JORGE LUIS GARCÍA VALLDECABRES



MÁSTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

*"You have to go through the heartache moments
to truly appreciate
the good times"*

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi padre, madre y hermana por ser mi soporte durante estos dos años

A mis tutores, Jorge y Alberto porque siempre ha estado atentos y han sido los guías para el desarrollo de este trabajo.

A Isabel y Adolfo por siempre estar dispuestos a cederme un poco de su tiempo para ayudarme a sacar este trabajo adelante, sus conocimientos son parte fundamental de este trabajo.

A todos los amigos que Valencia me permitió conocer, son las grandes relaciones que me regalo la estancia en estas tierras para toda la vida.

A mis profesores del máster por toda la pasión y conocimiento brindado durante el desarrollo del máster.

Gracias a todos ellos y las demás personas que aportaron un granito de arena porque sin ellos no hubiera sido posible.

<p>Título: Desarrollo de un protocolo para el modelado de estructuras en HBIM. Aplicado al caso de estudio de la iglesia San Juan del Hospital en la ciudad de Valencia.</p> <p>Autor: Jorge Francisco Asjana Robles</p>	
<p>Resumen Ejecutivo</p>	
<p>Planteamiento del problema a resolver</p>	<p>La falta de un protocolo que detalle los pasos a seguir para elaborar un modelo estructural de edificaciones históricas. El protocolo, contemplará todas las etapas en las que se interviene, atendiendo al modelado de los elementos singulares de geometría compleja que se presentan en cada una de estas etapas. Se trata de llenar un hueco en el proceso de implantación de esta metodología, HBIM, que sirva a los agentes de este sector, de arquitectura histórica medieval, a desarrollar proyectos de intervención para la rehabilitación y la conservación de forma más eficaz, implementado el modelo con datos fidedignos al estado actual, documentación “as-built”, para gestionar el ciclo integral de vida del edificio.</p>
<p>Objetivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar un protocolo para implementar el modelado de la estructura de los edificios históricos medievales en la metodología BIM. • Aplicar el protocolo desarrollado a la estructura de la nave de la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia. • Definir un modelo o maqueta tridimensional del sistema estructural de la Iglesia. • Exportar el modelo para implementar el uso en los programas de análisis de estructuras y proponer alternativas para mejorarlas.
<p>Estructura Organizativa</p>	<p>El siguiente trabajo se desarrolla según los siguientes apartados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Introducción • Marco teórico • Metodología de trabajo, desarrollo • Resultados

	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de resultado • Conclusiones • Líneas futuras de trabajo e investigación
Método	<p>Para cumplir con los objetivos se llevará a cabo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de la literatura existente con relación a análisis estructural con HBIM. • Desarrollo del protocolo para la implantación del modelado de la estructura de los edificios históricos medievales en BIM • Aplicación del protocolo desarrollado al caso de estudio, dentro del cual desarrollaremos las siguientes fases de trabajo: <ul style="list-style-type: none"> ○ La toma de datos geométricos con escáner laser. ○ El modelado estructural tridimensional. ○ La exportación del modelo a programas de análisis.
Cumplimiento de objetivos	<p>Cumpliendo con los objetivos planteados los cuales fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El desarrollo del protocolo teórico para la implementación de un modelo HBIM de estructuras de edificaciones históricas. • Se aplicó al caso de estudio de la nave central de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia. • Se definió el modelo tridimensional de la nave central. • Se evaluaron los resultados y se planteó la vía más factible hasta el momento para la posterior exportación y análisis estructural de la estructura.
Contribuciones	<p>Las contribuciones de este trabajo es la aportación del protocolo desarrollado del cual los agentes del sector podrán beneficiarse y utilizar como punto de guía en el proceso de modelar y analizar este tipo de construcciones históricas. Así mismo como el proceso paso a paso para la exportación hacia programas de cálculo y las líneas de trabajo y experimentación abiertas</p>

Recomendaciones	<p>Entre las recomendaciones cabe destacar:</p> <ul style="list-style-type: none">• Continuar el desarrollo del formato IFC para soportar la exportación bidireccional de este tipo de modelado histórico.• Profundizar más en el proceso de modelado constructivo dentro del programa arquitectónico.• Desarrollar la interoperabilidad entre programas buscando simplificar el uso de diferentes programas e ir unificando todo el proceso al uso de uno único.
Limitaciones	<p>Entre las limitaciones más importantes encontradas estuvieron:</p> <ul style="list-style-type: none">• La falta de más información respecto al procedimiento de modelado.• La falta de presentar al menos una guía para la exportación del modelo estructural de edificaciones históricas.• La falta de licencias de los programas que permitan el análisis y comparar la interoperabilidad entre distintas aplicaciones.

Resumen

Con los avances del Building Information Modelling en los últimos años, las puertas se han abierto para desarrollar el alto potencial que este presenta. Una de estas, es la implementación en edificaciones históricas con la posibilidad de desarrollar modelos paramétricos *as-built* lo que, conduce a obtener una mejora sustancial en la gestión de la documentación para futuras evaluaciones, proyectos de intervención y mantenimiento.

Se ha llegado a un grado de madurez elevado en el empleo de la toma de datos mediante aparatos escáneres topográficos de tecnología láser que ha facilitado el desarrollo de modelos *as-built* con alto nivel de detalles, aunque aún es un desafío la transferencia de estos modelos a programas de análisis estructural. La complejidad geométrica de los elementos estructurales en estas edificaciones medievales, así como, la caracterización de los materiales, el registro de las transformaciones y las deformaciones que sufre la estructura a lo largo de la historia dificulta un correcto modelado que lleve a una transferencia de la información entre los programas de manera satisfactoria.

En este trabajo, se busca desarrollar un protocolo para modelar estructuras históricas bajo la metodología BIM con el fin de poder ser evaluadas desde el punto de vista estructural mediante programas especializados. Se experimentará el proceso mediante la aplicación al caso de estudio elegido, la estructura de la nave de la Iglesia de San Juan del Hospital de la ciudad de Valencia.

Este trabajo se definirá el detalle de los pasos seguidos y las recomendaciones de cómo se propone modelar los elementos estructurales de las edificaciones medievales históricas, para poder ser exportadas a programas de análisis. Lo que ayudara a los agentes envueltos a tener un modelo paramétrico que ayudaría a la gestión y mantenimiento de estas.

Palabras claves: *HBIM, IFC, Estructura, Análisis estructural, Edificaciones históricas*

Abstract

With the development of the Building Information Modelling in the last couple of years, numerous potential fields have opened for this. Heritage Building has been one of those, giving the possibility to create parametric *as-built* models which will provide useful data to help the correct management and maintenance of the building in the future.

Interoperability in BIM has gained certain maturity and the implementation of laser scans for photogrammetry has simplified the development of high detail *as-built* models although the correct transfer of these models to structural analysis software is still a challenge. These buildings present complex geometry shapes in their elements, combining it with the materials used and the multiple changes, and deformation suffered throughout history, making the achievement of an accurate model that leads to a satisfactory transfer of information between the programs.

This work seeks to develop a protocol to model heritage Building's structure under BIM methodology to structurally evaluate them in analysis software. This will be applied to the case study of the San Juan del Hospital Church of the city of Valencia.

This will consist of a detailed step-by-step description of how to model structural elements of heritage buildings to be able to export them correctly to analysis software, aiming to help the stakeholders involved resulting in parametric models that will help to manage and maintain the buildings in a more effective way.

Keywords: *HBIM, IFC, Structure, Structural Analysis, Heritage Buildings*

Resum

Amb els avanços del Building Information Modelling en els últims anys noves portes s'han obert per a explotar l'alt potencial que est presenta. Una d'aquestes és el seu ús en edificacions històriques amb la possibilitat de desenvolupar models paramètrics *as-built* el que serveix per a obtenir una millor documentació de l'edificació per a futures avaluacions i manteniment d'aquesta.

Encara que la interoperabilitat en la metodologia BIM ha arribat a estat de maduresa i l'ús de làsers escàneres ha facilitat el desenvolupament de models *as-built* amb alt nivell de detalls àdhuc és un desafiament la transferència directa d'aquests models a programes d'anàlisi estructural. La complexitat geomètrica dels elements estructurals en aquestes edificacions, així com els materials i les diferents transformacions i deformacions que pateix l'estructura al llarg de la història dificulta una correcta transferència d'informació entre els programes.

En aquest treball se cerca desenvolupar un protocol per a modelar estructures històriques sota la metodologia BIM amb la finalitat de ser avaluades estructuralment en programes especialitzats. El qual serà aplicat al cas d'estudi de l'Església de Sant Joan de l'Hospital de la ciutat de València.

Aquest treball constara amb un detallat pas a pas de com s'haurien de modelar els elements estructurals de les edificacions històriques per a després ser exportats a programes d'anàlisi. El que ajudara als agents embolicats a tenir un model paramètric que ajudaria a la gestió i manteniment d'aquestes.

Paraules claus: HBIM, IFC, Estructura, Anàlisi estructural, Edificacions històriques

ACRÓNIMOS.

BIM: Building Information Modelling.

HBIM: Historic Building Information Modelling.

IRP: Instituto de Restauración del Patrimonio.

ITI: Instituto Tecnológico de Informatica.

IFC: Industry Foundation Classes.

UPV: Universitat Politècnica de Valencia.

TFM: Trabajo Final de Máster.

CAD: Computer Aid Design

BEP: BIM Execution Plan

VPD: Virtual Project Design

Mpa: Megapascal

CSI: Computer and Structures, Inc

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	ANTECEDENTES.....	17
1.2	MOTIVACIÓN	19
1.3	JUSTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL EN LA CIUDAD DE VALENCIA	20
1.4	OBJETIVOS.....	21
2	MARCO TEÓRICO.....	22
2.1	BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM).....	22
2.2	HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM)	24
2.3	MODELADO ESTRUCTURAL HBIM.....	26
2.4	INTERACCIÓN ENTRE PROGRAMAS	28
3	METODOLOGÍA DE TRABAJO	30
4	RESULTADOS.....	32
4.1	PROTOCOLO TEÓRICO PARA EL MODELADO DE ESTRUCTURAS EN HBIM	32
4.2	APLICACIÓN AL CASO DE LA IGLESIA DE SAN JUAN DEL HOSPITAL EN LA CIUDAD DE VALENCIA ..	38
4.3	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO.....	68
4.4	SOLUCIONES AL MODELADO HBIM	69
4.4.1	<i>COMPLEMENTOS PARA REVIT.....</i>	<i>69</i>
4.4.2	<i>MODELAR ESTRUCTURA CON ELEMENTOS DE OBRA NUEVA</i>	<i>70</i>
4.4.3	<i>UTILIZACIÓN DE MALLAS.....</i>	<i>72</i>
4.4.4	<i>PROCESO INVERSO. SOLUCIÓN TEÓRICA.....</i>	<i>79</i>
5	CONCLUSIONES	80
6	LÍNEAS DE TRABAJO E INVESTIGACIONES FUTURAS.....	82
7	REFERENCIAS.....	83

8	ANEXOS.....	87
8.1	FOTOS DE LA JORNADA DE ESCANEADO LASER. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL DE VALENCIA	87
8.2	IMÁGENES DE LA NUBE DE PUNTOS RESULTANTE	90
8.3	ENTREVISTA CON EL PROFESOR ADOLFO ALONSO.....	93
8.4	IMÁGENES DEL ANÁLISIS REALIZADO AL MODELO REDUCIDO.....	99
8.5	PLANOS DE MODELO TRIDIMENSIONAL	102

ÍNDICE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 – PROTOCOLO HBIM. (JORDAN, TZORTZOPOULOS, GARCÍA-VALLDECABRES, & PELLICER, 2018).....	32
ILUSTRACIÓN 2- PROTOCOLO PROPUESTO.....	33
ILUSTRACIÓN 3- VISTA EN PLANTA IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL. (CRESPO GODINO, 2006).....	39
ILUSTRACIÓN 4- MODELADO ARCO FAJÓN.....	41
ILUSTRACIÓN 5- MODELO ARCO ENJUTA CONTRAFUERTE.....	41
ILUSTRACIÓN 6 - BÓVEDA CENTRAL. FUENTE PROPIA.....	42
ILUSTRACIÓN 7 - MODELADO CAPILLAS NORTE.....	43
ILUSTRACIÓN 8- NERVIOS DE PIEDRA. FUENTE PROPIA.....	43
ILUSTRACIÓN 9- BÓVEDA DE CAÑÓN.....	43
ILUSTRACIÓN 10- MODELO CAPILLAS SUR.....	43
ILUSTRACIÓN 11- MODELO ÁBSIDE NERVIOS Y BÓVEDA.....	44
ILUSTRACIÓN 12- MODELO ÁBSIDE COMPLETO.....	44
ILUSTRACIÓN 13- MODELADO TRAMO BÓVEDA.....	44
ILUSTRACIÓN 14- MODELO COMPLETO. FUENTE PROPIA.....	45
ILUSTRACIÓN 15- ESCÁNER LASER. FUENTE PROPIA.....	46
ILUSTRACIÓN 16- ESCÁNER LASER DURANTE EL ESCANEADO DE LA IGLESIA. FUENTE PROPIA.....	46
ILUSTRACIÓN 17- LASER ESCÁNER. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL.....	47
ILUSTRACIÓN 18- JORNADA TOMA DE DATOS. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL.....	47
ILUSTRACIÓN 19- NUBE DE PUNTOS, SECCIÓN DE LA NAVE.....	48
ILUSTRACIÓN 20- NUBE DE PUNTOS UNIFICADA.....	48
ILUSTRACIÓN 21 - OPCIÓN INSERTAR NUBE DE PUNTOS. FUENTE PROPIA.....	48
ILUSTRACIÓN 22- NUBE DE PUNTOS EN REVIT. FUENTE PROPIA.....	49
ILUSTRACIÓN 23- OPCIÓN INSERTAR EJES Y NIVELES. FUENTE PROPIA.....	49
ILUSTRACIÓN 24- EJES CONSTRUCTIVOS. FUENTE PROPIA.....	50
ILUSTRACIÓN 25- NIVELES CONSTRUCTIVOS. FUENTE PROPIA.....	50
ILUSTRACIÓN 26- MODELADO IN SITU. FUENTE PROPIA.....	51
ILUSTRACIÓN 27- CUADRO DE CATEGORÍA DE FAMILIA Y PARÁMETROS.....	52
ILUSTRACIÓN 28- HERRAMIENTAS DE MODELADO IN SITU. FUENTE PROPIA.....	52
ILUSTRACIÓN 29 - BUSCADOR DE MATERIALES. FUENTE PROPIA.....	54
ILUSTRACIÓN 30- VISTA EN PLANTA DE COLUMNAS. FUENTE PROPIA.....	55
ILUSTRACIÓN 31- MODELO 3D COLUMNAS. FUENTE PROPIA.....	55
ILUSTRACIÓN 32- NUEVO PERFIL. FUENTE PROPIA.....	56
ILUSTRACIÓN 33- MODELADO IN SITU, ARCOS. FUENTE PROPIA.....	57
ILUSTRACIÓN 34- SWEEP. FUENTE PROPIA.....	58
ILUSTRACIÓN 35- CARGAR PERFIL. FUENTE PROPIA.....	58
ILUSTRACIÓN 36- MODELO 3D COLUMNAS Y VIGAS. FUENTE PROPIA.....	58
ILUSTRACIÓN 37- MODELO 3D COLUMNAS, VIGAS Y MUROS. FUENTE PROPIA.....	59
ILUSTRACIÓN 38- MODELADO TRIDIMENSIONAL COMPLETO. FUENTE PROPIA.....	60
ILUSTRACIÓN 39 - MODELADO DE LA CIMENTACIÓN. FUENTE PROPIA.....	60
ILUSTRACIÓN 40 – CONFIGURACIÓN DE OPCIONES IFC EN REVIT.....	62
ILUSTRACIÓN 41 - TABLA DE ENTIDADES IFC SOPORTADAS POR SAP2000 1DE2. (CSI, 2013).....	63
ILUSTRACIÓN 42 - TABLA DE ENTIDADES IFC SOPORTADAS POR SAP2000 2DE2. (CSI, 2013).....	64
ILUSTRACIÓN 43 - EXPORTAR IFC DESDE REVIT. FUENTE PROPIA.....	65
ILUSTRACIÓN 44 - IMPORTAR MODELO IFC EN SAP2000. FUENTE PROPIA.....	66
ILUSTRACIÓN 45 - MODELO IFC VISTO EN SAP2000. FUENTE PROPIA.....	67
ILUSTRACIÓN 46 - MODELO DE LA SOLUCIÓN ALTERNA VISTO EN AUTODESK ROBOT. FUENTE PROPIA.....	69

ILUSTRACIÓN 47 - MODELO ALTERNO USANDO ELEMENTOS PREDETERMINADOS. FUENTE PROPIA.....	70
ILUSTRACIÓN 48 - MODELO ALTERNO IFC VISTO EN SAP2000. FUENTE PROPIA.	71
ILUSTRACIÓN 49 - MODELO ALTERNO IFC VISTO EN AUTODESK ROBOT. FUENTE PROPIA.....	71
ILUSTRACIÓN 50- MODELO REDUCIDO, VISTO EN REVIT. FUENTE PROPIA	73
ILUSTRACIÓN 51- MODELO DE SOLIDOS, VISTO EN AUTOCAD. FUENTE PROPIA.....	74
ILUSTRACIÓN 52- MODELO MALLADO, VISTO EN GID. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO	75
ILUSTRACIÓN 53- MODELO MALLADO CON APOYOS, VISTO EN ANGLE. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO	75
ILUSTRACIÓN 54- MODELO DEFORMACIONES BAJO EL CALCULO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO	76
ILUSTRACIÓN 55- MODELO DE DAÑO BAJO EL CALCULO NO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO	76
ILUSTRACIÓN 56- MODELO DE TENSIONES BAJO EL CALCULO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO.....	77
ILUSTRACIÓN 57 - PROCESO INVERSO TEÓRICO	79
ILUSTRACIÓN 58- PROTOCOLO PARA EL MODELADO DE ESTRUCTURAS HBIM, REVISADO. FUENTE PROPIA	81
ILUSTRACIÓN 59- MODELO MALLADO CON SOBRAS VISTO EN EL PROGRAMA ANGLE.....	99
ILUSTRACIÓN 60- DEFORMACIONES EN z PRESENTES EN UN NUDO	99
ILUSTRACIÓN 61- DEFORMACIONES EN EJE Z	100
ILUSTRACIÓN 62- MODELO TENSIONES EN EL EJE Z	100
ILUSTRACIÓN 64- MODELO DE DAÑO BAJO EL CÁLCULO NO LINEAL. VISTA DESDE EL FONDO	101
ILUSTRACIÓN 63- MODELO DE DAÑO BAJO EL CALCULO NO LINEAL VISTA SUPERIOR.....	101

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El concepto *Building Information Modelling* (BIM) integra la habilidad de añadir información (en términos de propiedades de todo tipo de aspectos que caractericen a los materiales, sistemas constructivos, instalaciones, aspectos legales, gestión de la explotación y del mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del edificio, etc.) a los objetos diseñados desde el punto de vista de la concepción arquitectónica o desde la concepción de la ingeniería (Ghaffarianhoseini, 2016).

Estudios recientes han mostrado que la metodología BIM mejora el flujo de información entre las partes interesadas en el proyecto, lo cual, origina la búsqueda de nuevas soluciones para el diseño, reduce la cantidad de tiempo y el dinero destinados en la realización del proyecto. Todo ello, gracias a una alta precisión para la estimación de precios y la detección de conflictos futuros en el proyecto (Santos, 2017). Por lo que BIM, tiene la capacidad para intervenir en todas las etapas del ciclo de vida, tanto del proyecto como de la explotación útil del edificio: puede ser utilizada por el propietario para comprender virtualmente el proyecto a realizar, por los diseñadores para analizar y mejorar el diseño constantemente, por el contratista para planificar y gestionar la construcción, así como por los encargados de la explotación de la misma para la gestión y mantenimiento de esta.

A lo largo de los últimos años ha crecido el interés y la determinación, pues BIM fue enfocado a las nuevas edificaciones, estudiar e iniciar la implementación en BIM de las edificaciones existente, tanto contemporáneas como las históricas. Con el avance de las tecnologías está siendo posible desarrollar en las edificaciones construidas, de carácter histórico y monumental y es, a esta metodología de implementación a la que denominaremos *Historic Building Information Modelling* (HBIM). Y, que se entiende por la representación 3D en software específicos para el tratamiento de los elementos arquitectónicos, de un modelo, que gestione la información vinculada, así como, la interoperabilidad entre los agentes interesados, facilitando el trabajo

colaborativo entre los mismos. Esto es posible, gracias la tecnología asociada con la ayuda de aparatos tecnológicos que permiten la captura masiva de la información georreferenciada y el tratamiento posterior de la misma (scanner-laser, puntos de nube, modelos 3D, aplicaciones, APIS, etc.) (Oreni, 2013).

A mediados del año 2014 el Ministerio de Economía y Competitividad otorga al Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) el proyecto *Diseño de una base de datos, modelo para la gestión de la información y del conocimiento del patrimonio arquitectónico*. Con este se crea la relación entre el IRP y el ITI Instituto Tecnológico de Informática ambos de la Universitat Politècnica de Valencia (UPV). Este grupo de investigación ha creado un protocolo general para el desarrollo de proyectos en edificios históricos con HBIM que abarca toda la vida útil. Como continuación de una de las líneas que se planteaba en las conclusiones del proyecto, es la que se plantea como contribución de este trabajo y, que consistirá en la generación de un protocolo para la implementación del modelado de la estructura de edificaciones históricas bajo HBIM.

En la actualidad el grupo HBIM del IRP ha comenzado una nueva etapa de trabajo que consiste en el desarrollo de un modelo BIM de los elementos estructurales de la Iglesia de San Juan del Hospital esto para ser añadido al modelo central ya existente, el cual cuenta con un BEP (BIM Execution Plan) detallado y con familias parametrizadas creadas para este proyecto.

1.2 MOTIVACIÓN

La simplificación y mejora de los procesos de trabajo en la gestión y planificación en el ámbito de la ingeniería mediante las nuevas tecnologías ha sido una pasión dominante para mí. Desde que tuve conocimiento de esta metodología en un curso de Gestión de obras en los estudios de grado cursados en mi país, la República Dominicana y, más tarde la ampliación y desarrollo de estos en el máster de Planificación y Gestión en Ingeniería Civil quedé convencido de que esta, estaba conduciendo el futuro de la construcción, y que sería el camino en el que deseaba ampliar los estudios. Esto, me condujo, a que fuera imposible dejar pasar la oportunidad de trabajar en este tema que se me fue presentado por los profesores de asignatura y asesores de trabajo final de máster. Con la oportunidad de aportar a este proyecto ya en marcha, así como, para obtener la mayor cantidad de experiencia en esta metodología para en un futuro ser uno de los pioneros en la aplicación de esta en la República Dominicana, donde su aplicación se reduce a algunas obras nuevas de edificación del sector privado pero limitándose solo al uso arquitectónico (VECTORWORKS, 2012) (Egwunatum, Joseph-Akwara, & Akaigwe, 2016).

La realización de este trabajo final de máster me brinda la posibilidad de aplicar lo aprendido en el Máster de Planificación y Gestión en Ingeniería Civil, como son: los temas de gestión de proyecto, la simplificación de procesos vistos en *lean construction*, métodos de investigación, así como, de innovación en el área de la construcción. A esto, se añade lo aprendido en la materia específica de Integración y modelado en BIM, donde se estudió, los temas básicos de modelados, la toma de datos que constituyen la nube de puntos, así como el funcionamiento del trabajo colaborativo, la interoperabilidad de la información y la visión holística de los procesos en el sector de la construcción.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL EN LA CIUDAD DE VALENCIA

Se plantea gestionar la información pertinente al modelado y formalización de la estructura en el patrimonio arquitectónico y la construcción histórica, aplicado al proyecto de la Iglesia de San Juan del Hospital en la ciudad de Valencia la cual se encuentra en la calle Trinquet de Cavallers, nº 5 en Valencia; en el que, se le incluye el modelado de los elementos estructurales de la Iglesia de San Juan del Hospital una metodología HBIM.

Generalmente BIM es entendido como una herramienta orientada al Computer Aided Design (CAD), pero no es así, esta metodología indaga más que eso, como es la exploración de soluciones que mejoren la colaboración organizacional en la industria de la construcción lo que facilitaría mayores rendimientos en la productividad mientras se perfecciona el diseño, la calidad y los procesos de en los trabajos de mantenimiento; Elementos que forman parte de la cartera de la planificación y gestión.

Por ello, este trabajo se desarrolla según el marco y la visión que nos facilita los análisis de valor de la planificación y de la gestión con la ayuda de las herramientas BIM. Y de esta manera, definir un protocolo para este tipo de construcciones medievales abierto para ser aplicado a otros casos similares. Se espera, definir las familias parametrizadas necesarias para el modelo y obtener un modelado de los elementos estructurales existentes en la nave y capillas de la Iglesia de San Juan del Hospital. Así mismo, la información recurrente de los materiales, los sistemas constructivos y las técnicas, la información histórica y sobre el mantenimiento. Todo ello, optimizara los procesos de gestión de la explotación y el mantenimiento de los edificios históricos.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es diseñar un protocolo para la implementación del modelado de la estructura de los edificios históricos con BIM. Para lo cual, se necesita planificar el conjunto de actuaciones a realizar; la revisión bibliográfica previa, la realización de levantamientos geométricos, definir el protocolo para integrar los procesos a realizar entre los agentes interesados, como estos intercambiaban la información, tanto los agentes externos o internos de las siguientes fases de desarrollo de la implementación BIM.

Para alcanzar el objetivo general se dispondrá a desarrollar los objetivos específicos siguientes:

1. Análisis de la literatura existente con relación a análisis estructural con HBIM.
2. Diseño de un protocolo específico para el modelado estructural bajo la metodología HBIM
3. Aplicación del protocolo al caso de estudio de la iglesia de San Juan del Hospital.
 - a. Toma de datos con escáner laser.
 - b. Modelado tridimensional.
 - c. Exportación del modelo estructural a programas de análisis estructural.
 - d. Elaboración de cálculo con uno de los programas.
 - e. Evaluación, corrección e implementación de las mejoras en el protocolo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM)

BIM articula en torno a un modelo 3D, la representación digital de las edificaciones, toda la información relevante sobre el ciclo de vida de los edificios, desde su construcción hasta su demolición, incluyendo al menos; el modelo 3D, la planificación, las características de los materiales, los costes, las especificaciones de seguridad para el proceso de eyección, la explotación, los trabajos de mantenimiento y de conservación.

Se concibe la estandarización para facilitar el traspaso de la información para la operatividad de toma de decisiones entre diferentes agentes interesados.

BIM ha ganado la aceptación del público en el sector de la construcción y se espera que la metodología proporcione mejores significativas en la reducción de costes y el aumento de la productividad en los proyectos de construcción (Patraucean, 2015).

La metodología BIM toma el enfoque de las herramientas tradicionales de los proyectos de construcción basados en la representación, sin información vinculada, CAD 2D/3D y los lleva a un ecosistema virtual permitiendo aumentar el nivel de eficiencia, comunicación y colaboración que sobre pasa los estándares de información de la construcción tradicional. Por lo que, la aplicación de la planificación y gestión del proyecto con sistemas complejos podría llegar a ser, el tema más popular para aplicar la metodología BIM (Bryde, 2012).

En los últimos años, investigadores y diseñadores han enfocado la metodología BIM para la optimización de la planificación de obra, así como el uso de los recursos y los costos de obra (Sungyol Song, 2011). En el área de la planificación de los trabajos se ha estado desarrollado un aspecto del BIM 4D la cual utiliza herramientas del CAD, así como BIM para elaborar un modelo 3D que incorpora información/documentación del proceso de construcción con el cual se

procede a realizar una serie de simulaciones para determinar la secuencia de construcción óptima (Shih-Ming Chen, 2013).

Dentro de la estimación de costes, BIM 5D, se han desarrollado investigaciones donde utilizando herramientas BIM, para presupuesto junto a herramientas de control de riesgos, se demostró que es posible, el uso por parte de organizaciones de la metodología BIM, para la gestión en la construcción. Otras investigaciones del autor establecen una metodología basada en BIM y en *Desarrollo Virtual Proyectos* (VPD) el cual apoya el cálculo de recursos, costes y planificación de obra, enfocándose en las partes más delicadas del proyecto. Este, estima la carga de trabajo y los posibles errores a los que se puedan enfrentar utilizando un modelo de información basado en IFC. (Santos, 2017)

BIM, se ha vinculado con el desarrollo de la metodología Lean para la gestión de proyectos, así como, para mejora la colaboración y del traspaso de información, en el que, se auxilia a una de las metas de la metodología Lean, la reducción del valor no agregado (Bryde, 2012).

En los recientes años, estudiosos de estos temas, la gestión de instalaciones existentes se ha agregado, entre interesados, incorporar situaciones de riesgos entre los factores a considerar, en las aplicaciones BIM existentes, así mejorar las operaciones de los encargados de las instalaciones y, desarrollar un marco en donde integrar la gestión de edificaciones con la metodología BIM. Uno de los estudios se basa en la recolección de información de las operaciones de mantenimiento de una edificación. Se utiliza para identificar como se han deteriorado las condiciones de la edificación, con la finalidad de poder desarrollar acciones preventivas con anterioridad. Para conseguirlo, se ha integrado en los procesos BIM la recolección de datos. Así como, utilizar un proceso de análisis y razonamiento, a partir de la información obtenida del caso de estudio. No solo, se está comprendiendo los datos procedentes de la información histórica, sino que también, la propia experiencia abre el camino a un nuevo término *Building Knowledge Modelling* (Santos, 2017).

2.2 HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM)

El HBIM es un tema relativamente novedoso que se ha venido desarrollando en los últimos años, este, consiste en incluir la información de la edificación histórica al modelo BIM, se aplica de manera inversa del proceso de obra nueva, se parte de una construcción existente con un ciclo de vida de siglos, y en muchos casos, se encuentra protegido legalmente, legado para las siguientes generaciones. Es decir, se usan los objetos paramétricos para constituir las partes del modelo, gracias al emplear tecnología avanzada, como lo son escáner-laser y fotogrametría (Nieto, 2016) junto con software de apoyo para el registro de los datos y para la generación del modelo 3D. Este interés, sigue creciendo, ya que revoluciona las operaciones relativas a la gestión del mantenimiento de estas edificaciones a partir de la documentación contractual *as built*. Se mejora el cuidado, se les aumenta el ciclo de vida reduciendo los costes, el tiempo empleado gracias asignación de roles y responsabilidades.

Otro tema de interés es la utilización de los modelos 3D para la explotación de la visita pública en el campo de la industria del turismo cultural en torno a estas edificaciones. Con estos, los operadores y agentes de esta industria facilitarán contenidos más completos en los que se podrán visualizar los procesos constructivos a través de las diferentes épocas de la historia, así como, reconocer la evolución constructiva que han experimentado las edificaciones a lo largo de los distintos periodos.

El avance tecnológico en el sector de la construcción ha llevado a desarrollar instrumentos para la mejora de los componentes del ciclo de vida de los proyectos y uno de estos son las plataformas HBIM que vincular la información interna del modelo con bases externa de manera bidireccional, que permite la interoperabilidad y el trabajo colaborativo. Estas, funcionan mediante complementos para los softwares BIM que usan los objetos de una librería parametrizada para automatizar la etapa de implementación a través del modelado del edificio. Este proceso, es necesario reconocer las técnicas tradicionales, ya que los elementos arquitectónicos son registrados mediante aparatos como el escáner-laser o a través de

realización de una campaña *in situ* de captación de la información georreferenciada, los puntos y las fotografías de los elementos, unido al proceso de compresión e interpretación mediante el análisis comparativo-cognitivo directo de las fábricas de los datos obtenidos (C. Dore, 2013).

En los últimos años, las investigaciones y los estudios se han focalizado en a la aplicación de las herramientas BIM a edificaciones existentes, los cuales ofrecen una gran cantidad de alternativas y beneficios para el sector de la construcción. Entre los cuales están: las actividades de gestión de la explotación de la actividad, el modelado *as-built*, el registro de la documentación de los bienes patrimoniales de carácter histórico, el mantenimiento, el control de calidad, el monitoreo y la evaluación, la gestión de emergencias, la planificación retrofit. (Ghaffarianhoseini, 2016).

2.3 MODELADO ESTRUCTURAL HBIM

BIM utiliza unos softwares orientados a la sistematización de los objetos donde para en el caso de los elementos estructurales se procede a realizar ensamblados para generar el modelo de la estructura de la edificación. Cada miembro, posee información y una función definida, es decir: de un elemento viga conoce sus propiedades (materiales, propiedades de la sección, etc.), así como la función en el modelo como elemento horizontal, y si abarca dos o más ejes etc.). De esta forma, el modelo resultante contiene una gran cantidad de información, que puede utilizarse, entre las diferentes disciplinas, así como para realizar una mejor coordinación interna (Schinler & Nelson, 2008).

El proceso de diseño de una edificación principalmente incluye: un diseño arquitectónico, un diseño estructural y un diseño de instalaciones (mecánicas, eléctricas y sanitarias) y por lo general los diseños estructurales y los de instalaciones dependen de la eficacia con que reciban los datos e información del diseño arquitectónico.

El modelo estructural está dividido en dos: A/ el modelo de análisis y B/ el modelo de detalles.

A/ el modelo de análisis contiene información geométrica de los elementos como: la posición del eje, el tamaño del elemento, así como el espacio y división de este. Será, a partir de estos datos, los que emplearan los ingenieros estructurales para deducir y obtener la información relativa a las propiedades mecánicas, al tipo de conexión entre elementos, la información sobre las cargas que soportan, entre otras (Liu, Zhang, & Zhang, 2016).

Y B/ El modelo de detalles incluye las formas geométricas de los elementos estructurales, las propiedades de las secciones y los materiales extraídos del modelo arquitectónico.

Tradicionalmente estos dos modelos se definen a lo largo de dos etapas independientes durante el ciclo vida. La implementación en tal BIM de estos, se producen de manera que, se integran en una sola etapa. Por lo que, se puede compartir información a tiempo real. Se reducen los errores, las pérdidas y las discrepancias en la etapa del trazado de la estructura. Además, el

modelo estructural BIM, contribuye a facilitar el análisis y comprobar los resultados obtenidos. Así, se reduce el trabajo repetitivo y se mejora la eficacia y la calidad del diseño (Robinson, 2007).

Las edificaciones históricas normalmente experimentan durante el tiempo alteraciones que se manifiestan en forma de deformaciones, originadas por alteraciones de los firmes en el que se asienta la estructura, acciones reológicas y medioambientales, así como, la acción del hombre a lo largo del tiempo del ciclo de vida. Estas características no suelen ser consideradas en edificaciones existentes sin valor histórico, en el momento de ser modeladas. HBIM aporta, gracias a que, el sistema permite registrar las fases de construcción en el modelo único, toda la información histórica, así como, los sistemas constructivos antiguos, a través de las familias BIM (García-Valdecabres, Pellicer, & Jordan-Palomar, 2016).

2.4 INTERACCIÓN ENTRE PROGRAMAS

Dentro de la ingeniería, los proyectos se involucran a distintos agentes que estarán en contacto y utilizan diferentes sistemas de tecnología y programas computacionales. Estos, compartirán la información, procedentes de los repositorios centrales articulada a partir del modelo 3D. La ausencia de una forma de integrar las diferentes aplicaciones tecnológicas, conduce a demandar, más tiempo y más recursos. Al tener que, volver a modelar en los diferentes programas o tener que resolver los problemas de incompatibilidad entre los mismos. (N. Young, 2009)

Por esto, la interacción entre los programas es considerado como uno de los desafíos claves dentro de la industria de las nuevas tecnologías, de forma que se logre un flujo consistente de información, entre los agentes interesados de las distintas disciplinas que operan en BIM.

El *Industry Foundation Classes* (IFC) fue definido por la alianza *buildingSMART*, como el estándar aceptado por la industria para la elaboración de modelos. Esto fue debido a que los modelos IFC no solo abarca la geometría tridimensional de los objetos, si no, que también almacena metadatos relacionados con muchos de los aspectos de la edificación, lo que hace que muchas de las herramientas usadas por la industria soporten la importación y exportación de archivos IFC. (Steel, Drogemuller, & Toth, 2012).

En el año 1996, fue descrito por primera vez el sistema de estandarización IFC por la Agencia Internacional para la Interoperabilidad (IAI) por el acrónimo de las siglas en inglés. Desde entonces, se han realizado numerosas revisiones. Actualmente las especificaciones para el estándar IFC, están siendo administradas por la alianza *buildingSMART* (BuildingSmart, s.f.). Desde un punto de vista técnico, está definida dentro de la ISO 10303 (International Standards Organisation (ISO), 1994)

El lenguaje incluye elementos para un amplio rango de características, entre las cuales se encuentran geometrías tridimensionales, elementos de construcción básicos (columnas, vigas,

puertas, entre otros), comprende estructuras que facilitan el análisis, así como, información de los distintos procesos y el coste de estos. (Steel, Drogemuller, & Toth, 2012)

Aun así, el estándar IFC, sigue presentando importantes desafíos necesarios para determinar la magnitud con la que la metodología BIM va a influir en el sector.

Desafíos como son: la mejora de la calidad y la consistencia de los modelos producidos. Aspectos estos, que conllevan la resolución de problemas técnicos. Así como, el consenso, asociado para determinar que practicas determinan un buen modelo. (Steel, Drogemuller, & Toth, 2012).

3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se plantea dividir el trabajo en dos partes para la consecución satisfactoria de los objetivos planteados. En primer lugar, se procederá a la revisión de la literatura pertinente para luego con esto realizar el trabajo practico que desea conseguir.

Como punto de partida se tiene el modelo del proyecto que llevan en conjunto la IRP y la UPV, así como el trabajo de investigación *Análisis constructivo y estructural de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia* desarrollado por el profesor Luis de Mazarredo Aznar. Con esto se planteará: la situación anterior, actual y futura que presenta el proyecto. Asimismo, se revisará las fuentes bibliográficas. Estas, serán en su mayoría artículos científicos encontrado en bases de datos científicas de revistas especializadas en estos campos del saber. Y se completara, la revisión bibliográfica, con la elaboración de reuniones con expertos, con el fin de descartar cualquier descubrimiento previo llevado a cabo por otro investigador y que nos haga replantear el trabajo (Catala & Pellicer, 2000).

La segunda parte del trabajo será práctica y será dividida en tres fases, las cuales irán desde lo teórico a la practico:

1. Desarrollo protocolo para el modelado estructural en HBIM.
2. Generación de nube de puntos del interior de la iglesia.
3. Realizar modelo estructural HBIM en Revit.
4. Exportación del modelo realizado a diferentes programas de análisis estructural, calculo.
5. Evaluación del protocolo e incorporación de las mejoras

El desarrollo del protocolo dependerá de los resultados obtenidos en la revisión literaria científica y técnica sobre la cuestión realizada en la primera parte del trabajo. Una vez obtenida esta, se procederá a la realización de las familias parametrizadas necesarias para el correcto modelado de los elementos de la Iglesia. Para esto será necesario la utilización de los resultados de la nube de puntos obtenidas con el escáner laser y la información de los materiales utilizados

para la realización de los elementos estructurales de la iglesia. Con esto se procederá al último paso de modelado de la información con la metodología BIM y posterior análisis estructural de la misma.

4 RESULTADOS

4.1 PROTOCOLO TEÓRICO PARA EL MODELADO DE ESTRUCTURAS EN HBIM

Podemos definir protocolo como una secuencia detallada de un proceso de actuación, para nuestro caso una actuación técnica que busca asegurar las repeticiones exitosas de los resultados por otras personas ya sea bajo el mismo caso de estudio u otros.

Partiendo del protocolo BIM para el ciclo de vida en edificación históricas planteado por la Arquitecta Isabel Jordán. (Jordan, Tzortzopoulos, García-Valdecabres, & Pellicer, 2018)

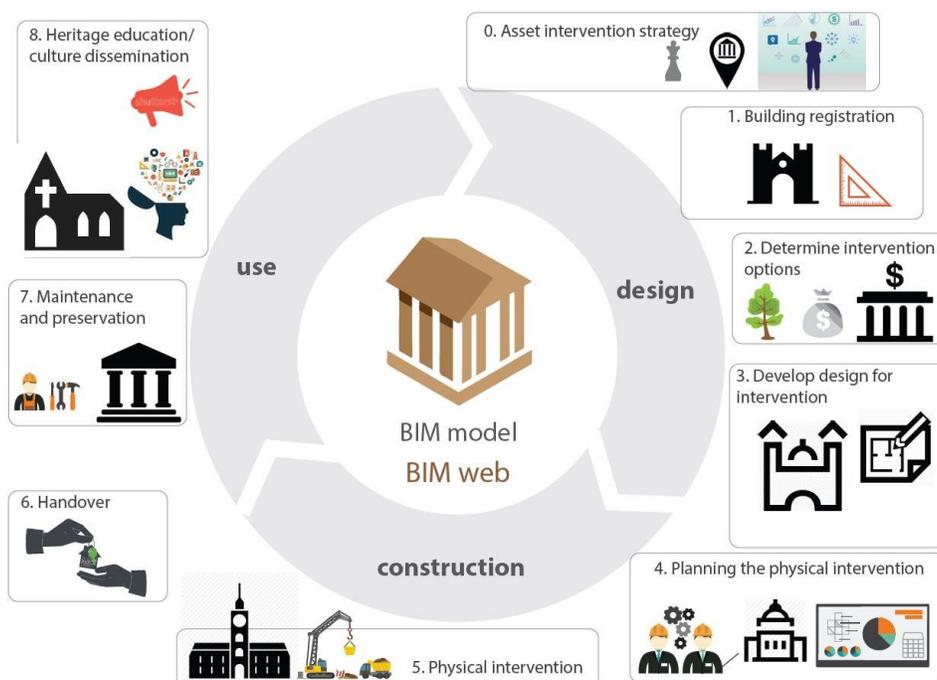


ILUSTRACIÓN 1 – PROTOCOLO HBIM. (JORDAN, TZORTZOPOULOS, GARCÍA-VALLDECABRES, & PELLICER, 2018)

Se plantea el siguiente protocolo para el modelado de estructuras mediante la metodología HBIM. Tras analizar el protocolo para el ciclo de vida de edificaciones históricas, se considera la inserción de este nuevo protocolo a la etapa de desarrollo del diseño para su intervención.

Este Protocolo consta de la aplicación de cuatro pasos para la satisfactoria conclusión del modelado deseado.



ILUSTRACIÓN 2- PROTOCOLO PROPUESTO.

1. Documentación de la Edificación

Es el primer paso que se recomienda llevar a cabo, en este se pretende realizar un reconocimiento y análisis exhaustivo de la estructura del edificio *in situ* con el cual se pretende trabajar. Y así, familiarizarse con los diferentes sistemas constructivos y elementos que la componen hasta el más mínimo detalle.

Aquí, se debe recolectar toda la información existente sobre la edificación desde planos *as-built*, datos sobre las diferentes variaciones y/o remodelaciones que se hayan llevado a cabo,

información relevante a los materiales constructivos utilizados, así como los tipos de elementos estructurales en lo que se sostiene la edificación.

Para esto nos podemos basar en los archivos que posea la administración de la edificación, artículos científicos, tesis, entre otras.

Una vez recolectado es importante que se corrobore lo que yace en la documentación con la realidad existente del edificio y clarificar las diferencias que pueda haber entre una y otra fuente, por lo que es necesario realizar una visita de inspección ocular lo más completa posible a la edificación.

En esta visita, se recomienda tomar notas de cada detalle observado desde tipo de estructura y estilo arquitectónico que presenta hasta imperfecciones que se puedan observar, esto ayuda a ir visualizando el modelo que vamos a llevar a cabo y se procederá a la realización del levantamiento gráfico del estado actual en el que se contemplan todos los aspectos de la realidad del edificio.

2. Toma de Datos Geométricos y Físicos

Después del análisis documental se procede a la toma de datos y completar el modelado estructural, en este caso, las formas geométricas de los elementos, así como sus propiedades físicas a partir del levantamiento realizado de la edificación histórica.

Para esto nos podemos apoyar en los procedimientos tradicionales de medición y/o en los avances que nos proporciona la tecnología que buscan simplificar y optimizar nuestro trabajo. En este, caso el uso de un láser escáner sería óptimo ya que facilita y agiliza el levantamiento y al final obtendremos una nube de puntos de la cual se puede partir como base para el modelado, un proceso inverso al que se conoce como *Scan to BIM*.

En el caso de las propiedades físicas será necesario un escaneado termodinámico de la edificación, así como diferentes pruebas de resistencia a los materiales que se encuentran en la edificación histórica.

3. La elaboración del modelo de la estructura

Tras la investigación sobre la edificación histórica y de haber realizado el levantamiento geométrico de la misma, continuamos con el proceso de esta información para llevarla a un modelo estructural computacional.

Para llevar esto a cabo de manera sistemática y correlacionado para así evitar errores que podrían afectarnos más adelante a la hora de la exportación y análisis de este en programas estructurales, recomienda seguir una línea de trabajo y siempre modelar constructivamente, considerando las necesidades a las que ha de responder la estructura de acuerdo con las hipótesis de trabajo que define al estado de cargas a las que estaría sometida.

Se comenzó, a partir del levantamiento realizado, la toma de datos y del estudio de la documentación gráfica existente. A continuación, se plantea un modelo para analizar los elementos estructurales y sus uniones, encontrados en el edificio, tratando de simplificarlo lo más posible. Pues, un modelado muy elaborado dificulta la implantación de la estructura a través de la aplicación Revit de Autodesk. Esta, se encuentra elaborada para realizar modelos de edificaciones contemporáneas por lo que sus herramientas no están diseñadas para trabajar con edificaciones históricas. Se trata, por tanto, de simplificar el flujo de trabajo a la hora de dar forma al modelo tridimensional.

Con esto se recomienda en primer lugar, modelar los ejes estructurales, así como los niveles constructivos y utilizarlos como punto de partida, ya que estos, nos ayudaran a posicionar los elementos estructurales con mayor facilidad en el modelo.

A partir de estos modelamos las columnas que soportan la edificación histórica, dándole posición en las intersecciones de los ejes previamente creados y sus respectivas alturas apoyándonos en los niveles constructivos.

Luego se recomienda modelar los arcos y bóvedas. Seguido de los muros de cierre que se encuentran en la edificación histórica, esto relacionado a las columnas que tendríamos modeladas. A partir de aquí con nuestro modelado geométrico casi completado terminamos modelando la cimentación de las columnas y sus tejados que, aunque no se considere un elemento estructural aporta carga a la estructura.

Para completar el modelado BIM debemos darle información a los elementos geométricos que hemos modelado, aquí definiremos los materiales y propiedades de cada elemento estructural que presenta el modelo.

4. Exportación a Programa de Análisis Estructural

Por último, luego de tener nuestro modelo estructural completado procedemos a exportarlo para su posterior análisis estructural.

Esto se podrá realizar de diferentes maneras de acuerdo con los programas que se utilicen y las licencias de estos que se posean, ya que cada casa posee su propio complemento de enlace entre estos programas, pero por lo general estos vienen con un precio.

La alternativa a esto es la utilización de los *Industry Foundation Classes* (IFC), este es el formato de exportación e importación desarrollado por la *BuildingSmart* y el cual es soportado por la mayoría de los programas en el mercado, el cual ha presentado grandes avances en la aplicación en edificaciones de nueva construcción pero que aún presenta retos que se deben plantear para el uso en edificaciones históricas.

Este funciona como un lenguaje de comunicación entre programas computacionales de diferentes profesiones, en donde cada programa le da a cada elemento o información una entidad que deberá ser reconocida en el programa de destino como igual.

La ventaja de esta alternativa es su *open source*, es decir, comprende la interoperabilidad con significativos programas de todas las especialidades disponibles en el mercado.

4.2 APLICACIÓN AL CASO DE LA IGLESIA DE SAN JUAN DEL HOSPITAL EN LA CIUDAD DE VALENCIA

Procedemos a la aplicación del protocolo planteado al caso de estudio de la Iglesia de San Juan del Hospital de la ciudad de Valencia, España. Con el propósito de dejar unos pasos claros para la utilización de este por otros interesados ya sea en este u otros proyectos de edificación históricas.

1. Documentación de la Edificación

Antes de la primera visita a la edificación se hizo una investigación de artículos y trabajos previos donde se pudieran encontrar información sobre la iglesia, esto resultó en la obtención de tres tesis doctorales realizadas con el asesoramiento del instituto de restauración del patrimonio de la UPV.

Las cuales poseían información relevante sobre la historia y la geometría de la edificación y los cambios que presento en las diferentes épocas de la historia (Garcia Valdecabres, 2010), así como un trabajo doctoral previo sobre los materiales constructivos y posterior análisis estructural de la iglesia de San Juan del Hospital (Mazarredo, 2015) en la cual se obtuvo las propiedades físicas de los materiales utilizados en la construcción de la edificación, así como un modelo analítico el cual utilizo para su análisis.

La Iglesia de San Juan del Hospital empieza su construcción por el año 1238 donde para entonces Europa se encontraba en una transición de estilos arquitectónicos, del románico, estilo que había permanecido en los últimos siglos, hacia el gótico el cual venia tomando auge en la Europa cristiana. Esto se llega a catalogar como románico tardío debido a algunas características espaciales que presentaba como son la influencia del arte islámico y la presencia del gótico.

Dentro de este estilo uno de los elementos más relevantes fueron los arcos diafragmáticos, que se puede definir como muros perpendiculares a la dirección principal de la nave y son perforados por un arco, el cual estrecha la nave principal.

Otra característica que podemos presenciar es que está cubierta por una bóveda dividida por unos arcos fajones en tramos rectangulares de lados desiguales, cortos en la dirección de la nave y más largos en la perpendicular. Normalmente con una bóveda de cañón corrida o de crucería nervada sencilla y en el presbiterio la crucería suele tener un esquema radial uniendo la clave o no al arco del triunfo por una ligadura algo típico en las iglesias de tipo parroquial.

Por último, otro referente arquitectónico que podemos encontrar en la Iglesia de San Juan del Hospital es el estilo cisterciense muy presente en esta época en el Reino de Aragón y Francia. Caracterizada por construcción sobrias, no exentas de grandeza, simplicidad y desnudez ornamental. Presenta arcos apuntados y bóvedas ojivales (García Valdecabres, 2010).

San Juan del Hospital está compuesto por el ábside, más cinco tramos en la nave central, las capillas entre contrafuertes, así como capillas a los pies del templo. La nave central está cubierta por bóveda apuntada de mampostería marcando los tramos con arcos fajones igualmente apuntados que arrancan de ménsulas (Mazarredo, 2015).

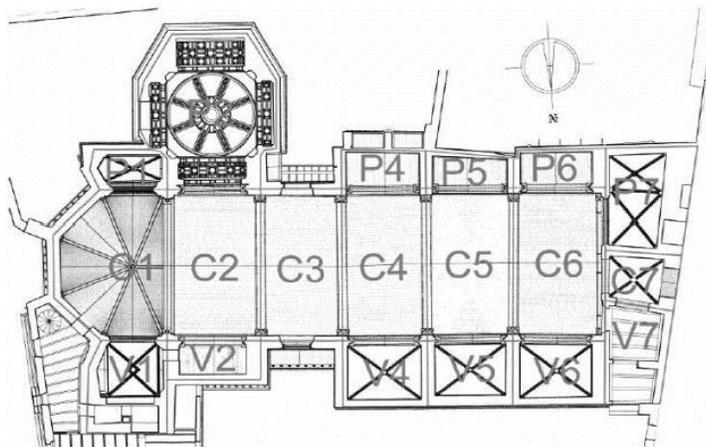


ILUSTRACIÓN 3- VISTA EN PLANTA IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL. (CRESCO GODINO, 2006)

Empezaremos comentando los materiales utilizados en la construcción del conjunto. Estos fueron definidos en la tesis doctoral "Análisis constructivo y estructural de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia" de Mazarredo. El cual los obtuvo a partir de una investigación de otros trabajos donde analizaban las propiedades del material presente en algunas construcciones de la ciudad de Valencia siendo este material el mismo utilizado para la construcción de la Iglesia en cuestión.

Para la sillería Mazarredo cita a Luis Gascó Pascual (Gasco Pascual, 1969) el cual define la piedra presente como caliza porosa característica propia de las canteras de Godella y la misma que está presente en las Torres de Serrano y en los puentes medievales que cruzan el río Turia en su paso por la ciudad de Valencia y, procedente de las canteras *Barranquet Vell* y *Barranquet Nou*.

El profesor Luis de Mazarredo, tras la revisión de diferentes artículos especializados y la consultar con profesionales de la cantería tradicional valenciana, opta por valores de resistencia a compresión para la roca entre 9MPa, encontrados en la roca proveniente de la cantera y un mínimo de 6MPa dado en el análisis de la roca presente en el puente de la Trinidad de Valencia.

Igual para la resistencia a tracción la cual presenta valores desde la nula resistencia hasta los 0.3Mpa.

Por último, para el módulo de elasticidad encontró diferencias en su investigación por lo que planteo valores entre los 12000 Mpa y los 3000 Mpa.

Tras esto procederemos a definir los elementos constructivos presentes en el conjunto Iglesia de San Juan del Hospital la cual presenta una construcción en fábrica, que no es más que una construcción hecha con piedra o ladrillo y argamasa (Huerta, 2004). En este encontramos los siguientes elementos estructurales: cimentación, muros y contrafuertes, bóvedas, cubiertas.

La cimentación

Se conforma por un relleno de cascotes con baños de mortero ciclópeo de cal de donde arrancan los muros a partir de una hilada de ladrillo cocido, que actuaría a modo de capa de regularización. Y se encuentra a unos 2.15 m de profundidad Valldecabres plantea la hipótesis que utilizaremos en este trabajo de que las diferencias de cotas son prácticamente idénticas en toda la cimentación. (Garcia Valldecabres, 2010)

Arcos y Contrafuertes

Formado por arcos fajones, que son de resalto en el abovedamiento, solo presentan una función constructiva, ya que se elaboran en primer lugar para actuar como curvatura permanente para la construcción de las bóvedas, sin embargo, soportaran una pequeña porción de la carga. (Heyman, 1995). Estas se cierran en la parte superior por enjuntas y en los laterales por los contrafuertes lo que completa el diafragma y da la rigidez transversal a la iglesia. Los contrafuertes están formados por doble hoja exterior de sillería y una hoja interior de relleno esto para absorber el empuje horizontal



ILUSTRACIÓN 5- MODELO ARCO ENJUTA CONTRAFUERTE



ILUSTRACIÓN 4- MODELADO ARCO FAJÓN

Bóveda

Compuestas de Bóvedas de cañón, la cual "se puede imaginar como una serie de arcos semicirculares paralelos que producen un empuje lineal distribuido a lo largo de los muros de soporte. Estos muros deberán ser suficientemente robustos como para contrarrestar adecuadamente la bóveda", por lo que estas soportan su propio peso y distribuyen los esfuerzos hacia los soportes (Heyman, 1995).

La bóveda central presenta diferentes materiales constructivos. En los tramos segundo y tercero se emplea el ladrillo macizo y, en el cuarto tramo es de ladrillo, con clave de piedra y el quinto es todo en piedra.

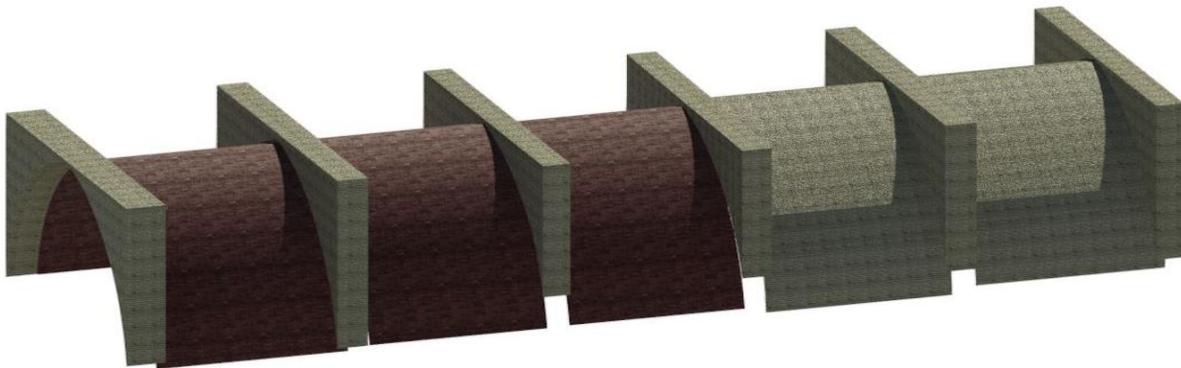


ILUSTRACIÓN 6 - BÓVEDA CENTRAL. FUENTE PROPIA

Capillas norte

Bóveda de crucería que se puede definir sencillamente como la resultante de la intersección de dos cañones cilíndricos iguales. En el caso de estudio propuestas están enlucida con yeso y presentan nervio de piedra, estos proveen una función estructural clave que es el refuerzo en una cascara que presenta una fuerte discontinuidad (Heyman, 1995). Presenta enjutas también de sillería y contrafuertes laterales de dos hojas exteriores de sillería y relleno de argamasa.



ILUSTRACIÓN 8- NERVIOS DE PIEDRA. FUENTE PROPIA

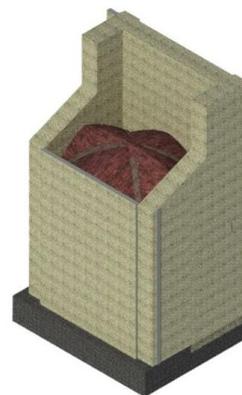


ILUSTRACIÓN 7 - MODELADO CAPILLAS NORTE

Capillas sur

Compuestas por bóvedas de cañón las cuales son apuntadas y de sillería vista. Además de arcos formeros que terminan empotrados en el muro o en semipilastras.



ILUSTRACIÓN 9- BÓVEDA DE CAÑÓN



ILUSTRACIÓN 10- MODELO CAPILLAS SUR

Ábside

Este presenta traza octagonal nervada en piedra y plementería cerámica vista. Equilibrada con contrafuertes radiales. No se posee información de que se encuentra entre el ábside y la cubierta. Por lo que se hace la misma proposición hecha por Mazarredo de la existencia de tabiquillos apoyados en los nervios los que soportan la cubierta (Mazarredo, 2015).



ILUSTRACIÓN 11- MODELO ÁBSIDE NERVIOS Y BÓVEDA



ILUSTRACIÓN 12- MODELO ÁBSIDE COMPLETO

Muros

Poseen huecos controlados y una vara de espesor. Estos son de piedra labrada dispuesta por hiladas en sus caras vistas y de casquijo y argamasa en su interior. (Garcia Valldecabres, 2010)

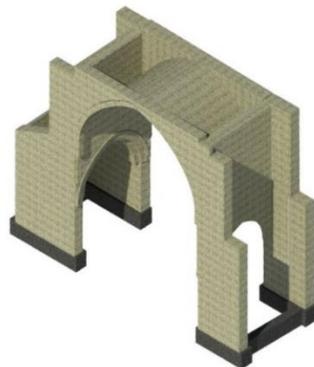
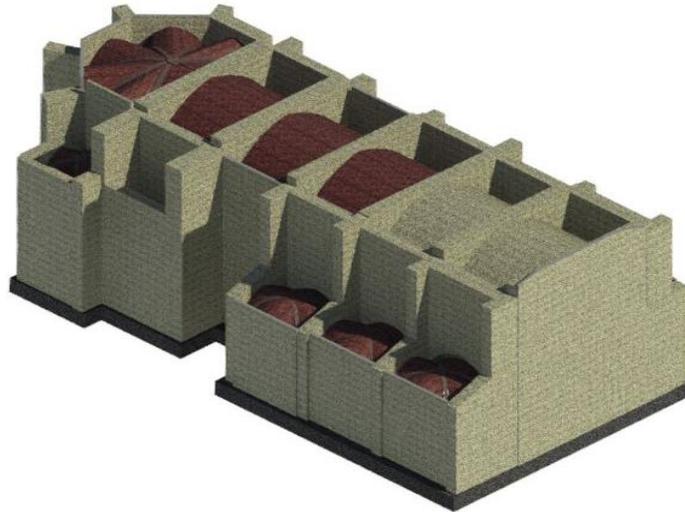


ILUSTRACIÓN 13- MODELADO TRAMO BÓVEDA

Sistema estructural



ILUSTRACIÓ 14- MODELO COMPLETO. FUENTE PROPIA

2. Toma de Datos Geométricos y Físicos

Para correctamente representar las geometrías complejas que se presentan en edificaciones históricas es necesario la utilización de técnicas e instrumentos de medición avanzadas.



ILUSTRACIÓN 15- ESCÁNER LASER. FUENTE PROPIA



ILUSTRACIÓN 16- ESCÁNER LASER DURANTE EL ESCANEADO DE LA IGLESIA. FUENTE PROPIA

Por lo que para la reconstrucción geométrica de la iglesia San Juan del Hospital se partió de una nube de puntos previamente realizada por el IRP, combinada con la toma de 19 escaneados realizados al interior de la iglesia, para esto fue necesario establecer previamente los diferentes puntos desde donde se iban a ser realizados estos. Para el registro de los escaneados se utilizaron esferas como objetivos. En total 6 esferas las cuales se colocaban estratégicamente en cada escaneado teniendo siempre tres de ellas en común con el escaneado anterior.

Este trabajo se realizó en conjunto con dos compañeros más del máster, que en sus trabajos tenían a la iglesia como caso de estudio por igual, así como dos de los profesores a cargo del trabajo el Arq. Jorge García Valldecabres y la Arq. Isabel Jordan Palomar. La separación entre escaneados no fue de más de 15 metros, realizado con un escáner laser Faro Focus 3D X 130. La densidad de información fue establecida en 44 millones de puntos por escaneado, donde cada escaneado tomaba alrededor de 9 minutos en completarse. La precisión por puntos del

instrumento se espera que sea de más o menos 3 mm. Se utilizo la cámara integrada en el escáner para la obtención de fotografías durante el escaneado. La realización de los 19 escaneados tomo alrededor de medio día.



ILUSTRACIÓN 18- JORNADA TOMA DE DATOS. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL



ILUSTRACIÓN 17- LASER ESCÁNER. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL

En cuanto a la información de la geometría y propiedades de los materiales presentes se utilizará los hallazgos previamente encontrados por Mazarredo en su tesis doctoral (Mazarredo, 2015). Este se basó en una investigación detallada de trabajos previos, análisis no invasivos como lo es la termografía con la cual pudo delimitar los materiales y el rango de acción de las propiedades de estos con sus respectivas modificaciones y restauraciones durante lo largo de la historia lo que fue alterando sus condiciones originales, así como su comportamiento estructural.

AUTODESK RECAP

El registro de los escaneados y la limpieza de estos se realizó en Recap programa de Autodesk, mediante una combinación *scan to scan* que genero un registro con una precisión general mejor

del mm. Este modelo se exporto unificado para luego ser unido al ya existente modelo del conjunto San Juan del hospital el cual incluía todo el exterior de la iglesia elaborado previamente por él IRP. Formando con estos dos un modelo más completo del complejo para ser utilizado para generar un modelo HBIM.



ILUSTRACIÓN 20- NUBE DE PUNTOS UNIFICADA

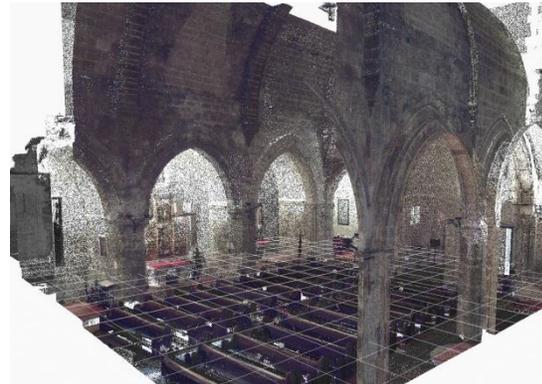


ILUSTRACIÓN 19- NUBE DE PUNTOS, SECCIÓN DE LA NAVE

3. Modelización Estructural

Con este paso previo realizado, el siguiente paso es importar la nube de puntos al programa que utilizaremos para la realización del modelo, en este caso se utilizó el programa Autodesk Revit, esto por ser uno de los más avanzado en el sector además de que ofrece una licencia estudiantil por ser alumno de la Universitat Politècnica de València.

Luego de abrir el programa y seleccionar una plantilla de trabajo estructural nos dirigimos al menú insertar y cliqueamos la opción *Point Cloud*, aquí nos abre una pestaña de búsqueda

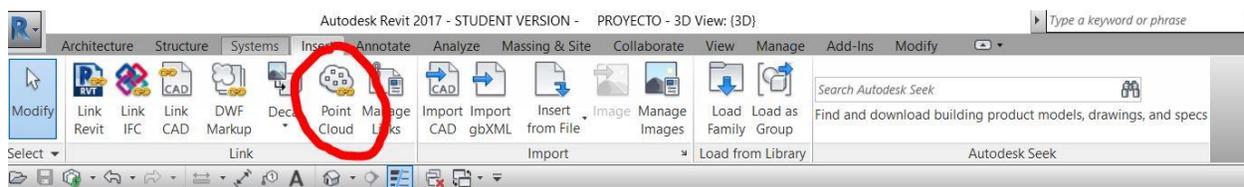


ILUSTRACIÓN 21 - OPCIÓN INSERTAR NUBE DE PUNTOS. FUENTE PROPIA

donde deberemos encontrar el archivo con el que trabajamos previamente en Autodesk Recap.

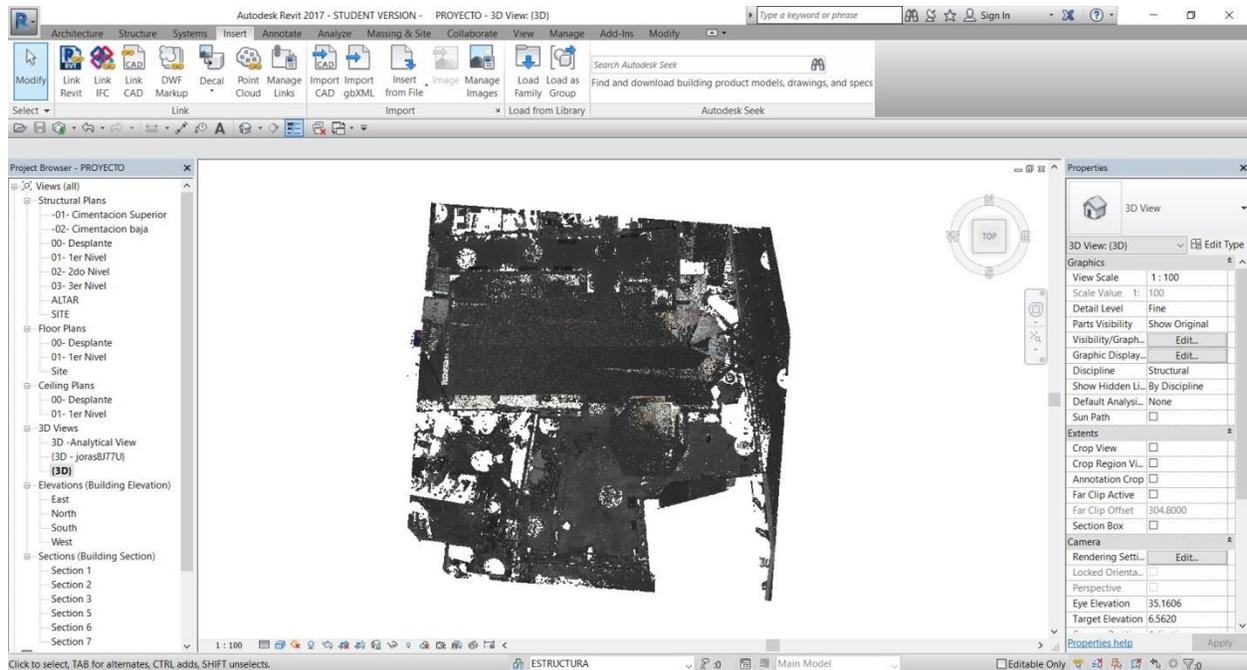


ILUSTRACIÓN 22- NUBE DE PUNTOS EN REVIT. FUENTE PROPIA

Una vez tenemos la nube de puntos procedemos a crear los ejes estructurales y los niveles constructivos, esto lo hacemos desde la pestaña de estructura en las opciones de *Grid* y *Level* respectivamente. Con esto tendremos un punto de partida para empezar a modelar los elementos estructurales.



ILUSTRACIÓN 23- OPCIÓN INSERTAR EJES Y NIVELES. FUENTE PROPIA

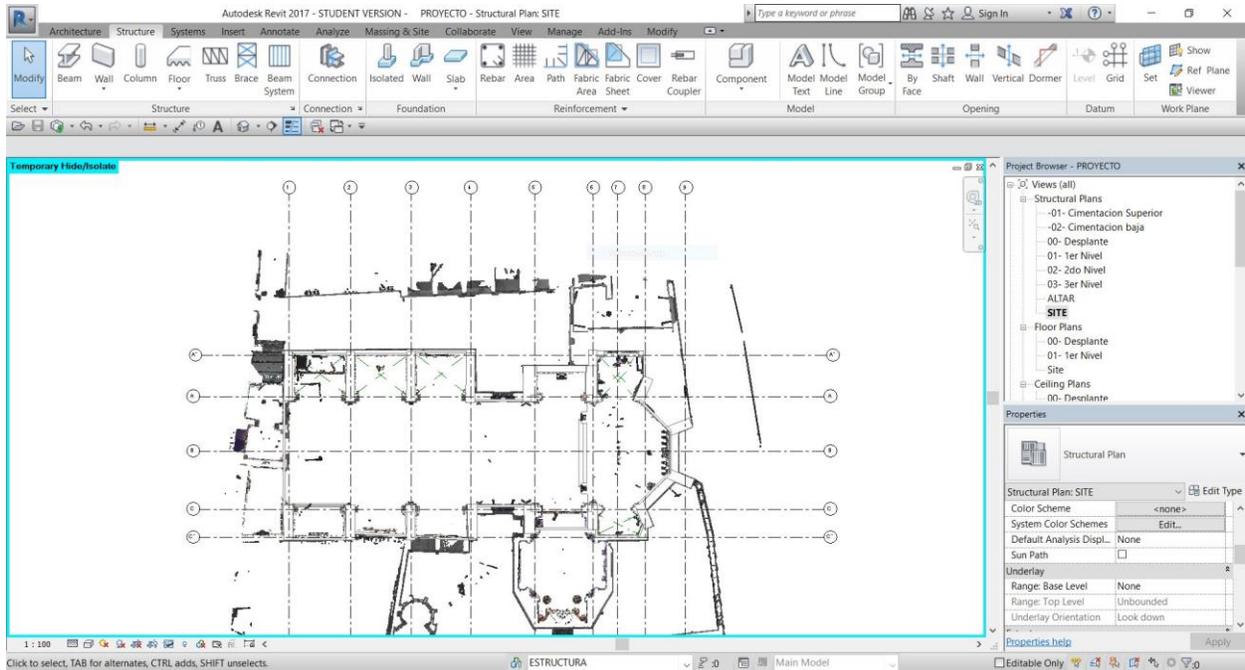


ILUSTRACIÓN 24- EJES CONSTRUCTIVOS. FUENTE PROPIA

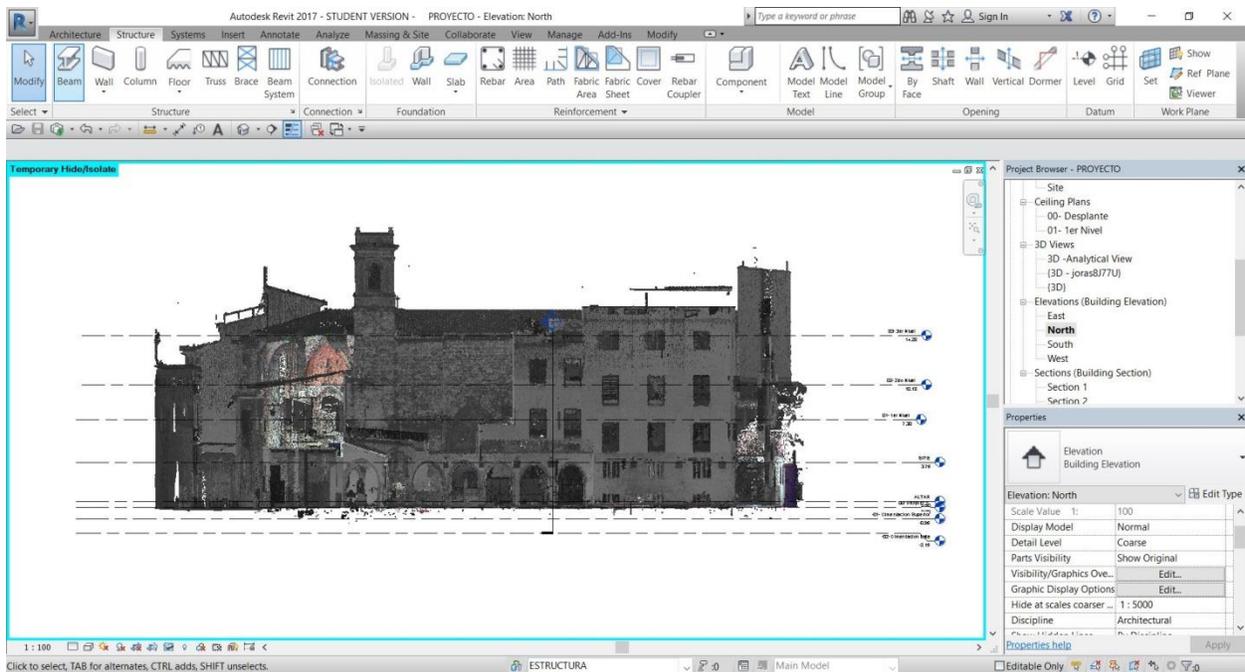


ILUSTRACIÓN 25- NIVELES CONSTRUCTIVOS. FUENTE PROPIA

Una vez tenemos esto podemos empezar el modelo de los elementos estructurales de la edificación histórica, para esto empezaremos con las columnas, debemos saber que todo elemento con fines estructurales que vayamos a modelar deberemos realizarlo dentro de la pestaña de estructura de Autodesk Revit.

Debido a los estilos arquitectónicos del pasado, los elementos estructurales de las edificaciones históricas están formados por una geometría compleja totalmente diferente a la que se utilizan en la actualidad y a lo que se va a adaptando la tecnología, por esto, para el modelado de estos elementos no se podrán utilizar las familias de elementos predeterminados que nos vienen con el programa, sino que se irán modelando en situ. Para los más tradicionales se procederá a utilizar alguna de las familias que presenta Revit por defecto y crearemos una partir de esta para adecuarla a lo que necesitamos modelar.

Para modelar los elementos con geometría compleja deberemos dirigirnos a la pestaña de estructura seleccionamos *Component Model in-Place*, aparecerá una ventana que nos pedirá que selecciones dentro de que categoría estructural ubicaremos el elemento que vamos a modelar.



ILUSTRACIÓN 26- MODELADO IN SITU. FUENTE PROPIA

Seleccionamos *Columns* lo que nos genera una nueva ventana donde vamos a dar un nombre a la nueva familia que vamos a crear, es importante tender en cuanto la nomenclatura que utilizaremos para ir creando estas nuevas familias con el fin de tener estas organizadas para su futura manejo. Esto abre una nueva pestaña, *Create*, aquí encontraremos las seis diferentes formas con la que podremos crear familias nuevas y así se puedan ajustar a lo que tenemos en la realidad.

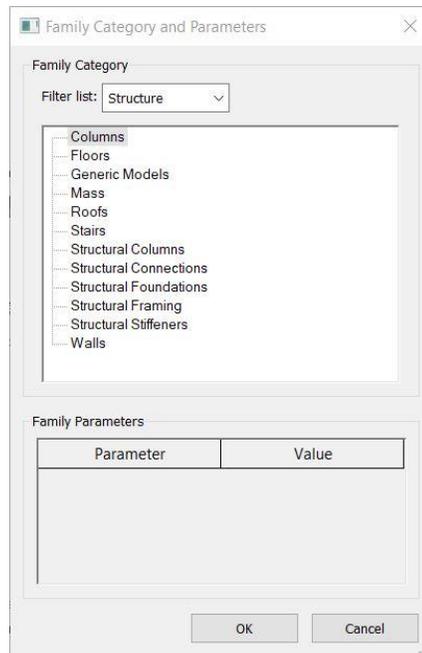


ILUSTRACIÓN 27- CUADRO DE CATEGORÍA DE FAMILIA Y PARÁMETROS



ILUSTRACIÓN 28- HERRAMIENTAS DE MODELADO IN SITU. FUENTE PROPIA

Extrusion: esta función nos permite a partir de un perfil dibujado crear una forma solida en 3D.

Blend: Muy similar a *extrusion*, luego de definir la geometría de ambos extremos esta función nos permite crear un elemento solido a partir de estos dos perfiles, cambiando de forma a largo

de su longitud para adaptarse a la diferencia entre estos, como por ejemplo el programa nos presenta forma solida que cambia de un cuadrado a un circulo en su otro extremo.

Revolve: partiendo de un perfil esta función nos permite barrerlo a partir de un eje y especificando cuantos grados queremos que este recorra.

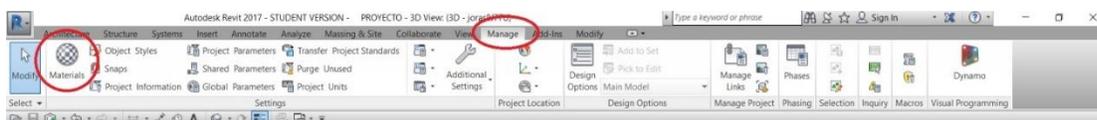
Sweep: parecido al anterior *Sweep* nos permite barrer un perfil, pero a diferencia del anterior en esto podemos definir el camino que queremos que este recorra.

Sweep Blend: mezcla dos de las anteriores como su nombre lo indica, luego de definir dos perfiles geométricos diferentes para la base y la cúspide, y de definir el camino que queremos que recorra esta función nos crea un elemento 3D.

Void Forms: Con esta función podemos crear elementos volumétricos, pero con la característica de que no serán sólidos, esto es útil para eliminar cualquier fragmento no deseado de una forma sólida.

Luego de seleccionar la herramienta que mejor nos ayuda a representar la geometría del elemento Autodesk Revit nos da unas herramientas de dibujo entre las que podemos seleccionar líneas rectas o curvas, cuadrados, círculos, elipses, entre otras. Una vez obtenido nuestro elemento el cual no posee propiedades, es necesaria proveer a este del tipo de material en que está construido como de las propiedades físicas necesarias. Una vez completado este el elemento pasa a ser una familia más del proyecto.

Antes de asignar materiales a estas nuevas familias debemos de crear estos ya que no los encontraremos en la base de datos que posee Autodesk Revit. Para esto nos dirigimos a la pestaña "Manage" y seleccionamos la opción "Materials".



En la ventana que nos abre veremos la base de datos de materiales que viene por defecto con el programa. Para crear un nuevo material que se adapte al que necesitamos podremos utilizar dos opciones, siendo la primera buscar un material que se ajuste mucho al que necesitamos, para luego crear un duplicado de este y modificar sus propiedades para que concuerden con la del material en cuestión.

La otra opción en caso de que no tengamos ningún material parecida al que necesitamos sería crear nuestro nuevo material, para la cual sería necesario aparte de conocer sus propiedades físicas sería tener a disposición la información necesaria para suplir los datos de identidad, gráfico y de apariencia.

Se recomienda ir asignando estos materiales a las nuevas familias al momento en que se vayan creando las mismas.

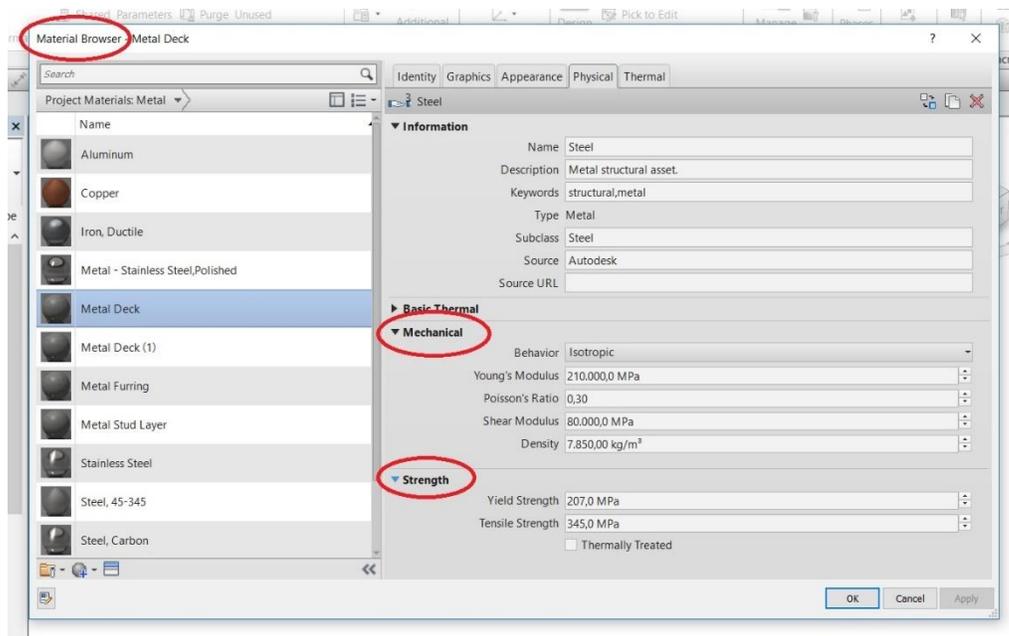


ILUSTRACIÓN 29 - BUSCADOR DE MATERIALES. FUENTE PROPIA

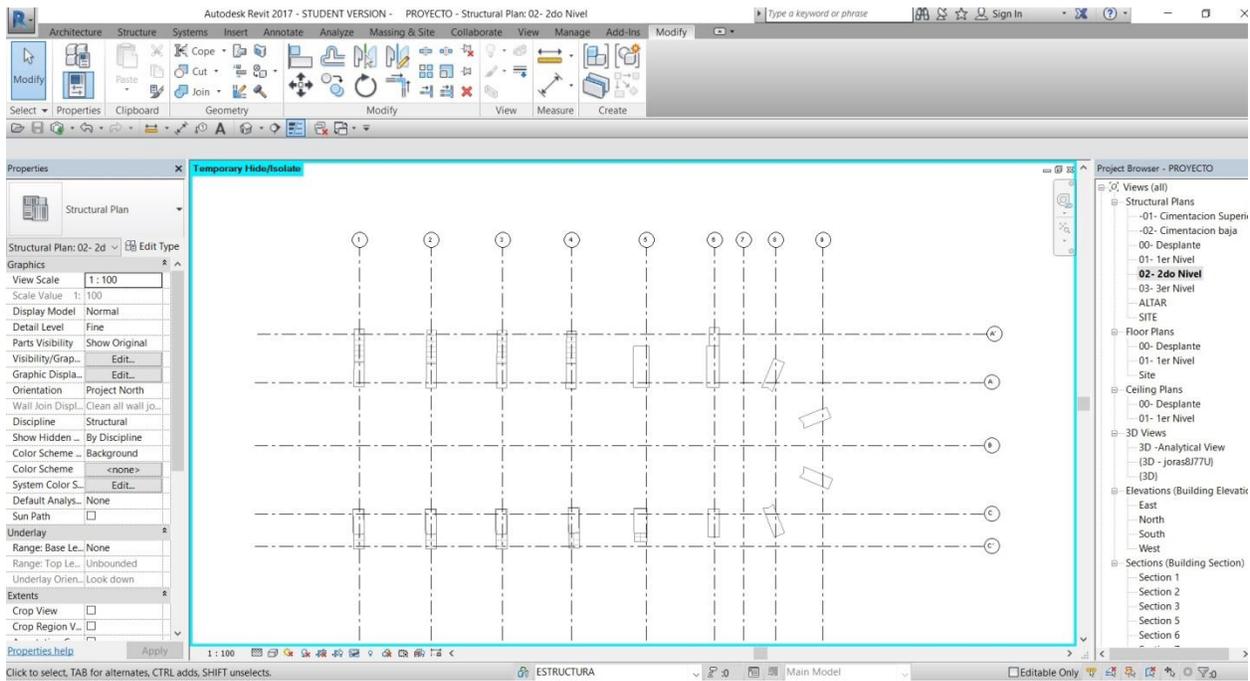


ILUSTRACIÓN 30- VISTA EN PLANTA DE COLUMNAS. FUENTE PROPIA

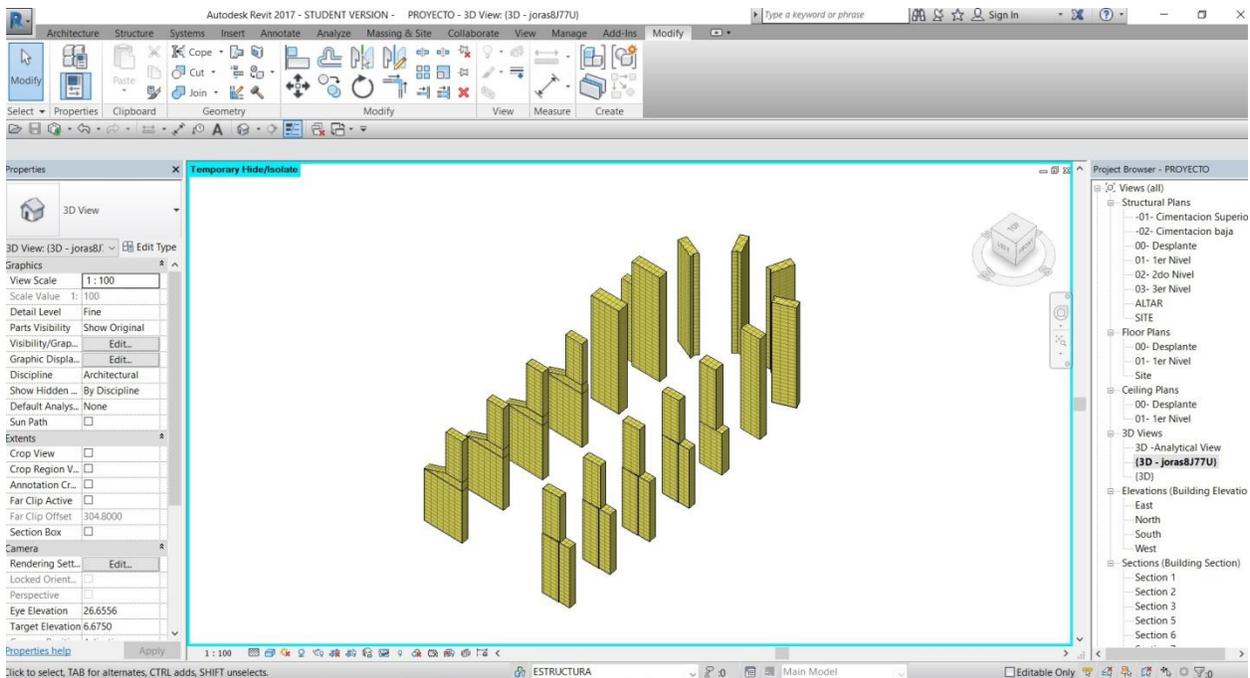


ILUSTRACIÓN 31- MODELO 3D COLUMNAS. FUENTE PROPIA

A continuación, siguiendo el protocolo propuesto, continuaríamos con el modelado de los elementos viga, en este caso los arcos que presenta la edificación histórica, seguido de los muros de cierre.

Para los arcos volveremos a utilizar el modelado in situ dentro de la pestaña de estructuras y para estos la opción de modelado más adecuada sería la de "Sweep" pero es necesario crear el perfil del elemento previamente, para luego ser cargado dentro de la nueva familia.

Nos dirigimos a nuevo y seleccionamos nueva familia, luego nos sale una ventana en la cual seleccionares la plantilla adecuada a lo que vamos a necesitar, en este caso, seleccionamos "Profile".

Una vez tengamos dibujado nuestro perfil procedemos a guardar el archivo y volvemos a nuestro proyecto. Ya en el proyecto dentro de la pestaña de estructura nos dirigimos hacia la opción de modelado in situ.

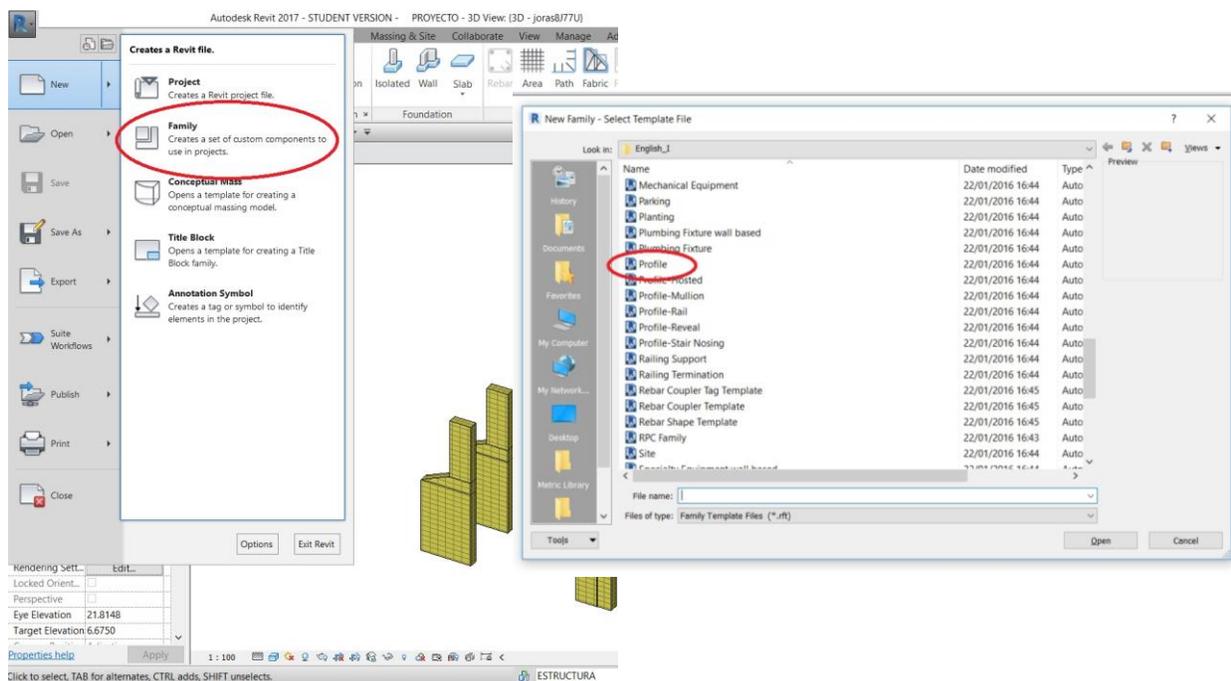


ILUSTRACIÓN 32- NUEVO PERFIL. FUENTE PROPIA

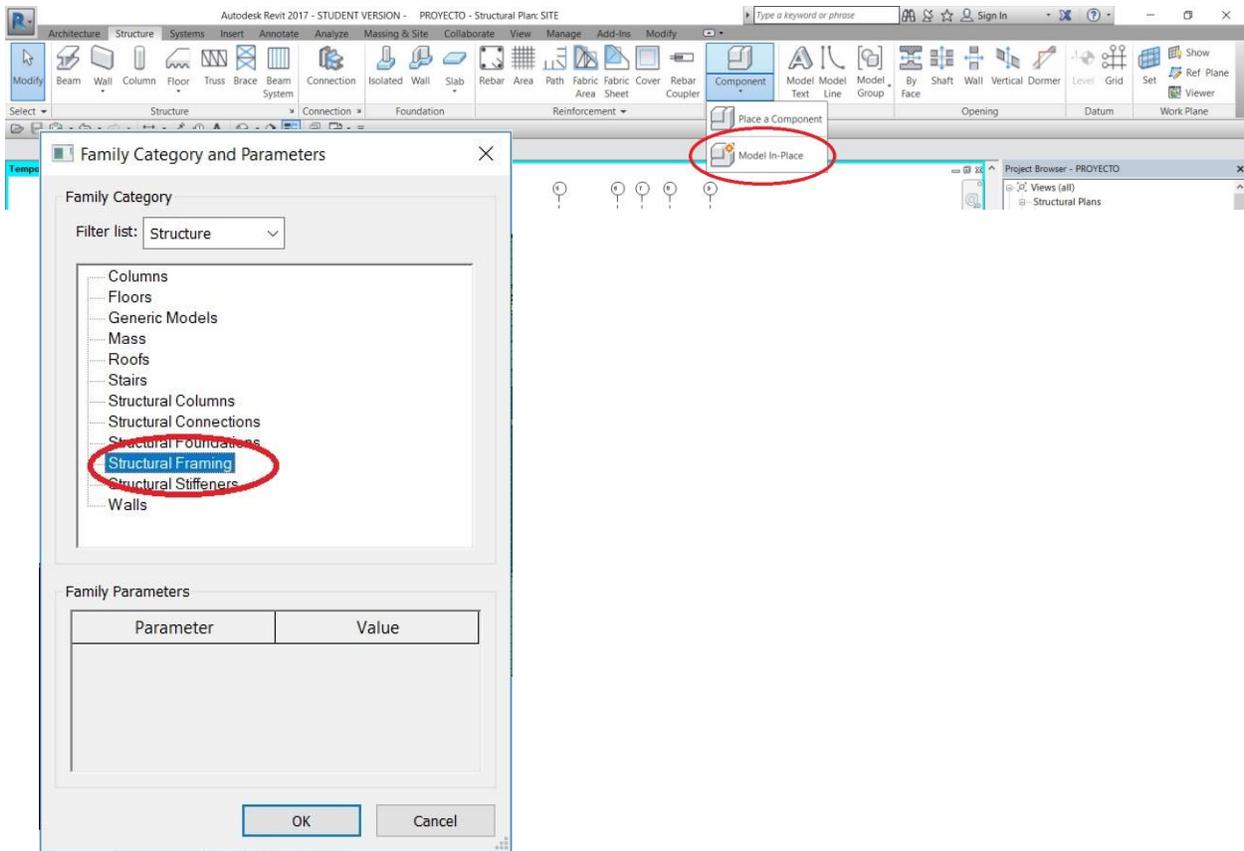


ILUSTRACIÓN 33- MODELADO IN SITU, ARCOS. FUENTE PROPIA

En la ventana de categoría de familia y parámetros seleccionaremos la opción de "Structural

"Framing" y damos nombre (siguiendo la nomenclatura que se estableció) a la nueva familia.

A continuación, seleccionamos la opción "sweep", procedemos a dibujar el camino que queremos que recorra el perfil y aceptamos. Luego seleccionamos la opción de cargar perfil, nos aparecerá una ventana de búsqueda donde deberemos seleccionar el perfil que dibujamos previamente.



ILUSTRACIÓN 35- CARGAR PERFIL. FUENTE PROPIA

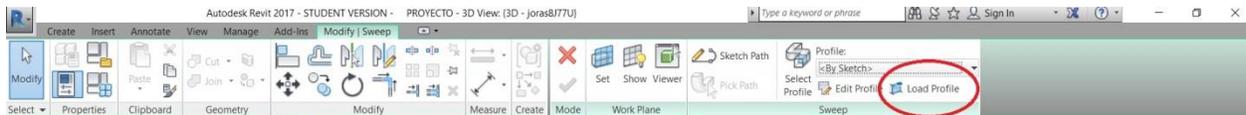


ILUSTRACIÓN 34- SWEEP. FUENTE PROPIA

Una vez lo carguemos aceptamos los cambios y obtenemos nuestro arco.

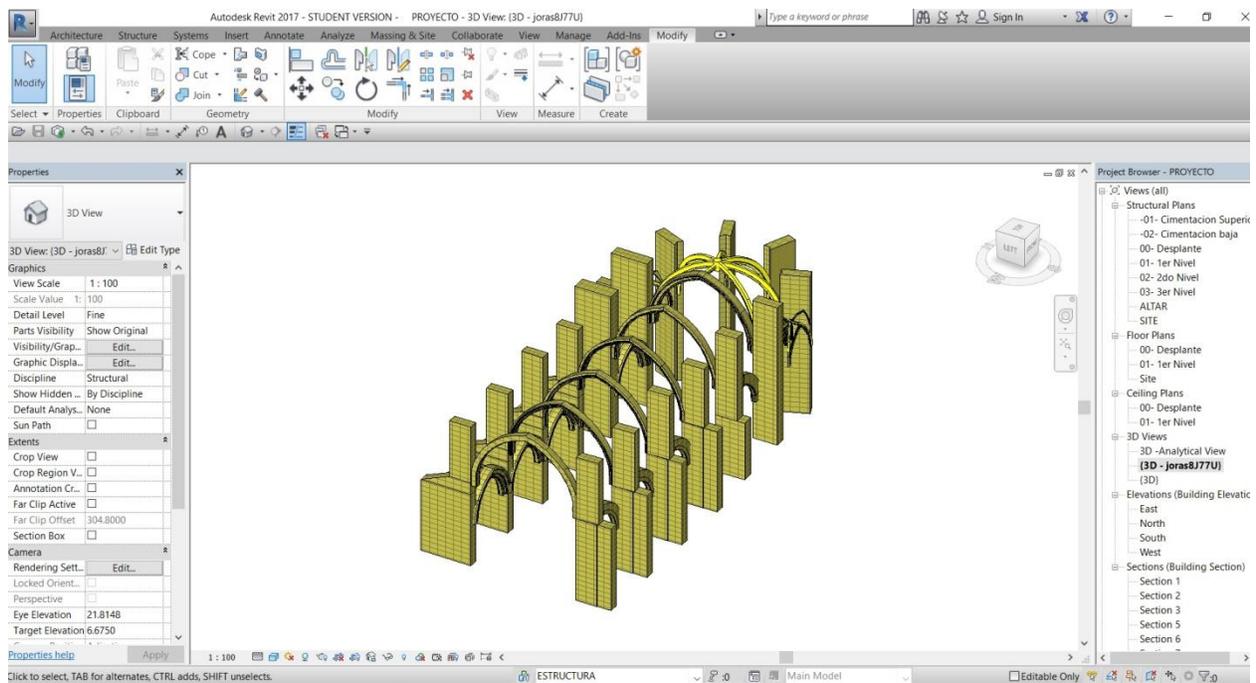


ILUSTRACIÓN 36- MODELO 3D COLUMNAS Y VIGAS. FUENTE PROPIA

Para el modelado de los muros de cierre ya que no poseen una geometría compleja podrías modelar estos de dos maneras distintas, una sería modelarlos duplicando una de las familias existente en Autodesk Revit y editando las propiedades de este para que se adapten a lo que necesitamos y la otra opción es modelarlos como elemento in situ, seleccionando como familia Muros y utilizando la opción de "extrusion" para luego asignarle sus propiedades.

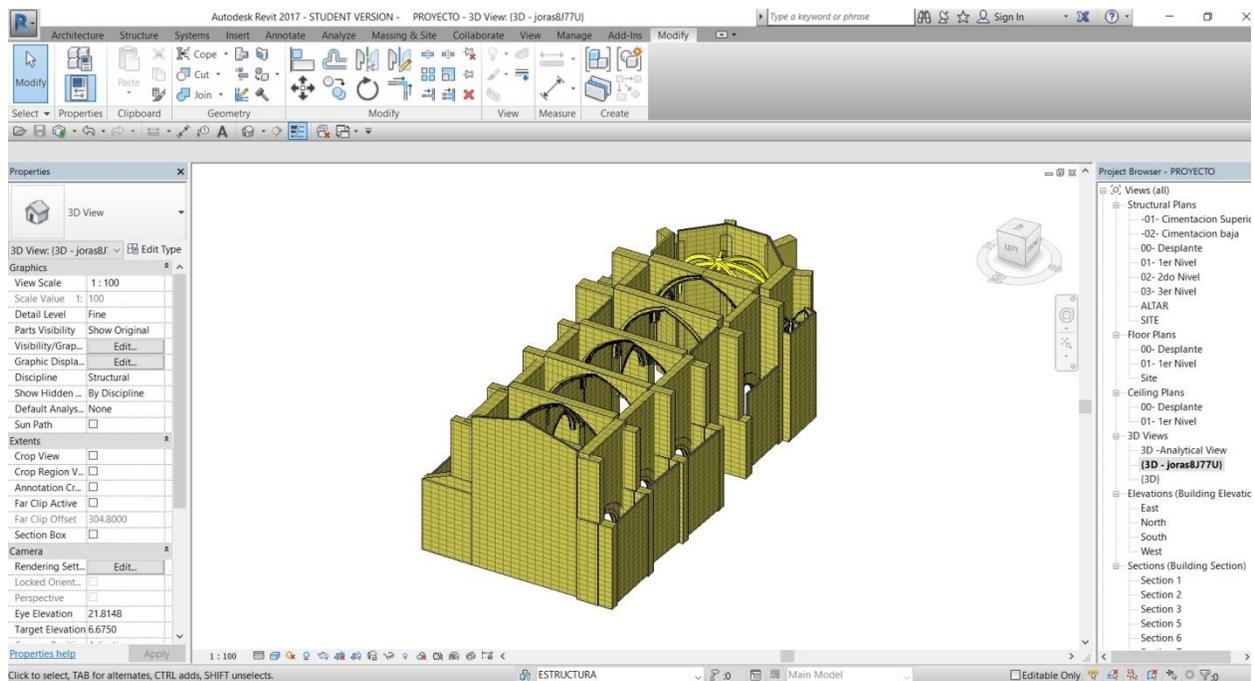


ILUSTRACIÓN 37- MODELO 3D COLUMNAS, VIGAS Y MUROS. FUENTE PROPIA

Una vez tenemos las columnas, vigas y muros modelados, continuamos con el modelado de la cimentación. Para nuestro caso como se especificó anteriormente la cimentación se encuentra a una profundidad 2.15 m y consiste en una cimentación corrida. Para esto volveremos a utilizar la opción de modelado in situ y para el tipo de familia seleccionaremos "Structural Foundations" le damos un nombre a la familia y procedemos a modelar la cimentación corrida a lo largo de todo el muro de cierre.

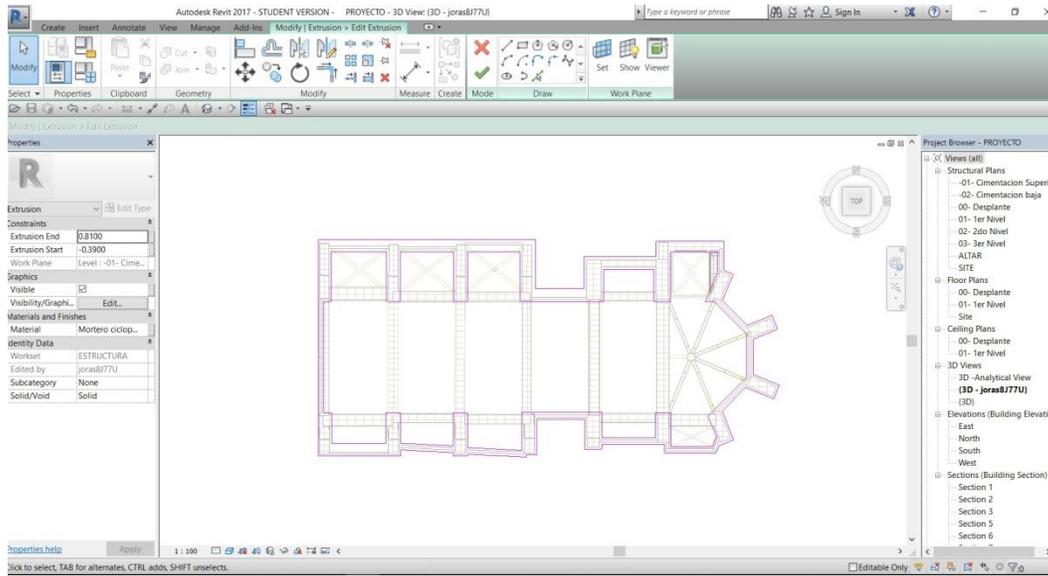


ILUSTRACIÓN 39 - MODELADO DE LA CIMENTACIÓN. FUENTE PROPIA

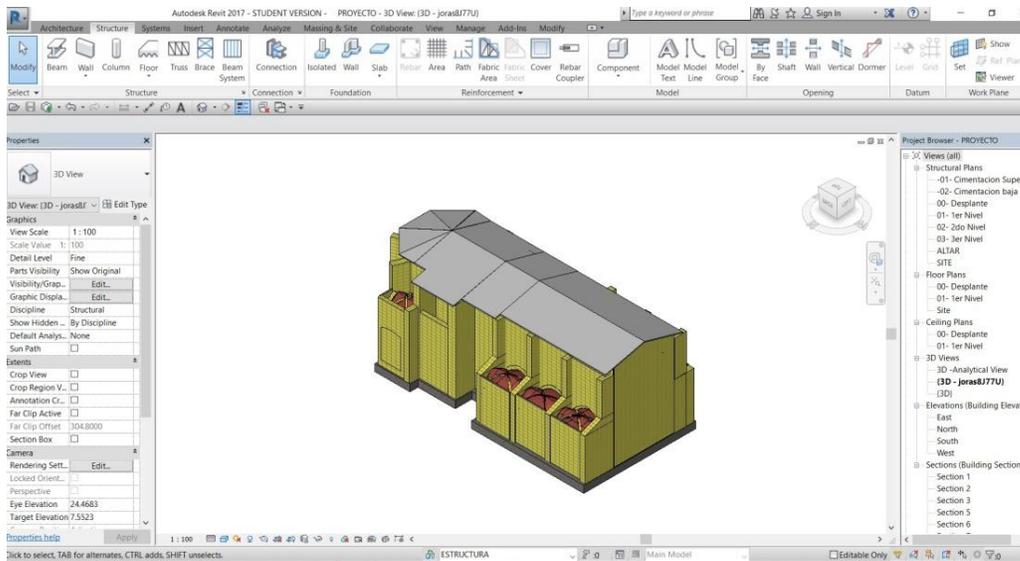


ILUSTRACIÓN 38 - MODELADO TRIDIMENSIONAL COMPLETO. FUENTE PROPIA

4. Exportación a los programas de Análisis Estructural

Una vez tenemos el modelo tridimensional completo, incluida la información asociada con todos los tipos de especificaciones técnicas que lo completan, se procede a comprobar el grado de interoperabilidad que existe, entre el programa en el que se implementado el modelo, es decir modelo virtual 3D + basa de datos intrínseca, en este caso la aplicación escogida fue Autodesk Revit, y los programas de análisis estructural de mayor difusión en el mercado. Se determinó como una de las prioridades que en el formato de transferencia lograra incluir el archivo la información intrínseca al modelo geométrico 3D, por lo que, se descarta cualquier formato que solo soporte la transferencia de la información geometría.

La selección del formato en que se iba a exportar, así como los programas en los que se iba a probar se vio limitada a los programas que estuvieran disponibles de forma gratuita o en versión para estudiantes o de prueba limitada en el tiempo. Lo mismo, fue un factor clave a la hora de decidir utilizar el formato IFC ya que, muchas casas ofertan complementos que pueden ser agregados a Autodesk Revit para facilitar la comunicación del modelo entre sus programas de análisis, pero al igual que sus programas, estos tienen un precio.

Los programas de análisis seleccionados fueron *SAP2000* de CSI y Autodesk *Robot Structural Analysis Profesional* y como se especificó anteriormente el formato de transferencia a utilizar será el IFC.

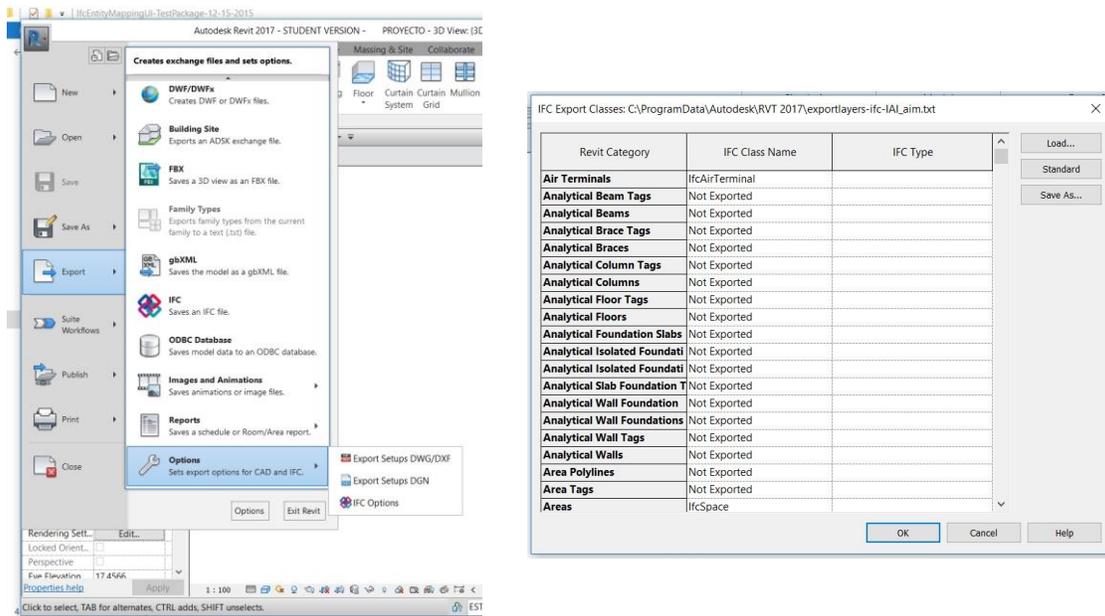


ILUSTRACIÓN 40 – CONFIGURACIÓN DE OPCIONES IFC EN REVIT

Luego de seleccionar los programas se deberá confirmar las entidades compatibles entre ambos programas. Una vez confirmada vamos al menú y seleccionamos exportar y en opciones seleccionamos opciones IFC.

Technical Note		IFC4 Import and Export
Architectural Coordination View Import		
Shared Building Element Entities		
The table below indicates for each of the IFC entity types in the Shared Building Element schema whether it is imported into ETABS and SAP2000, and if it is imported, notes any restrictions:		
IFC Entity	Imported	Restrictions
IfcBeam		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. The end points typically require adjustment by the user as they are at the face of the support – wall, column, or girder. Always imported as a straight line.
IfcBeamStandardCase		
IfcBeamType		
IfcBuildingElementProxy		
IfcBuildingElementProxyType		
IfcBuildingSystem		
IfcChimney		
IfcChimneyType		
IfcColumn		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. Always imported as a straight line.
IfcColumnStandardCase		
IfcColumnType		
IfcCovering		
IfcCoveringType		
IfcCurtainWall		
IfcCurtainWallType		
IfcDoor		
IfcDoorStandardCase		
IfcDoorType		
IfcMember		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. The end points typically require adjustment by the user as they are at the face of the support – wall, column, or girder. Always imported as a straight line.
IfcMemberStandardCase		
IfcMemberType		
IfcPlate		
IFC4 Import and Export		Page 4 of 27

ILUSTRACIÓN 41 - TABLA DE ENTIDADES IFC SOPORTADAS POR SAP2000 1DE2. (CSI, 2013)

Technical Note		IFC4 Import and Export
IfcPlateStandardCase	Red	
IfcPlateType	Red	
IfcRailing	Red	
IfcRailingType	Red	
IfcRamp	Red	
IfcRampFlight	Red	
IfcRampFlightType	Red	
IfcRampType	Red	
IfcRelConnectsPathElements	Red	
IfcRelCoversBldgElements	Red	
IfcRelCoversSpaces	Red	
IfcRoof	Red	
IfcRoofType	Red	
IfcShadingDevice	Red	
IfcShadingDeviceType	Red	
IfcSlab	Yellow	Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. Always imported as a straight line
IfcSlabElementedCase	Red	
IfcSlabStandardCase	Green	
IfcSlabType	Green	
IfcStair	Red	
IfcStairFlight	Red	
IfcStairFlightType	Red	
IfcStairType	Red	
IfcWall	Red	
IfcWallElementedCase	Red	
IfcWallStandardCase	Green	
IfcWallType	Green	
IfcWindow	Red	
IfcWindowStandardCase	Red	
IfcWindowType	Red	

ILUSTRACIÓN 42 - TABLA DE ENTIDADES IFC SOPORTADAS POR SAP2000 2DE2. (CSI, 2013)

Dentro de esta pestaña podremos ver qué entidad IFC posee cada categoría de Revit y podremos modificarlas de acuerdo con la necesidad de los programas de análisis.

Luego de modificar las entidades, guardamos y vamos a menú y volvemos a seleccionar exportar y ahora seleccionamos IFC.

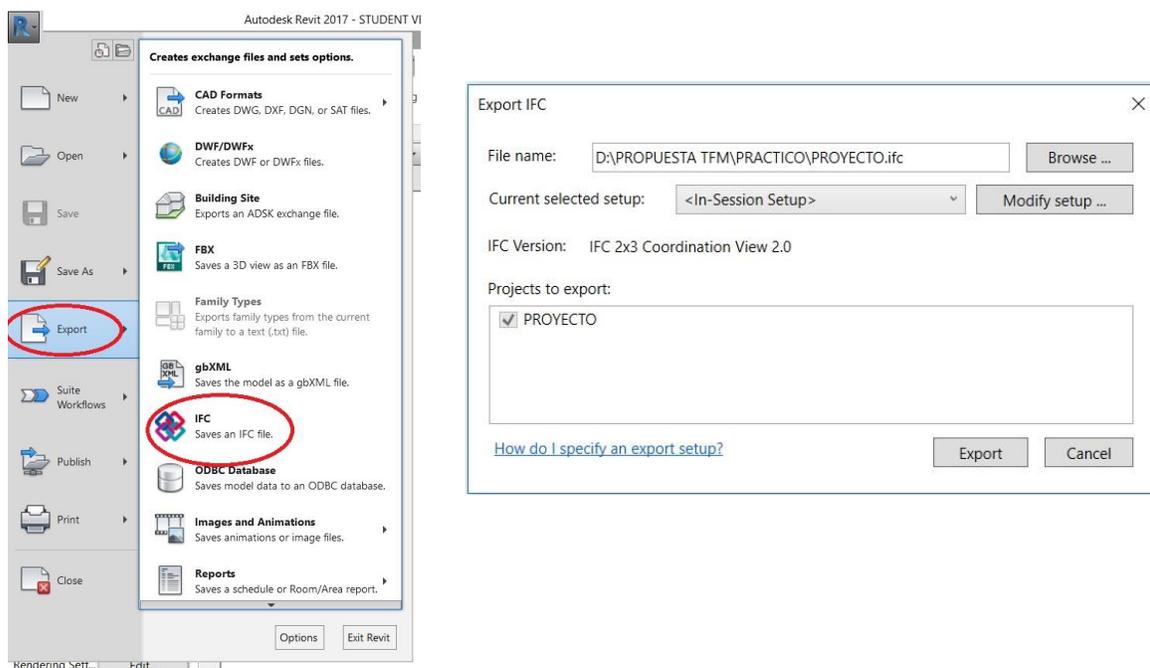


ILUSTRACIÓN 43 - EXPORTAR IFC DESDE REVIT. FUENTE PROPIA

Se nos presenta una ventana en la que podremos elegir donde ubicar el archivo que se va a exportar, así como el tipo de versión IFC a utilizar, y a continuación, seleccionamos exportar.

Luego de la generación del archivo ya solo queda importar el mismo en los programas de análisis.

Para SAP2000 nos dirigimos a archivo, importar y ahí seleccionamos "IFC .ifc File" lo que no abrirá una ventana en donde buscaremos el archivo IFC exportado desde Revit y presionamos "Import".

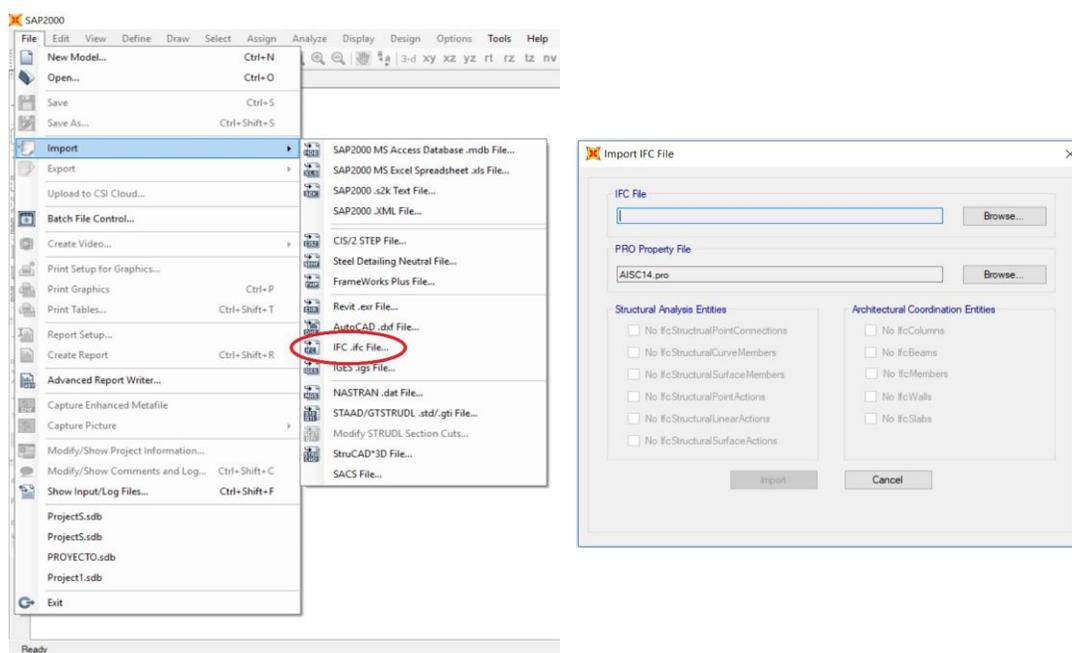


ILUSTRACIÓN 44 - IMPORTAR MODELO IFC EN SAP2000. FUENTE PROPIA

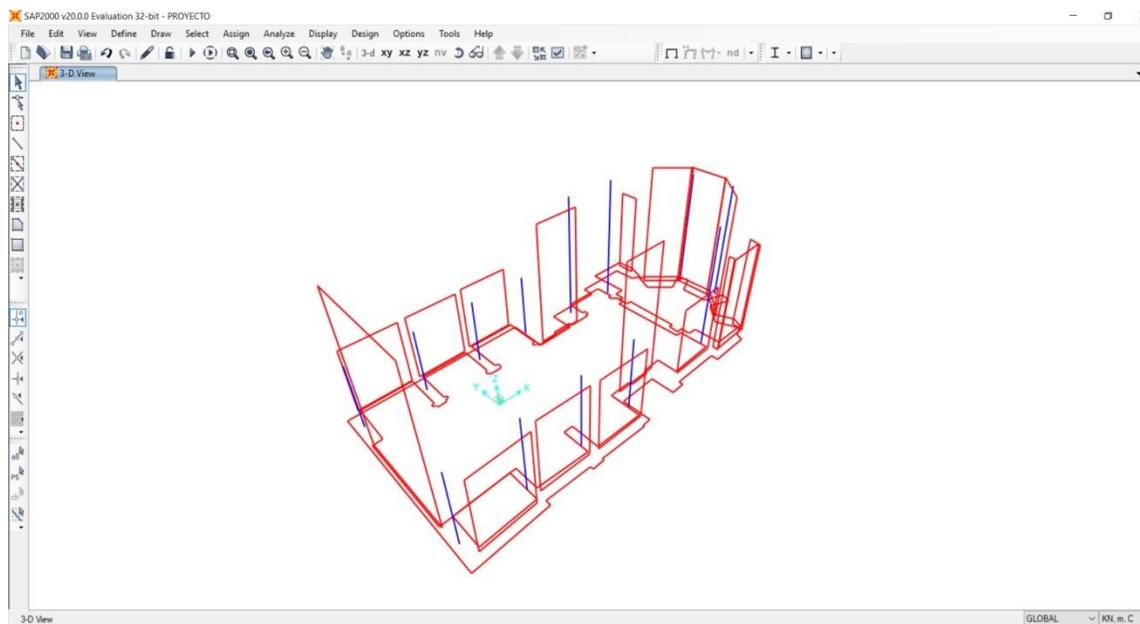


ILUSTRACIÓN 45 - MODELO IFC VISTO EN SAP2000. FUENTE PROPIA

4.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO

Luego de completar el ciclo del protocolo planteado y observar los resultados de la importación del archivo IFC a los programas de análisis estructural se contempla el incorrecto intercambio de información entre los programas dando como resultado la ausencia de algunas de las familias de elementos.

En una primera instancia en el archivo visto en *SAP2000* se observa la ausencia de los arcos y de las bóvedas y cubierta. Fijándonos en el documento de las entidades IFC soportadas por este programa vemos como limitante que solo soporta cierto tipo de geometría y formas. Esto resulta en una clara limitante a la hora de trabajar con edificaciones históricas debido a la complejidad geométrica que estas suelen presentar en sus elementos.

Evaluando los resultados del archivo IFC luego de abrirlo en el programa *Robot Structural* de Autodesk nos encontramos con la ausencia por igual de algunos elementos del modelo. Lo que nos recalca las deficiencias del formato para trasladar elementos geométricos complejos.

Ya utilizando el enlace directo que nos ofrece Autodesk por ambos ser programas de la misma casa nos encontramos que este no soporta el correcto direccionamiento de elementos creados *in situ*, solo transfiriendo correctamente aquellas familias de elementos predeterminado de Revit.

4.4 SOLUCIONES AL MODELADO HBIM

4.4.1 COMPLEMENTOS PARA REVIT

Con el avance y el incremento del uso de la metodología BIM en el sector de la arquitectura y la construcción y debido a la cantidad de programas computacionales de diferentes casas necesarios para el desarrollo y realización de los proyectos de este sector, la poca interoperabilidad que había entre ellos resultaba un obstáculo mayúsculo para la eficiencia de esta metodología por lo que se empezó a desarrollar complementos para los programas de arquitectura como lo es Revit, esto con el fin de mejorar el intercambio de información con programas más especializados como los de análisis de estructuras.

Estos complementos tienden a ser más eficaces en el intercambio de información ya que están específicamente programados para intercambios en dos direcciones entre los mismos programas, lo que facilita esta tarea.

Entre las desventajas que presenta esta solución está en que el intercambio solo se puede realizar hacia un solo programa y que usualmente estos complementos vienen con un precio de mercado.

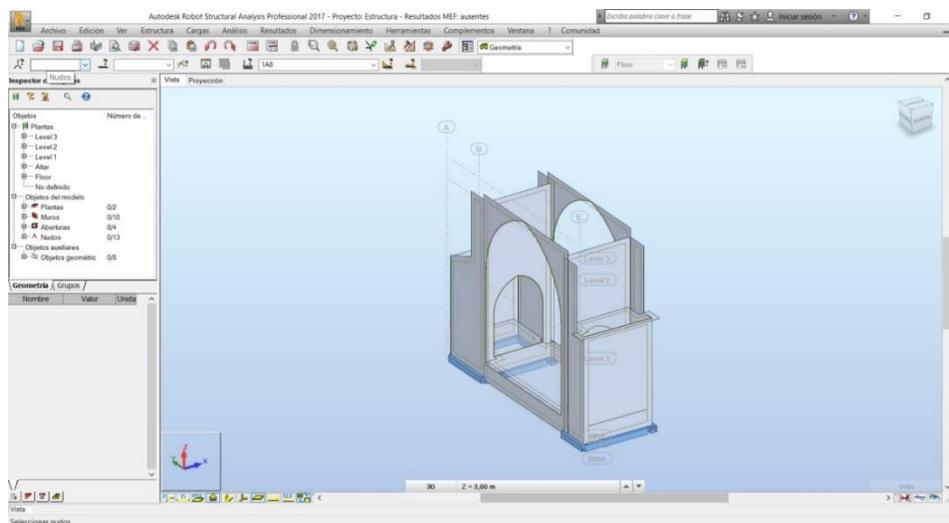


ILUSTRACIÓN 46 - MODELO DE LA SOLUCIÓN ALTERNA VISTO EN AUTODESK ROBOT. FUENTE PROPIA

4.4.2 MODELAR ESTRUCTURA CON ELEMENTOS DE OBRA NUEVA

Esta solución contempla el uso de las familias que vienen por defecto dentro de Revit que durante la exportación previa se comprobó una correcta transferencia de los datos de los elementos que se encontraban en esta.



Estos a parte de la correcta transferencia de datos también nos facilita el manejo del modelo analítico del proyecto el cual ya también viene determinado para cada elemento.

Pero este, también presenta desventajas significativas para su uso en edificaciones históricas, y estas son la carencia de flexibilidad a la hora de cambiar la geometría. Información que es necesaria en este tipo de edificaciones. Por lo que, se limita la capacidad para realizar arcos o muros compuestos y son elementos característicos de las edificaciones históricas. Esto conlleva al que modelo pierda información y carezca no una representación geométrica cercan a lo que existe en la realidad.

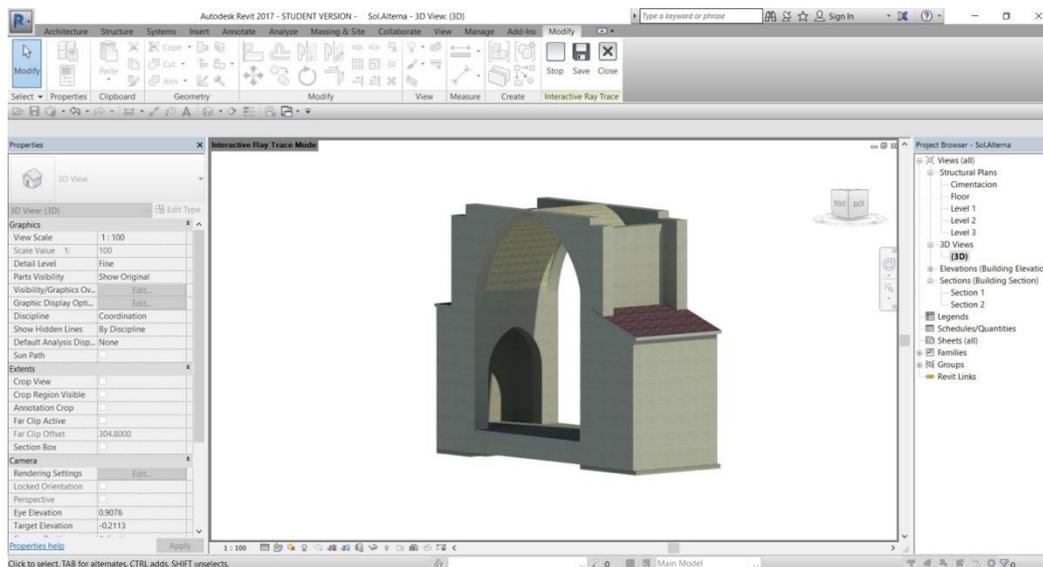


ILUSTRACIÓN 47 - MODELO ALTERNO USANDO ELEMENTOS PREDETERMINADOS. FUENTE PROPIA

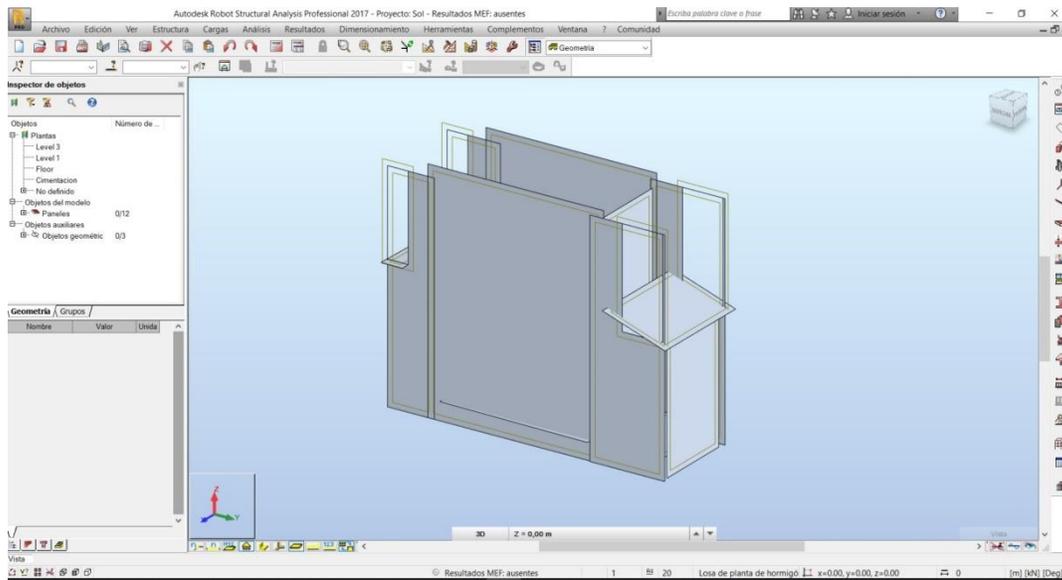


ILUSTRACIÓN 49 - MODELO ALTERNO IFC VISTO EN AUTODESK ROBOT. FUENTE PROPIA.

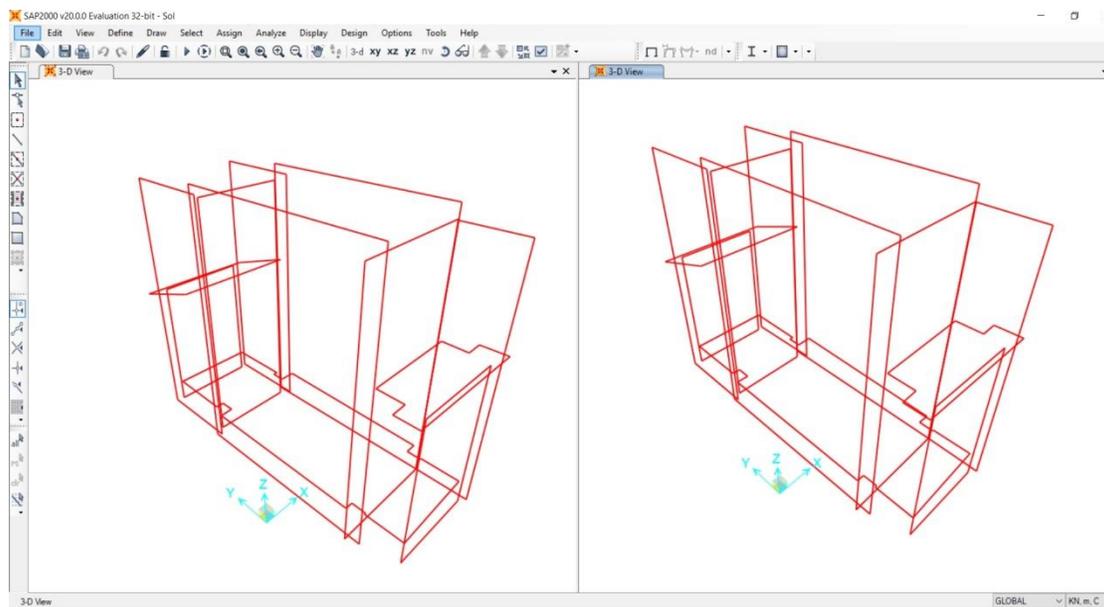


ILUSTRACIÓN 48 - MODELO ALTERNO IFC VISTO EN SAP2000. FUENTE PROPIA.

4.4.3 UTILIZACIÓN DE MALLAS

Después, de la entrevista con el profesor Adolfo Alonso Dura, (ver anexo 3) el cual, nos detalló entre otras cosas, la manera más conveniente en la actualidad, y que es, la que utilizando el equipo que dirige, en diferentes proyectos de edificaciones históricas.

La idea es realizar una conversión inteligente del modelo HBIM en un mallado solido de tetraedros, es decir, discretizar el medio continuo de la estructura en elementos finitos, con el fin de facilitar reconocer esta información en los programas específicos de un análisis estructural mediante elementos finitos. Y todo esto, sin perder el nivel detallado de la geometría obtenido desde la nube de puntos. Por ello, se debe implementar la integración de todos los requerimientos necesarios para facilitar la correcta la realización del análisis estructural en los programas escogidos, desde la primera etapa de modelado hasta la definición de las propiedades de los materiales, apoyos y las hipótesis de cargas.

El proceso para llevar a cabo esta solución consiste en la realización del modelado a partir de la nube de puntos teniendo en cuenta la consistencia geométrica del modelado, para el cual podemos utilizar la librería existente de familias en Revit para el modelado de los elementos de geometría regular y simple, ya para los elementos más complejos se decidió modelarlos de manera *in-situ* simplificando su geometría, dándoles a estos sus correctas categoría, familia y tipo. Una vez completado el modelo tridimensional en el programa Revit procedemos a exportar este hacia AutoCAD en el formato geométrico ACIS (.sat).

Una vez importado en AutoCAD procedemos a dividir los elementos solidos por capas atendiendo a los materiales de los elementos, esto nos facilitara la asignación de materiales una vez exportado el modelo al programa de cálculo. Además de realizar la unión de estos sólidos, ya que la creación de un mallado apto para un análisis de elementos finito los diferentes elementos deben convertirse en un modelo local con una perfecta unión cara con cara y arista con arista para garantizar la continuidad del modelo.

Una vez definida las capas y completado la unión de los sólidos formando un solo elemento en AutoCAD procedemos a exportar este hacia un programa de mallado en un formato preferiblemente de transferencia de representaciones de modelado sólidos como son IGES (.iges) o IGS (.igs).

Para el tramado 3D del modelo, el elemento básico es el tetraedro, que es un poliedro de 4 lados donde tres de ellos se encuentran en cada vértice. Esto se lleva a cabo para garantizar una transición correcta entre elementos de dimensiones variables. Por esto es muy importante llevar a cabo un modelado geoméricamente consistente ya que una discontinuidad en la unión de dos elementos generaría un aumento en la cantidad de tetraedros o hexaedros necesarios para la correcta transición entre los elementos y por ende un aumento significativo del número final de elementos lo cual nos demandaría una mayor cantidad de tiempo y potencia a la hora de realizar el análisis estructural.

Para la realización del mallado se debe asignar el tamaño promedio que se desea que tenga los tetraedros, esto tomando en cuenta el espesor de los elementos con los que se trabaja, esto para tener una buena representación de elementos a lo largo del espesor de un elemento.

Una vez exportado el modelo solido mallado hacia el programa de cálculo estructural deberemos de asignar los materiales a los elementos, así como los apoyos de la estructura y las hipótesis de cargar bajo las cuales queremos analizar el modelo.

Para validar este proceso nos valimos de un modelo reducido del caso de estudio propuesto, en donde analizamos una sección de la nave, bajo la tutoría del profesor Adolfo Alonso.

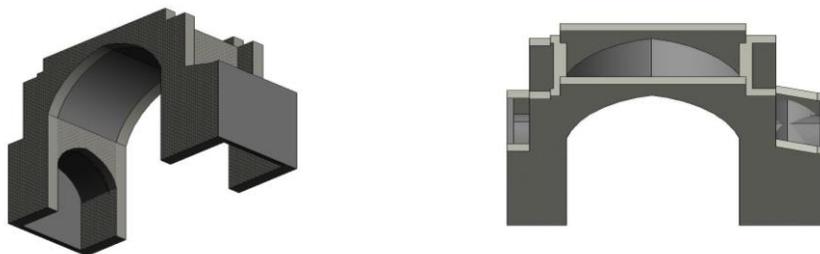


ILUSTRACIÓN 50- MODELO REDUCIDO, VISTO EN REVIT. FUENTE PROPIA

Para esto se idealizo el modelo a partir de la nube de puntos y utilizando las familias existentes se modelaron los muros macizos y las paredes. Para las bóvedas de cañón y de crucería se utilizó la herramienta de modelado in-situ.

El modelo se exporto en formato ACIS hacia AutoCAD donde se unieron los sólidos en una misma capa y se exporto el resultado en formato IGS.

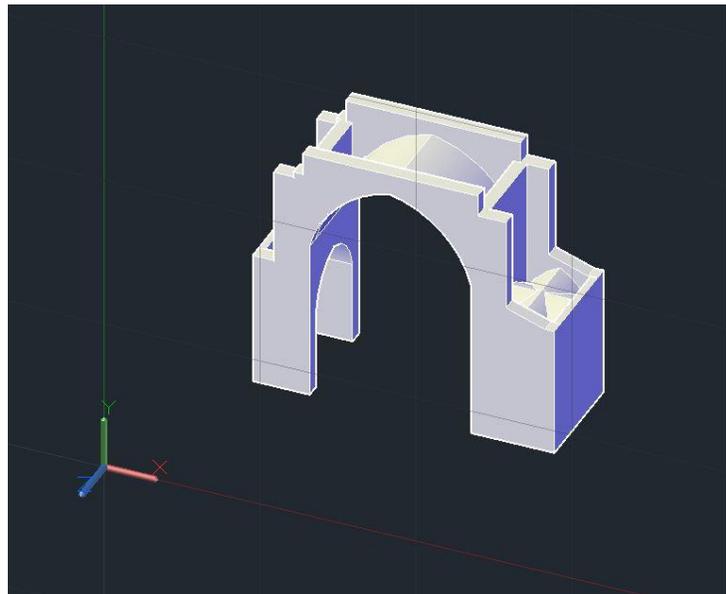


ILUSTRACIÓN 51- MODELO DE SOLIDOS, VISTO EN AUTOCAD. FUENTE PROPIA

Ya obtenido el sólido geoméricamente consistente y exportado hacia el programa de mallado, en este caso se utilizó el programa *GiD* bajo la tutoría del profesor Alonso. *GiD* es un programa desarrollado por el *Centro de Métodos Numéricos en Ingeniería*, un centro de investigación localizado en Barcelona (España), fue fundado en 1987 en la Universidad Politécnica de Cataluña y se especializa en el desarrollo de aplicaciones de métodos numéricos y programas para buscar soluciones a la variedad de problemas que surgen en ingeniería y las ciencias aplicadas. (About us | GiD - The personal pre and post processor, 2018)

Para generar la malla se le asigno un tamaño promedio 0.6, con este valor se nos genero una malla de 51,493 solidos o tetraedros y un total de 15,215 nodos.

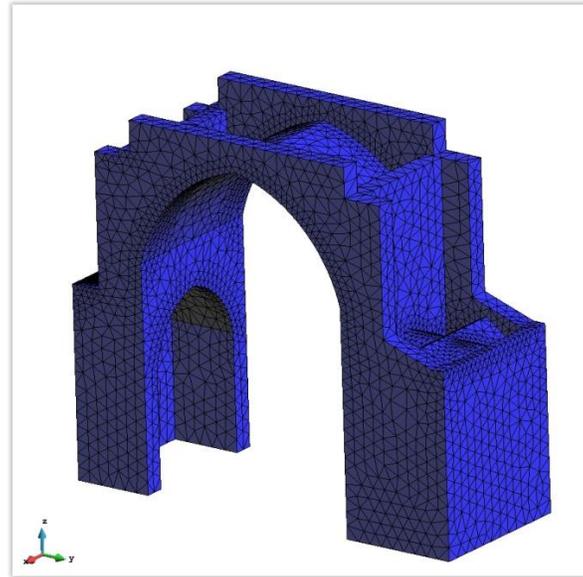


ILUSTRACIÓN 52- MODELO MALLADO, VISTO EN GID. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO

Una vez tenemos completado el tramado procedemos a exportarlo al programa de cálculo ANGLE, desarrollado por el profesor Alonso (Anexo 3, 2018).

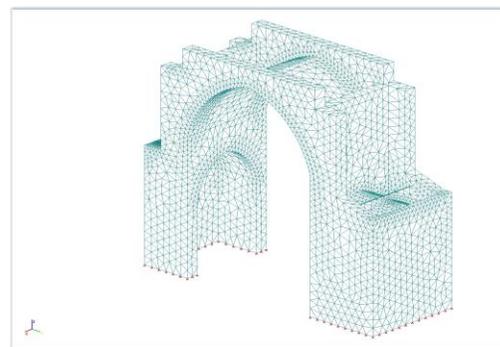
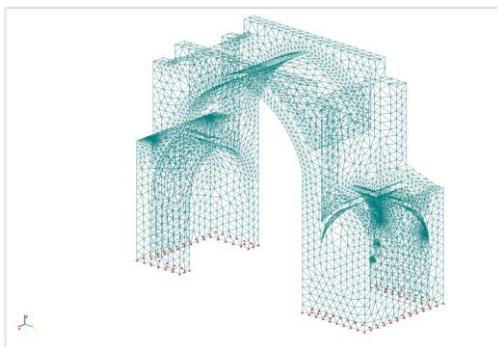


ILUSTRACIÓN 53- MODELO MALLADO CON APOYOS, VISTO EN ANGLE. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO

Una vez lo tenemos le asignamos los materiales, en este caso se utilizó sillería, y le asignamos los apoyos que presenta el modelo y como cargas solo se consideraron las de peso propio. Con estos datos se analizó el modelo bajo un análisis lineal con una duración total de 15 segundos y otro no lineal con una duración de 3 minutos, en el cálculo lineal se observaron las deformaciones que presenta el modelo y en el cálculo no lineal se visualizaron los daños.

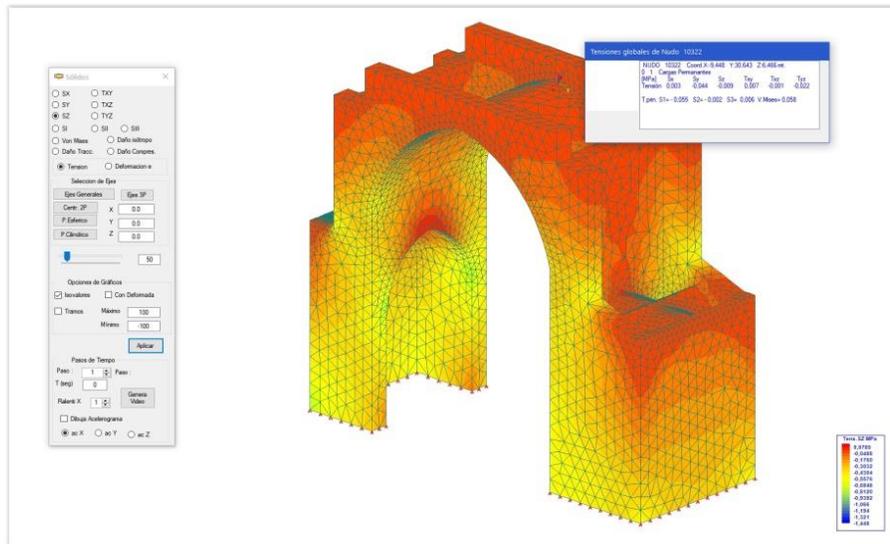


ILUSTRACIÓN 54- MODELO DEFORMACIONES BAJO EL CALCULO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO

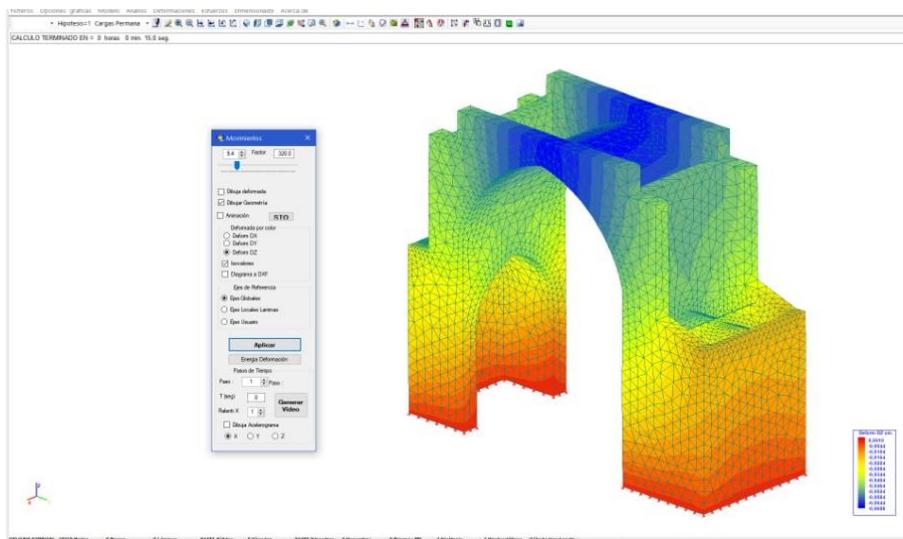
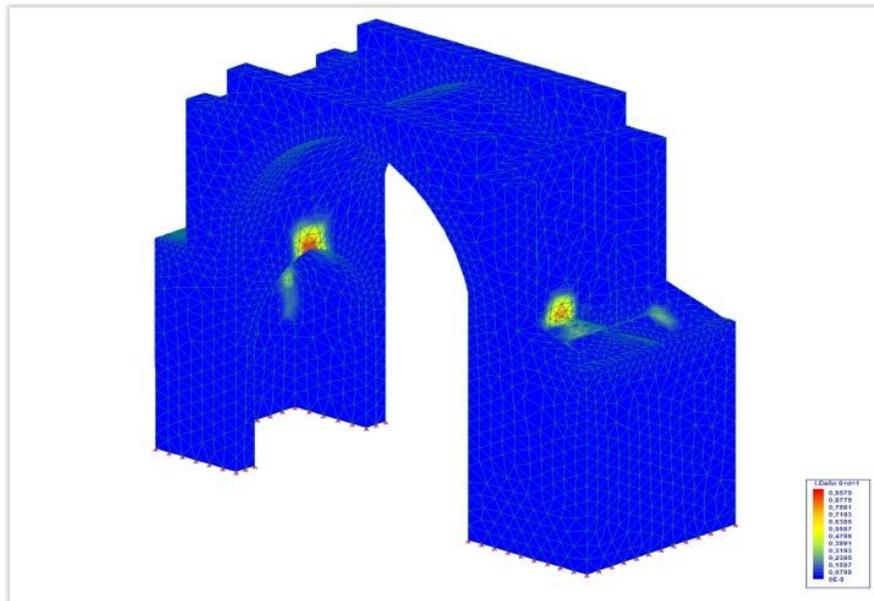


ILUSTRACIÓN 55- MODELO DE DAÑO BAJO EL CALCULO NO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO



ILUSTRACIÓ 56- MODELO DE TENSIONES BAJO EL CALCULO LINEAL. IMAGEN APORTADA POR EL PROF. ADOLFO ALONSO

De las soluciones propuesta tal vez la más factible. Posee la desventaja o la deficiencia en el entorno del programa Revit en el manejo de sólidos y mallas, que conllevaría a que para poder manejar las aplicaciones para el mallado, a la necesidad de modelar la edificación en programas computacional para el modelado en tres dimensiones de gráficos, tipo de programa más bien utilizados para el desarrollo de video juegos y escenas.

Una solución a esto sería, simplificar el proceso en el mismo programa en el que se diseña el modelo, e incluir una aplicación específica para el análisis numérico de la estructura mediante elementos finitos, algo con lo que está trabajando el profesor Adolfo Alonso, este programa trabajaría como un complemento para el cálculo estructural dentro de la aplicación Revit evitándose así la exportación e importación a otros programas, con esto de reduciría la perdida de información, así como del tiempo de trabajo (anexo 3, 2018).

Como desventaja también cabe mencionar la perdida de la información adicional a la geometría como en este caso serían los materiales. Esto se debe a la utilización de un formato geométrico a

la hora de exportar desde Revit, esto conlleva, volver a asignar estos datos en el programa de cálculo estructural.

El uso de esta solución ha venido teniendo un incremento en los últimos años con el desarrollo de los escáneres laser en el sector de la construcción y con estos poder realizar un proceso inverso de diseño con lo que ayuda en el modelado de las edificaciones históricas (Barrile, Bilotta, D' Amore, Meduri, & Trovato, 2016) (Crespi, et al., 2015)

4.4.4 PROCESO INVERSO. SOLUCIÓN TEÓRICA.

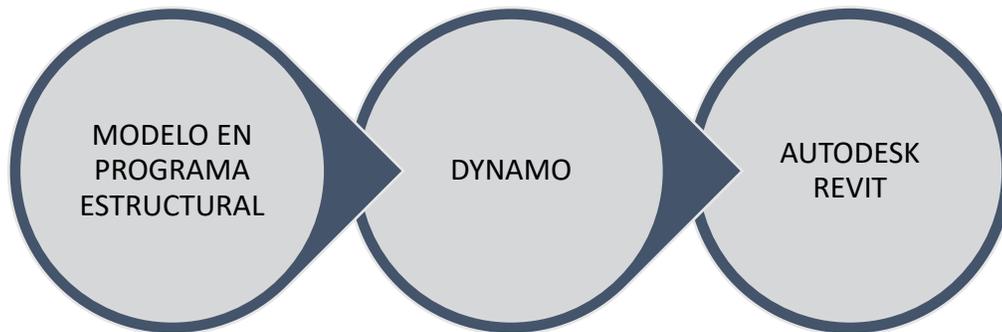


ILUSTRACIÓN 57 - PROCESO INVERSO TEÓRICO

Dynamo, que al principio se desarrolló como un complemento de Revit para luego pasar a ser un programa independiente, está definido como un programa de programación visual accesible tanto para programadores como para lo que no; este le da la posibilidad al usuario de visualizar el comportamiento de la escritura del proceso basándose en nodos y líneas, donde los nodos representan números, funciones, etc. Mientras los cables representan las relaciones entre estos (Pocobelli, 2018).

En esta solución teórica al modelado estructural se plantea la posibilidad de invertir el proceso, partiendo de la realización del modelado estructural en programa de análisis igualmente utilizando la nube de puntos, como punto partida, para luego con la ayuda de Dynamo llevar este modelo a Revit.

Esto teóricamente debería simplificar los problemas de interoperabilidad existentes a la hora de exportar desde Revit, manteniendo un modelo estructural estable para el programa de análisis, así como un modelo BIM con toda la información pertinente necesaria.

5 CONCLUSIONES

Después de haber estudiado las guías y los protocolos BIM que existente para obra e infraestructuras de nueva planta y, no hallar para construcciones históricas existentes, se procedió a definir el objetivo del trabajo: el desarrollo de un protocolo para el modelado de estructuras históricas. El cual, se aplicaría al caso de estudio escogido, la nave de la Iglesia de San Juan del Hospital en Valencia.

Una vez logrado de manera satisfactoria modelo 3D de la estructura de la iglesia se procedió a la exportación a programas de análisis estructural como fueron: *SAP2000* y *Autodesk Robot*, en formato IFC propuesto por como el modelo de datos de *Industry Foundation Classes* destinado a recibir los datos de la industria de la construcción en formato de archivo abierto y de neutral plataforma que no está controlada por un único proveedor o grupo de proveedores, en el que se observó, que la transferencia tanto como del modelo para la información no se verificaba de una manera completa. Se quedaban datos en la transferencia.

Una vez, revisado el modelo e investigar a fondo en el proceso, se determinó que el problema venía en una deficiencia del formato a la hora de soportar el tipo de modelado propuesto.

Tras la detección de este problema, se procedió a plantear otras alternativas, en la que se podría implementar el modelado 3D. Y fruto de un prolongado proceso de discernimiento, se planteó; una solución teórica y tres soluciones de implementación.

Estas soluciones procedentes de la experiencia se aplicaron a una parte del modelo del caso de estudio y se procedió a considerar las ventajas y desventajas que estas presentaban. Pudiendo concluir que, nos encontramos en un momento el que aún está abierta la cuestión de lograr la interoperabilidad bajo el formato abierto que propone la *BuildingSmart* a la hora de trabajar con edificaciones históricas, debido a la complejidad geométrica que presentan los elementos constructivos que conforman estas edificaciones.

Tras la evaluación de las alternativas y la selección de la más apropiada para su uso en la actualidad se procede a readaptar el protocolo para la fase de la exportación. E incluir el proceso de mallado del modelo como paso previo para proceder a la importación a los programas de análisis y calculo estructural (solución 3).



ILUSTRACIÓN 58- PROTOCOLO PARA EL MODELADO DE ESTRUCTURAS HBIM, REVISADO. FUENTE PROPIA

6 LÍNEAS DE TRABAJO E INVESTIGACIONES FUTURAS

Una vez discutido las conclusiones que de los resultados obtenidos se nos abren nuevas cuestiones a las que dar respuesta, retos para seguir y que concretaremos en las siguientes líneas de trabajo e investigación futuras:

1. Debido a la poca interoperabilidad que presenta el formato IFC, se muestra la necesidad de seguir desarrollando este formato hacia al punto de una buena compatibilidad para el desarrollo de proyectos de edificaciones históricas.
2. El desarrollo de familias parametrizadas que faciliten el modelado constructivo de los elementos estructurales históricos.
3. Simplificar la interoperabilidad en todo el proceso de modelado y análisis, buscando integrar todo esto en una sola aplicación.

Esta última línea, es en la que se está iniciando los primeros esbozos el equipo liderado por el profesor Adolfo Alonso con el que he podido intercambiar distintos puntos de vistas sobre las bondades y las contrariedades del planteamiento inicial de los formatos y la interoperabilidad universal en un formato.

7 REFERENCIAS

- About us | GiD - The personal pre and post processor.* (14 de Julio de 2018). Obtenido de GiD The personal pre and post processor: <https://www.gidhome.com/about-us/>
- Arayici, Y. (2010). Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. 189-195.
- Barrile, V., Bilotta, G., D' Amore, G., Meduri, M., & Trovato, S. (2016). Structural modeling of a historic castle using close range photogrammetry. *International journal of mathematics and computers in simulation*.
- Becker, R., Falk, V., Hoenen, S., & Loges, S. (s.f.). BIM - Towards the entire lifecycle.
- Bryde, D. (2012). The projecto Benefits od Building Information Modelling (BIM). *Internation Jornal of Project Management*, 971-980.
- BuildingSmart. (s.f.). Obtenido de <http://www.buildingsmartalliance.org>
- C. Dore, M. M. (2013). Semi-Automatic Modelling of Building Façades with shape grammars using Historic Building Information Modelling. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 57-64.
- Catala, J., & Pellicer, E. (2000). *Prontuario de la Investigacion cientifica*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Choi, H.-J., Kwon, M.-J., kim, J.-H., & Kim, J.-J. (2011). A study on data interaction among different levels of detail in plannig phases for mega projects. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (págs. 442-448). Seoul: ISARC.
- Crespi, P., Franchi, A., Ronca, P., Giordanao, N., Scamardo, M., Gusmeroli, G., & Schiantarelli, G. (2015). From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building. *WTT Transactions on The Built Enviroment*. doi:10.2495/BIM150471
- Crespo Godino, D. (2006). *Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia: Evolucion constructiva a traves de la lectura muraria y de las fuentes documentales*. Valencia: UPV.
- CSI. (2013). *Technical note IFC4 import and export*. Computers and Structures, Inc.
-

- Egwunatum, S., Joseph-Akwara, E., & Akaigwe, R. (2016). Optimizing energy consumption in building designs using building information model (BIM). *Slovak Journal of Civil Engineering*, 19-28.
- García Valldcabres, J. (2010). *La metrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia*. Valencia: UPV.
- García-Valldcabres, J., Pellicer, E., & Jordan-Palomar, I. (2016). BIM scientific literature review for existing buildings and theoretical method: proposal for heritage data management using HBIM. *Construction Research Congress 2016*. San Juan: ASCE.
- Gasco Pascual, L. (1969). *La Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia y su relacion con la soberana orden de Malta*. . Valencia: Facsimil.
- Ghaffarianhoseini, A. (2016). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1046-1053.
- Hartmann, T. (2012). Aligning building information model tools and construction management methods. 605-613.
- Heyman, J. (1995). *The Stone Skeleton*. Cambridge: Cambridge Univesity Press.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometria y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. . Instituto Juan de Herrera.
- International Standards Organisation (ISO). (1994). *Industrial automation systems and integration- product data representation and exchange- part1: overview and fundamental principles. ISO standard 10303_1*.
- Jordan, I., Tzortzopoulos, P., García-Valldcabres, J., & Pellicer, E. (2018). Protocol to Manage Heritage-Building Interventions Using Heritage Building Information. *Sustainability*. doi:10. 908. 10.3390/su10040908
- Li, C.-H., & Zhou, T.-H. (2016). Application of BIM for Safety Management During Construction. *2016 International Conference on Manufacturing Construction and Energy Engineering* (págs. 1-4). Hong Kong: MCEE.

- Liu, Z.-Q., Zhang, F., & Zhang, J. (2016). The building information modeling and its use for data transformation in the structural design stage. *Journal of Applied Science and Engineering*, 273-284.
- Mazarredo, L. d. (2015). *Análisis constructivo y estructural de la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Minho Oh, J. L. (2014). Integrated system for BIM-based collaborative design. *Elsevier*, 196-206.
- N. Young, S. J. (2009). *The business value of BIM-getting building information modeling to the bottom line*. New York, NY, U.S.: McGraw-Hill.
- Nieto, J. E. (2016). Management of built heritage via the HBIM project: a case study of flooring and wall tiling. *Virtual Archaeology Review*, 1-12.
- Nor Diana Aziz, A. H. (2016). Building information modelling (BIM) in facilities management: Opportunities to be considered by facility managers. *Elvieser*, 353-362.
- Oreni, D. (2013). From 3D Content Models to HBIM for Conservation and Management of Built Heritage. (págs. 344-357). Italy: Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- Patraucean, V. (2015). State of Research in Automatic As-Built Modelling. *Advance Engineering Informatics*, 162-171.
- Pocobelli, D. (2018, 11 18). Building information models for monitoring and simulation data in heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry*. Retrieved from WWW Document: <http://dynamoprimer.com/en/>
- Robinson, C. (2007). Structural BIM: Discussion, Case Studies and Latest Developments. *The Structural Design of tall and Special Buildings*, 16, 519-533.
- Sacks, R. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modelling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management ASCE*, 958-970.
- Santos, R. (2017). Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*, 118-136.
- Schinler, D., & Nelson, E. (2008). BIM and the Structural Engineering Community. *Structure Magazine*, págs. 10-12.

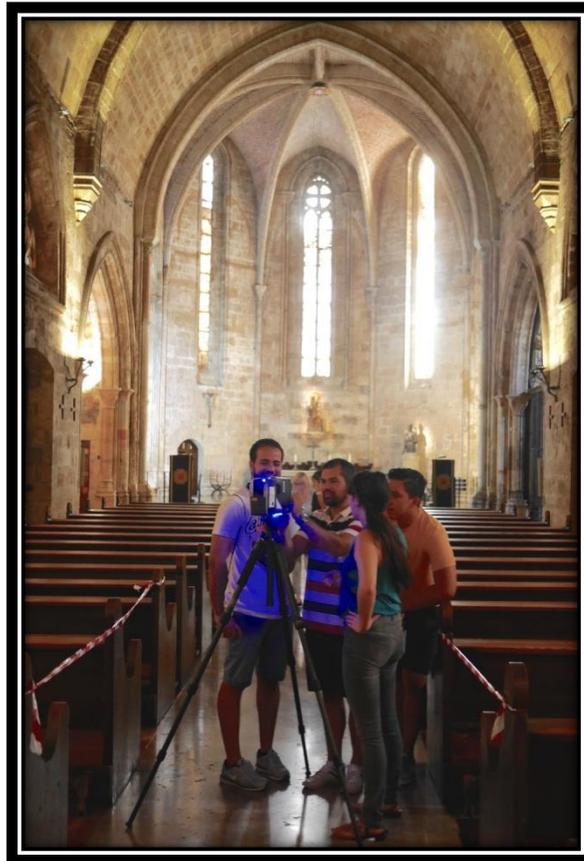
- Shih-Ming Chen, F. (-H.-M. (2013). A framework for an automated and integrated project scheduling and management system. *ELSEVIER*, 89-110.
- Steel, J., Drogemuller, R., & Toth, B. (2012). Model interoperability in building information modelling. *Softw Syst Model*, 99-109. doi:<https://doi.org/10.1007/s10270-010-0178-4>
- Sungyol Song, J. Y. (2011). Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction. *ELSEVIER*, 895-912.
- Taurianinen, M. (2016). The effects of BIM and lean construction on design management practices. *Procedia Engineering*, 567-574.
- Thomas Beach, I. P. (2017). Management of Collaborative BIM data BY federating distributed BIM models. *ASCE*.
- VECTORWORKS. (2012). *VECTORWORKS A NEMETSHECK COMPANY*. Obtenido de VECTORWORKS: <http://www.vectorworks.net/bim/projects/135>
- Volk, R. (2013). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 109-127.
- Yan Liu, S. v. (2015). Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China. *International Journal of Project Management*, 686-698.
- Yarmohammadi, S., & Ashuri, B. (2015). Exploring the approaches in the implementation of BIM-based MEP coordination in the USA. *Journal of Information Technology in Construction*, 1-17.

8 ANEXOS

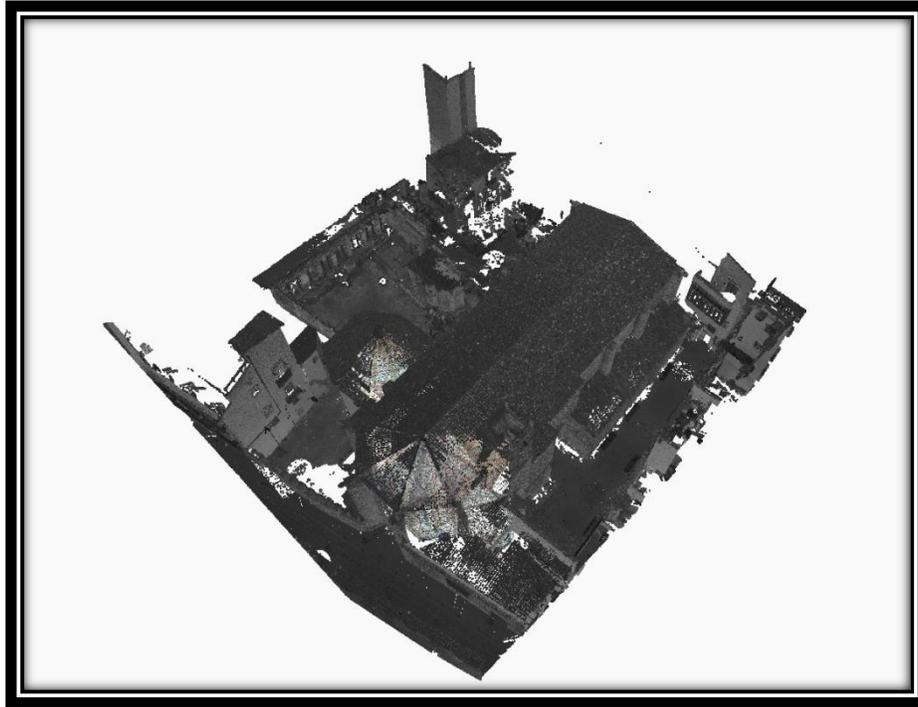
8.1 FOTOS DE LA JORNADA DE ESCANEADO LASER. FUENTE IGLESIA SAN JUAN DEL HOSPITAL DE VALENCIA



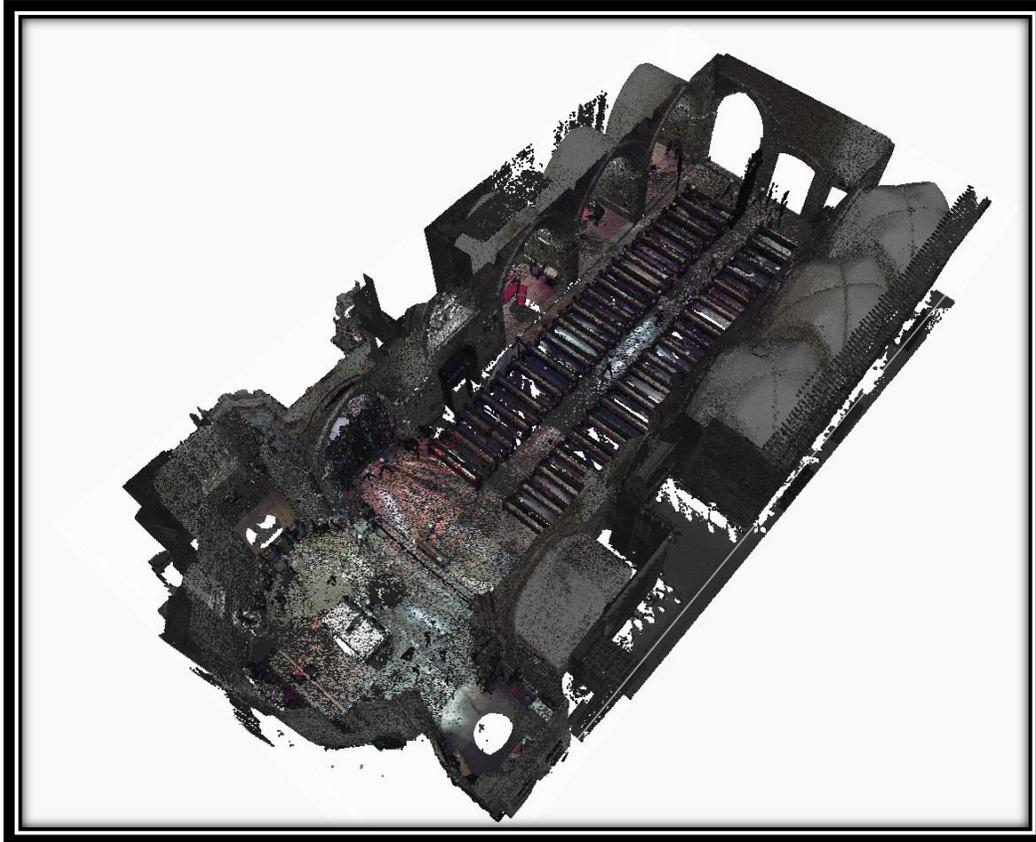




8.2 IMÁGENES DE LA NUBE DE PUNTOS RESULTANTE







8.3 ENTREVISTA CON EL PROFESOR ADOLFO ALONSO

Entrevista con Adolfo Alonso Durá, celebrada el 6 de Julio de 2018.

El destacado investigador, Adolfo Alonso Durá, es doctor en arquitectura, Profesor Titular de Universidad adscrito al departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universitat Politècnica de Valencia.

Adolfo Alonso: Revit tiene arquitectura, estructura e instalaciones, básicamente. Esta pensado por lo menos todo desarrollo de familias y de gestiones para obras de edificios nuevos. Por ejemplo, el tema de la estructura la puedes definir para edificios de hormigón, acero, forjados con losas y la idea es que se exporta a través del formato IFC, se lee en un programa de cálculo y se calcula. El problema está en que esos ficheros no pasan toda la información, por ejemplo, en Revit, las cargas no las pasa. Eso quiere decir que en el programa de cálculo tú tienes que esta información, por lo tanto, a eso le falta desarrollo aún. La idea es la que tiene que ser en un futuro, integrar el cálculo para calcular dentro de la propia aplicación de Revit, pero ahí, falta desarrollo.

Luego por ejemplo he manejado un programa genérico, que es el sap2000, famoso, que este tiene lectura de IFC, pero muy incompleta. Por ejemplo, te coge, si es una estructura de barras es decir pilares y vigas, solo la geometría, la posición, pero ha perdido o no ha sabido recoger las secciones, los materiales que luego hay que añadir. Las losas por ejemplo no las recupera, las recupera mal. Hay otro programa, que es robot, lo que pasa con ese que como es de Autodesk no lee IFC si no que directamente lee la base y ese sí que tiene más interoperabilidad.

Entonces, eso está funcionando en ese sistema para estructuras nuevas, el problema son estas (edificaciones historias).

Las estructuras históricas como viste en la tesis del profesor Luis de Mazarredo tienen, diríamos, un asunto especial y que es que hay que hacer mallados después de modelar los elementos, básicamente de sólidos. Yo lo que he estado probando es exportar los volúmenes, para AutoCAD como masas y a partir de ahí trabajar con programas de mallados para luego calcularlos.

AA: Mi tesis doctoral que la empecé, en el año 90 – 91, a trabajar en esa investigación, tenía ya la idea de BIM que aún no existía tecnología para poder implementar es decir yo estaba trabajando en AutoCAD y estaba calculando estructuras en otro programa y que no enlazaba AutoCAD con otros programas tenía que volver a montar todo, introducir toda la información para que el programa realizase los cálculos. La idea que teníamos entonces era ¿por qué no tenemos todo en el modelo de dibujo? que es lo que ahora es BIM, dándole vueltas a esto dije, yo, voy a hacer esto con la estructura, y entonces, surgió el modelo y la tesis, era dentro de AutoCAD, levantabas la estructura, la definías toda y luego yo la leía directamente y la calculaba, eso dio origen a un programa, un programa que ahora está registrado en la universidad, que se vende, Architrave. Y tengo otro programa que desarrollé, el padre de Architrave, es decir, que es el de mi experimentación y hago eso. Entonces ahora estoy en una fase de hacer lo mismo con Revit, es decir, introducir el cálculo dentro de Revit. No es un programa de calculo que lea fichero IFC, yo de eso ya me he olvidado porque es un lio. Yo voy a utilizar al api de Revit, que se puede acceder a ella y obtener todos los datos, y esos datos directamente los utilizo para hacer desarrollar un programar dentro de la propia aplicación de Revit para que pueda calcular la estructura. Es decir, lo mismo que he hecho aquí, pero incluso, ahora se parte ya con todas las funciones hechas, simplemente es adaptarlas al formato de AutoCAD.

Mi implementación va a hacer con todo lo que ya tengo hecho, que va a servir para todo lo que es la parte estructural, entrar en la api de Revit y generar la estructura, por lo tanto, el producto final será una aplicación de Revit que tú la cargaras y directamente, el edificio que tu estas montando, empiezas ya a calcularse porque, ya tengo todos los datos. No tengo que exportar ficheros, ni tengo que utilizar un programa de cálculo externo, el programa de cálculo será el plug-in.

La construcción: nosotros dimos un curso el año pasado de Revit dentro de uno de los másteres del departamento de arquitectura gráfica. Este no buscaba elaborar elementos bonitos si no bien construidos que las uniones de las paredes estuviesen bien, que estructuralmente este bien. Entonces la parte de la estructura la enseñamos nosotros en el primer cuatrimestre, entonces,

fue cuando me di cuenta, que si tu no defines bien modelado los elementos luego vas a tener problemas de cálculo. Porque Revit, no es dibujar, es construir, y algunos utilizan Revit solo desde el punto de vista formal que aparenta que está bien, no, vamos a ver, si quieres hacerlo bien hay que trabajarlo más en familias y en uniones.

Este proyecto que pienso hacer no lo voy a hacer solo, sino que hay una entidad que es. BiMMate Este es el título de la presentación que realizó en el congreso EUBIM 2018, José María Abellán Alemán. Geolocalización y generación automática de emplazamientos a través de servicios y datos de plataformas gubernamentales mediante la API de Autodesk© Revit™. Esta empresa lleva ya años trabajando, es una especie de entidad, una plataforma que ha generado para el colegio de arquitectos de Murcia y a la que se han asociados varios colegios de arquitectos de España entonces desarrollan en Revit, han desarrollado familias muy bien preparadas constructivamente. Han desarrollado un tema de cartografía, muy bueno, han desarrollado uno de mediciones y presupuesto muy bueno, incluso con todas sus familias. Con el me voy a asociar para desarrollar el tema de estructuras. Lo que voy a hacer es para estructuras modernas: pilares, vigas, muros, losas. Yo trabajo mucho en la práctica con estructuras históricas, pero el primer paso en Revit no lo voy a hacer ahí, lo voy a hacer diríamos que sería en lo que más se utiliza en estructuras. Pero mi idea es evidentemente en la segunda fase cuando eso funcione que sea también estructuras históricas.

En que se diferencian las estructuras históricas, pues en que las estructuras modernas básicamente son de elementos lineales y superficiales, las estructuras históricas presentan elementos másicos. Y eso ¿qué repercusión tiene en la estructura? pues en la estructura los elementos lineales son barras y ya está y los elementos como una losa o muro es un elemento superficial estos son más fáciles de trabajar aquí al ser elementos másicos, el elemento estructural es un cubo o un tetraedro, pequeñito porque si no, no lo puedes calcular y diríamos que la principal dificultad es hacer ese mallado, una malla de elementos en tres dimensiones.

Te voy a enseñar un informe que hice para una iglesia de Rubielos de Mora que en este caso es todo másico, te diré de donde partimos. Primero se hizo un levantamiento con escáner laser, de

ahí se sacó la volumetría en AutoCAD, volúmenes sólidos, y de ahí hice los mallados de todo el conjunto para luego realizar el cálculo de esta.

Ahora tal y como esta, IFC para esto no sirve, si se desarrolla de otra manera, no lo sé, pero ahora la idea sería exportar a AutoCAD o un formato leíble, hay malladores que te leen otros formatos de sólidos que a lo mejor sin pasar por .dwg también se podría hacer, pero en definitiva es exportar en sólidos.

Jorge García: Rubieles de Mora es una iglesia muy similar a la de san Juan del hospital de Valencia.

Jorge Asjana: ¿y donde esta?

AA: eso está en Teruel, a unos 130 o 120 kilómetros de aquí

JG: tiene muros y bóvedas de crucería, es decir son arcos de crucería La bóveda de cañón se sustituye por una bóveda de crucería. Pero los arcos son iguales, son arcos fajones. También, ambas poseen una cabecera poligonal.

AA: aquí lo que hice fue lo siguiente, lo que son muros, pilastras etc., a este nivel lo puedes hacer en Revit entonces cuando tú lo exportas a .dwg puedes recuperar eso perfectamente. aquí lo que hice fue como las bóvedas son bóvedas tabicadas mezclé dos cosas, los que son más mäsicos como lo son los muros, contra fuertes, campanario, con sólidos y las bóvedas que eran finas de 8 o 10 cm con mallas superficiales. En el cálculo puedes hacer las dos cosas.

Lo que ha de estar bien es la conexión entre los elementos porque si no estará desenganchado. Otra cosa a tener pendiente es que si eso lo sacas de un escaneado laser hay que limpiar mucho porque todo lo que es decoración no te sirve, si lo incluyes fatal porque si tienes una cornisita y la incluyo como solido me va a llenar de millones de triángulos lo que va a bloquear y no me sirve para la estructura. Por lo tanto, hay que limpiar y dejar volúmenes limpios, desde el punto de vista estructural.

A partir del sólido hay que hacer el mallado, en AutoCAD yo he preparado rutinas para hacer mallados lo que ocurre es que AutoCAD es muy malo para manejar, a ver, sólidos simples muy bien, pero yo de cada sólido de esos le voy a sacar miles de sólidos pequeñitos y AutoCAD ya para eso tiene problemas. Entonces si son cosas simples que no tienen mucho volumen yo he generado funciones y rutinas desde AutoCAD para generar los mallados, pero cuando es más gordo tengo que salirme de AutoCAD y utilizar malladores. Hay unos que son muy buenos como el Guid. Yo lo que hago es desde AutoCAD género. aquí, archivo importar puedo importar cantidad de formatos. El programa Guid es un mallador muy bueno lo han hecho en Barcelona, en el centro internacional de métodos numéricos en la escuela de ingenieros de caminos, este programa lo conozco de los años 90.

Del sólido, mallarlo y luego hay que darle propiedades de los materiales, poner donde están los apoyos meterles cargas, todas las condiciones para luego calcular. Después de todo este proceso se analiza y se pueden ver diferentes condiciones de manera gráfica, como las tensiones, en varias direcciones, las deformaciones, incluso puedes desarrollar cálculos donde prevés que donde podrías tener fisuras, cálculos dinámicos contra los terremotos, ya eso es variado.

Resumiendo, el proceso es generar el modelo en Revit, y tal como están las cosas ahora no puedes calcularlo directamente en Revit si no que ese modelo lo exportas en sólidos, en AutoCAD o uno de esos formatos, para importarlos al programa de mallado de ahí ya al cálculo y calculo ya de lo que quieras, las tensiones, las deformaciones, si se va a romper, calculo ante sismos.

Tema parte estructural

Barra: elemento estructural de dos nudos.

Losa, muro o pilares: no son líneas, se dividen en muchas líneas y nudos donde en vez de dos se analizan tres o cuatro. Mas compleja porque su geometría de deformación es más compleja, es superficial.

Estructura mítica: no puedo hacer ni líneas ni superficies para analizar. Ya que si se usan superficies por dentro se analizaría hueco. El otro elemento sería volumétrico donde se llena la estructura mítica con volúmenes, que podría ser tetraedro o hexaedro, donde estos no tienen por qué ser regulares. Siendo los hexaedros preferibles, pero solo funciona bien para elementos simples. Donde cada volumen con el que se rellena el elemento mítico se considera un elemento estructural, los cuales tienen diferentes cantidades de nudos.



Se le llama análisis de elemento finito porque de una cantidad infinita de puntos que se mueven en una estructura para su análisis, se simplifican a una cantidad deseada los puntos a analizar para poder formar un sistema de ecuaciones con una cantidad definida de incógnitas (deformaciones) y para conocer lo que pasa entre los puntos seleccionados se interpola usando las deformaciones ya conocidas

de los puntos previamente analizados. Por lo que se convierte de un sistema infinito a un sistema finito.

8.4 IMÁGENES DEL ANÁLISIS REALIZADO AL MODELO REDUCIDO

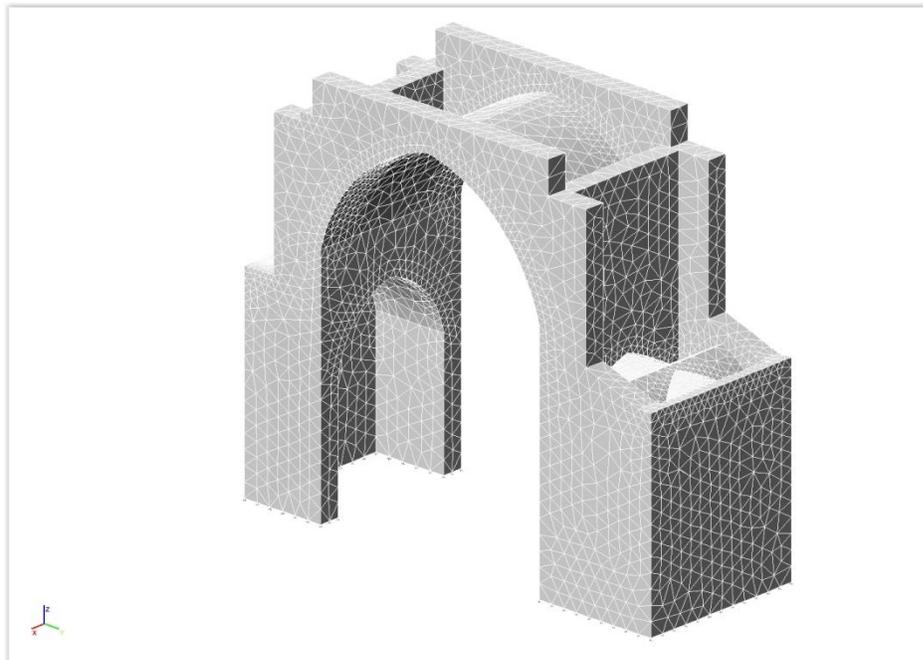


ILUSTRACIÓN 59- MODELO MALLADO CON SOBRES VISTO EN EL PROGRAMA ANGLE

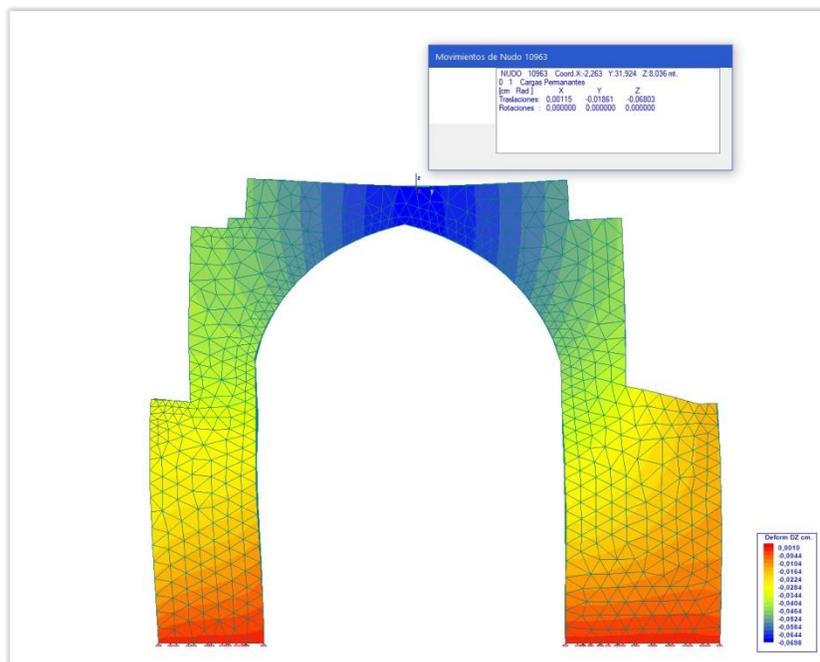


ILUSTRACIÓN 60- DEFORMACIONES EN Z PRESENTES EN UN NUDO

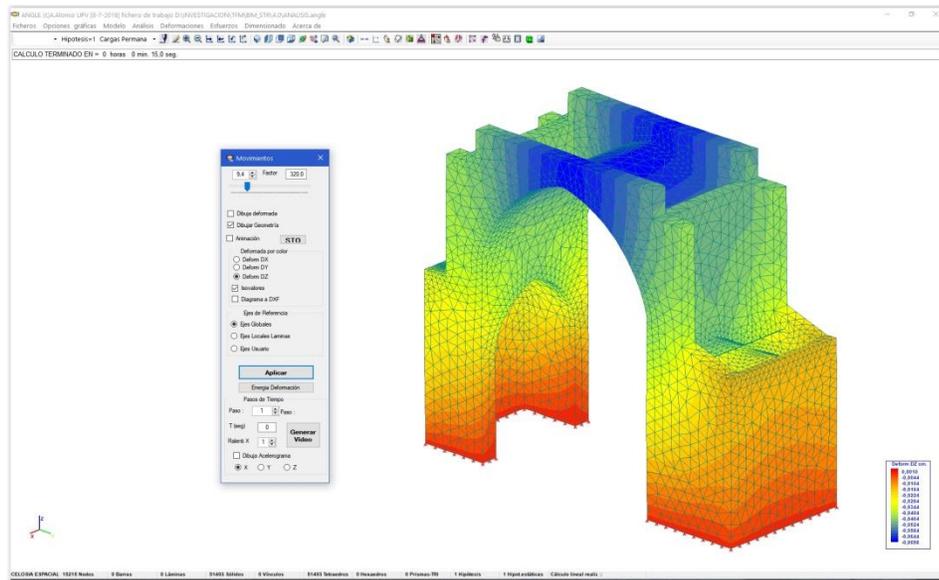


ILUSTRACIÓN 61- DEFORMACIONES EN EJE Z

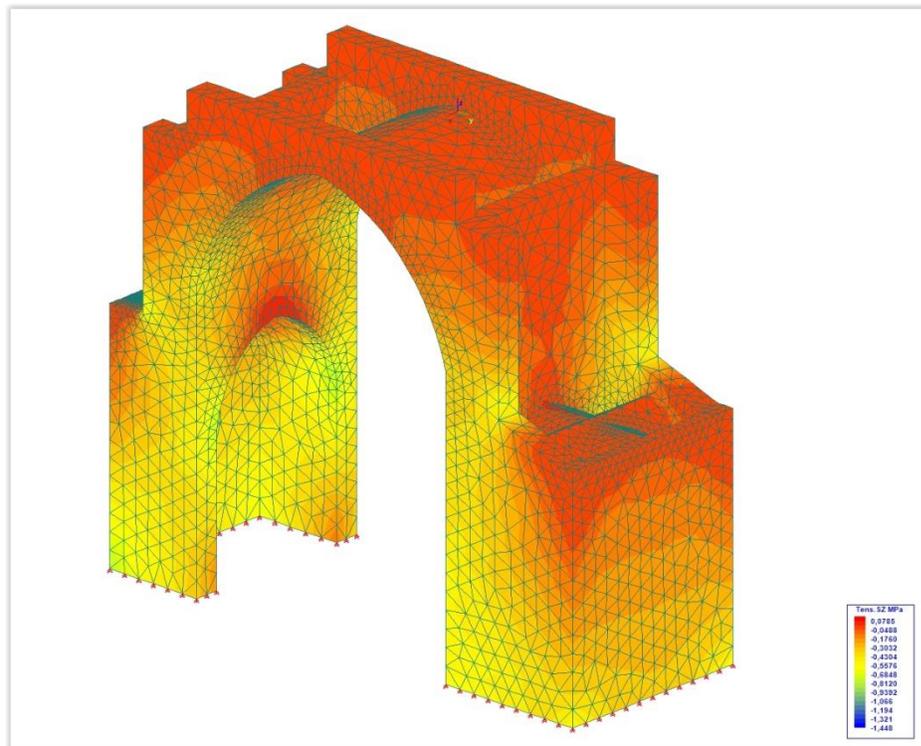


ILUSTRACIÓN 62- MODELO TENSIONES EN EL EJE Z

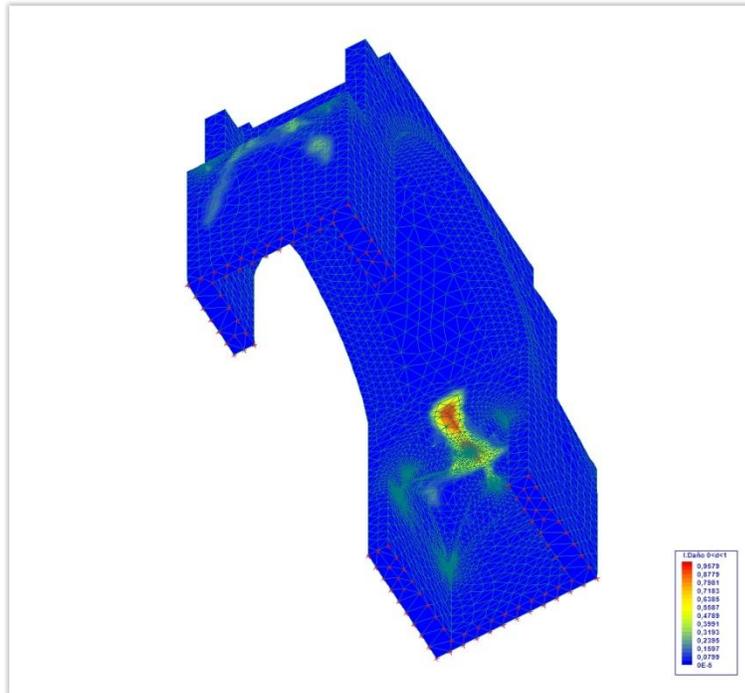


ILUSTRACIÓN 64- MODELO DE DAÑO BAJO EL CÁLCULO NO LINEAL VISTA SUPERIOR

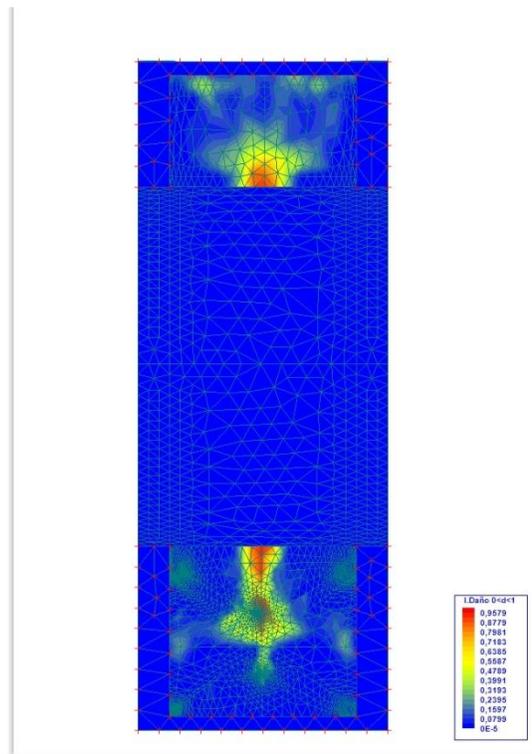
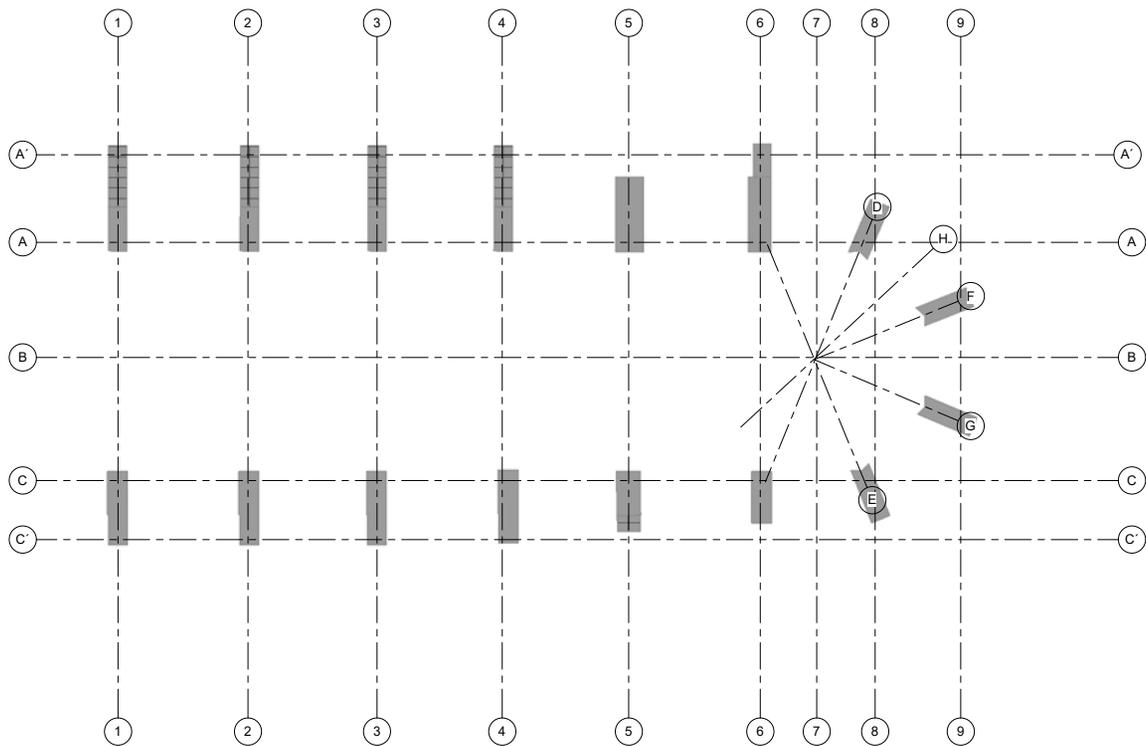


ILUSTRACIÓN 63- MODELO DE DAÑO BAJO EL CÁLCULO NO LINEAL. VISTA DESDE EL FONDO

8.5 PLANOS DE MODELO TRIDIMENSIONAL



① 01- 1er Nivel
1 : 100



MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

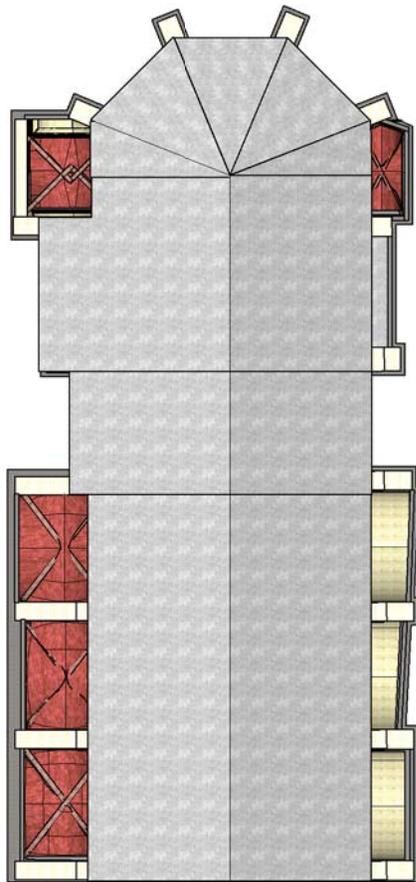
Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES ARQ. ISABEL JORDAN

1 : 100

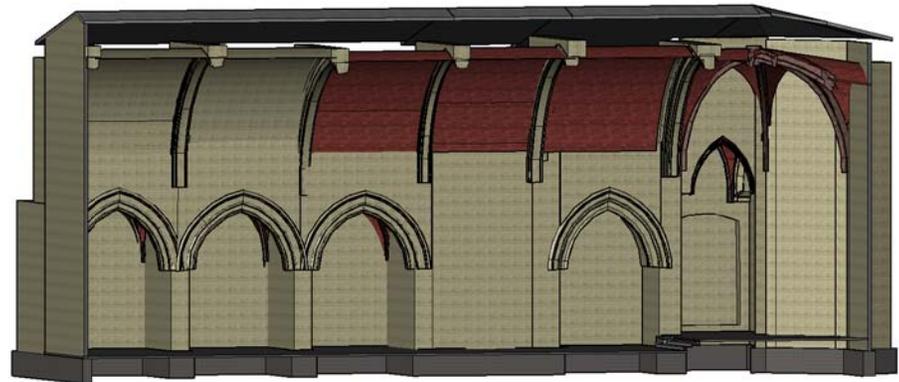
A101

PLANO EJES ESTRUCTURALES

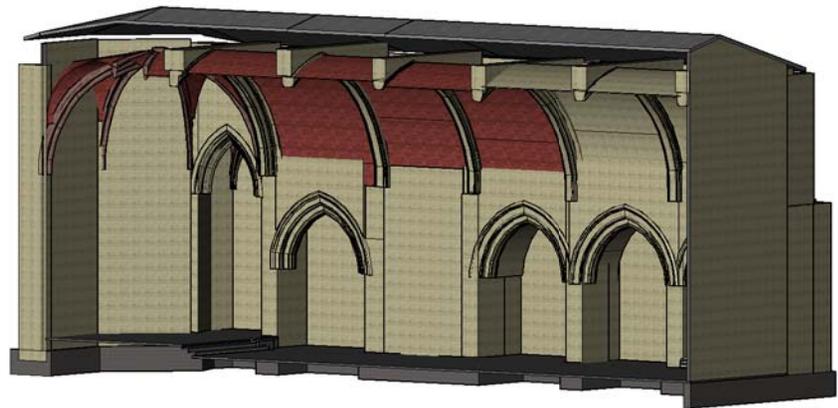
06/29/18



① 3D PLANTA



② 3D VISTA LAT SUR



③ 3D VISTA LAT NORTE



MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

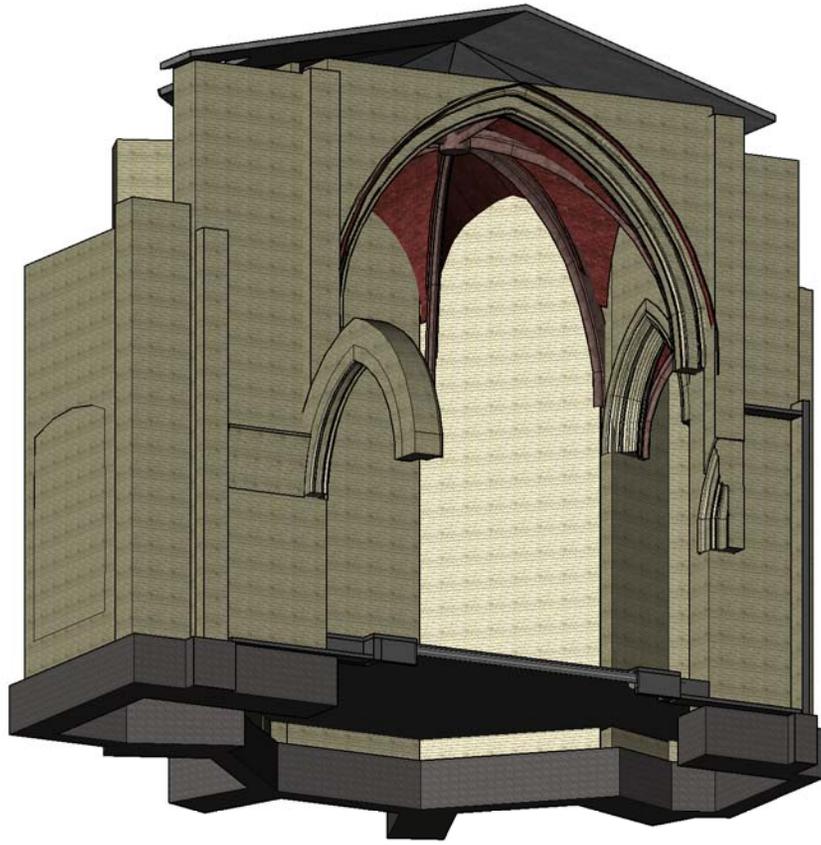
JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES ARQ. ISABEL JORDAN

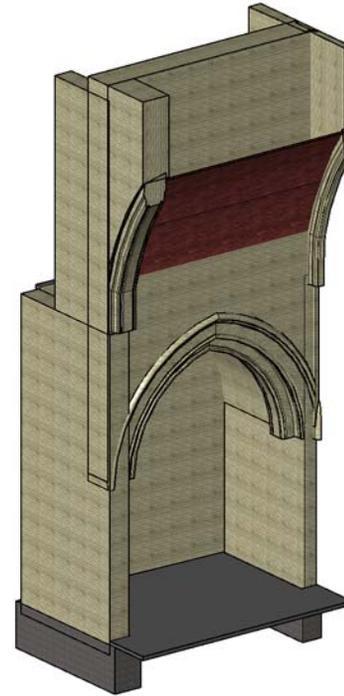
A102

PLANTA Y CORTES NORTE Y SUR

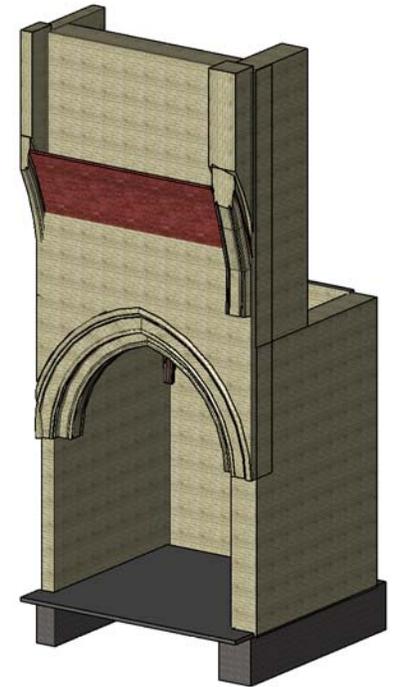
06/29/18



① 3D VISTA ALTAR



③ 3D CAPILLA NORTE



② 3D CAPILLA SUR



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

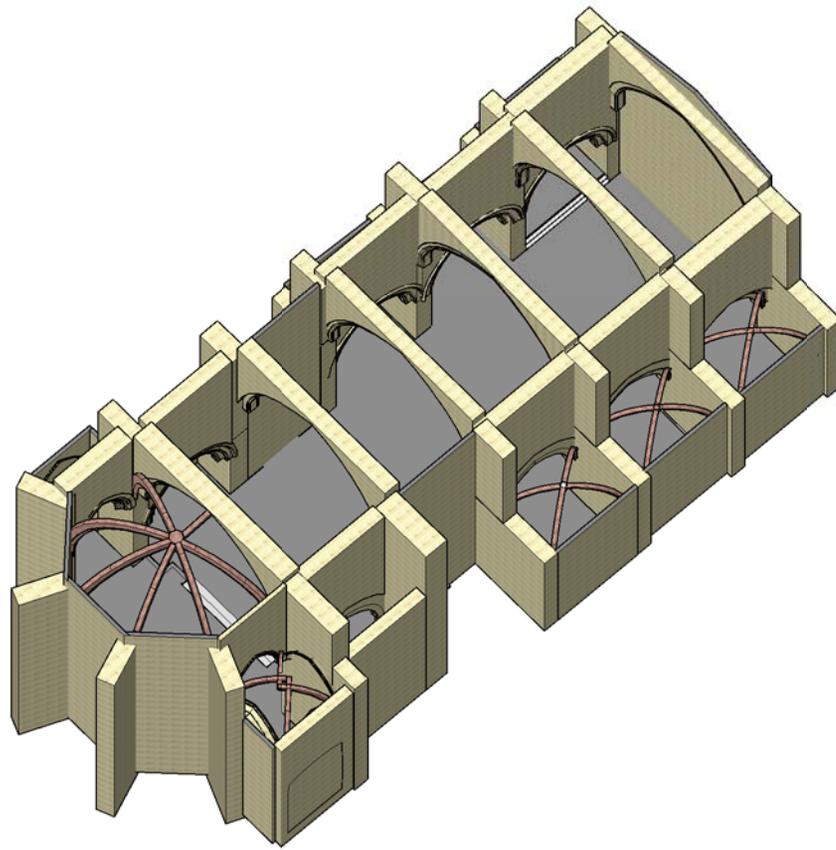
JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES ARQ. ISABEL JORDAN

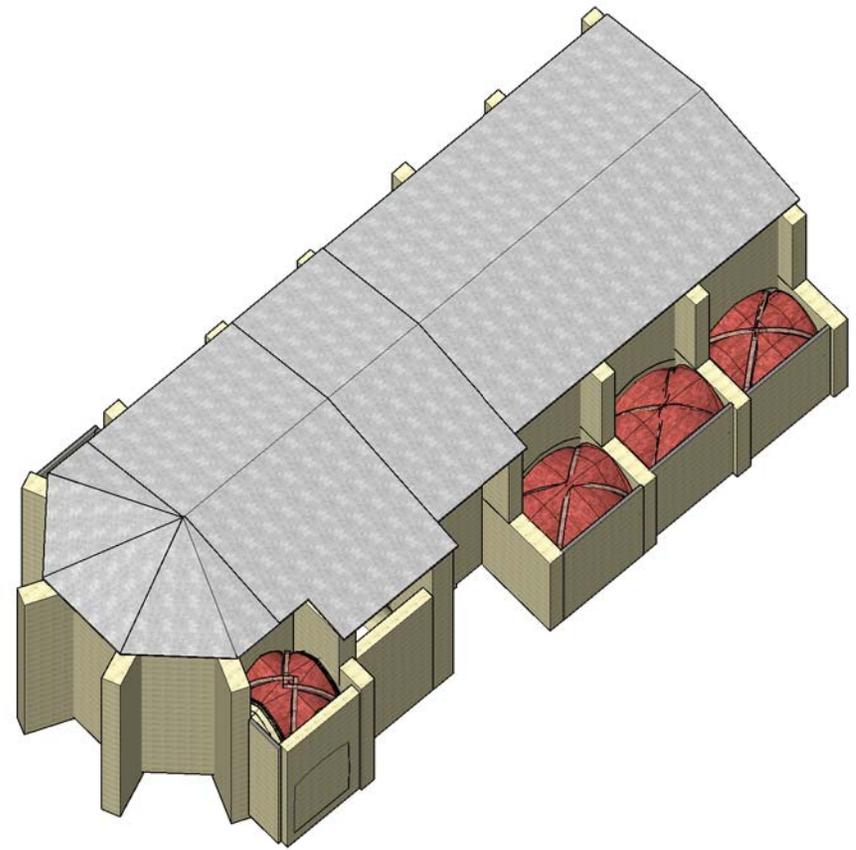
A103

VISTAS 3D

06/29/18



① MODELO COMP.
DIAFRAGMA



② MODELO COMP. BOVEDA
CENTRAL



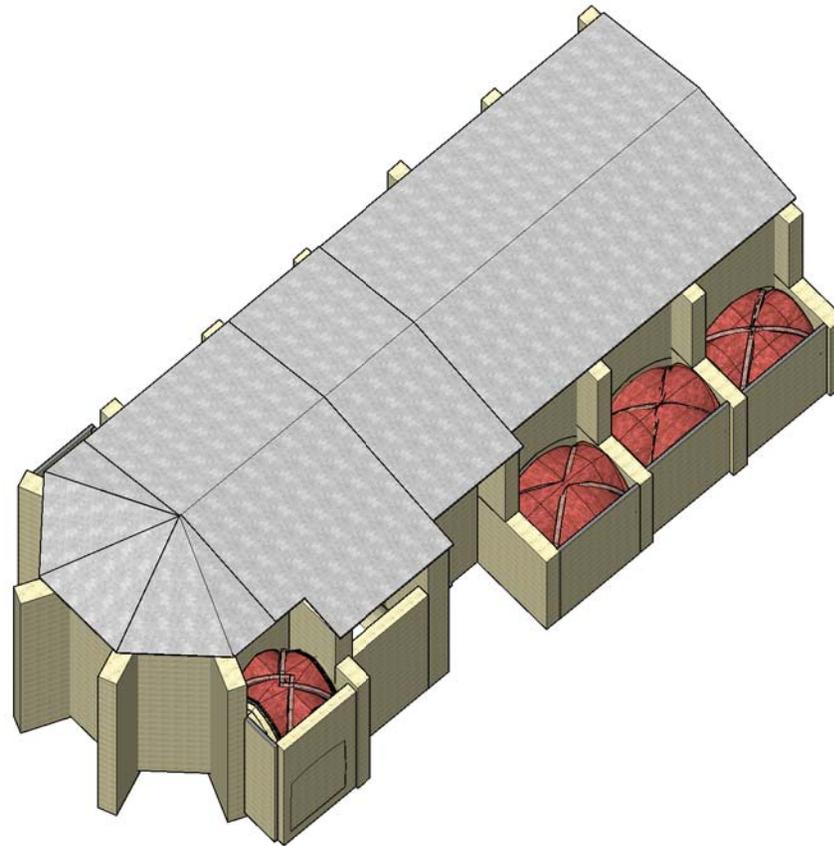
MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES ARQ. ISABEL JORDAN

A104 MODELO

06/06/2018



① MODELO COMPLETO



MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

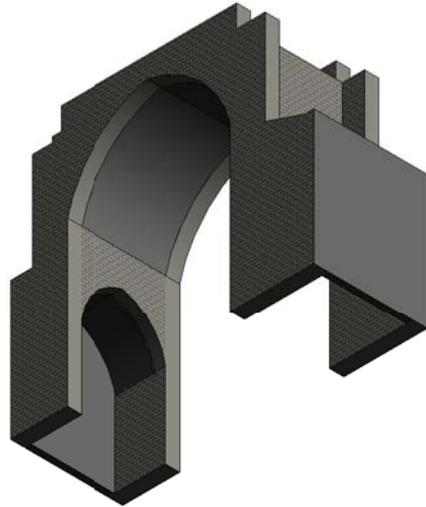
JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES ARQ. ISABEL JORDAN

A105

MODELO COMPLETO

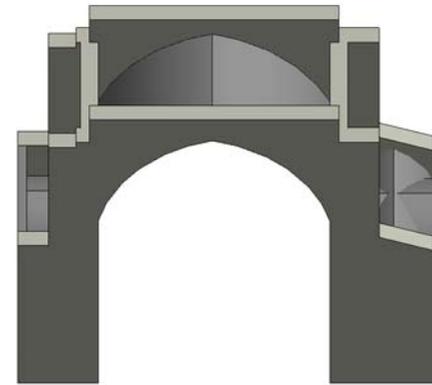
06/29/18



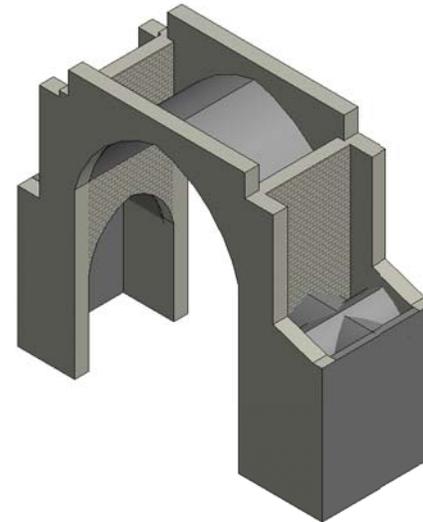
1 vista1



4 vista4



3 vista3



2 vista2



UNIVERSITAT
POLITECNICA
DE VALÈNCIA



MASTER UNIVERSITARIO EN PLANIFICACION Y GESTION EN INGENIERIA CIVIL

JORGE FRANCISCO ASJANA ROBLES

Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Dr. JORGE LUIS GARCIA VALLDECABRES Arq. ISABEL JORDAN

A106

MODELO SOLUCION

07/14/18