

**Ventajas y Desventajas de la Implementación de BIM en el Análisis Pseudoestático de
Carga Lateral Equivalente en Edificaciones de Hasta 20 Metros de Altura**

Presentado por:

John Sebastián Flórez Castellanos, Mary Luz Gil Montaña

Trabajo de Grado para Optar por el Título en Ingeniería Civil

Director:

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Materiales, Magister en Ingeniería Civil, PhD en

Ingeniería Civil. Luis Eduardo Zapata Orduz

Codirector:

Ingeniera Civil. Karen Milady Castañeda Parra

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Agradecimientos

A Dios y nuestras familias por depositar toda su confianza en nosotros porque lejos o cerca siempre mantuvieron su apoyo y comprensión constante para ayudarnos a cumplir nuestra meta.

A nuestros profesores por darnos sus conocimientos y su tiempo, y en especial al Ing. Óscar E. Giratá V. y al Ing. Omar G. Sánchez, quienes nos apoyaron incondicionalmente en el desarrollo de este proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	19
1. Objetivos	23
1.1 Objetivo General	23
1.2 Objetivos Específicos	23
2. Metodología tradicional en el análisis estructural	24
2.1 Interoperabilidad en la metodología tradicional	25
3. Metodología BIM para análisis estructural	25
3.1 Interoperabilidad en la metodología BIM	26
4. Variables de comparación	26
4.1 Variables cualitativas	27
4.2 Variables cuantitativas	28
4.3 Método de valoración de las variables cualitativas	30
4.4 Evaluación de las variables cualitativas	31
5. Modelos de calibración	32
5.1 Definición de los modelos de calibración	32
5.2 Resultados de los modelos de calibración	36
5.2.1 Masa de los modelos de calibración	36
5.2.2 Tiempos de modelamiento	37
5.2.3 Reacciones en los modelos de calibración	38
5.2.4 Deformaciones en los modelos de calibración	40

6. Caso de estudio	41
6.1 Definición y planteamiento del caso de estudio	41
6.2 Pre-proceso	41
6.2.1 Pre-proceso del caso de estudio empleando la metodología tradicional	42
6.2.2 Pre-proceso del caso de estudio empleando la metodología BIM	51
6.2.3 Resultados del pre-proceso del caso de estudio	59
6.3 Solución	62
6.4 Post-proceso	69
6.4.1 Post-proceso del caso de estudio empleando la metodología tradicional	72
6.4.2 Post-proceso del caso de estudio empleando la metodología BIM	72
6.4.3 Resultados del post-proceso del caso de estudio	73
6.4.4 Evaluación de variable de costos	75
7. Discusión de los resultados	76
8. Conclusiones	83
9. Observaciones	85
Referencias Bibliográficas	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Variables cualitativas para la comparación entre las metodologías.....	27
Tabla 2. Variables cuantitativas para la comparación entre las metodologías.....	29
Tabla 3. Puntajes de calificación de las variables cualitativas. Entre mayor puntaje mejor.	30
Tabla 4. Valoración de variables cualitativas según el software de análisis de cada metodología. Entre mayor sea el puntaje mejor.	31
Tabla 5. Características y propiedades de los modelos de calibración.	33
Tabla 6. Masas obtenidas en los software de análisis. Entre el porcentaje sea más bajo, más preciso es el cálculo de la masa.	37
Tabla 7. Tiempo de modelamiento en porcentajes. Entre menor sea el valor es más eficiente el software empleada.	38
Tabla 8. Reacciones resultantes de la calibración inicial comparados inicialmente con SAP2000.	39
Tabla 9. Deformaciones resultantes de los modelos de calibración inicial.	40
Tabla 10. Discretización de tiempos medidos en la ejecución de las partes del pre-proceso en el caso de estudio.	60
Tabla 11. Detalle de la información obtenida en los modelos realizados en CAD o BIM.	61
Tabla 12. Comparación porcentual del cálculo de masas en los software de análisis respecto a la masa real obtenida en Revit. Entre más bajo sea el porcentaje es más preciso.	63
Tabla 13. Resultados en la base de la estructura según los casos de carga y para cada software empleado.....	64

Tabla 14. Errores obtenidos en la comparación de los resultados de los software de CSI frente a Robot S.A.P.	66
Tabla 15. Valor del cortante basal de la estructura calculado por cada software de análisis.	68
Tabla 16. Distribución de las fuerzas sísmicas por entrepiso en cada software de análisis.	68
Tabla 17. Resultados porcentuales de las derivas en la dirección X en cada software de análisis.	69
Tabla 18. Resultados porcentuales de las derivas en la dirección Y en cada software de análisis.	69
Tabla 19. Comparación porcentual de las derivas en dirección X y Y con respecto a SAP2000. Un porcentaje más bajo indica más proximidad a la respuesta.	70
Tabla 20. Resultado de la cuantificación de los tiempos de ejecución del post-proceso y el tiempo total acumulado del desarrollo del caso de estudio.	73
Tabla 21. Resultados porcentuales de las derivas en la dirección X en cada software de análisis al finalizar el post-proceso.	74
Tabla 22. Resultados porcentuales de las derivas en la dirección Y en cada software de análisis al finalizar el post-proceso.	74
Tabla 23. Resultados del cortante basal de la estructura calculado por cada uno de los software de análisis al finalizar el post-proceso.	74
Tabla 24. Costo de los factores analizados para la variable de costos de implementación de las metodologías.	75
Tabla 25. Cálculo final de la masa de la estructura discretizado por tipo de elemento en cada uno de los software de análisis y comparado con el valor real obtenido en Revit.	77

Tabla 26. Resultados finales de los resultados en la base de la estructura por cada caso de carga analizado en cada software teniendo a Robot S.A.P. como punto de comparación.	78
Tabla 27. Sintetización de ventajas y desventajas de la implementación de las metodologías tradicionales en el análisis dinámico de una edificación.	79
Tabla 28. Sintetización de ventajas y desventajas de la implementación de la metodología BIM en el análisis dinámico de una edificación.	81

Lista de Figuras

Figura 1. Puntajes de evaluación de las variables cualitativas.	32
Figura 2. Respuesta gráfica de los cálculos de masas en los software de análisis.	37
Figura 3. Respuesta gráfica del cálculo del tiempo de modelamiento.	38
Figura 4. Representación gráfica de los resultados de reacciones de los modelos de calibración inicial.	39
Figura 5. Representación gráfica de los resultados de deformaciones de la calibración inicial. ..	40
Figura 6. Planta estructural propuesta en AutoCAD.	43
Figura 7. Ejes de los elementos del sistema estructural propuesto dibujados en AutoCAD.	44
Figura 8. Descripción del proceso de importación de los formatos ".dxf" en SAP2000.	45
Figura 9. Descripción del proceso de importación de los formatos ".dxf" en ETABS.	45
Figura 10. Cantidad de información importada en SAP2000 desde el modelo CAD.	46
Figura 11. Cantidad de información importada en ETABS desde el modelo CAD.	46
Figura 12. Herramientas de modelamiento de elementos tipo área en SAP2000.	47
Figura 13. Herramientas de modelamiento de elementos tipo área en ETABS.	48
Figura 14. Método de carga de los elementos área en SAP2000.	49
Figura 15. Método de carga de los elementos área en ETABS.	49
Figura 16. Herramientas de visualización de tablas de resultados en: a) ETABS (izquierda) y b) SAP2000 (derecha).	50
Figura 17. Herramienta de visualización de derivas en ETABS: "Story response plots".	51
Figura 18. Modelo 3D completo creado en Revit.	52

Figura 19. Herramienta de exportación del modelo 3D de Revit hacia Robot S.A.P. a través de su vínculo directo.....	53
Figura 20. Modelo del caso de estudio en Robot S.A.P.	54
Figura 21. Herramientas de modelamiento geométrico de los elementos área en Robot S.A.P... ..	54
Figura 22. Herramientas de asignación de los diferentes modelos matemáticos de los elementos tipo área en Robot S.A.P.....	55
Figura 23. Método de asignación de cargas en la estructura en Robot S.A.P.....	56
Figura 24. Visualización de selección independiente de elementos para el proceso de carga de la estructura en Robot S.A.P.....	57
Figura 25. Funciones dentro de la herramienta "Diagrams for building" de Robot S.A.P.	58
Figura 26. Ejemplo de funciones de la herramienta "Diagrams for buildings" de Robot S.A.P. .	59
Figura 27. Representación gráfica de la contabilización del tiempo de ejecución del pre-proceso.	61
Figura 28. Comparación porcentual del cálculo de reacciones en los software de análisis a partir de los casos de carga definidos.....	67
Figura 29. Representación gráfica de la distribución de los cortantes de entrepiso hechas por los software de análisis.....	68
Figura 30. Variación de la deriva de entrepiso calculada por cada software en la dirección X. ..	71
Figura 31. Variación de la deriva de entrepiso calculada por cada software en la dirección Y. ..	71
Figura 32. Resumen del tiempo empleado en el pre-proceso y el post-proceso durante el desarrollo del caso de estudio.....	73
Figura 33. Resultado gráfico del costo de implementación de cada una de las metodologías propuestas.	76

Figura 34. Comparación de la deriva máxima del edificio obtenida con cada software de análisis.

Un valor más bajo del porcentaje significa que se puede optimizar aún más la estructura. 83

Figura 35. Visualización gráfica del tiempo acumulado para el desarrollo del caso de estudio en

sus fases de pre-proceso, solución y post-proceso. 84

Glosario

Análisis estructural: conjunto de modelos matemáticos aplicados al estudio de las estructuras en ingeniería civil, que permiten determinar fuerzas, esfuerzos internos y las características estructurales de las mismas.

Building Information Modeling: BIM es un conjunto de herramientas utilizadas para el apoyo de grandes proyectos en el proceso de creación y administración durante el desarrollo del mismo. BIM se centra en visualización, intercambio de información y productividad mejorada gracias a la optimización de la coordinación de la documentación de los proyectos.

Calibración: es un proceso de comparación de resultados en el cual se verifica, comprueba y ajusta parámetros o variables para la cercanía de los valores de respuesta.

Concreto reforzado: es un material producto de la mezcla de porciones adecuadas de agregado grueso, fino, agua y material cementante, este material (concreto) es vertido dentro de unos elementos conocidos como casetones estructurados de acuerdo al refuerzo de barras de acero corrugadas.

Cualitativo: adjetivo o característica que describe de manera subjetiva las propiedades de un elemento, pero que no se puede cuantificar.

Cuantitativo: adjetivo o característica que describe las propiedades de un elemento por medio de valores numéricos, cantidades o magnitudes.

Deformación: es un cambio de forma o tamaño que sufre un objeto producidos por cargas o esfuerzos que actúen sobre este.

Deriva: es un desplazamiento relativo entre dos plantas o niveles consecutivos en altura de una edificación.

Desplazamiento: movimiento de una partícula en cualquier dirección debido a una fuerza aplicada.

Desventaja: condición desfavorable que algo tiene respecto a otro cosa.

Fuerza horizontal equivalente: método de análisis de resistencia sísmica para el diseño de edificaciones en altura. Se fundamenta en el cálculo del cortante basal de una estructura producida por un sismo, que corresponde a un espectro sísmico elástico de diseño, y que busca controlar las derivas de piso para los desplazamientos horizontales relativos máximos permitidos

Metodología: conjunto de procedimientos, técnicas o mecanismos que son utilizados para el cumplimiento de un objetivo.

Modelo: En ingeniería civil es la representación de una estructura que sirve de referencia para esquematizar la realidad, puesto que presenta las características específicas de la misma.

Modelamiento arquitectónico: es el modelo de un proyecto que presenta características arquitectónicas como distribución de espacios, dimensiones preliminares, geometría de elementos y especificación de materiales.

Modelamiento estructural: es el modelo de un proyecto que presenta características estructurales como sistema de apoyo, asignación de cargas, conexión entre elementos, entre otras.

Plano arquitectónico: es la representación gráfica en 2D de parte de un proyecto en istas independiente con características arquitectónicas como distribución de espacios, dimensiones preliminares, geometría de elementos.

Pórtico resistente a momento: es un sistema estructural en el espacio (3D) en el cual los nodos y elementos estructurales son capaces de resistir principalmente fuerzas de flexión, aunque también resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales.

Reacción de apoyo: es la fuerza de reacción que se desarrolla en el apoyo para contrarrestar la fuerza ejercida por la edificación.

Sensibilidad: es la calidad y variabilidad de la respuesta en una medición frente a alguna característica o parámetro.

Software: programa o aplicación informático que permite ejecutar diferentes tareas en un computador.

Ventaja: condición favorable que algo tiene respecto a otro cosa.

Zona de amenaza sísmica: conjunto de lugares con características similares de aceleración pico efectiva y velocidad pico efectiva.

RESUMEN

TÍTULO: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BIM EN EL ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO DE CARGA LATERAL EQUIVALENTE EN EDIFICACIONES DE HASTA 20 METROS DE ALTURA. *

AUTORES: MARY LUZ GIL MONTAÑA**
JOHN SEBASTIÁN FLÓREZ CASTELLANOS**

PALABRAS CLAVE: BIM, METODOLOGÍA TRADICIONAL, ANÁLISIS ESTRUCTURAL, FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE, INTEROPERABILIDAD, PÓRTICO RESISTENTE A MOMENTOS.

DESCRIPCIÓN:

La plataforma BIM busca mejorar todos los procesos que tienen cabida en un proyecto, puesto que, generalmente, en un proceso de diseño se presenta una falta de comunicación directa y eficiente entre los diferentes profesionales que intervienen en la planeación y ejecución del proyecto. El propósito del trabajo expuesto a continuación es comparar de forma cuantitativa las variables que intervienen en un procedimiento de pre-dimensionamiento de una edificación con un sistema estructural de tipo pórtico resistente a momentos, a través de un análisis lineal como lo es el método de Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) para el cumplimiento de derivas. La finalidad es evaluar dichas variables y definir qué tipo de ventajas y desventajas brinda la implementación de la plataforma BIM en el sector de la ingeniería civil respecto a la metodología de diseño considerada como “tradicional”, la cual se define en el presente documento. En primera instancia se definen las variables que se tienen en cuenta como punto de comparación de las metodologías, se realizan unos modelos de calibración inicial para determinar el comportamiento de dichas variables, luego se propone un planta estructural para el caso de estudio en las diferentes herramientas computacionales determinando los aspectos fundamentales tales como el modelamiento, cálculo de masa y aplicación de carga vertical en la estructura. Luego, se desarrolla el método de carga lateral equivalente, se itera la geometría de los elementos de resistencia sísmica propuestos para el cumplimiento de derivas establecido por el Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente (NSR – 10) y finalmente, se determinan las diferencias fundamentales dentro de las metodologías obteniendo como producto final un cuadro de comparación que evalúa a cada una con cada variable y se establece como principal disparidad las variables correspondientes a los resultados obtenidos del software utilizado, la interoperabilidad y los costos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Materiales, Magister en Ingeniería Civil, PhD en Ingeniería Civil. Codirector: Karen Milady Castañeda Parra, Ingeniera Civil.

ABSTRACT

TITLE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF IMPLEMENTING BIM IN PSEUDOSTATIC ANALYSIS OF EQUIVALENT LATERAL LOAD FOR BUILDINGS UP TO 20 METERS HIGHT*

AUTHORS: MARY LUZ GIL MONTAÑA**
JOHN SEBASTIÁN FLÓREZ CASTELLANOS**

KEYWORDS: BIM, Traditional methodology, Structural analysis, Equivalent Lateral Force, Interoperability, Moment-resisting frame.

DESCRIPTION:

BIM platform seeks upgrade processes that are got in a project, because generally, in a design process there is a lack of direct and efficient communication among the different professionals that are involved in the planning and execution of the project. The purpose of the elaboration exposed next is to compare in a quantity way the variables that intervene in a procedure of pre-dimensioning of a building with moment-resisting frames as structural system, through the lineal analysis as is the Equivalent Lateral Force (EHF) method to check drifts. The goal is to evaluate those variables and define what kind of advantages and disadvantages the BIM implementation provides in the civil engineering sector whit respect the design methodology that is considered “traditional”, which is defined in this document. First at all, the variables that are used for the comparison of methodologies are defined and the initial models are created to determine how the enhancement of those variables is. Then, for the case study, a structural plan is proposed using the different software of each methodology taking care about the fundamental aspects determined as the modelling process, the mass calculation and the assign of vertical loads to the structure. After that, the Lateral Equivalent Force, the geometry of the elements are iterated to accomplish the drift limits established in Colombian Regulation of Quake-Resistant Construction (NSR – 10), and, finally, the differences among the methodologies are set to obtain a comparison table that evaluates each workflow based on the variables found of which were defined as main the results obtained by software used, the interoperability and the costs.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Materiales, Magister en Ingeniería Civil, PhD en Ingeniería Civil. Codirector: Karen Milady Castañeda Parra, Ingeniera Civil.

Introducción

En la actualidad, el desarrollo de las herramientas computacionales en el área de la ingeniería civil ha generado que los resultados de los análisis de elementos finitos (FEA) puedan ser almacenados y compartidos en una gran variedad de formatos; un ejemplo de lo anterior es el Industry Foundation Classes (IFC) (Hibbeler & Tan, 2009), el cual es un formato que permite el intercambio de información en las etapas de diseño entre software de diferentes casas como CSI®, Autodesk®, MIDAS®, CYPE®, entre otros. Por otra parte, la plataforma BIM ofrece un vínculo directo entre sus programas para garantizar la interoperabilidad entre los mismos y la conservación de los archivos y sus datos en óptimas condiciones (Liu, Zhang, & Zhang, 2016), (Anil, Akinci, Kurc, & Garrett, 2015), (Fedorik, Makkonen, & Heikkilä, 2016). Así mismo existen problemas entre los software que utilizan el IFC puesto que se puede incurrir en una pérdida de la integridad de la información debido a fallas del formato en el empleo del Building Information Exchange (BIE) (Liu et al., 2016).

La plataforma Building Information Modelling (BIM) se ofrece como solución de interoperabilidad entre aquellos diseñadores de las diferentes profesiones que actúan en un proyecto, ya que les permite interactuar entre ellos y sus aportes específicos alimentado los modelos en tiempo real con ayuda del almacenamiento en la nube, ahorrando tiempo y mejorando la toma de decisiones entre ellos, por medio del mejoramiento de los canales de comunicación, alcanzando una completa coordinación para el desarrollo de un proyecto (Liu et al., 2016), (Wang, 2016), (N. O. Nawari et al., 2014). Por otra parte, se realizó un sondeo a conveniencia a partir de unas consultas a colegas profesionales para ratificar que lo que se conoce en el medio como

“metodología de diseño tradicional” es el empleo de software de casas independientes entre sí para llevar a cabo el proceso de diseño; así mismo, coincidieron en un flujo continuo de información, con subprocesos como pre-dimensionamiento, modelamiento, asignación de cargas, evaluación de derivas, iteración de geometría hasta el cumplimiento de derivas y acuerdo con el arquitecto y otros profesionales. Con lo anterior se corrobora cómo se lleva a cabo el proceso de comunicación entre el arquitecto y el ingeniero calculista, el cual puede volverse tedioso y demorado debido a una comunicación no muy eficiente entre los participantes (Cardani & Angjeliu, 2016), (N. Nawari, Itani, & Gonzalez, 2011), (Szelağ, 2017), (Chi, Wang, & Jiao, 2014). Además en las herramientas brindadas por BIM, a partir de un modelo arquitectónico se tiene la posibilidad de crear un modelo detallado de una estructura, además de la capacidad que se tiene de crear un modelo analítico, que contenga plena información de los elementos que lo componen, pues dichas herramientas tienen la ventaja de seleccionar porciones del modelo para posteriormente ser exportadas de manera independiente a programas de análisis estructural y viceversa (N. O. Nawari et al., 2014), (Barazzetti et al., 2015), por ende, el uso de los datos se puede compartir en tiempo real, lo cual reduce errores, pérdidas y discordancias de código en la etapa de dibujo constructivo (Liu et al., 2016).

Las falencias existentes en la comunicación entre los profesionales que intervienen en el diseño de un proyecto dan como resultado pérdidas económicas importantes, pérdida de tiempo y esfuerzos por parte de todos ellos, y, en general, ineficiencia. Por lo tanto, lo primero que se hace es establecer aquellas variables que se ven afectadas por esta problemática, las cuales se analizarán y evaluarán de forma cuantitativa teniendo en cuenta las metodologías BIM y “tradicional”, las cuales se detallarán más adelante.

Este proyecto contempla el desarrollo y análisis de un caso de estudio con el cuál se busca sintetizar las ventajas y desventajas que brinda el uso de cualquiera de las metodologías propuestas. Antes de la ejecución del caso de estudio se plantea una pequeña calibración de resultados para verificar que el manejo de los programas SAP2000® y Robot Structural Analysis Professional® es adecuado y se utilizan correctamente éstas herramientas.

Por otra parte, para el caso de estudio se define desde un planta arquitectónica de una edificación real, ubicada en la ciudad de Floridablanca, Santander, Colombia; una zona de alta amenaza sísmica. El sistema estructural propuesto es un sistema de pórtico resistente a momentos. Se modela la edificación según los parámetros que se establece para cada metodología empleada y se corren los análisis de Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) para la evaluación final de las derivas ya que como se estipula en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) (Sísmica, 2010) es de carácter obligatorio que una edificación tipo pórtico resistente a momentos cumpla el concepto de derivas y para este propósito uno de los métodos propuestos es el de FHE, el cual es un procedimiento para el análisis pseudoestático de carga lateral equivalente de una estructura (Sísmica, 2010) dado la necesidad de cumplir con los límites de desplazamientos horizontales en una edificación en altura dentro del marco legal.

Finalmente, dentro del alcance de esta investigación se establece que sólo se va a efectuar la evaluación de derivas por medio del método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) mediante cada una de las metodologías propuestas. Adicionalmente, se planteó una mejor comparación de resultados por medio de la realización de todos los modelos de calibración y caso de estudio en el software ETABS® de Computers and Structures ®, Inc (CSI). El proyecto de investigación contempla dentro de su alcance diseñar y/o detallar el refuerzo del sistema estructural de disipación

de energía del caso de estudio. Tampoco se hace énfasis en un análisis dinámico mediante cualquier otro método diferente a FHE.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Describir ventajas y desventajas de Building Information Modeling (BIM) frente a herramientas tradicionales (SAP2000 y CAD 2D), en el análisis pseudoestático de carga lateral equivalente para edificaciones de hasta 20 metros de altura por el método de fuerza horizontal equivalente (FHE), estableciendo las variables preliminares de tiempo, costos, requisitos de hardware e interoperabilidad.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar un conjunto de variables para la comparación de las herramientas BIM y las tradicionales (SAP2000 y CAD 2D), utilizadas para el análisis pseudoestático de carga lateral equivalente de edificaciones de hasta 20 metros de altura.
- Evaluar y cuantificar el comportamiento de las variables establecidas dentro del desarrollo del modelamiento y análisis estructural por el método de FHE, en el caso de estudio para cada una de las herramientas empleadas.
- Sintetizar las ventajas y desventajas de las variables analizadas según la metodología empleada (BIM y tradicional) a partir de los resultados obtenidos en caso de estudio elaborado.

2. Metodología tradicional en el análisis estructural

En un principio, para lograr definir cómo se trabaja tradicionalmente en el ámbito del diseño estructural se recurrió a unas consultas a expertos en el área en la ciudad de Bucaramanga para poder decidir si era viable la definición y enfoque dado a la investigación. Así pues, se realizó una serie de preguntas las cuales llevaron a determinar que en cuanto a la parte de análisis dinámico de una estructura se tiene por lo general un flujo de trabajo de interacción y reuniones constantes entre un Arquitecto y un Ingeniero Calculista en el procesamiento de planos arquitectónicos hasta planos estructurales que corresponden al pre-dimensionamiento de la estructura mediante la verificación del cumplimiento de derivas permitidas según la NSR – 10 en su Título A (Sísmica, 2010).

En los resultados obtenidos en las consultas se muestra que los planos arquitectónicos se manejan convencionalmente impresos o con el software AutoCAD® de Autodesk, mientras que el análisis y diseño estructural se efectúa con software como SAP2000® y/o ETABS® pertenecientes a la empresa CSI para luego tener que volver al software de dibujo CAD 2D para realizar despieces y planos del diseño realizado en cualquiera de los software de análisis. Cabe aclarar que cada programa de análisis puede hacer diseño hasta cierto punto y esto genera una cantidad de procesos adicionales para completar todo el proceso de diseño de un proyecto.

En fin, se propuso para esta investigación trabajar con la metodología tradicional desde dos puntos de comparación así:

- Tradicional 1: Dibujo y modelado 2D en AutoCAD® y análisis estructural en SAP2000®.
- Tradicional 2: Dibujo y modelado 2D en AutoCAD® y análisis estructural en ETABS®.

2.1 Interoperabilidad en la metodología tradicional

Como herramienta de modelamiento se tomó el software AutoCAD 2017® y se realizaron en él los diferentes modelos que serían exportados a los programas de análisis estructural que, como ya se ha mencionado, forman parte de la metodología tradicional de diseño de edificaciones: SAP2000® e ETABS®. Luego, la interoperabilidad en esta metodología se basó en los modelos que eran compatibles desde el programa de Autodesk hacia los software de CSI teniendo en cuenta que sólo se emplearán los modelos con formato “.dxf” ya que son los que tienen compatibilidad con los programas anteriormente mencionados.

3. Metodología BIM para análisis estructural

La metodología BIM se ven como una filosofía de diseño la cual busca optimizar todos los procesos y subprocesos del diseño de una obra civil gracias a la colaboración y comunicación eficiente entre los diferentes profesionales que hacen parte del proceso de planeación, diseño, ejecución, desarrollo y mantenimiento de una obra civil.

La plataforma BIM tiene la función de ayudar en el proceso descrito anteriormente por medio de herramientas computacionales que cada profesional puede utilizar respecto a la orientación dada por su especialidad. Por ejemplo, la casa Autodesk ha desarrollado esta idea de implementación BIM en todos sus software al incluir en su casa aquellos que sirven para modelamiento 3D, 4D y 5D; análisis, diseño y detallado estructural, de redes hidro-sanitarias, eléctricas y mecánicas, entre

muchos otros. En la presente investigación, que se limita de acuerdo al alcance de la misma, se utilizaron los siguientes software de Autodesk:

- AutoCAD 2017®
- Revit Structure 2017®
- Robot Structural Analysis Professional 2017®

3.1 Interoperabilidad en la metodología BIM

Lo primero que se estableció fue la herramienta de modelamiento a emplear, la cual fue Revit 2017®, de Autodesk y luego, el programa de análisis estructural Robot Structural Analysis Professional®. El primero se utilizó para modelar las diferentes estructuras de calibración de resultados y el caso de estudio, y como posee un vínculo directo con Robot S.A.P. 2017 ® se emplea este último en el análisis estructural de las diferentes estructuras modeladas. Al tener una interoperabilidad directa los modelos creados y/o modificados en cualquiera de los dos programas, uno puede actualizar al otro sin ningún inconveniente.

4. Variables de comparación

Para la definición de las variables de comparación se recurrió a la lectura bibliográfica con la cual se encontró que éstas se dividen en aquellas variables cuyo valor cuantitativo es tomado a través del proceso y aquellas variables cualitativas a las cuales se asigna una calificación cuantitativa

para facilidad de comparación en los resultados. En la Tabla 1 se presentan cada una de esas variables y se da una pequeña explicación de qué significan las mismas.

Adicionalmente, como se mencionó, se establece una calificación cuantitativa que de un valor numérico a las variables cualitativas con el ánimo de medir su utilidad para el objetivo final de la investigación; esta calificación se encuentra en la Tabla 1.

4.1 Variables cualitativas

Se definieron como aquellas variables que no pueden ser medidas numéricamente pero que son de un gran aporte a la identificación de las ventajas y desventajas que trae consigo la implementación de cada una de las metodologías empleadas. Estas variables se presentan como sigue en la Tabla 1.

Tabla 1.
Variables cualitativas para la comparación entre las metodologías.

Variables de comparación entre las metodologías	
Variable	Descripción
Colaboración	Facilidad de que los profesionales de distintas especialidades intervengan en un diseño en tiempo real y puedan aportar al proceso eficientemente (Wang, 2016) y en cualquier momento para así poder mejorar el aspecto de toma de decisiones.
Interoperabilidad	Facilidad que tienen los programas de una casa ed software para transferir información y modelos entre ellos sin pérdida alguna y/o

Cualitativas

	degradación de la información o atributos de los datos contenidos en los mismos.(Fedorik et al., 2016), (Wang, 2016).
Integración	Posibilidad de integrar a los diferentes profesionales especialistas en un proyecto en una misma plataforma que pueda llevar a cabo el proceso de diseño sin limitaciones por sus especialidades (Wang, 2016) y que retroalimente todos los modelos existentes.
Automatización	Facultad que tienen los programas para agilizar procesos internos y externos relacionados con las diferentes especialidades de los profesionales que participan en un proyecto (Chi et al., 2014).
Visualización	Propiedad otorgada a los programas según las características que maneja su interfaz y cómo se muestra ésta al usuario para dar resultados (Chi et al., 2014) además de la cantidad de procesos que permite observar sin tener que cambiar las ventanas del software empleado.

4.2 Variables cuantitativas

En la definición de las variables cuantitativas se buscó un enfoque de aquellas cualidades medibles en la implementación de cada metodología para el hallazgo final de las ventajas y desventajas que trae consigo la implementación de cada una de ellas en el análisis dinámico de una edificación. Es así como se sintetizó la Tabla 2, la cual es mostrada a continuación con la definición de las variables mencionadas anteriormente.

Tabla 2.

Variables cuantitativas para la comparación entre las metodologías

Variables de comparación entre las metodologías		
	Variable	Descripción
Cuantitativas	Nivel de Detalle	Muestra la capacidad de detalle de ambas metodologías tanto en los modelos como en los resultados, además de la discretización de información en la interfaz de los programas. También es conocido como Level of Development (LOD) (Forum, 2016), (Madrid, 2012).
	Resultados	Datos de los análisis realizados por los programas cada una de las metodologías, los cuales bien pueden ser ligeramente diferentes de acuerdo a los sistemas numéricos que utilice cada programa. Esta variable incluye los valores obtenidos en cuanto a reacciones (cortante basal), deformaciones, desplazamientos (derivadas) (Sísmica, 2010).
	Tiempos de modelado	Variable que puede describir y cuantificar el comportamiento del tiempo en el proceso de modelamiento e interoperabilidad entre los programas (Chi et al., 2014), (Lagüela & Varela, 2016).
	Costos de implementación de software y hardware	Corresponde a un valor cuantificable que depende del precio de las licencias de cada programa sumado a las características computacionales mínimas requeridas por cada uno (AutoDesk, 2017), (Computers and Structures Inc, 2017).

4.3 Método de valoración de las variables cualitativas

Se creó la Tabla 3 en la cual se planteó un método de calificación numérico para las variables cualitativas de forma tal que correspondiera a una evaluación más representativa para las metodologías propuestas en el alcance de esta investigación.

Tabla 3.

Puntajes de calificación de las variables cualitativas. Entre mayor puntaje mejor.

Especificación de la calificación de variables cualitativas		
Variable	Valor	Descripción
Colaboración	1 – 5	De la más baja participación colaborativa por falta de conexión en línea (1) hasta la participación colaborativa óptima y eficiente (5).
Interoperabilidad	1 – 5	De las más baja interoperabilidad entre los programas de una misma casa entre ellos y con los de otras empresas (1) hasta la interoperabilidad total (5).
Integración	1 – 5	De la más baja posibilidad de integrar las diversas especialidades que intervienen en el proyecto (1) hasta una integración total (5)
Automatización	1 – 5	De una automatización de procesos deficiente o inexistente (1) hasta una automatización de procesos eficiente (5).
Visualización	1 – 5	De un nivel de visualización de resultados básico (1) hasta un detalle de visualización completo (5).

4.4 Evaluación de las variables cualitativas

A continuación, en la Tabla 4 se presenta un resumen de los valores asignados a cada una de las variables cualitativas para los software empleados de acuerdo a la valoración dada en esta investigación basada en la bibliografía consultada, conocimientos previos a la realización de la investigación, asesorías externas al proyecto que aportaron su conocimiento a la realización de esta calificación y el manejo propio en el desarrollo de los modelos de calibración y caso de estudio.

Tabla 4.

Valoración de variables cualitativas según el software de análisis de cada metodología. Entre mayor sea el puntaje mejor.

Valoración de variables cualitativas			
Variable	SAP2000	ETABS	Robot
1. Colaboración	2	2	4
2. Interoperabilidad	3	4	5
3. Integración	2	2	4
4. Automatización	2	3	5
5. Visualización	3	4	5

Así mismo se muestra la Figura 1 la cual muestra el resultado de la evaluación de forma gráfica y permite evidenciar que las variables cualitativas favorecen a la metodología BIM debido a que al emplear únicamente Robot S.A.P. ® o cualquier otro software de análisis se pudo comenzar a evaluar cada una de las variables cualitativas incluso desde los modelos de calibración.

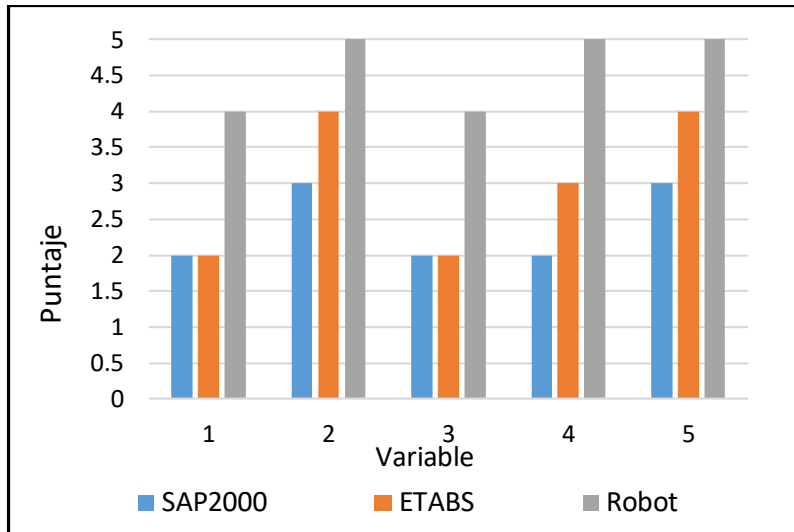


Figura 1. Puntajes de evaluación de las variables cualitativas.

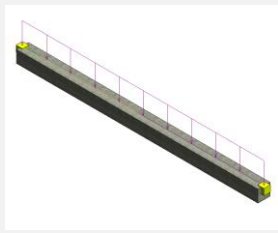
5. Modelos de calibración

5.1 Definición de los modelos de calibración

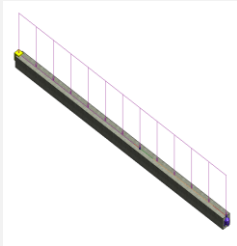
Los modelos de calibración se crearon con el fin de buscar diferencias en los modelos y sus resultados iniciales obtenidos con los software de cada metodología empleada. En la Tabla 5 se exponen las principales características y propiedades de los modelos además de las cargas aplicadas a estos y demás consideraciones tenidas en cuenta en el desarrollo de la fase de calibración de los resultados iniciales para proceder a realizar el caso de estudio.

Tabla 5.

Características y propiedades de los modelos de calibración.

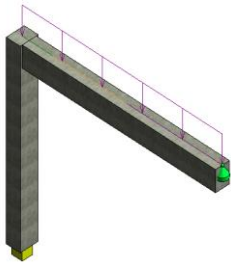
Descripción de modelos de calibración de la investigación		
#	Modelo	Descripción
1		<ul style="list-style-type: none"> - Viga con apoyos de primer y segundo grado - $f^c = 21$ [MPa] - $L = 5$ [m] - Carga $D = 10$ [kN/m] - No considera peso propio - $b = 0.35$ [m] - $h = 0.45$ [m]
2		<ul style="list-style-type: none"> - Viga con apoyo de tercer grado - $f^c = 21$ [MPa] - $L = 10$ [m] - Carga $D = 30$ [kN/m] - No considera peso propio - $b = 0.5$ [m] - $h = 0.5$ [m]
3		<ul style="list-style-type: none"> - Viga con apoyo de tercer grado - $f^c = 21$ [MPa] - $L = 8$ [m] - Carga $D = 0 - 15$ [kN/m] de un extremo al otro de la viga - No considera peso propio

4



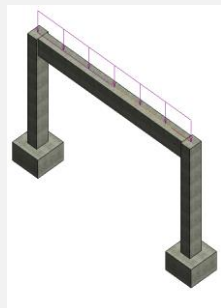
- $b = 0.35$ [m]
- $h = 0.6$ [m]
- Viga con apoyos de primer y segundo grado
- $f^c = 21$ [MPa]
- $L = 7$ y 5 [m]
- Carga $D = 5$ [kN/m]
- No considera peso propio
- V1 0.4×0.4 [m] y $L = 7$ [m]
- V2 0.4×0.4 [m] y $L = 5$ [m]

5



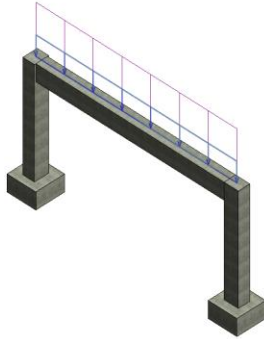
- Pórtico 2D con apoyos de tercer grado en cada columna. Inercia en las columnas igual debido al empleo de una sola sección.
- $f^c = 21$ [MPa]
- $L = 4$ y 5 [m]
- Carga $D = 20$ [kN/m]
- No considera peso propio
- V 0.35×0.45 [m] y $L = 5$ [m]
- C 0.35×0.45 [m] y $L = 4$ [m]

6



- Pórtico 2D con apoyos de tercer grado en cada columna. Inercia igual en las columnas debido a secciones transversales iguales
- $f^c = 21$ [MPa]
- $L = 3$ y 6 [m]
- Carga $D = 20$ [kN/m]
- No considera peso propio

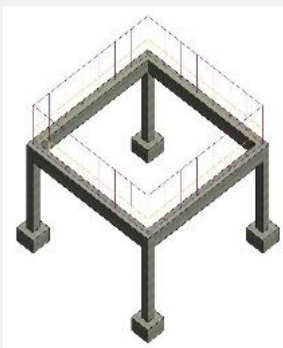
7



- V 0.4x0.4 [m] y L = 6 [m]
- C 0.5x0.5 [m] y L = 3 [m]
- Pórtico 2D con apoyos de tercer grado en cada columna. Inercia diferente en las columnas debido a secciones transversales diferentes

- $f^c = 21$ [MPa]
- L = 3.25 y 7 [m]
- Carga D = 5 [kN/m]
- Carga L = 3 [kN/m]
- Considera peso propio
- V 0.4x0.5 [m] y L = 7 [m]
- C1 0.4x0.5 [m] y L = 3.25 [m]
- C2 0.5x0.4 [m] y L = 3.25 [m]

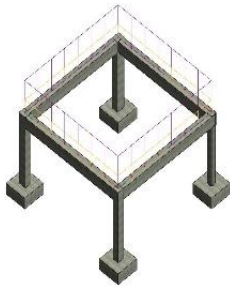
8



- Pórtico 3D con apoyos de tercer grado en cada columna. Inercia igual en las columnas debido a secciones transversales iguales

- $f^c = 21$ [MPa]
- L = 3.25 y 7 [m]
- Carga D = 5 [kN/m]
- Carga L = 2 [kN/m]
- Considera peso propio
- V 0.4x0.5 [m] y L = 7 [m]
- C 0.4x0.4 [m] y L = 3.25 [m]

9



- Pórtico 3D con apoyos de tercer grado en cada columna. Inercia diferente en las columnas debido a sus secciones transversales
- $f'c = 21$ [MPa] (vigas)
- $f'c = 28$ [MPa] (columnas)
- $L = 3.25$ y 7 [m]
- Carga $D = 5$ [kN/m]
- Carga $L = 2$ [kN/m]
- Considera peso propio
- $V = 0.4 \times 0.5$ [m] y $L = 7$ [m]
- CA1 0.4×0.5 [m] y $L = 3.25$ [m]
- CA2 0.5×0.4 [m] y $L = 3.25$ [m]
- CB1 0.4×0.4 [m] y $L = 3.25$ [m]
- CB2 R = 0.4 [m] y $L = 3.25$ [m]

5.2 Resultados de los modelos de calibración

Para los modelos de calibración se evaluaron los aspectos tanto cualitativos como cuantitativos de las metodologías empleadas. En las siguientes sub-secciones se describirán cómo se realizó el proceso de evaluación y cuantificación de las variables en los modelos de calibración.

5.2.1 Masa de los modelos de calibración. En primera instancia, en la Tabla 6 se compara el cálculo de la masa que realiza cada software respecto a SAP2000® y se evidencia mediante una comparación porcentual respecto a cada modelo de comparación. Así, el software SAP2000® muestra 100% de masa calculada y los demás software presentan un porcentaje menor de valor de masa puesto que optimiza el

cálculo al realizar el corte geométrico en cada programa de los elementos que se intersecan. La figura 2 representa mediante un gráfico de barras la diferencia porcentual de cálculo de masa en donde a partir del modelo número 5 comienza a ser evidente la diferencia de valores entre los programas y ésta va en crecimiento hasta el modelo de calibración número 9.

Tabla 6.

Masas obtenidas en los software de análisis. Entre el porcentaje sea más bajo, más preciso es el cálculo de la masa.

Cálculo de masa en cada modelo (%)			
Modelo	SAP2000	ETABS	Robot
1	100%	100%	100%
2	100%	100%	100%
3	100%	100%	100%
4	100%	100%	100%
5	100%	98%	98%
6	100%	97%	97%
7	100%	97%	97%
8	100%	96%	96%
9	100%	96%	96%

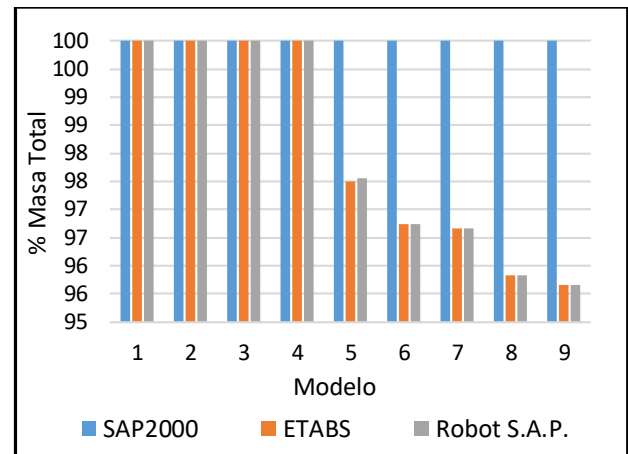


Figura 2. Respuesta gráfica de los cálculos de masas en los software de análisis.

5.2.2 Tiempos de modelamiento. Seguidamente, instancia se buscó cuantificar el tiempo de modelamiento en los programas empleados, así es como se crearon la Tabla 7 y la Figura 3 mostradas a continuación donde se encuentra que el software de análisis SAP2000 fue tomado como punto de referencia, es decir, es el 100% ya que es el programa que se emplea tradicionalmente desde la academia, luego, al ver la Tabla 7, donde se observan porcentajes menores lo que se concluye es que fue más eficiente el modelamiento ya que no emplea el 100% del tiempo que se gasta en SAP2000 sino que al contrario, produce un ahorro de tiempo.

Tabla 7.

Tiempo de modelamiento en porcentajes. Entre menor sea el valor es más eficiente el software empleada.

Porcentajes de tiempos de modelamiento			
Modelo	SAP2000	ETABS	ROBOT
1	100%	110%	90%
2	100%	90%	80%
3	100%	100%	100%
4	100%	100%	70%
5	100%	100%	70%
6	100%	90%	70%
7	100%	80%	70%
8	100%	80%	70%
9	100%	70%	60%

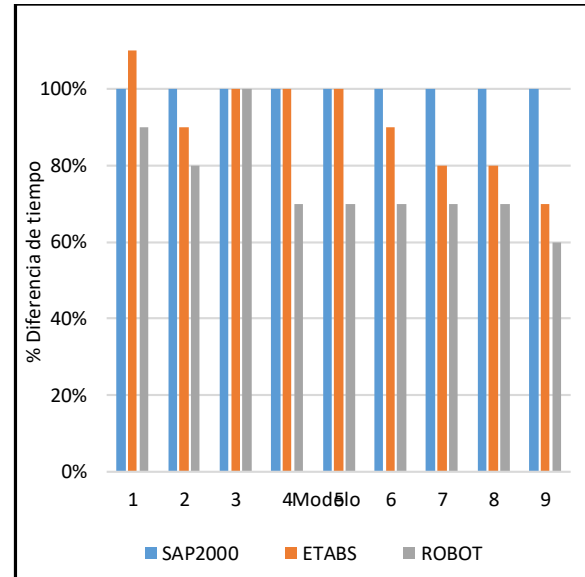


Figura 3. Respuesta gráfica del cálculo del tiempo de modelamiento.

5.2.3 Reacciones en los modelos de calibración. Para este apartado se realizaron la Tabla 8 y la Figura 4 las cuales sólo muestran el porcentaje de diferencia encontrado entre los programas analizando las reacciones calculadas (tomando como base la herramienta SAP2000®) por cada uno de ellos, en cada modelo, en un apoyo y una dirección determinada, tomada de igual manera para los diferentes modelos en un apoyo específico de cada uno, es decir, se analizaron bajo las mismas circunstancias los modelos de los 3 software empleados para el mismo caso, pero no quiere decir que fuera la misma condición en todos los modelos puesto que todos tienen características diferentes.

Tabla 8.

Reacciones resultantes de la calibración inicial comparados inicialmente con SAP2000.

Resultados del análisis de calibración inicial de las reacciones			
Modelo	Reacciones en SAP2000 [kN]	%Diferencia ETABS	%Diferencia Robot
1	25.0	0.0 %	0.0 %
2	250.0	0.0 %	0.0 %
3	-32.1	0.0 %	0.4 %
4	17.8	0.0 %	0.1 %
5	14.6	0.0 %	0.9 %
6	-13.6	0.0 %	2.8 %
7	-3.6	0.2 %	5.9 %
8	-12.8	0.4 %	4.2 %
9	2.2	0.2 %	6.7 %

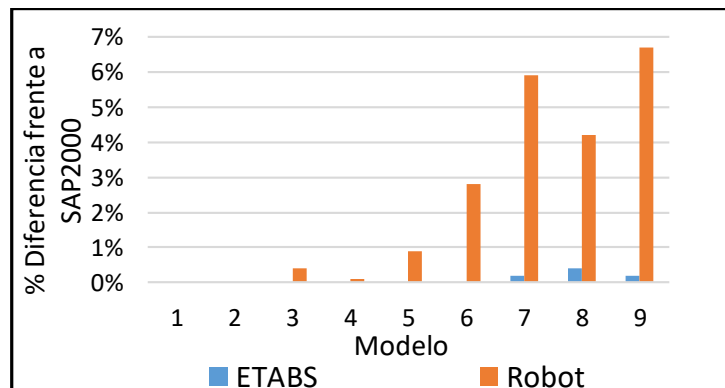


Figura 4. Representación gráfica de los resultados de reacciones de los modelos de calibración inicial.

5.2.4 Deformaciones en los modelos de calibración. También se analizaron las deformaciones alcanzadas en los elementos más críticos de cada modelo de calibración dando como resultado los valores analizados en la Tabla 9 y en la Figura 5 donde se observan diferencias notables de hasta 8% si se compara lo obtenido en Robot S.A.P frente a SAP2000, pero esto es debido al fenómeno del recorte de la masa y se ve que corresponde igualmente con la sección anterior donde el mismo efecto produce cambios notables en la obtención de reacciones.

Tabla 9.

Deformaciones resultantes de los modelos de calibración inicial.

Diferencias de resultados de deformaciones			
Modelo	SAP2000	ETABS	Robot
	[mm]		
1	1.41	1.66 %	0.84 %
2	6.90	0.00 %	0.99 %
3	0.58	0.17 %	1.86 %
4	1.49	0.00 %	1.78 %
5	1.80	1.87 %	2.13 %
6	0.92	0.00 %	7.83%
7	1.26	4.26 %	6.39 %
8	1.56	0.26 %	3.35 %
9	1.66	0.06 %	1.01 %

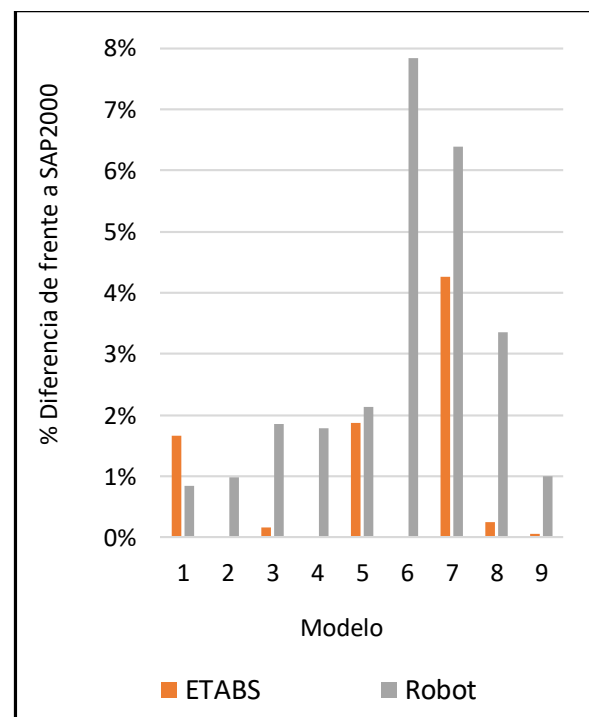


Figura 5. Representación gráfica de los resultados de deformaciones de la calibración inicial.

6. Caso de estudio

6.1 Definición y planteamiento del caso de estudio

Como se mencionó previamente, para el caso de estudio se planteó realizar el análisis estructural y pre-dimensionamiento de un edificio con las características propuestas en la presente sección, y además, se identificaron unas fases claves que se llevaron a cabo independientemente de la metodología empleada, las cuales son:

- Pre-proceso
- Solución
- Post-proceso

Como caso de estudio se empleó una estructura con las siguientes características

- Zona sísmica alta: DES
- Tipo de Suelo: C
- Sistema estructural: Pórtico
Resistente a Momentos
- Número de Pisos: 6
- Altura total: 16.8 [m]
- Número de sótanos: 0

6.2 Pre-proceso

Desde de las primeras etapas en un proyecto civil, se desarrolla una interacción entre diferentes profesionales a partir de la creación del diseño de una estructura de un arquitecto, que luego procede al intercambio de información arquitectónica con un ingeniero calculista, el cual recibe

planos y los convierte en un modelo, ya sea que lo haga primero en 2D (Computer-Aided Drawing CAD) o en un modelamiento 3D directamente en un software de dibujo y/o de análisis.

Dentro de la elección de los elementos estructurales y no estructurales del proyecto, cabe resaltar lo importante que es para el dimensionamiento inicial de la estructura, el cumplimiento del reglamento específicamente en esta etapa referente el Título C de la NSR – 10 (Sísmica, 2010b). Como se mencionó anteriormente se cumple el pre-dimensionamiento para los siguientes elementos:

- Vigas según la Tabla C.9.5(a) y el literal C.21.5
- Columnas según el literal C.21.6
- Placas maciza y nervada en una dirección según la Tabla C.9.5(a).

Así pues, en el caso de estudio se simuló esta situación al tomar un modelo arquitectónico de una edificación, plantear un sistema de planta estructural y modelarla con las herramientas propuestas en cada metodología, es decir, se dibujó la planta en AutoCAD® como parte de la metodología Tradicional, y, por otro lado, se modeló la misma planta propuesta en Revit® como parte de la metodología BIM. La planta propuesta se muestra en las Figuras 6 y 18 para el dibujo CAD y 3D (en Revit®) respectivamente. El pre-proceso detallado en cada metodología se presenta a continuación.

6.2.1 Pre-proceso del caso de estudio empleando la metodología tradicional. Como parte de la metodología Tradicional se empleó el software CAD AutoCAD®, de Autodesk, para realizar el dibujo y modelado 2D de una planta estructural tipo a partir del diseño arquitectónico y se preparó el archivo en un formato “.dxf” para poder utilizarlo más adelante en el paso de información del modelo 2D a SAP2000® y a

ETABS®, los cuales se emplearon como programas de análisis estructural. A continuación, en la Figura 6 se observa la distribución de la planta que fue propuesta para este caso de estudio con el sistema estructural descrito en el alcance. Luego, en la Figura 7 se encuentra el sistema de ejes de los elementos propuestos en la distribución de planta con el fin de poder ser importados a SAP2000® como elementos tipo “frame”, detalle que no es necesario para ETABS ya que éste admite la importación de la planta completa.

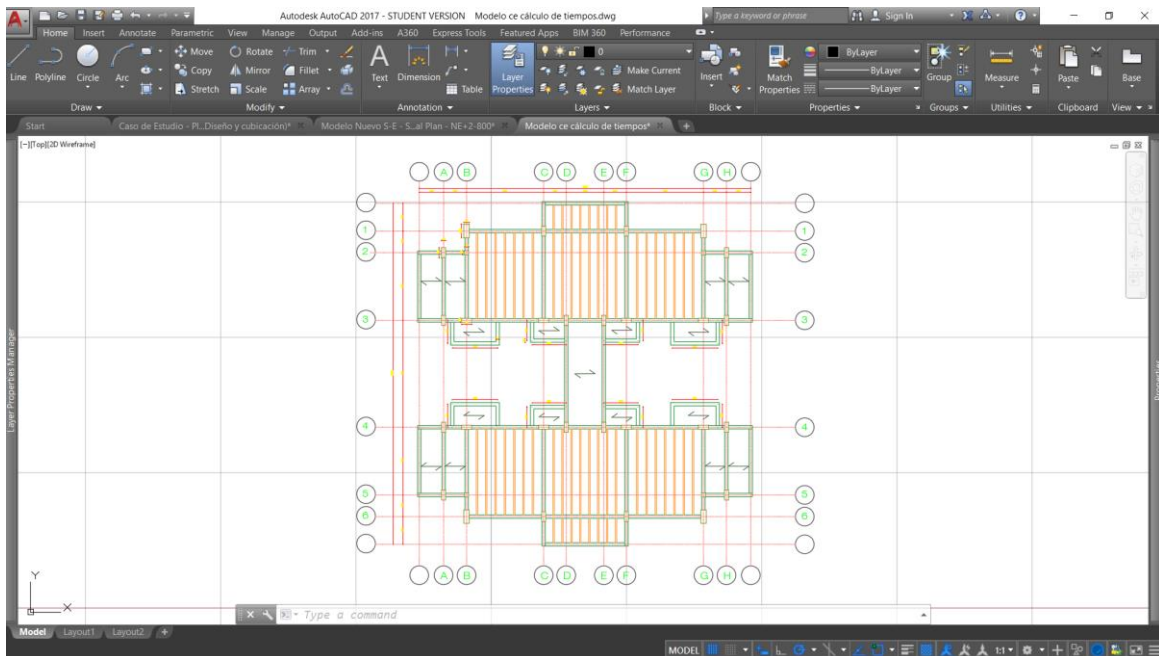


Figura 6. Planta estructural propuesta en AutoCAD.

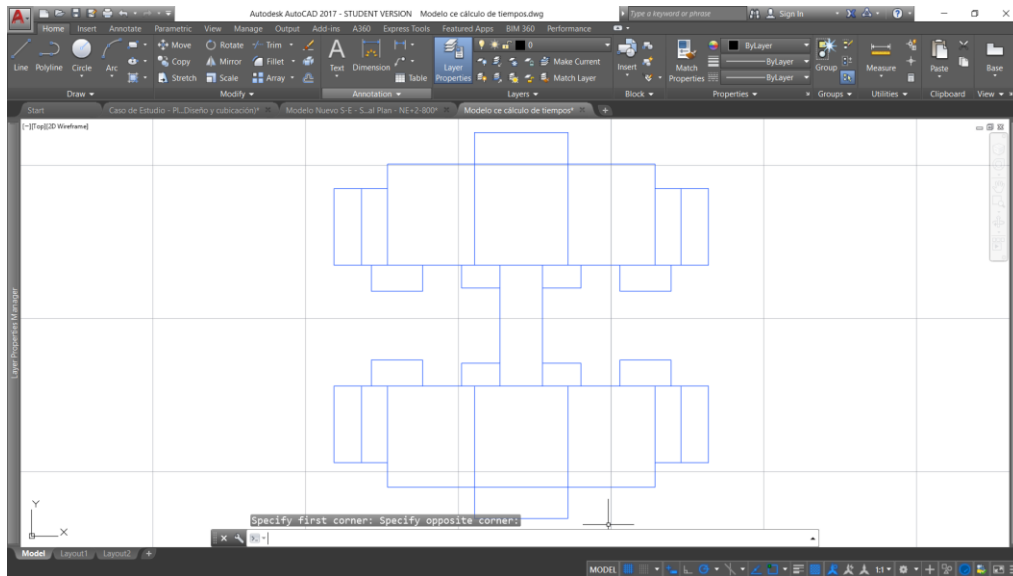


Figura 7. Ejes de los elementos del sistema estructural propuesto dibujados en AutoCAD.

Como se mencionó anteriormente, esta planta se exportó en un formato (.dxf) tal que los programas de la casa CSI pudieran reconocer. Es así como en la parte final del pre-proceso se culminó el modelamiento preliminar en los software de análisis SAP2000® e ETABS®. Adicionalmente, se contabilizó el tiempo que demoró el importar los datos del dibujo CAD y refinarlos hasta dejar listo el modelamiento estructural en los dos software mencionados. A continuación, en la Figura 8 se muestra cómo es el proceso de importación del archivo “.dxf” en el software SAP2000® hasta el producto final de esa transferencia de información, la cual debe ser complementada debido a las falencias presentadas en estos procedimientos entre los diferentes programas.

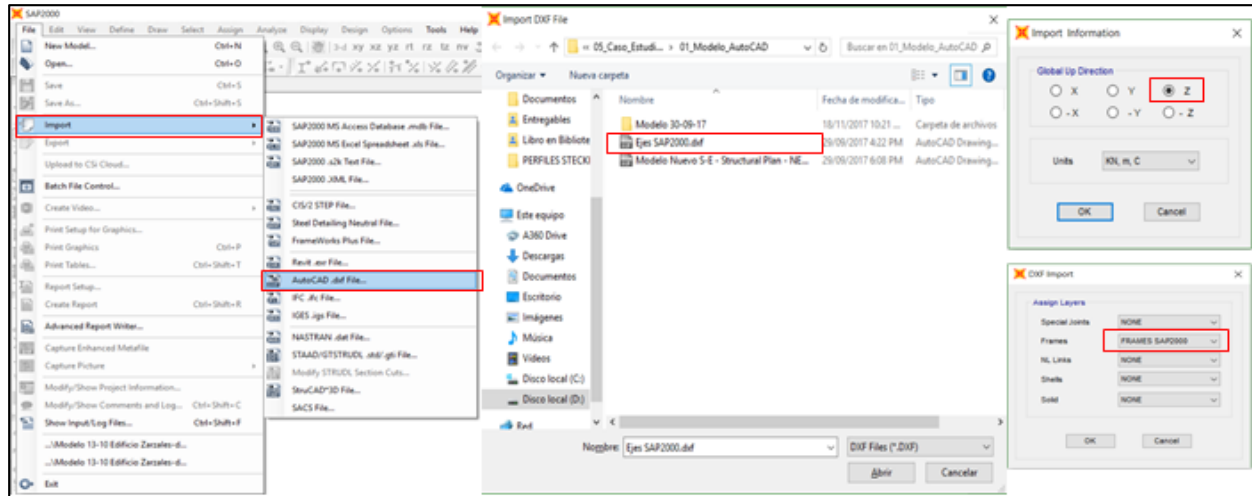


Figura 8. Descripción del proceso de importación de los formatos ".dxf" en SAP2000.

De manera similar, se desarrolló el procedimiento para el modelamiento con ETABS® y esto se evidencia en la Figura 9 mostrada a continuación.

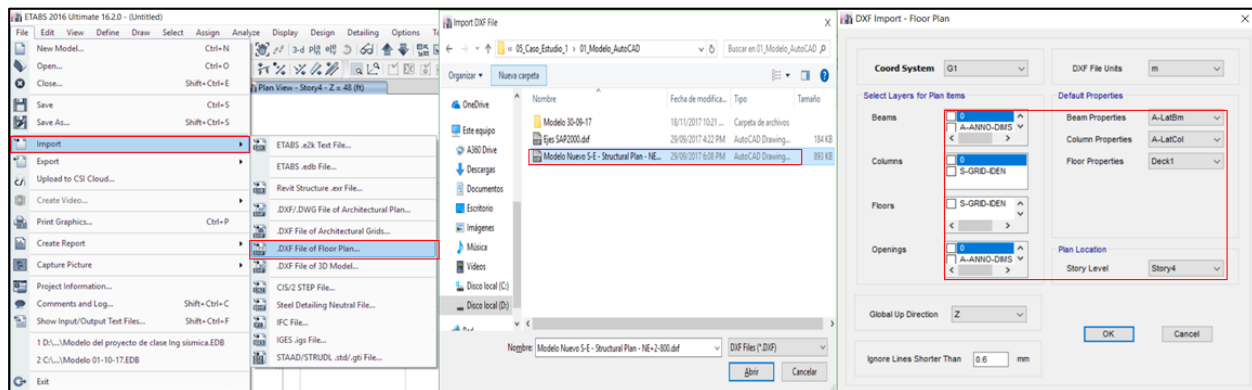


Figura 9. Descripción del proceso de importación de los formatos “.dxf” en ETABS.

La Figura 10 muestra la cantidad información importada desde AutoCAD® hacia SAP2000®, lo cual difiere respecto al manejo que proporciona ETABS®, como se puede ver en la Figura 11. La diferencia radica en que SAP2000® sólo admite los ejes de los elementos los cuales deben ser

dibujados por el usuario en AutoCAD®, mientras que ETABS® sólo necesita la planta estructural para usarla a especie de plantilla donde él mismo crea las columnas con sus secciones reales.

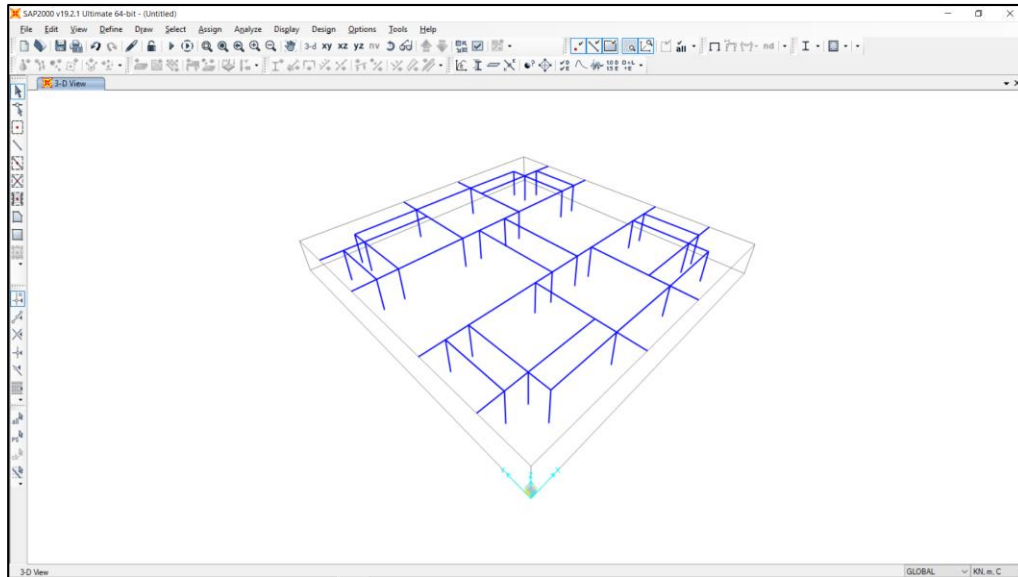


Figura 10. Cantidad de información importada en SAP2000 desde el modelo CAD.

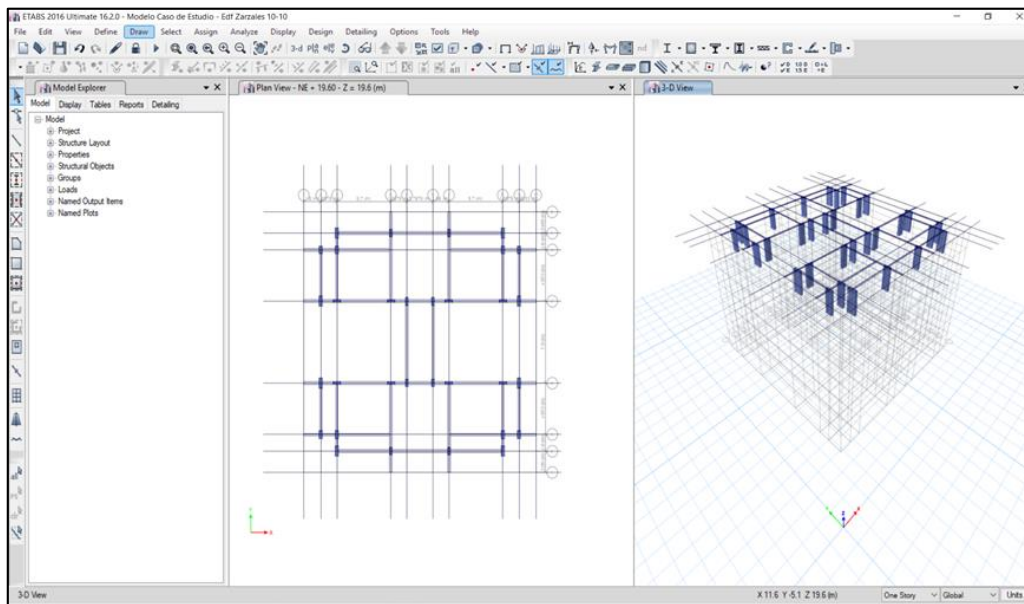


Figura 11. Cantidad de información importada en ETABS desde el modelo CAD.

Otra diferencia entre SAP2000® e ETABS® es el modelamiento de los elementos tipo área ya que en el primero se tuvo que modelar elementos Shell de tipo Membrane que no aportaran ni masa ni peso a la estructura debido a que éstos elementos se modelaron con el único fin de transmitir las cargas verticales por unidad de área a los elementos tipo Frame pertenecientes al sistema de disipación de energía sísmica, mientras que, por otro lado, en ETABS® se pudieron modelar placas macizas y ortotrópicas que no solo transmitieron carga sino que aportaron su masa y peso al sistema en general. Así, al no considerar el peso propio de los elementos Shell en SAP2000® éste tuvo que calcularse a mano y asignarse a los elementos uno a uno para que se calculara correctamente el método FHE de forma automática en el mismo. Las Figuras 12 y 13 muestran, respectivamente, la diferencia entre la forma de modelamiento de los elementos tipo área en los software.

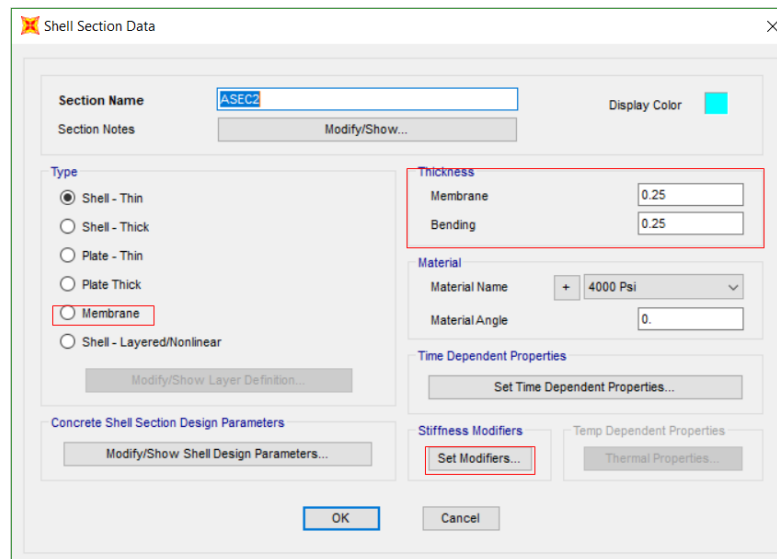


Figura 12. Herramientas de modelamiento de elementos tipo área en SAP2000.

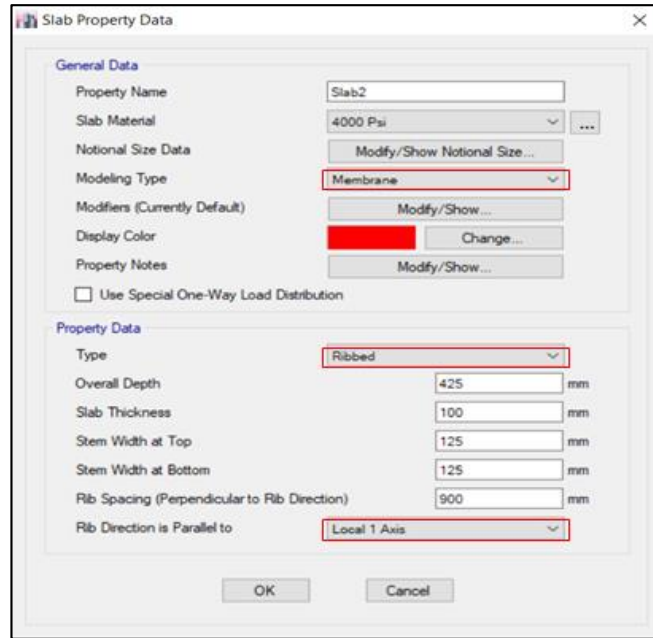


Figura 13. Herramientas de modelamiento de elementos tipo área en ETABS.

Con la información planteada anteriormente y lo que se muestra a continuación en las Figuras 14 y 15 respectivamente, se evidencia que las cargas en SAP2000® fueron asignadas de forma manual a cada uno de los elementos tipo área, primeramente en una planta la cual se replicó gracias a la facilidad de simétrica del edificio. Pero, por el contrario, en ETABS® se utilizó la herramienta llamada “Load Set” la cual permitió generar procesos de carga mucho más discretizados, precisos y eficientes. Este procedimiento se cumplió a partir de las cargas seleccionadas del reglamento (Sísmica, 2010c)

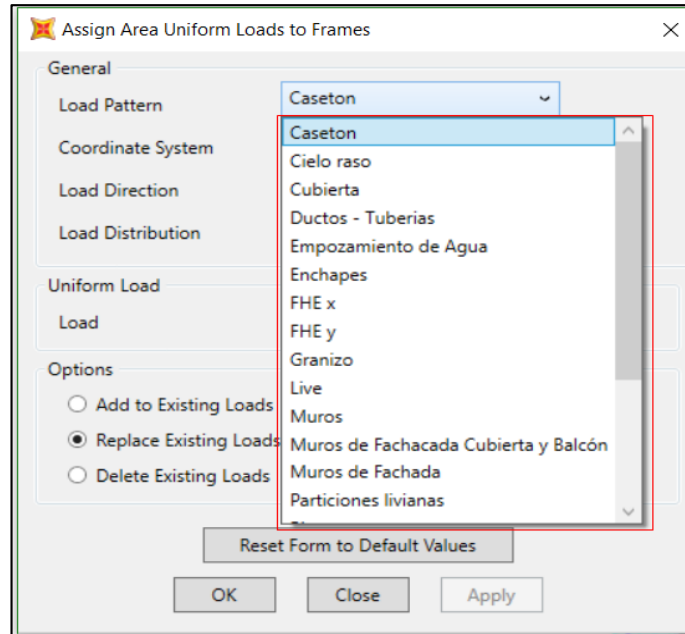


Figura 14. Método de carga de los elementos área en SAP2000.

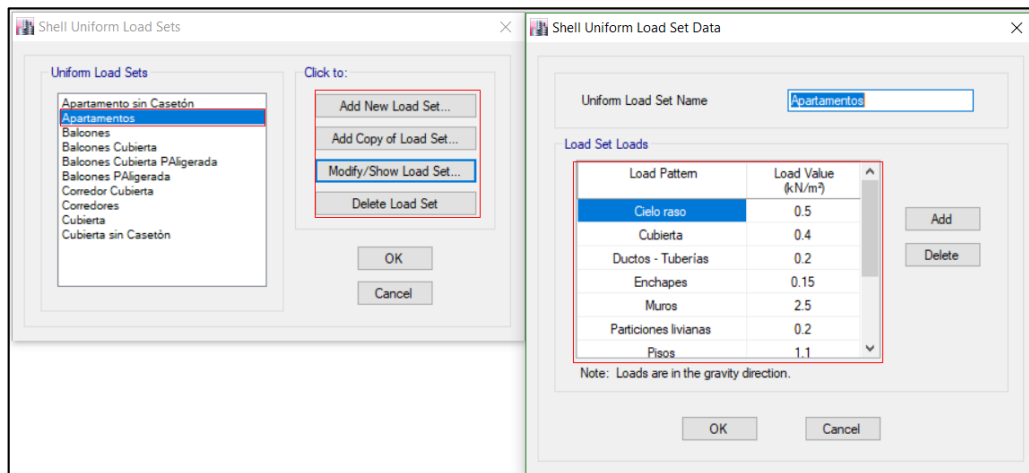


Figura 15. Método de carga de los elementos área en ETABS.

Ambos programas de la casa CSI tienen opciones de visualización de los resultados del análisis muy similares con una ventana de visualización de tablas de respuestas, tal y como se muestra en la Figura 16 mostrada a continuación.

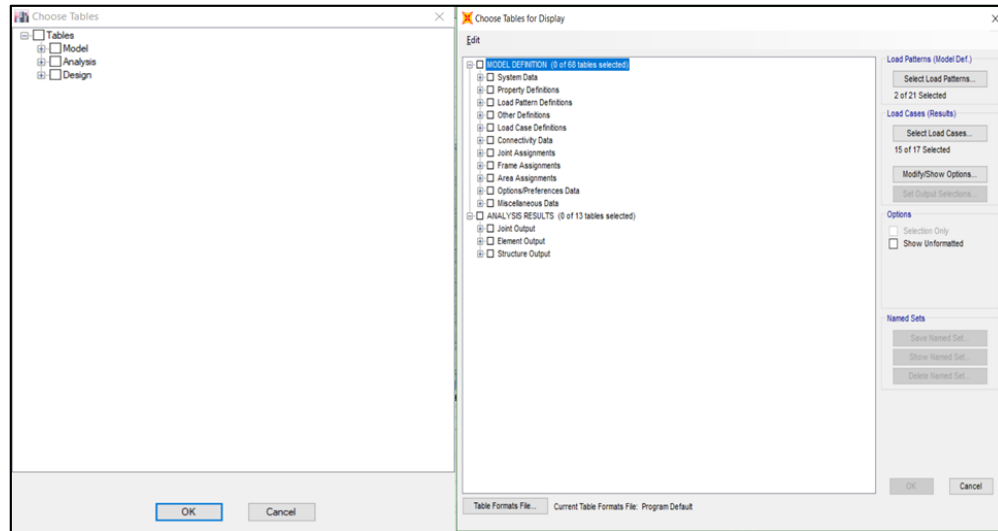


Figura 16. Herramientas de visualización de tablas de resultados en: a) ETABS (izquierda) y b) SAP2000 (derecha).

Sin embargo, algunas de las herramientas de ETABS® son mucho más específicas para el análisis de edificaciones. Una de ellas es, por ejemplo, “Story response plots” la cual permitió verificar el control de derivas y la distribución de los cortantes de entrepiso (entre otras de sus funciones) durante el desarrollo de esta investigación. Esta herramienta se puede observar en la Figura 17. Por el contrario, para el cumplimiento de las derivas y su chequeo en SAP2000® siempre hubo la necesidad de hacer hojas de cálculo adicionales a los datos entregados por el programa y así poder verificar si se cumplía con la normativa.

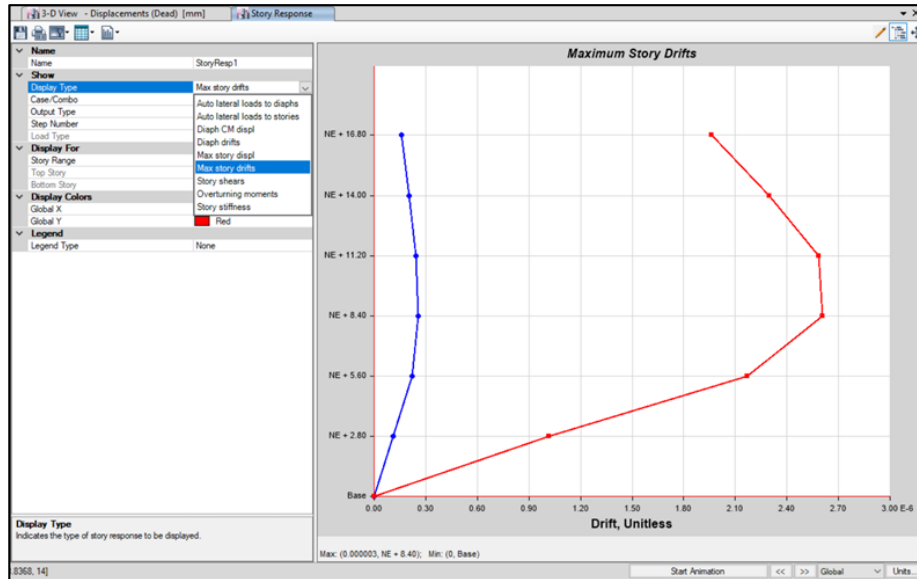


Figura 17. Herramienta de visualización de derivas en ETABS: "Story response plots".

Al comparar las herramientas como SAP2000® y ETABS®, los cuales pertenecen a la casa CSI y a la misma metodología tradicional, se observa que aún existen diferencias en la etapa de modelamiento.

6.2.2 Pre-proceso del caso de estudio empleando la metodología BIM. Por otra parte, en la metodología BIM se presenta una variedad de opciones en las cuales por un lado, el modelamiento puede partir de planos arquitectónicos realizados en 2D y ser exportados como guía de modelamiento en 3D por medio de la herramienta computacional de Revit®, esto permite obtener una mayor visualización de los espacios que se requieren en el proyecto. Por otro lado, en el caso de estudio se decidió realizar el modelo en éste desde “cero” con el objetivo de medir el tiempo de modelamiento. En la Figura 18 se observa el resultado de procedimiento descrito anteriormente.

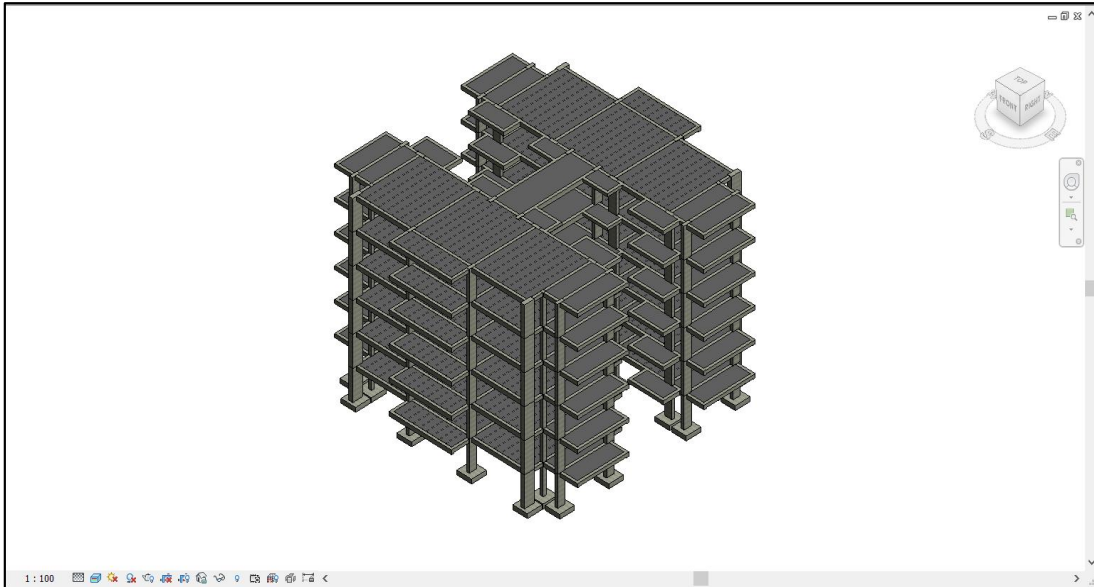


Figura 18. Modelo 3D completo creado en Revit.

Como se muestra en la Tabla 10 el modelamiento por metodología BIM requiere un mayor gasto de tiempo que lo requerido por la metodología tradicional, sin embargo se observa también que existe una gran diferencia del modelo 3D y 2D frente a la visualización, propiedades y materiales de los elementos, proceso de asignación y ubicación de los mismos, entre otros, además de la integración de elementos sin resistencia sísmica como placas macizas y aligeradas que permiten tener una claridad mayor con respecto a la cantidad de masa del modelo estructural, siendo esta última fundamental en el método de carga lateral equivalente (FHE).

Cuando se importa el modelo 3D a la herramienta computacional de análisis, que para esta metodología es Robot S.A.P. ®, este acepta el formato con un mayor gasto de tiempo respecto a lo que sucedió con la metodología Tradicional. Sin embargo, el modelo importado no trabaja como plantilla sino que integra todas las propiedades que fueron asignadas en el programa de dibujo (Revit®). En el proceso de paso de información entre los programas de la metodología BIM como lo es de Revit® a Robot S.A.P. ® es mucho más eficiente puesto que además de exportar el modelo

en 3D con dimensiones correctas, transmite todas las propiedades mecánicas asignadas. En la Figura 19 se observa el proceso de exportación en donde la facilidad se hace evidente debido al link directo que posee Revit® hacia Robot S.A.P. ® en la pestaña “Análisis”.

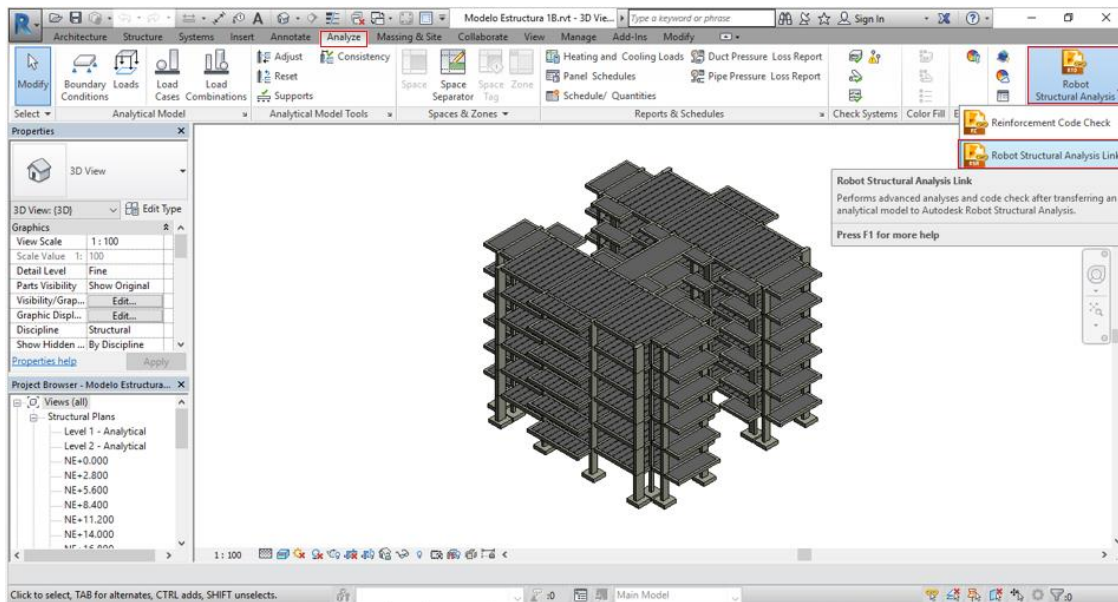


Figura 19. Herramienta de exportación del modelo 3D de Revit hacia Robot S.A.P. a través de su vínculo directo.

En el programa de análisis se debe reasignar los sistemas de losas aligeradas y macizas, pero este trae consigo el modelamiento específico en la función para cada tipo de losa con la inclusión de características necesarias de las mismas tales. En la Figura 20, se aprecia el modelo en el programa de Robot Structural ® y la Figura 21 muestra la herramienta “Thickness” con la cual se asignas las propiedades a los sistemas de losa maciza y aligerada.

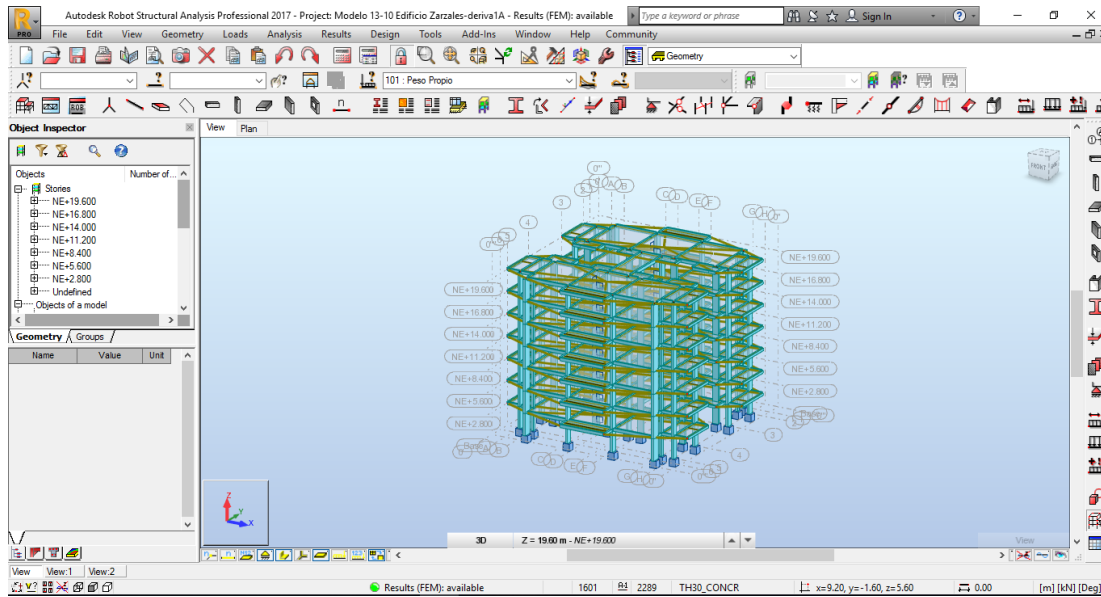


Figura 20. Modelo del caso de estudio en Robot S.A.P.

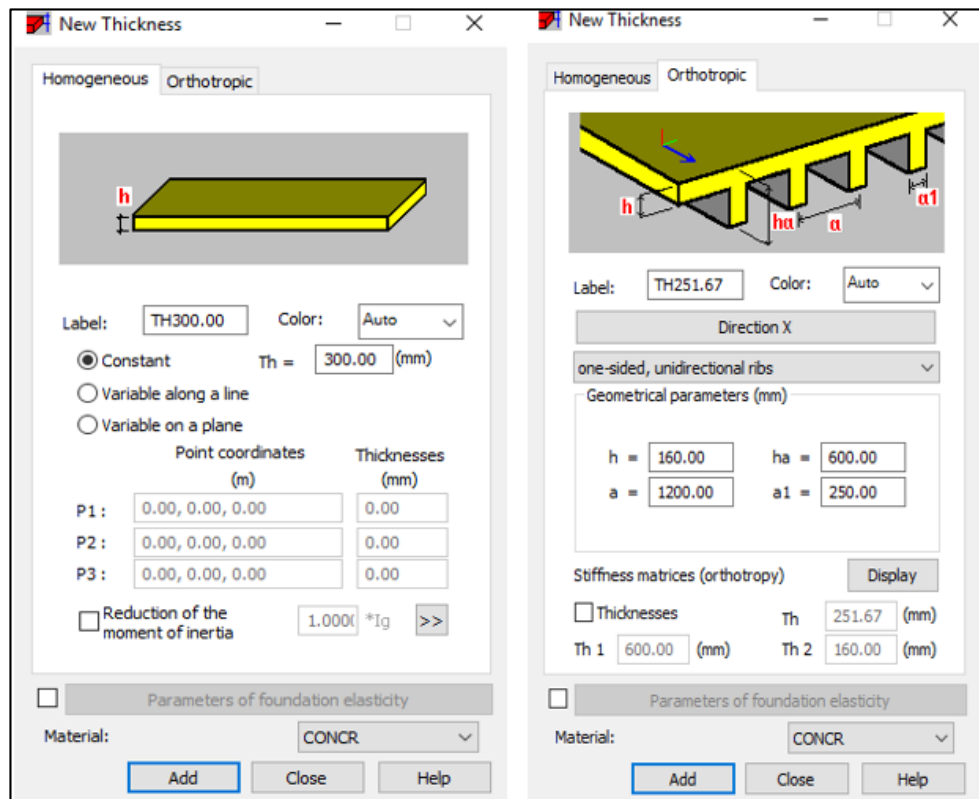


Figura 21. Herramientas de modelamiento geométrico de los elementos

área en Robot S.A.P.

A continuación se debe asignar la matemática interna según el tipo de panel, en la Figura 22 se muestra las opciones que presenta el software Robot Structural® sin embargo estas se pueden modificar según la necesidad del análisis del proyecto; esto nos demuestra que sobre esta herramienta se tiene más control respecto a los software utilizados en la metodología tradicional.

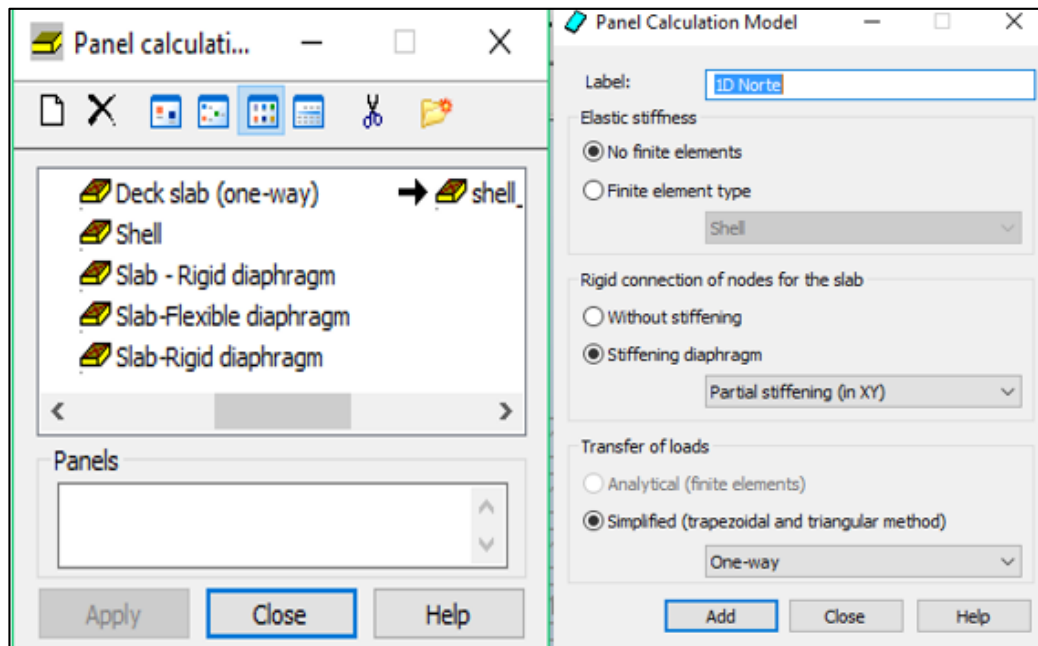


Figura 22. Herramientas de asignación de los diferentes modelos matemáticos de los elementos tipo área en Robot S.A.P.

Otro aspecto frente al modelamiento en el programa de análisis es la asignación de cargas, puesto que se permite discretizar las cargas de forma más óptima, de esta manera si se necesita asignar dos valores de carga en un mismo caso de carga para un mismo elemento se puede asignar y tener control sobre cada valor independiente, proceso que no se puede desarrollar en los software de la metodología tradicional. En la Figura 23 se observa el método de asignación de cargas por

medio de una tabla específica de este procedimiento de tal manera que si dentro de la asignación de cargas se comete un error al asignarla a un tipo de carga diferente se puede cambiar con un “click” sin cambiar toda la asignación realizada anteriormente.

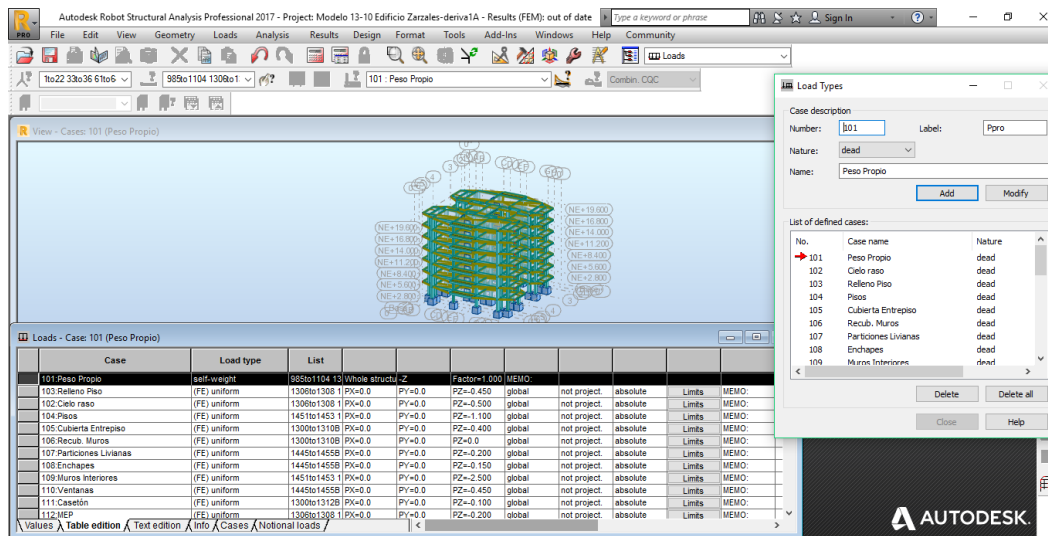


Figura 23. Método de asignación de cargas en la estructura en Robot S.A.P.

Por otro lado, una de las ventajas del software de análisis de BIM es la selección de los elementos, ya que adicionalmente a la selección de convencional se permite mostrar los elementos seleccionados en una ventana totalmente independiente. De esta manera a diferencia de los programas de análisis tradicionales se puede tener elementos seleccionados en ventanas diferentes sin necesidad de asignarlos a un grupo, pasar de una ventana a otra sin perder la selección y teniendo todo bajo un mayor control y menor grado de error respecto al proceso convencional de seleccionar elementos independientes dentro del modelo en 3D donde se encuentra gran cantidad de elementos y conduce a una mayor posibilidad de error. Lo anterior se observa en la Figura 24.

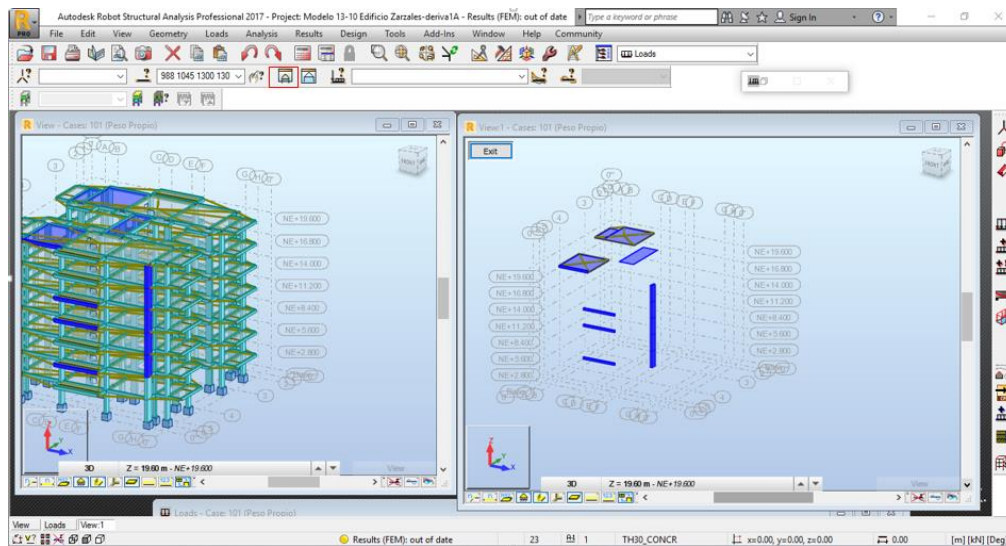


Figura 24. Visualización de selección independiente de elementos para el proceso de carga de la estructura en Robot S.A.P.

Podemos encontrar también dentro de la variable de visualización y automatización una serie de herramientas que brinda el software de análisis Robot Structural® las cuales permiten calcular los puntos de centro geométrico, centro de rigidez y centro de gravedad; los cuales a pesar de que son diferentes se suele manejar con valores iguales debido a que los software de análisis tradicional no desarrollan la matemática para este tipo de cálculo. En cuanto a la visualización específica de los resultados hasta el proceso de cálculo de derivas, se pudo observar que Robot Structural® posee adicionalmente a las tablas de resultados, una ventana independiente de resultados y diagramas con la cual el usuario puede interactuar de forma tal que determine específicamente los resultados que quiere que se muestren en la pantalla del modelo de la estructura. En la Figura 25 se observa los diferentes parámetros que permite mostrar la opción de “Diagrams for building” que es una herramienta más detallada que la herramienta general “Diagrams”.

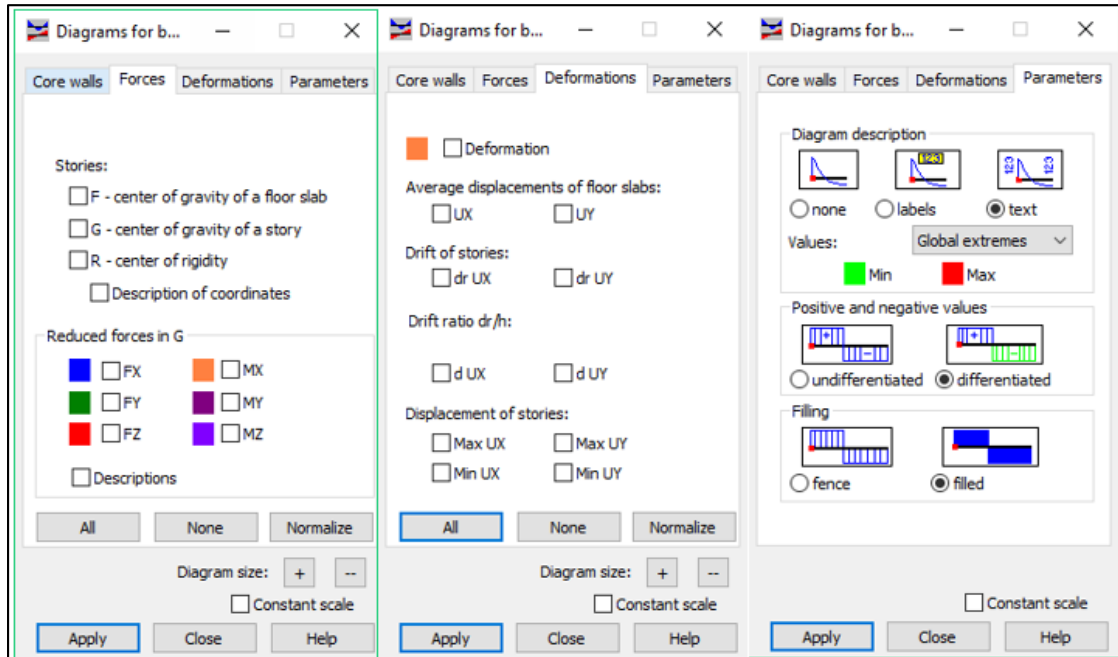


Figura 25. Funciones dentro de la herramienta "Diagrams for building" de Robot S.A.P.

En la Figura 26 se observa unas de las posibles funciones previamente mostradas y la forma de visualización en el modelo 3D.

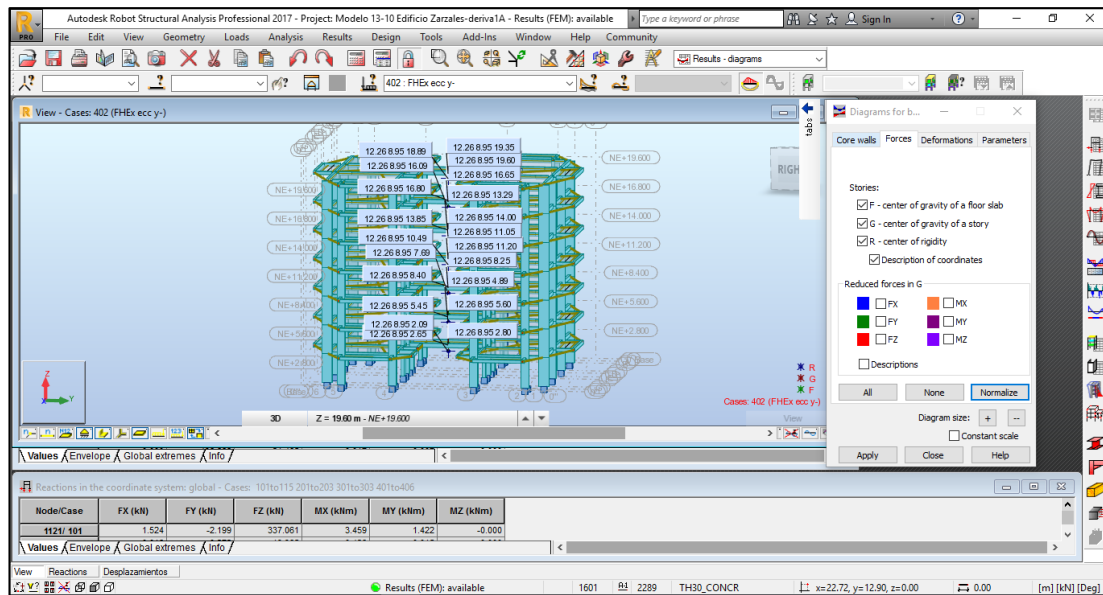


Figura 26. Ejemplo de funciones de la herramienta "Diagrams for buildings" de Robot S.A.P.

6.2.3 Resultados del pre-proceso del caso de estudio. La medición del pre-proceso se realizó con la cuantificación del tiempo invertido en el modelamiento tanto en los programas de dibujo como en los de análisis. Con la medición de esta variable se pudo observar que no solo se debe medir el tiempo empleado por cada software en la importación del archivo respectivo, sino que es fundamental cuantificar el tiempo adicional que lleva el terminar los modelos debido a que la cantidad y nivel de detalles de información que se transmiten de un programa de modelamiento a un programa de diseño de acuerdo a las herramientas computacionales en cada metodología. A continuación, en la Tabla 10 se muestra el resumen del pre-proceso.

Se aclara que el proceso del pre-dimensionamiento de la estructura se completó en un tiempo igual para todas las metodologías ya que fue la base para comenzar el modelamiento. El modelamiento en CAD es utilizando la herramienta AutoCAD®, mientras que el modelamiento BIM es realizado en Revit®. La diferencia del detalle de estos tipos de modelos se muestra más específica en la Tabla 11. Por otro lado el modelamiento Computer Aided Engineering (CAE) es referido a la asignación de cargas, propiedades mecánicas de los elementos, y asignación de los

parámetros del método de FHE en los software de análisis y diseño estructural. Las cantidades de masa desde el modelado CAD no es posible calcularlas, por lo tanto se calcula manualmente lo cual es reflejado en el tiempo mostrado en Tabla 10 para los métodos tradicionales y las cantidades CAE son los resultados de cargas, deformaciones y derivas mostrados por los software de análisis y diseño estructural.

Tabla 10.

Discretización de tiempos medidos en la ejecución de las partes del pre-proceso en el caso de estudio.

Tiempos empleados en la implementación de las metodologías en el pre-proceso (medido en minutos)			
Factor	Tradicional 1	Tradicional 2	BIM
Pre-dimensionamiento (Manual)	90	90	90
Modelamiento CAD	75	60	N/A
Modelamiento BIM	N/A	N/A	100
Modelamiento CAE	401	151	172
Cantidades CAD (Manuales)	180	180	N/A
Cantidades BIM (Automáticas)	N/A	N/A	20
Cantidades CAE	60	20	10
Total Acumulado	806	501	392

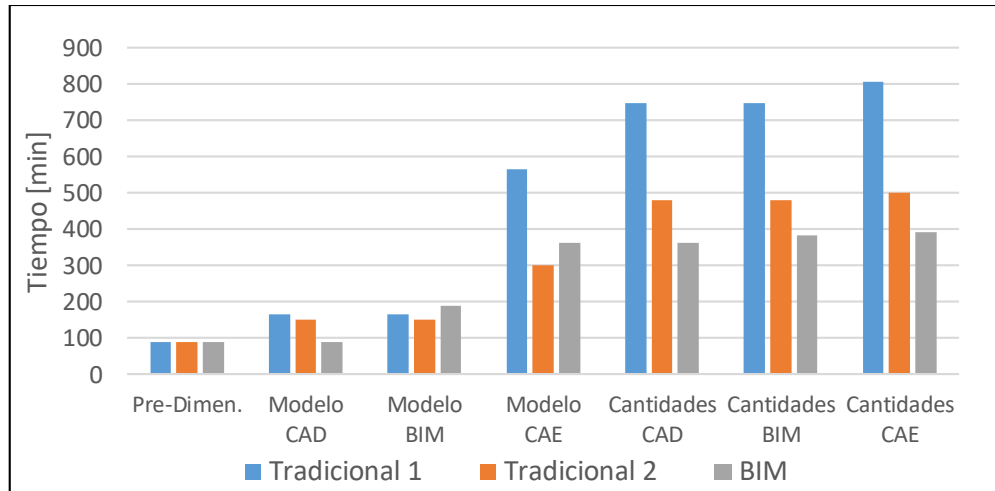


Figura 27. Representación gráfica de la contabilización del tiempo de ejecución del pre-proceso.

Tabla 11.

Detalle de la información obtenida en los modelos realizados en CAD o BIM.

Detalle de modelado CAD y BIM			
Parámetro	Especificación	Revit	AutoCAD
Geometría		SI	NO
	Local		
Geometría	X	SI	SI
	Y	SI	SI
	Z	SI	SI
Materiales		SI	NO
Interacción	Nodos	SI	NO
	Apoyos	SI	NO

6.3 Solución

En la etapa de la solución se verifica esencialmente el tiempo en el cual un programa de análisis lleva a cabo la obtención de los cálculos internos para mostrar al usuario los resultados esperados, es decir, es el tiempo en el cual se corre el modelo. Este tiempo al ser tan bajo no fue cuantificado independientemente. Por otra parte, el tiempo empleado en la interpretación de los resultados mostrados a continuación hace parte de la cuantificación del tiempo del pre-proceso, pero, al ser necesario ejecutar los modelos en los programas para poder obtener dichas respuestas, es lo que hace que se presenten en esta etapa de la investigación.

Como parte de la solución se incluye la obtención de resultados por parte de los programas de análisis en cuanto a reacciones en la base por cada caso de carga que haya en la estructura, desplazamientos de los nodos y fuerzas que el programa aplica automáticamente a cada entrepiso al calcular el método FHE. Al analizar estas tablas con resultados se pudo apreciar una diferencia sensible en la forma como los programas calculan la masa de la estructura, además de que al cargar los elementos tipo área cada uno calcula los resultados de forma diferente a pesar de tener las mismas cargas aplicadas; esto se puede apreciar en la Tabla 13 la cual resume el valor de las reacciones en la base de la estructura para cada caso de carga y la Tabla 14 presenta el error al comparar los resultados de Robot S.A.P. ® contra SAP2000® e ETABS®, y los obtenidos en ETABS® contra SAP2000® en este mismo instante de la solución.

Como se evidenció en los análisis de modelos de calibración el cálculo de masa existe diferencias significativas entre los software, lo que puede inducir a que en el método FHE asuma dimensiones incorrectas ya que éste depende directamente de la masa de la estructura. La comparación se realiza igual a la de los modelos de calibración y se presenta el error a continuación en la Tabla 12, donde además se aprecia el valor de las masas calculadas por tipo de elemento, es

decir, la masa de todos los elementos tipo viga, columna o placa, los cuales son tomados desde Revit® como el valor real de masa en la estructura y el cual sirve como base de la comparación aquí presentada, debido a su precisión milimétrica y el tipo modelamiento empleado.

Tabla 12.

Comparación porcentual del cálculo de masas en los software de análisis respecto a la masa real obtenida en Revit. Entre más bajo sea el porcentaje es más preciso.

Resultados del análisis de calibración inicial de las masas				
Elemento	Revit [kg]	Robot S.A.P. [kg]	ETABS [kg]	SAP2000 [kg]
Columnas	302604	302606	302606	302606
Vigas	297676	290467	329158	329158
Losas	506122	575339	575359	497912
Total	1106403	1168412	1207120	1129676
Error	-	6%	9%	2%

Se observa que la masa obtenida más cercana a la realidad es la calculada por Robot S.A.P. ® debido a que el modelo importado al mismo desde Revit® transfirió todas las propiedades geométricas asignadas y la diferencia que se alcanza a observar se debe únicamente a la superposición de las losas del modelamiento matemático y ortotrópico del Robot S.A.P. ® debido a que el modelo analítico contempla que los elementos área vayan entre ejes de vigas mientras que en Revit® las losas se modelaron de forma tal que no se superpusieran en ninguna parte de toda su extensión. Por otro lado, para efectos de cálculo de masa el programa SAP2000® tiene la opción de reducir visualmente los elementos tipo viga para evitar su superposición con las columnas pero no reduce la masa ni la longitud de la distancia de aplicación de cargas uniformes sobre las mismas,

cosa que tampoco realiza ETABS®, mientras que Robot S.A.P. ® si lo hace para evitar sobrecargas que realmente no existen en estos elementos y evita masas adicionales en la estructura.

Adicionalmente, se observa un cálculo de error más bajo en SAP2000® debido a que la masa aportada por las losas macizas y aligeradas se incluyó en el modelo a partir de un cálculo manual y no automático como sí se hizo en ETABS® y Robot S.A.P. ®, por lo cual se encontró cálculo de masa más aproximado al tomado desde Revit®.

Las Tablas 13 y 14 muestran los valores de reacciones obtenidas cuando se terminó el modelamiento inicial, es decir, cuando no se habían verificado aún las derivas. Los valores definitivos se encuentran en la sección del post-proceso planteada más adelante, aunque desde aquí se espera que el resultado sea muy similar ya que las cargas no aumentaron o disminuyeron, únicamente se va a variar la masa de la estructura, esto gracias al proceso iterativo requerido para el cumplimiento de las derivas, como se exige en el Título A del reglamento NSR – 10 (Sísmica, 2010), a partir de la variación de secciones de los elementos.

Tabla 13.

Resultados en la base de la estructura según los casos de carga y para cada software empleado.

Diferencias de resultados de reacciones en la base para cada caso de carga aplicada a la edificación			
Carga	SAP2000	ETABS	Robot
	kN	kN	kN
Ppropio	11078.34	11837.73	11456.54
Viva	3426.56	3888.89	3883.68
MEP	402.56	463.46	463.46

Cieloraso	1006.40	1158.67	1158.65
Relleno piso	905.76	1042.80	1042.79
Pisos	1845.07	2124.23	2124.20
Cubiertas	691.31	812.29	813.06
Particiones	313.51	364.26	364.26
Enchapes	216.04	253.84	254.08
Muros	4193.34	4827.79	4827.73
Ventanas	648.10	761.52	762.24
Granizo	335.47	386.22	386.22
Empozamiento	335.47	386.22	386.22
Roof live	1677.34	1931.11	1931.09
Muros Fachada	3572.65	3601.51	3117.00
Casetones	158.02	188.25	188.25
Muros Fachada Cubierta	553.04	553.07	492.04

En la Tabla 14 se observan los errores encontrados al comparar todos los casos de cargas y cómo son calculados como reacciones por cada programa de análisis. Se recuerda que se compara al SAP2000®, ETABS® y Robot S.A.P® tomando como punto de referencia Robot S.A.P® ya que se evidencia a lo largo de la investigación que este último posee un mayor grado de precisión por resultados en cálculos de masa y asignación de cargas hasta el momento. Adicionalmente, en la Figura 28 se aprecia un gráfico que resume los errores arrojados por los programas al comparar las respuestas de las reacciones.

Tabla 14.

Errores obtenidos en la comparación de los resultados de los software de CSI frente a Robot S.A.P.

Porcentaje de diferencias de resultados de reacciones en la base para cada caso de carga aplicada a la edificación.			
Carga	SAP2000	ETABS	Robot
Peso propio	96.70%	103.33%	100.00%
Viva	88.23%	100.13%	100.00%
MEP	86.86%	100.00%	100.00%
Cieloraso	86.86%	100.00%	100.00%
Relleno piso	86.86%	100.00%	100.00%
Pisos	86.86%	100.00%	100.00%
Cubiertas	85.03%	99.91%	100.00%
Particiones	86.07%	100.00%	100.00%
Enchapes	85.03%	99.91%	100.00%
Muros	86.86%	100.00%	100.00%
Ventanas	85.03%	99.91%	100.00%
Granizo	86.86%	100.00%	100.00%
Empozamiento	86.86%	100.00%	100.00%
Roof live	86.86%	100.00%	100.00%
Muros Fachada	114.62%	115.54%	100.00%
Casetones	83.94%	100.00%	100.00%
Muros Fachada Cubierta	112.40%	112.41%	100.00%

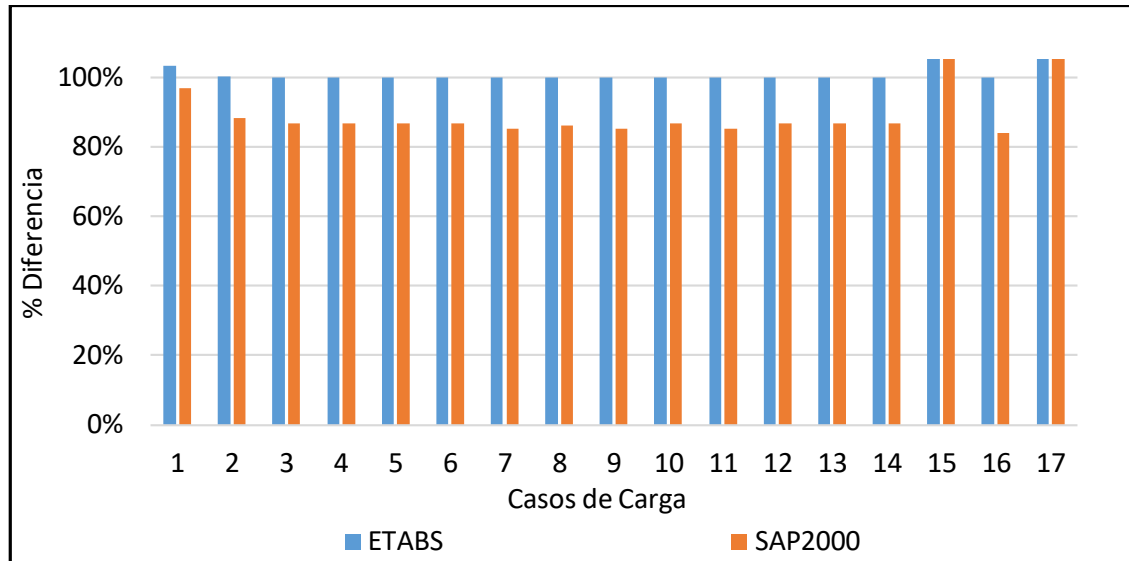


Figura 28. Comparación porcentual del cálculo de reacciones en los software de análisis a partir de los casos de carga definidos.

Como se puede observar en la Tabla 14, los errores más grandes encontrados al comparar Robot S.A.P. ® con ETABS® se presentan por el cálculo automático de la masa de la estructura (3.33%) y por las cargas de los muros de fachada en la cubierta y los entrepisos (12.41% y 15.54% respectivamente), debido a que las cargas distribuidas sobre las vigas se toma de manera diferente en cada software ya que ETABS® recorta la geometría para refinar el cálculo de la masa pero no disminuye la longitud de aplicación de la carga sobre dichos elementos, lo cual genera un valor de carga más alto que el presentado por Robot S.A.P. ®. Por otra parte, en la solución también se obtuvieron los valores de cortante basal y las fuerzas sísmicas aplicadas por entrepiso por el método de cálculo automático de cada software. Estos resultados se muestran en las Tablas 15 y 16, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 15.
Valor del cortante basal de la estructura calculado por cada software de análisis.

Cortante basal calculado en cada software		
SAP2000 [kN]	ETABS [kN]	Robot S.A.P. [kN]
18318.71	18312.45	18017.49

Tabla 16.
Distribución de las fuerzas sísmicas por entrepiso en cada software de análisis.

Fuerza sísmica aplicada a cada entrepiso en cada software				
Nivel	Manual [kN]	SAP2000 [kN]	ETABS [kN]	Robot [kN]
NE+2.80	17073.87	18096.29	18312.45	18017.49
NE+5.60	16211.38	17214.52	17419.55	17154.31
NE+8.40	14428.35	15334.86	15516.14	15314.22
NE+11.2	11701.53	12408.22	12552.52	12449.11
NE+14.0	8015.48	8401.36	8495.05	8526.45
NE+16.8	3358.57	3288.90	3318.02	3521.36

La Figura 29 presenta la distribución del cortante de cada entrepiso contrastado contra el cálculo realizado manualmente.

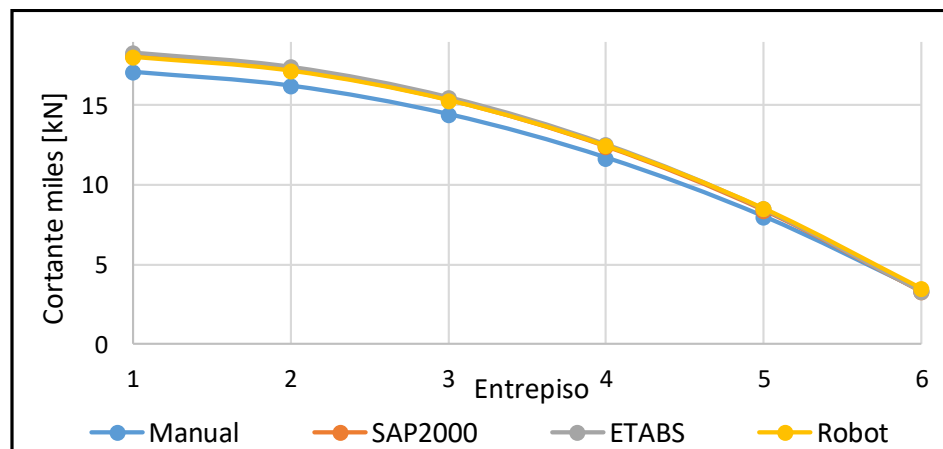


Figura 29. Representación gráfica de la distribución de los cortantes de entrepiso hechas por los software de análisis.

6.4 Post-proceso

Para esta sección se tomaron las derivas obtenidas directamente en cada software y se compararon entre sí para obtener un porcentaje de error entre los software y su forma de cálculo de las derivas; estos valores se contemplan en las Tablas 17 y 18 donde se observan las derivas máximas en las direcciones X y Y.

Tabla 17.

Resultados porcentuales de las derivas en la dirección X en cada software de análisis.

Resultados de porcentaje de derivas en dirección X			
Nivel	SAP2000	ETABS	Robot
NE + 2.80	1.07%	0.97%	0.93%
NE + 5.60	1.84%	1.64%	1.61%
NE + 8.40	1.90%	1.71%	1.68%
NE + 11.20	1.69%	1.54%	1.53%
NE + 14.00	1.33%	1.24%	1.24%
NE + 16.80	0.94%	0.91%	0.90%

Tabla 18.

Resultados porcentuales de las derivas en la dirección Y en cada software de análisis.

Resultados de porcentaje de derivas en dirección Y			
Nivel	SAP2000	ETABS	Robot
NE + 2.80	1.17%	1.18%	1.04%
NE + 5.60	2.56%	2.48%	2.31%
NE + 8.40	3.04%	2.98%	2.77%
NE + 11.20	2.99%	2.95%	2.74%
NE + 14.00	2.63%	2.64%	2.44%
NE + 16.80	2.20%	2.27%	2.07%

Tabla 19.

Comparación porcentual de las derivas en dirección X y Y con respecto a SAP2000. Un porcentaje más bajo indica más proximidad a la respuesta.

Resultados de error entre los resultados de cada programa en las derivas obtenidas en dirección X y Y				
Nivel	Dir.	SAP2000 (Deriva)	ETABS (Diferencia)	Robot (Diferencia)
NE + 2.80	X	1.07%	10%	15%
	Y	1.17%	0%	13%
NE + 5.60	X	1.84%	12%	14%
	Y	2.56%	3%	11%
NE + 8.40	X	1.90%	11%	13%
	Y	3.04%	2%	10%
NE + 11.20	X	1.69%	10%	11%
	Y	2.99%	1%	9%
NE + 14.00	X	1.33%	7%	7%
	Y	2.63%	0%	8%
NE + 16.80	X	0.94%	3%	5%
	Y	2.20%	3%	6%

En los resultados anteriores se observó que las derivas calculadas en los tres software no fueron exactamente iguales, y los porcentajes de diferencia de ETABS y Robot frente a SAP2000 se encuentran en la Tabla 19 para ambas direcciones.

Adicionalmente, en las Figuras 30 y 31 mostradas a continuación se puede ver la variación del error obtenido por entrepiso al comparar las derivas obtenidas en dirección X y Y (respectivamente) en cada uno de los programas de análisis empleados.

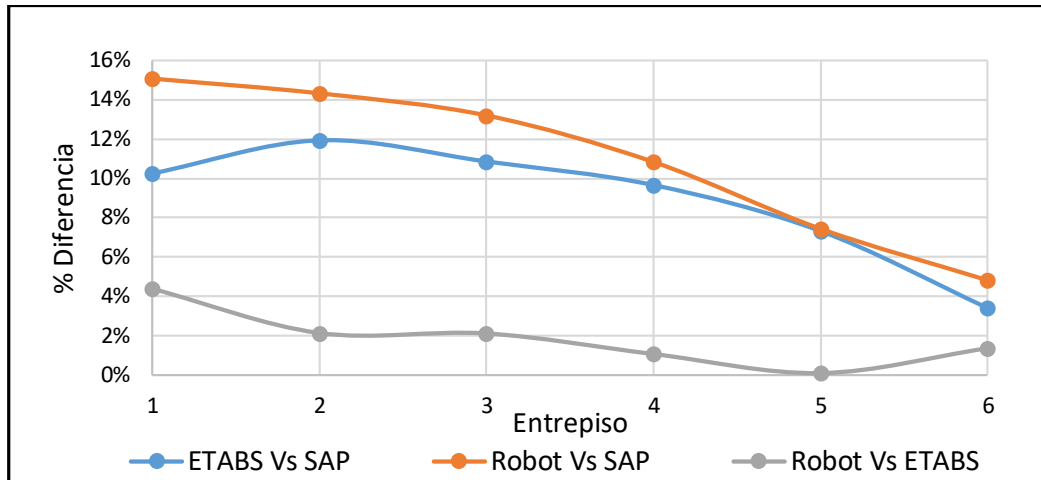


Figura 30. Variación de la deriva de entrepiso calculada por cada software en la dirección X.

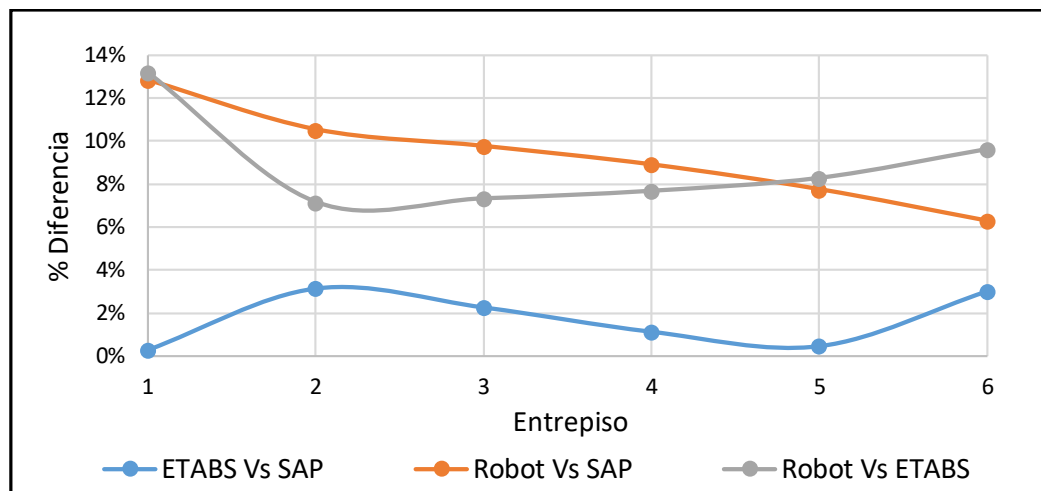


Figura 31. Variación de la deriva de entrepiso calculada por cada software en la dirección Y.

Como al principio no se cumplieron las exigencias de derivas máximas se procedió a realizar el proceso iterativo de variación de secciones de columnas y vigas para poder dar por terminado el pre-dimensionamiento de la estructura. Este proceso se midió en tiempo de ejecución del cambio de secciones y demás para llegar al final del post-proceso y cumplir con las derivas tal y como se ve en las Tablas 21 y 22 donde se presentan las derivas finales de cada entrepiso de la estructura.

6.4.1 Post-proceso del caso de estudio empleando la metodología tradicional. Con las herramientas de la metodología tradicional se tomó un poco más de tiempo en el proceso iterativo, especialmente con SAP2000®, debido a que éste no cuenta con una opción de visualización de derivas de forma automática como sí lo hace ETABS® o Robot S.A.P.®, luego, el cálculo manual de todas las derivas de las columnas por cada piso y la selección de la deriva máxima del entrepiso fue lo que hizo que el resultado y obtención de secciones que cumplieran el límite de los desplazamientos horizontales máximos permitidos en la reglamentación incrementara el tiempo del procedimiento.

Por otra parte, ETABS® no tuvo ese inconveniente ya que tiene la posibilidad de visualizar las derivas en ambas direcciones del plano, pero ambos programas poseen una forma de edición y asignación de secciones un poco más tediosa pese a que actualmente cada uno cuenta con herramientas de selección más eficientes que en versiones anteriores del software.

6.4.2 Post-proceso del caso de estudio empleando la metodología BIM. En la metodología BIM se realizó un proceso iterativo rápido gracias a las herramientas de selección de Robot® y que el método de cálculo automático hizo evidente la facilidad del manejo de la herramienta y la interpretación de sus resultados como el modelamiento más cercano a la estructura real. Las derivas obtenidas en Robot S.A.P.® se visualizaron de forma más rápida ya que éste puede dejar visibles los resultados por entrepiso en una misma ventana al tiempo que varía las secciones de los elementos seleccionados y realiza los cálculos del método, por lo que fue más fácil identificar qué tan cercano se estaba del pre-dimensionamiento final de la edificación.

6.4.3 Resultados del post-proceso del caso de estudio. En la Tabla 20 se encuentra el resumen de los tiempos de ejecución de los procedimientos dentro del post-proceso. Éstos se encuentran acumulados y se aprecian en la Figura 32.

Tabla 20.

Resultado de la cuantificación de los tiempos de ejecución del post-proceso y el tiempo total acumulado del desarrollo del caso de estudio.

Tiempos empleados en la obtención de respuestas en la solución (medido en minutos)			
Factor	Tradicional 1	Tradicional 2	BIM
Primer control de derivas	85	5	5
Pre-dimensionamiento final	60	50	25
Total acumulado con procesos anteriores	951	556	422

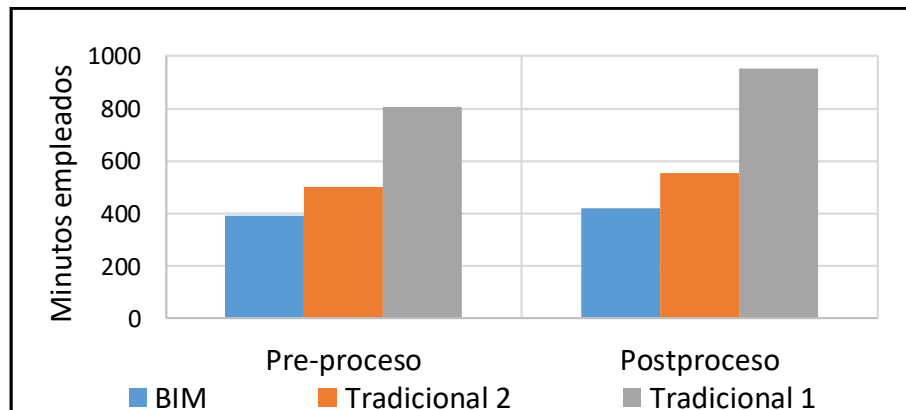


Figura 32. Resumen del tiempo empleado en el pre-proceso y el post-proceso durante el desarrollo del caso de estudio.

Las Tablas 21 y 22 presentan las derivas finales de la estructura aunque se ve claramente una diferencia entre ellas y, como ya se había dicho anteriormente, se debe exclusivamente a la cantidad de masa calculada por cada software. Por otro lado, en la Tabla 23 se muestran los valores

de los cortantes basales calculados por cada programa en la parte final del post-proceso cuando la estructura ya cumplió las derivas mostradas enseguida.

Tabla 21.

Resultados porcentuales de las derivas en la dirección X en cada software de análisis al finalizar el post-proceso.

Resultados de porcentaje de derivas finales en dirección X			
Nivel	SAP2000	ETABS	Robot
NE + 2.80	0.42%	0.41%	0.37%
NE + 5.60	0.87%	0.82%	0.76%
NE + 8.40	1.00%	0.94%	0.85%
NE + 11.20	0.96%	0.91%	0.74%
NE + 14.00	0.82%	0.80%	0.88%
NE + 16.80	0.66%	0.66%	0.61%

Tabla 22.

Resultados porcentuales de las derivas en la dirección Y en cada software de análisis al finalizar el post-proceso.

Resultados de porcentaje de derivas finales en dirección Y			
Nivel	SAP2000	ETABS	Robot
NE + 2.80	0.29%	0.28%	0.25%
NE + 5.60	0.69%	0.65%	0.62%
NE + 8.40	0.91%	0.87%	0.93%
NE + 11.20	1.00%	0.97%	0.94%
NE + 14.00	1.00%	0.99%	0.83%
NE + 16.80	0.96%	0.96%	0.91%

Tabla 23.

Resultados del cortante basal de la estructura calculado por cada uno de los software de análisis al finalizar el post-proceso.

Cortante basal calculado en cada software		
SAP2000 [kN]	ETABS [kN]	Robot S.A.P. [kN]
21829.85	21823.60	21561.58

6.4.4 Evaluación de variable de costos. La variable de los costos se midió con respecto a cuánto cuestan las licencias de los programas de modelamiento y análisis empleados (software) y el costo de un computador con los requerimientos mínimos de sistema para correr cada uno de los mismos (hardware). La Tabla 24 muestra los costos de los factores mencionados y el total del costo de adquisición como 0 tal teniendo en cuenta que la metodología nombrada como “Tradicional 1” y la “Tradicional 2” se tomaron como la combinación SAP2000® y AutoCAD®, e ETABS® y AutoCAD®, respectivamente. Para la plataforma BIM brindada por Autodesk se encontró un paquete completo que incluye diversos programas de la casa y que son empleados en el diseño estructural, es decir, no se tomaron precios individuales de software ya que se encontró que venían todos en un paquete.

Tabla 24.

Costo de los factores analizados para la variable de costos de implementación de las metodologías.

Resultados de los costos de implementación de cada metodología			
Factor	Tradicional 1	Tradicional 2	BIM
Software	\$11'066.540	\$21'278.465	\$7'792.930
Hardware	\$1'140.000	\$1'140.000	\$1'190.000
Total	\$12'206.540	\$22'418.465	\$8'982.930

La Figura 33 muestra una gráfica de costo total donde se aprecia claramente la diferencia de la implementación de una u otra metodología recordando que la combinación SAP2000® y AutoCAD® fue considerada aquí como tradicional al igual que ETABS® y AutoCAD®.

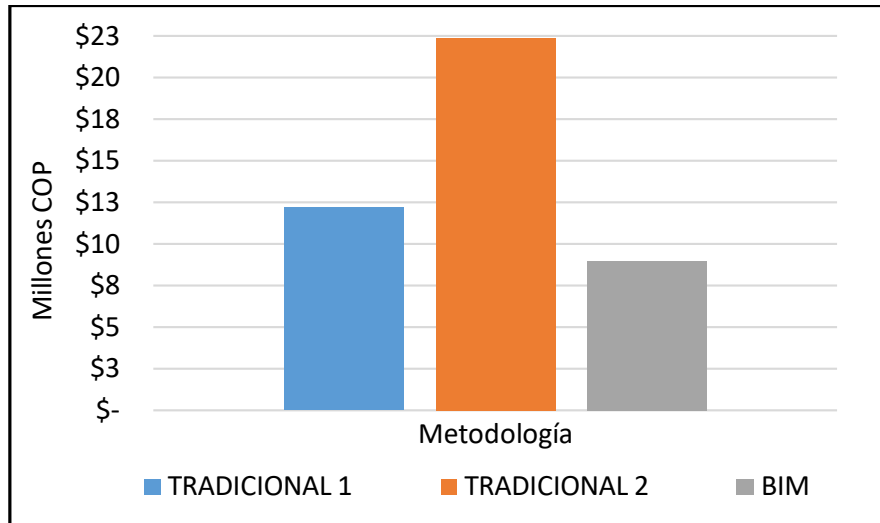


Figura 33. Resultado gráfico del costo de implementación de cada una de las metodologías propuestas.

7. Discusión de los resultados

En el desarrollo de la investigación se pudo demostrar que uno de los factores con mayor influencia en los resultados encontrados antes, durante y después del modelamiento y análisis estructural es la masa, ya que el método empleado para el análisis dinámico depende estrictamente de ella, luego, se hace evidente que es importante utilizar una herramienta de análisis que tenga un porcentaje de error más bajo al comparar esta variable, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 25, la cual contiene los valores de las masas calculadas por cada software al final del post-proceso y su porcentaje de error respecto a Revit®, haciendo la aclaración que SAP2000® presenta menos porcentaje de error debido a que se presentó la necesidad de calcular a mano la masa aportada por las placas de cada entrepiso y distribuirla en las áreas de carga de cada planta lo cual genera una

disminución en la eficiencia, mientras que ETABS® y Robot S.A.P.® lo hicieron de forma automática.

Tabla 25.

Cálculo final de la masa de la estructura discretizado por tipo de elemento en cada uno de los software de análisis y comparado con el valor real obtenido en Revit.

Resultados de la masa final del caso de estudio				
Elemento	Revit	Robot	ETABS	SAP2000
Columnas	840038	846557	846557	846557
Vigas	301490	295785	357063	357060
Losas	486972	575339	575356	497912
Total	1628500	1717681	1778976	1701529
Error	-	5%	9%	4%

Adicionalmente es muy importante recordar que la distribución de las cargas también es de gran importancia y se debe considerar los resultados presentados en la Tabla 26 la cual muestra los errores generados por este efecto, debido a que para el cumplimiento de derivas las secciones de columnas aumentan y por ende debe disminuir la longitud de las vigas las cuales se ven directamente afectadas por la carga de los muros de la fachada y cubierta de la estructura. Un ejemplo de lo dicho anteriormente es el aumento del error calculado para estos casos de carga entre Robot S.A.P. ®– SAP2000® y Robot S.A.P ® – ETABS® ya que los software de CSI no reajustan las longitudes en las cuales se aplican las cargas lineales mencionadas con anterioridad, mientras que Robot S.A.P. ® si contempla este proceso dentro de su programación interna. Además de lo anteriormente establecido, se observó con la Tabla 25 que al implementar la metodología BIM existe un ahorro en cuanto a los costos de implementación contrastado con los software de la

metodología tradicional ya que todos éstos se deben comprar por separado, luego esta variable se estableció como una de las más importantes después de los resultados y la interoperabilidad.

Tabla 26.

Resultados finales de los resultados en la base de la estructura por cada caso de carga analizado en cada software teniendo a Robot S.A.P. como punto de comparación.

Porcentaje de diferencias de resultados de reacciones en la base para cada caso de carga aplicada a la edificación			
Carga	SAP2000	ETABS	Robot
Peso propio	99.07%	103.58%	100.00%
Viva	88.23%	100.13%	100.00%
MEP	86.86%	100.00%	100.00%
Cieloraso	86.86%	100.00%	100.00%
Relleno piso	86.86%	100.00%	100.00%
Pisos	86.86%	100.00%	100.00%
Cubiertas	85.03%	99.91%	100.00%
Particiones	86.07%	100.00%	100.00%
Enchapes	85.03%	99.91%	100.00%
Muros	86.86%	100.00%	100.00%
Ventanas	85.03%	99.91%	100.00%
Granizo	86.86%	100.00%	100.00%
Empozamiento	86.86%	100.00%	100.00%
Roof live	86.86%	100.00%	100.00%
Muros Fachada	120.62%	121.59%	100.00%
Casetones	83.94%	100.00%	100.00%
Muros Fachada Cubierta	116.96%	116.97%	100.00%

Por otro lado, para sintetizar las ventajas y desventajas de las variables analizadas a lo largo del desarrollo de la investigación se crearon las Tablas 27 y 28 mostradas a continuación, con la cual se busca presentar cuál sería la metodología más indicada para realizar el análisis dinámico

preliminar de la estructura presentada y en general, de cualquier estructura de hasta 20 metros de altura, hasta llegar a un pre-dimensionamiento que cumpla con los requisitos del reglamento NSR – 10.

Tabla 27.

Sintetización de ventajas y desventajas de la implementación de las metodologías tradicionales en el análisis dinámico de una edificación.

Ventajas y desventajas por cada variable en la metodología Tradicional		
Variable	Tradicional	
	Ventaja	Desventaja
Colaboración	N/A	Muy baja o nula al emplear SAP2000® y/o ETABS® ya que no hay procesos colaborativos en tiempo real entre los profesionales.
Interoperabilidad	Admite algunos formatos CAD e IFC de forma más eficiente en ETABS® que en SAP2000®.	No existe una retroalimentación de los modelos y archivos importados
Integración	Se pueden incluir a los arquitectos los cuales proponen los modelos en los cuales se basa el diseño estructural.	No incluye a ninguna profesión adicional a la arquitectura y la ingeniería estructural.
Automatización	ETABS® tiene herramientas que generan una ganancia en cuanto a eficiencia ya que genera reportes con resultados calculados de forma automática.	SAP2000® no posee varias de las herramientas que están incluidas en ETABS® para el cálculo de resultados finales como la visualización de las derivas máximas de entrepiso, lo cual es objetivo de estudio de esta investigación.
Visualización	Es regular en SAP2000® e ETABS®, pero se hace más sencilla y manejable, además del bajo consumo computacional de éstos.	Se hace más difícil el control específico de algunos parámetros dentro de los procesos que el programa hace automáticamente.
Nivel de Detalle	Muestra secciones en 3D, desfases de elementos y cargas aplicadas. Adicionalmente,	En los software SAP2000® e ETABS® no se puede presentar un detalle más especializado de los elementos ni de los resultados, es

<p>Resultados</p>	<p>ETABS® genera reportes del proyecto.</p> <p>No genera mayores ventajas frente a otros programas, pero se resalta que ETABS® tiene una manera de aproximar mejor el cálculo automático de masa de elementos pertenecientes o no al sistema de resistencia sísmica de la estructura.</p>	<p>decir, no puede sobrepasar un nivel LOD300.</p> <p>En SAP2000®, hay un alto grado de error en la distribución de cargas y cálculo automático de la masa de la estructura. ETABS® falla en la distribución de cargas lineales en elementos que se intersectan. Esto afecta directamente las derivas calculadas aumentando las dimensiones finales del caso de estudio.</p>
<p>Tiempos de modelado</p>	<p>ETABS® posee herramientas que simplifican algunos procesos como la creación y asignación de cargas para los elementos tipo área, lo cual hizo más eficiente el proceso de carga y el control sobre la asignación de las mismas; o también, recibe modelos de dibujo con algunas características geométricas de algunos de los elementos estructurales como columnas y las crea automáticamente.</p>	<p>La asignación de propiedades geométricas y mecánicas no puede ser realizada dentro de los modelos de dibujo que son importados a SAP2000®, lo que se traduce en ineficiencia dentro del modelamiento estructural.</p>
<p>Costos de implementación de software y hardware</p>	<p>N/A</p>	<p>Se evidencia un mayor costo de implementación al comprar el software de dibujo y de análisis por separado (AutoCAD® – SAP2000® o AutoCAD® – ETABS®) ya que sus costos individuales aumentan considerablemente el uso de los mismos dentro de un proceso de diseño de un proyecto solamente estructural ya que no tienen en cuenta a las demás áreas interesadas ni los software que emplea cada una de ellas.</p>

Tabla 28.

Sintetización de ventajas y desventajas de la implementación de la metodología BIM en el análisis dinámico de una edificación.

Ventajas y desventajas por cada variable en la metodología BIM		
Variable	BIM	
	Ventaja	Desventaja
Colaboración	Los software empleados permiten compartir la información del proyecto en tiempo real para incluir los aportes de cada profesional.	Robot S.A.P. ® no permite colaboración de otras profesiones en sí mismo pero sí hace parte del sistema colaborativo BIM.
Interoperabilidad	Revit® permite la transferencia de información multidireccional entre todos los programas dentro de la plataforma BIM.	N/A
Integración	Permite que todas las profesiones que intervienen en un proyecto puedan aportar significativamente.	N/A
Automatización	Retroalimenta y actualiza lo modelos empleados en los diferentes programas de la plataforma en un sentido bi-direccional.	N/A
Visualización	Los programas permiten tener una gran cantidad de ventanas que permiten tener una interfaz con mayor control sobre todos los procesos que se generan en el desarrollo de la investigación.	Genera mayores consumos y requerimientos computacionales para el desarrollo eficiente de los procesos.
Nivel de Detalle	Puede alcanzarse un nivel completo de detalle, es decir LOD400.	En el desarrollo de la investigación sólo se alcanzó nivel de detalle LOD300.
Resultados	Robot S.A.P ® presenta el menor índice de error en cálculos de masas y optimiza la distribución de cargas lineales, lo que conlleva a respuestas de derivas más precisas y dimensiones de elementos menores a las calculadas por otros programas de análisis.	Sigue presentando pequeños índices de error debido a la aproximación de los modelos matemáticos para la asignación de placas aligeradas y macizas de los entresijos del caso de estudio.

<p>Tiempos de modelado</p>	<p>A pesar de ser un poco más demorado que trabajar con ETABS® – AutoCAD®, esta pequeña diferencia de tiempos se compensa con la precisión de las respuestas, los niveles de detalle y los cálculos de cantidades precisos.</p>	<p>El proceso de modelamiento inicial puede tomar un poco más de tiempo debido a la rigurosidad del detalle, propiedades y dibujo de los elementos que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica como las placas.</p>
<p>Costos de implementación de software y hardware</p>	<p>Se tiene un paquete integral con todos los programas de la plataforma necesarios para el desarrollo de un proyecto por un precio mucho menor respecto a lo que ofrece la misma casa por cada uno de sus software si se compraran de forma independiente.</p>	<p>Los requisitos computacionales pueden hacer incrementar un poco su implementación debido a que el hardware necesario es más costoso si se quiere una eficiencia mayor en los programas.</p>

Finalmente, las dimensiones definitivas obtenidas luego del post-proceso podrían variar si se buscara la optimización de las secciones en cada uno de los programas empleados ya que las derivas obtenidas alcanzan a variar un poco entre los programas empleados como se ve en la Figura 34, la cual muestra la deriva máxima alcanzada de todos los entrepisos únicamente en la dirección Y de la estructura debido a que ésta es considerada la dirección más crítica frente a la acción del sismo.

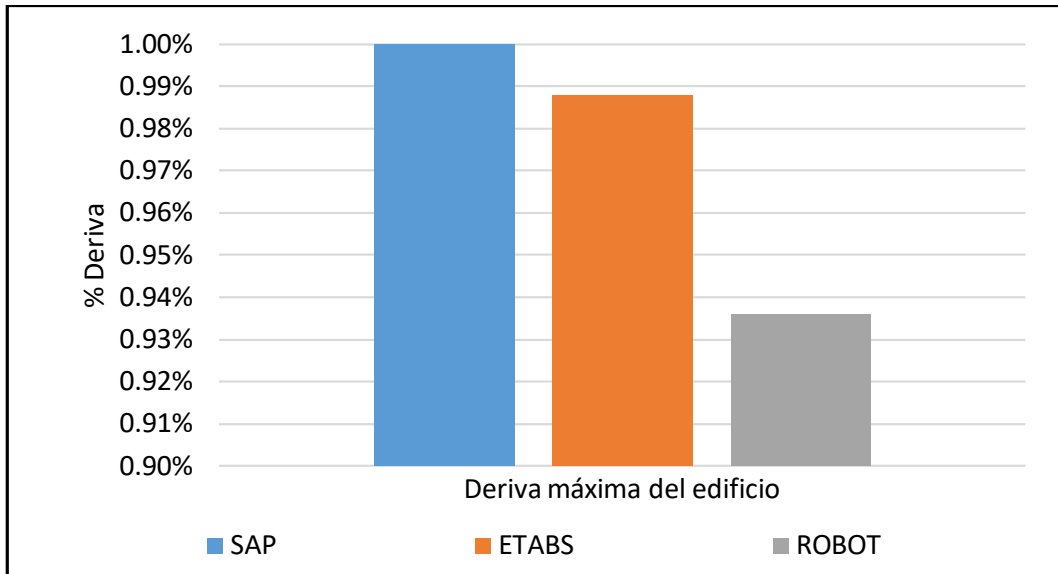


Figura 34. Comparación de la deriva máxima del edificio obtenida con cada software de análisis. Un valor más bajo del porcentaje significa que se puede optimizar aún más la estructura.

8. Conclusiones

Al observar el dimensionamiento final de la estructura se puede apreciar que las secciones de los elementos son poco convencionales, así que se propone hacer un cambio de sistema estructural a uno tipo dual, combinado o de muros de carga como se establece en el Título A del reglamento NSR – 10 (Sísmica, 2010), (Rochel Awad, 2012).

En la implementación de las metodologías propuestas se puede evidenciar los resultados de cada una por su eficiencia general en la Figura 35 la cual muestra en cuál de las tres existe una

mayor posibilidad de emplearse para esta etapa del diseño de un proyecto si se contemplara únicamente el tiempo de operación.

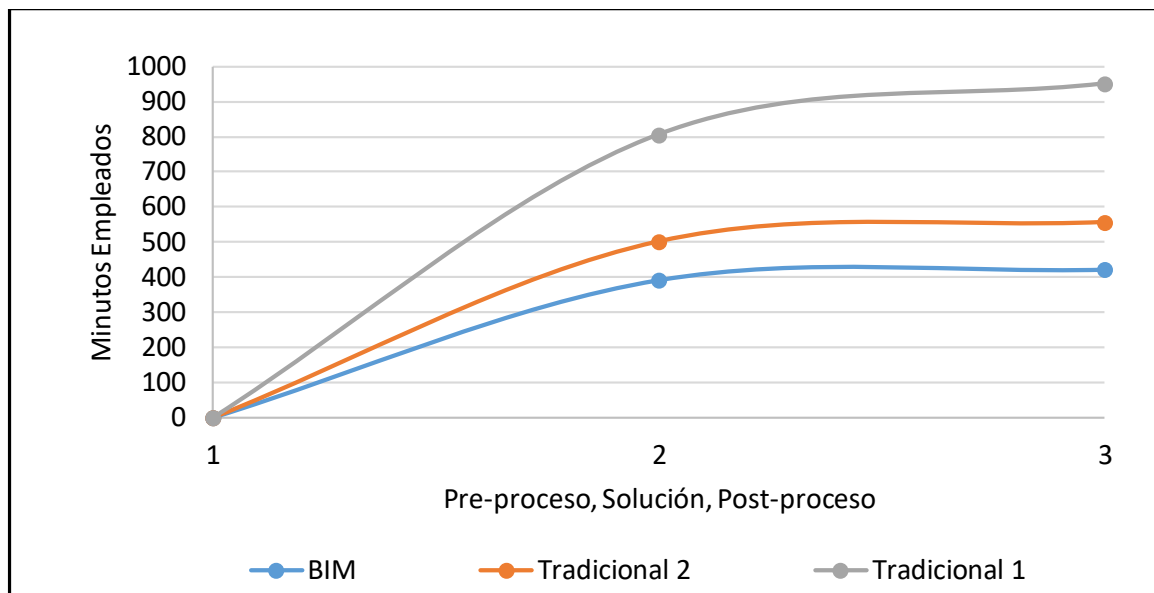


Figura 35. Visualización gráfica del tiempo acumulado para el desarrollo del caso de estudio en sus fases de pre-proceso, solución y post-proceso.

La comparación de precisión de resultados se puede medir al observar las dimensiones finales propuestas al verificar las derivas obtenidas con ellas y ver el programa que arroja una deriva más baja con las mismas secciones, lo cual radica en la masa, y así, combinado con la eficiencia se puede traducir en la metodología más óptima para realizar el proceso de análisis dinámico de una estructura y dar las dimensiones que cumplan el reglamento y sus exigencias sísmicas.

En el cuadro de las ventajas y desventajas presentado en la sección 6 se observa que las variables de mayor distinción entre la metodología BIM y la Tradicional son resultados, interoperabilidad y costos.

9. Observaciones

Se pudo observar en el desarrollo de la investigación lo fundamental que es el parámetro de la masa. Sería una ventaja adicional poder integrar los profesionales de un proyecto como arquitectura y redes para trabajar sobre un cálculo de masa más preciso y no solo guiado por las cargas mínimas propuestas en el reglamento NSR – 10 (Sísmica, 2010), utilizando el programa de modelamiento 3D que permita compilar las diferentes especialidades.

Al concluir la investigación se evidencia el gran campo que queda por explorar, un ejemplo de esto es toda la etapa de diseño de los elementos de la estructura y las ventajas que brinda los software de diseño utilizados convencionalmente frente a la metodología BIM o viceversa, además de los reportes del detalle estructural y verificación de la estructura completa como etapa final.

Referencias Bibliográficas

- Anil, B., Akinci, B., Kurc, O., & Garrett, J. H. (2015). Building-Information-Modeling – Based Earthquake Damage Assessment for Reinforced Concrete Walls. *J. Comput. Civ. Eng.*, 306(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000551](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000551).
- AutoDesk. (2017). AutoDesk Education Community.
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM : Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- Cardani, G., & Angjeliu, G. (2016). Challenges from building information modeling to finite element analysis of existing buildings. *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 120–124. <https://doi.org/10.1201/9781315616995-17>
- Chi, H. L., Wang, X., & Jiao, Y. (2014). BIM-Enabled Structural Design: Impacts and Future Developments in Structural Modelling, Analysis and Optimisation Processes. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 22(1), 135–151. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9127-7>
- Computers and Structures Inc. (2017). CSI WORLDWIDE SALES.
- Fedorik, F., Makkonen, T., & Heikkilä, R. (2016). Integration of BIM and FEA in Automation of Building and Bridge Engineering Design. *International Association for Automation and Robotics in Construction*, (Isarc).
- Forum, B. (2016). *Level of development specification*.
- Hibbeler, R. C., & Tan, K.-H. (2009). *Structural Analysis* (Vol. 123), Recuperado de .

- Lagüela, S., & Varela, M. (2016). BIM as Management Tool for Existing Buildings. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure Downloaded*, 377–388. <https://doi.org/10.1201/b19024-24>
- Liu, Z., 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*, 19(3), 273–284. <https://doi.org/10.6180/jase.2016.19.3.05>
- Madrid, J. A. (2012). Nivel de desarrollo LOD. Definiciones, innovaciones y adaptación a España.
- Nawari, N., Itani, L., & Gonzalez, E. (2011). Understanding Building Structures Using BIM Tools. *Computing in Civil Engineering (2011)*, 478–485. [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)59](https://doi.org/10.1061/41182(416)59)
- Nawari, N. O., Chichugova, T., Mansoor, S., Delfin, L., Chichugova, T., Mansoor, S., & Delfin, L. (2014). BIM in Structural Design Education. *Computing in Civil and Building Engineering*, 2143–2150. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.266>
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. (U. EAFIT, Ed.) (Segunda). Medellín, Colombia.
- Sísmica, A. C. de I. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. In *Titulo A* (p. 186). Bogotá: Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes.
- Sísmica, A. C. de I. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. In *Titulo C* (p. 590). Bogotá: Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes.
- Sísmica, A. C. de I. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. In *Titulo B* (p. 88). Bogotá: Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes.

Szelağ, R. (2017). The Use of BIM Technology in the Process of Analyzing the Increased Effort of Structural Elements. *Procedia Engineering*, 172, 1073–1076.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.165>

Wang, X. (2016). Analysis on complex structure stability under different bar angle with BIM technology. *Perspectives in Science*, 7, 317–322. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.049>