ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GENERACIÓN DE GEOMETRÍA CAD EN LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CAE

MICHAEL STIVENS CIFUENTES YATE	20142375064
JOHAN FELIPE VARÓN PEÑA	20142375033

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GENERACIÓN DE GEOMETRÍA CAD EN LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CAE

MICHAEL STIVENS CIFUENTES YATE	20142375064
JOHAN FELIPE VARÓN PEÑA	20142375033

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

MSc. Ing. John Alejandro Forero Casallas

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2016

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D.C, 29/01/2016

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 14
1. PROBLEMA 16
1.1 PLANTEAMIENTO PROBLEMA 16
1.2 JUSTIFICACIÓN 18
1.3 OBJETIVOS 19
1.4 ALCANCE 20
1.4.1 Condición de prueba experimental 20
1.4.2 Generación de geometrías CAD 20
1.4.3 Simulaciones CAE 21
2 MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL 22
2.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA TÉCNICA 22
2.1.1 Generación CAD 22
2.1.2 Procesos CAE 24
2.1.3 Relación CAD/CAE 25
2.2 MARCO TEÓRICO 32
2.2.1 CAD 32
2.2.2 CAE 58
2.2.3 Rutinas CAD/CAE 61
3 MARCO METODOLÓGICO 63
4 DISEÑO EXPERIMENTAL 65
4.1 SELECCIÓN GEOMETRÍAS 65

4.1.1 Pieza 1: Eje 66
4.1.2 Pieza 2: Bloque Prismático 70
4.1.3 Pieza 3: Placa 76
4.2 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES Y NIVELES 83
4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL 84
5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 86
5.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 86
5.2 PIEZA 1: EJE 87
5.2.1 Condiciones de simulación 87
5.2.2 Simulación con enmallado controlado 88
5.2.3 Presentación de resultados experimentales 89
5.2.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos 95
5.2.5 Análisis de resultados 99
5.3 PIEZA 2: BLOQUE PRISMÁTICO 108
5.3.1 Condiciones de simulación 108
5.3.2 Simulación con enmallado controlado 109
5.3.3 Presentación de resultados experimentales 110
5.3.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos 115
5.3.5 Análisis de resultados 118
5.4 PIEZA 3: PLACA 127
5.4.1 Condiciones de simulación en los experimentos 127
5.4.2 Simulación con enmallado controlado 128
5.4.3 Presentación de resultados experimentales 129
5.4.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos 134

5.4.5 Análisis de resultados 138
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 147
6.1 Conclusiones 147
6.2 Recomendaciones 149
BIBLIOGRAFÍA 151

Listado de Figuras

Pág.

Figura 1. Ejemplo de curva explícita 34
Figura 2. Ejemplo de superficie explícita 35
Figura 3. Ejemplo de curva implícita 36
Figura 4. Línea generada por polinomios de grado 1. 39
Figura 5. Dibujo de una superficie como una malla de triángulos 40
Figura 6. Grados de continuidad 43
Figura 7. Estimación del uso reciente de formatos de intercambio de datos CAD, en Europa y América del Norte. 46
Figura 8. Características y dimensiones del eje 66
Figura 9. Pasos uno y dos de la operación número uno del eje 67
Figura 10. Pasos tres y cuatro de la operación número uno del eje 67
Figura 11. Paso uno de la operación número dos del eje 68
Figura 12. Boceto para realizar el corte por revolución 68
Figura 13. Boceto de corte y eje terminado 69
Figura 14. Boceto con las dimensiones finales del eje 69
Figura 15. Pieza terminada por revolución 70
Figura 16. Pieza número dos, soporte y cargas (Superior) y dimensiones (inferior) 71
Figura 17. Pasos uno y dos de la operación número uno del bloque prismático 72
Figura 18. Pasos tres y cuatro de la operación número uno del bloque prismático 72
Figura 19. Pasos uno y dos de la operación número dos del bloque prismático 73
Figura 20. Pasos tres y cuatro de la operación número dos del bloque prismático 74
Figura 21. Pasos uno y dos de la operación número tres del bloque prismático 75

Figura 22. Pasos tres y cuatro de la operación número tres del bloque prismático 75
Figura 23. Pieza número tres, fuerzas y dimensiones generales.....76
Figura 24. Pasos uno y dos de la operación número uno de la placa de montaje .77
Figura 25. Pasos tres y cuatro de la operación número uno de la placa de montaje 78
Figura 26. Paso cinco de la operación número uno de la placa de montaje.....78
Figura 27. Paso uno de la operación número dos de la placa de montaje 79
Figura 28. Pasos dos y tres de la operación número dos de la placa de montaje .80
Figura 29. Paso cuatro de la operación número dos de la placa de montaje 80
Figura 30. Pasos uno y dos de la operación número tres de la placa de montaje .81
Figura 31. Pasos tres y cuatro de la operación número tres de la placa de montaje 82
Figura 32. Paso cinco de la operación número tres de la placa de montaje.....82
Figura 33. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 1 87
Figura 34. Discretización del eje con enmallado controlado 89
Figura 35. Enmallados del eje variando CAD. a) A1-B1-C1, b) A2-B1-C1, c) A3-B1-C1, d) A2-B1-C1 y e) enmallado refinado 96
Figura 36. Enmallados del eje variando operaciones. a) A2-B1-C1, b) A2-B2-C1, c) A2-B3-C1 y d) enmallado refinado.....97
Figura 37. Enmallados del eje variando archivo de exportación. a) A2-B1-C1, b) A2-B1-C2, c) A2-B1-C3 y d) enmallado refinado 98
Figura 38. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza uno.....100
Figura 39. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza uno.....101
Figura 40. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza uno.....102
Figura 41. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza uno 103

Figura 42. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza uno.....104
Figura 43. Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza uno 105
Figura 44. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 2.....108
Figura 45. Discretización del bloque prismático con enmallado controlado.....110
Figura 46. Enmallados del bloque prismático variando CAD. a) A1-B2-C3, b) A2-B2-C3, c) A3-B2-C3, d) A4-B2-C3 y e) enmallado refinado.....115
Figura 47. Enmallados del bloque prismático variando generación de geometría. a) A3-B1-C2, b) A3-B2-C2, c) A3-B3-C2 y d) enmallado refinado 116
Figura 48. Enmallados del bloque prismático variando archivo de exportación. a) A4-B1-C1, b) A4-B1-C2, c) A4-B1-C3 y d) enmallado refinado 117
Figura 49. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza dos.....119
Figura 50. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza dos.....120
Figura 51. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza dos.....121
Figura 52. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza dos 122
Figura 53. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza dos.....123
Figura 54 Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza dos 124
Figura 55. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 3.....127
Figura 56. Discretización de la placa con enmallado controlado 129
Figura 57. Enmallados de la placa variando CAD. a) A1-B2-C1, b) A2-B2-C1, c) A3-B2-C1, d) A4-B2-C1 y e) enmallado refinado.....135
Figura 58. Enmallados de la placa variando la generación de geometría. a) A1-B1-C2, b) A1-B2-C2, c) A1-B3-C2 y d) enmallado refinado 136

Figura 59. Enmallados de la placa variando el archivo de exportación. a) A1-B2-C1, b) A1-B2-C2, c) A1-B2-C3 y d) enmallado refinado 137
Figura 60. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza tres.....139
Figura 61. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza tres.....140
Figura 62. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza tres.....141
Figura 63. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza tres 142
Figura 64. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza tres.....143
Figura 65. Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza tres 144

Listado de Diagramas

Pág.

Diagrama 1. Resultados pieza 1 - software Solidworks 91
Diagrama 2. Resultados pieza 1- software Inventor 92
Diagrama 3. Resultados pieza 1 - software Ansys Workbench 93
Diagrama 4. Resultados pieza 1 - software Siemens NX 94
Diagrama 5. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima del eje 106
Diagrama 6. Combinaciones más aproximadas para los esfuerzos equivalentes máximos del eje 107
Diagrama 7. Resultados pieza 2 - software Solidworks 111
Diagrama 8. Resultados pieza 2 - software Inventor 112
Diagrama 9. Resultados pieza 2 - software Ansys Workbench 113
Diagrama 10. Resultados pieza 2 - software Siemens NX 114
Diagrama 11. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima del bloque prismático 126
Diagrama 12. Combinaciones más aproximadas para esfuerzo equivalente máxima para el bloque prismático 126
Diagrama 13. Resultados pieza 3 - software Solidworks 130
Diagrama 14. Resultados pieza 3 - software Inventor 131
Diagrama 15. Resultados pieza 3 - software Ansys Workbench.....132
Diagrama 16. Resultados pieza 3 - software Siemens NX 133
Diagrama 17. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima de la placa 146
Diagrama 18. Combinaciones más aproximadas para esfuerzo equivalente máximo de la placa 146

Listado de Tablas

Pág.

Tabla 1. Característica de algunos métodos de diseño de curvas.....44
Tabla 2. Diseño experimental 84
Tabla 3. Combinaciones de experimentos.....85

RESUMEN

En el presente trabajo de grado, se hace un estudio acerca de la incertidumbre en los resultados obtenidos en el CAE (por el método de los elementos finitos), que se produce a partir, de algunos factores inmersos en los modelados CAD. Para la realización de la experimentación, observación y análisis, tres modelos tridimensionales simples fueron creados y simulados por elementos finitos (mediante mallados finos por defecto), variando los siguientes factores: el software de generación CAD, los procesos de generaciones de geometrías, y los tipos de archivos de exportación al CAE. Desde la realización de las simulaciones, los resultados analizados son las deformaciones totales máximas y los esfuerzos equivalentes máximos, de ahí que, se identifica la influencia de cada factor mediante un análisis de medias, a su vez éstos se comparan con los resultados de simulaciones llevadas a cabo con enmallados controlados. Por otro lado, se desarrolla un estado del arte alrededor de la generación de geometrías en CAD, y de trabajos de investigación en torno a la adecuada integración CAD/CAE. Por último, se concluye principalmente, cómo afectan las variaciones de los factores en CAD (involucradas en la experimentación) a los resultados obtenidos en las simulaciones por elementos finitos; y a su vez, se destacan cuáles de éstas variaciones, hacen que los resultados se aproximen a valores de referencia.

INTRODUCCIÓN

Dos técnicas han revolucionado el tratamiento del diseño mecánico en el mundo de la industria: CAD y CAE. Dichas técnicas, hacen parte de las herramientas que complementan las tareas de dibujo y cálculo manual, ayudando a los diseñadores para que elaboren de manera más eficiente sus productos; todo lo anterior se traduce en reducción de costos y tiempo. (Paramo, 2012) No obstante, los problemas de diseño aún no están completamente solucionados, pues aunque, ya ha transcurrido mucho tiempo de utilizarse el método de los elementos finitos con los modelos geométricos computacionales, se evidencia que la integración de ellos no es la mejor. En otras palabras, tanto el CAD como el CAE trabajan mayoritariamente cada uno por su cuenta, lo que ha obligado a que distintos entes (educativos, gubernamentales, de ingeniería, empresas del sector privado, laboratorios, entre otros) trabajen arduamente con el fin de integrar adecuadamente éstos dos sistemas.

Asimismo, la necesidad del presente trabajo se plantea, puesto que, se ha evidenciado en el semillero de investigación SIMEC de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; que ciertas variables en el modelado geométrico y en el tipo de archivo CAD, generan cambios significativos en los resultados que se obtienen en las herramientas de ingeniería asistida por computador, para este caso, el método por elementos finitos.

En el desarrollo de este trabajo de grado, se sigue la metodología descrita en el Capítulo 3. Así pues, en primera instancia se estableció un estado del arte

(Capítulo 2), que permitió obtener con claridad las bases teóricas del modelado CAD y sus condiciones de su funcionamiento en CAE.

Además, se realizaron tres tipos de modelos CAD (con características geométricas particulares), bajo ciertas operaciones de generación geométrica, teniendo en cuenta la variación del software CAD (tales como: Solidworks®, Autodesk® Inventor, el modelador de diseño de Ansys® Workbench y Siemens® NX), y el tipo de archivo a exportar (IGES, STEP o directamente) a la herramienta CAE (Ansys® Workbench). Todo lo anterior, se describe en el Capítulo 4)

Posteriormente, a los tres modelos CAD se les realizaron simulaciones CAE de tipo estático estructural (en el software Ansys® Workbench), bajo ciertas condiciones de simulación, con el fin de obtener resultados comparables (de deformaciones totales y esfuerzos equivalentes) entre simulaciones experimentales (ver Capítulo 5).

Con base en el desarrollo de la obtención de las simulaciones por elementos finitos (en el software Ansys® Workbench.), se llevó a cabo el correspondiente análisis de resultados mediante la comparación entre los distintos factores involucrados; para finalmente, concluir (en el Capítulo 6) cómo las variables en el CAD (el tipo de software, la generación CAD, y los archivos de exportación) afectaban los resultados de las simulaciones en CAE (por el método de los elementos finitos) y cuáles de esas variables, aproximaban mejor los resultados a valores de referencia.

1. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO PROBLEMA

Para la industria en general y las diferentes áreas de conocimiento, se hace uso de las herramientas computacionales para resolver y corroborar soluciones a problemas de tipo: numérico, físico y químico. Hoy en día, una de las herramientas más utilizadas, es el análisis por el método de los elementos finitos; en el que se realiza la solución a un problema, mediante una aproximación numérica de sistemas de ecuaciones, posterior a una discretización del modelo de dicho problema.

"A nivel mundial, los diseñadores hoy en día, generan archivos CAD (Diseño asistido por computador) y estos deben traducirse en geometrías de análisis adecuadas, enmalladas y en información de entrada a una gran escala de códigos de análisis por elementos finitos (FEA). Esta tarea está lejos de ser trivial y para diseños de ingeniería complejos, se estima que toma más del 80% del tiempo total del análisis y los diseños de ingeniería son cada vez más complicados. Por ejemplo, en la actualidad, un automóvil típico consiste en cerca de 3.000 piezas, un avión de combate en más de 30.000, el Boeing 777 más de 100.000, y un submarino nuclear moderno alrededor de 1.000.000. El diseño de ingeniería y el análisis no son esfuerzos separados." (Cottrell, Hughes, & Bazilevs, 2009)

El diseño de sistemas de ingeniería sofisticados se basa en una amplia gama de análisis y simulación por métodos computacionales, tales como: mecánica estructural, dinámica de fluidos, acústica, electromagnetismo, transferencia de calor, etc.

Para el marco nacional, en el semillero de investigación SIMEC, de la Facultad Tecnológica, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; se ha realizado el estudio de algunos modelos CAD, utilizados posteriormente en una interfaz de simulación CAE. Dichos modelos, fueron generados a partir de diferentes variables, y se pudo evidenciar que esas variables afectaban directamente los resultados de la solución de las simulaciones ejecutadas en la interfaz CAE.

Surgen entonces, los siguientes cuestionamientos: ¿Cómo aumentar la confiabilidad de las simulaciones en CAE, a partir del CAD? y ¿Qué tipo de procedimientos en la elaboración de los modelos CAD, pueden tenerse en cuenta para generar un análisis adecuado en CAE?

Para este contexto, con el presente proyecto se pretende realizar un estudio de la influencia de la geometría CAD en CAE, a partir de simulaciones y resultados que permitan evidenciar, analizar y mejorar, la confiabilidad de los resultados en CAE.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En primer lugar, el proyecto se sustenta en un ambiente académico, debido a que se logra evidenciar la falta de información presente en la incertidumbre generada en los resultados de simulaciones CAE (específicamente en análisis de elementos finitos) a partir del uso de herramientas CAD, con lo cual es una razón de mucho peso para trabajar en este campo poco explorado tanto a nivel internacional como a nivel local.

En segundo lugar, en un ambiente tecnológico, el proyecto se argumenta en la reducción de la incertidumbre en los resultados de las simulaciones CAE, generando una mayor confianza y un uso más constante de estas herramientas informáticas. Igualmente, el proyecto se valida en el estudio y selección de la forma correcta en la que se debe generar la geometría y el tipo de archivo en que se debe exportar para su posterior uso en CAE. Como ya se pudo observar en el semillero de investigación SIMEC, existe un cambio significativo en los resultados de las simulaciones debido a factores como el tipo de archivo de exportación CAD, la forma en que se genera la geometría en el CAD y el tipo de herramienta CAD usada para generar la geometría.

Por último, el proyecto se valida en un ámbito personal, para reforzar los conocimientos en el funcionamiento de las herramientas informáticas, como lo son, las herramientas CAD y CAE, para ir un paso más allá de ellas ¿para qué sirven? y saber ¿cuál es la forma más adecuada de usarlas?

1.3 OBJETIVOS

- OBJETIVO GENERAL

Identificar la influencia de la geometría generada en herramientas CAD en los resultados obtenidos en la simulación mediante herramientas CAE, a partir de, pruebas experimentales.

- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

  - Desarrollar un estado del arte alrededor de la generación de geometrías tridimensionales en el modelador CAD.
  - Crear modelos CAD mediante distintas formas de generación de geometrías variando los procesos, las herramientas CAD y los tipos de archivos de exportación CAD.
  - Realizar simulaciones por el método de elementos finitos mediante el uso de la herramienta CAE en las geometrías CAD generadas.
  - Identificar los factores que generan los cambios en el CAE, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones CAE.

1.4 ALCANCE

1.4.1 Condición de prueba experimental

La experimentación consta de tres diferentes modelos generados en CAD, cada uno, a partir de la combinatoria entre: cuatro diferentes paquetes de software, tres procedimientos distintos de generación de geometrías y tres tipos de exportación CAD. Todos los modelos CAD son simulados mediante el uso de una sola herramienta CAE, de la cual se obtienen los datos para cada simulación, de las deformaciones totales y esfuerzos equivalentes, cabe aclarara que solo se hace referencia en el documento a los resultados máximos obtenidos para estos datos. Por otro lado, no hay condiciones físicas de experimentación. Asimismo, la identificación de las influencias de cada factor en los experimentos, se realiza por comparación de medias. Por último, cabe aclarar que en la experimentación solo se toman variables que intervienen en el CAD (factores y niveles), pero en ningún caso del diseño de experimentos se involucra alguna variable CAE.

1.4.2 Generación de geometrías CAD

Los factores seleccionados para el presente estudio, hacen parte de los procedimientos generales en la utilización del CAD, tales como el uso de paquetes de software comercial, elaboración de operaciones involucradas en la generación de geometría y el uso de archivos de exportación en los software CAD/CAM/CAE, que hacen parte del diseño y desarrollo del producto.

En cuanto a los niveles, los software CAD seleccionados son los que se encuentran licenciados en la Universidad Distrital y solo se utilizan los siguientes paquetes: Solidworks®, Autodesk® Inventor, modelador geométrico de Ansys®

Workbench y Siemens® NX. Las operaciones para la generación de la geometría son tres para cada pieza, ya que la elaboración de estas son de manera simple. En cuanto a los archivos de exportación, se seleccionaron los más utilizados industrialmente (Srinivasan, 2008) que corresponden a geometrías tridimensionales.

Las piezas y modelados CAD establecidos son tres, los cuales están elaborados únicamente por medio de geometrías controladas (sin tantas operaciones involucradas) y de características prismáticas y cilíndricas. Cabe aclarar, que no se hace uso de tolerancias, ni rugosidades y las dimensiones de cada pieza son simples, para evitar la influencia del punto flotante en los resultados en la herramienta CAE.

1.4.3 Simulaciones CAE

Para la selección del software CAE, se utiliza únicamente el paquete Ansys® Workbench, el cual se encuentra licenciado y su uso es especializado para simulaciones por el método de los elementos finitos.

Todas las simulaciones en CAE por el método de los elementos finitos, llevadas a cabo en este trabajo de grado, son de tipo estático-estructural y no de ningún otro tipo ya sea: dinámico, térmico, de dinámica de fluidos computacional (CFD), vibracional, ni electromagnético, etc. También, las simulaciones se realizaron por medio del uso del material: Acero ASTM A-36, que tiene características lineales-isotrópicas. Por otro lado, las discretizaciones de los modelos en CAE son llevadas a cabo mediante enmallados finos por defecto; exceptuando los mallados controlados, para realizar las comparativas en los análisis de resultados.

2 MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1.1 Generación CAD

La topología está dedicada al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas, un ejemplo clarificador es transformar la geometría de una taza de té en la geometría de una rosquilla, estos dos objetos serán equivalentes, mientras se pueda transformar uno en el otro mediante isometrías, y aun así, conservando las características de áreas, volúmenes y otras. Pues lo anterior, es la herramienta fundamental utilizada en *Queens University Belfast* en Inglaterra, para generar un análisis topológico en la geometría de un objeto, cuyo objetivo principal, es permitir interrogaciones que se puedan realizar en la descripción topológica a una cierta familia de subconjuntos (o células virtuales), de algún conjunto dado de una geometría; de cumplirse lo anterior, dicha familia cumple las reglas sobre la unión y la intersección. (Tierney, Sun, Robinson, & Armstrong, 2015)

Un caso puntual en el modelado y análisis de estructuras, es el presentado en *Glyndwr University* en Reino Unido, donde se realizan pruebas para evaluar el desempeño de un componente, en cualquier etapa de la fase de diseño del mismo, al ser éste sometido a cargas o desplazamientos (restringidos) aplicados. Se destaca de este trabajo, que los componentes del objeto de estudio, son modelos que típicamente se modelarían mediante arquitectura CAD y se analizarían por medio de análisis de elementos finitos. Además, categorizan éstos componentes en macro-escala, mini-escala y micro-escala; debido a la comparación de los resultados obtenidos del desempeño, al material del

componente, su estructura, su composición química, entre otros; para finalmente, mediante un algoritmo matemático y la utilización de la información extraída de las diferentes escalas (a las cuales se categorizaron los componentes), generar diferentes geometrías, con características similares. (McMillan, 2015)

Siguiendo la línea de modelos topológicos CAD, *Université du Québec* en Canadá, lleva a cabo la adaptación de un modelo topológico CAD para el análisis mediante el método de los elementos finitos. El propósito de dicha adaptación conlleva a la creación de un modelo que los autores llamaron: topología de mallado con restricción; que permite de manera automática a los operadores de adaptación destinados a conformar los límites de fronteras del modelo CAD y su descomposición dentro del modelamiento mediante elementos finitos; sólo mediante la utilización de mallados de caras, bordes, vértices, etc. (entidades geometrías relevantes). A su vez, el modelo topológico inicial CAD puede ser alterado, de manera que se puedan realizar modificaciones prioritarias de la forma inicial del CAD, remover detalles del diseño irrelevantes para evitar problemas al generar mallas y reducir costos computacionales, realizar la mayor cantidad de simetrías posibles en el diseño (es una forma muy eficiente de simplificar un modelo) , y crear dominios de fronteras condicionados para subdividir el modelo con caras, bordes o vértices que representan regiones rígidas de manera interdependiente; todo esto lleva al desenlace de preparar un modelo CAD para ser analizado eficientemente mediante elementos finitos. (Foucault, Cuillière, François, Léon, & Maranzana, 2008)

2.1.2 Procesos CAE

El proceso de desarrollo de un prototipo se forma mediante etapas cíclicas, y en cada una de esas etapas el enmallado va cambiando, así es como en el trabajo realizado en *Delft University of Technology* en Holanda, se expone que básicamente la utilización de un mallado realizado anteriormente a una etapa específica de diseño de un producto, puede ser la base para la construcción de un remallado en la siguiente etapa. Y esta reutilización, es posible gracias a que en un modelo geométrico general en CAD, se pueden contener todas las diferentes características geométricas que se necesiten, sin alterar la estructura general de todo el mallado (ya sea porque se añadió o eliminó, alguna de esas características). Con la metodología anterior, se pueden generar resultados eficientes de análisis por elementos finitos de manera iterativa, debido a que el mallado base debe preservar su estructura principal, pero sus atributos geométricos pueden ser modificados en cualquier momento para generar enmallados derivados que no tienen errores de discretización en el CAE. (Sypkens Smit & Bronsvoort, 2009)

De manera mucho más profunda y específica, la *Université du Québec en Canadá*, se presenta una optimización del mallado de una geometría CAD compuesta o heterogénea, que consiste en generar de manera automática mallados tetraédricos usando conceptos ya mencionados como la representación de límites (o B-rep) y adaptaciones específicas de avance de algoritmos de generación de mallas, este último es muy similar a la realización de un enfoque multiescala, basado en la generación de dominios y subdominios, de los cuales se hacen enmallados o discretizaciones cada vez más pequeñas y que son relacionadas a mallas anteriormente generadas. Este enfoque garantiza, de una

manera simple y natural, una malla que presente continuidad y conformidad, para realizar el análisis por elementos finitos. (Cuillière, Francois, & Drouet, 2013)

2.1.3 Relación CAD/CAE

En el trabajo realizado en *Grenoble University* en Francia, se propone un enfoque de idealización de un modelo por elementos finitos, basado en los procesos de formas regenerativas que generalmente se llevan a cabo al momento de descomponer objetos representados inicialmente por B-rep o representación de fronteras, lo cual no es más que, un método para representar formas de objetos usando los límites. Un sólido se representa como una colección de elementos de superficie conectados, el límite entre sólidos y no sólidos. En este trabajo los autores consideran que dicha idealización no es fácil de llevar a cabo utilizando los arboles de construcción generados por la mayoría de programas CAD; no obstante, usar los procesos regenerativos que están atados a un objeto que no está reducido a un solo árbol de construcción pero si a un gráfico que contiene todos los arboles no triviales de construcción, resulta más factible para la realización de una idealización a una de sus variables. (Boussuge, Léon, Hahmann, & Fine, 2014)

Incluir a una temprana etapa de desarrollo de un producto mejoras en el diseño CAD, para así obtener resultados satisfactorios en los análisis CAE, es un punto de convergencia de la mayoría de los trabajos aquí expuestos, al contrario del presentado en *University of Stavanger*, en Noruega, donde el autor realiza análisis ingenieriles a dos casos específicos de la industria. El primer caso es un brazo robótico, en el cual, desde la información geométrica obtenida del CAD, luego es descrito en CAE, en términos de: mallas, cargas y limitaciones. Lo anterior es un

proceso iterativo de diferentes posibles escenarios, que en términos generales, es qué pasa si se modifica una u otras variables, en una etapa temprana del diseño y permitiendo confrontar dichos escenarios. El procedimiento anterior es realizado de manera similar en un segundo caso, que corresponde a un recipiente de presión. El enfoque integrado por el CAD y el análisis por elementos finitos, le permite a los autor demostrar la principal ventaja de su trabajo, al concluir que se puede estudiar iterativamente el comportamiento de un modelo en CAE (en una etapa temprana de diseño). Sin embargo, éste aclara que es una aproximación breve de su investigación, por lo que por ahora se consideraría una solución superficial. (Gelgele, 2006)

Un método propuesto para facilitar el proceso de optimización estructural de componentes mecánicos, basado en integración CAD-CAE, cuyos resultados muestran que el método propuesto facilita el proceso de optimización estructural y reduce el costo computacional en comparación con otros enfoques, es el trabajo realizado por *University of Ulsan* en Corea del Sur. Para llevar a cabo la optimización estructural, apoyados con las herramientas asistidas por ordenador CAD-CAE de técnicas meta-modelado, los autores desarrollan un modelo matemático de optimización, el cual hace que un componente mecánico representado en una función, principalmente minimice costos; así como también, junto con técnicas de meta-modelado (usado en Ingeniería de software, Ingeniería de sistemas y otras disciplinas) para generar el análisis, construcción y desarrollo de: esquemas, reglas, restricciones, modelos, y teorías aplicables y útiles para el modelado de clases predefinidas de problemas. El marco de integración de las actividades realizadas comprende: el modelo matemático, el proceso del meta modelado, un componente CAD y un componente CAE. El modelo matemático y el proceso de meta-modelado son el núcleo del trabajo, ya que contiene la tarea de controlar la integración y los procesos de la estructura a optimizar. Lo que proporciona un enlace directo a CAD y los componentes CAE. Este enlace permite

algo que se ha presentado en varios de los artículos aquí indagados, y es que un usuario puede modificar el archivo de entrada de los componentes CAD y obtener automáticamente la extracción de los nuevos resultados del análisis ingenieril del componente en CAE. (Park & Dang, 2010)

La investigación realizada en *University of Science and Technology* de China, está muy correlacionada con la integración CAD-CAE pero dejando de lado la optimización, y centrándose exclusivamente en la estructura de representación de modelos tanto del CAD como del CAE (lenguaje de programación de cada uno). Se sabe que cuesta hoy en día mucho tiempo y esfuerzo por parte de los ingenieros, el lograr la interacción entre CAD y CAE, y es la brecha que los autores se proponen cerrar. Éste trabajo busca la creación de un software de integración mediante una arquitectura de representación unificada, por sus siglas en inglés URA (Unified Representation Architecture) que permita la interacción natural entre estas dos plataformas CAD-CAE bastante utilizadas, pero cada una con su propio lenguaje. El URA como parte fundamental del software de integración, está conformado por tres partes esenciales que son: un modelo de datos unificado, un mallado y características unificadas incluyendo límites de representación de fronteras unificados. El procedimiento que sucede a todo lo anterior, es la gestión de datos unificada, que consiste en la interacción unificada, estructura de datos unificada, geometría constructiva unificada e interfaz unificada; finalmente, se debe realizar la visualización y pos-procesamiento para el diseño en CAD y para el análisis del rendimiento en CAE. (Xia, Wang, Wang, & Yu, 2015)

Y siguiendo esta misma línea en *Université A/Mira de Algeria*, presentan un nuevo enfoque mediante una interfaz o entorno de integración CAD/CAE basado, no en el URA como el artículo inmediatamente anterior, sino en representación mixta, que es la mezcla entre la representación de frontera o B-Rep y la representación

poliédrica, lo que crea un vínculo solido entre el modelo CAD y el modelo CAE. Se evidencia en el trabajo que la representación mixta (asociada a un conjunto de herramientas necesarias), conduce a reducir tanto como sea posible, el tiempo de proceso de preparación de un modelo. (Hamri, Léon, Giannini, & Falcidieno, 2010)

En cuanto a la integración CAD/CAE, hay trabajos que se centran en describir sus alcances en lo que implica la toma de decisiones de alto nivel, en cuanto al modelado e idealización, con el fin de crear un análisis eficiente y apto para el propósito fijado, tal como ocurre en un trabajo llevado a cabo por *Queen's University Belfast* en Inglaterra, aquí los autores desarrollan algo que ellos denominan: intención de simulación para la de integración CAD/CAE. Esta intención de simulación, no es más que, definir diversos procesos de integración CAD/CAE idealizados que permitan un análisis eficiente y apto para el propósito fijado, y al mismo tiempo, obtener diferentes procesos de modelos de análisis. Mediante la utilización de la intención de simulación, el modelado CAD para la simulación, puede ser plenamente explotado y el flujo de trabajo computacional se puede automatizar fácilmente, reduciendo muchas tareas manuales repetitivas (por ejemplo, la definición de acoplamiento adecuado entre elementos de diferentes tipos y la aplicación de condiciones de contorno). El nuevo enfoque utilizado por los autores se basa en tres puntos fuertes de la tecnología computacional de diseño, que son: el modelado celular (que es un enfoque alternativo para la preparación del modelado geométrico) representaciones geométricas (que ofrecen flexibilidad al crear varias representaciones de un componente a analizar), y las equivalencias (que establece los vínculos entre las entidades en un diseño diferente y los modelos de análisis que representan la misma región del espacio). La idealización de estos puntos clave, ayuda a automatizar los procedimientos de análisis posteriores. La naturaleza genérica de lo denominado: intención de simulación, permite que se defina de una manera abstracta los modelos de análisis, independientemente de las representaciones

geométricas asociadas o los diversos paquetes ya existentes de CAD/CAE. (Nolan, Tierney, Armstrong, & Robinson, 2015)

Siguiendo con los análisis basados en el desarrollo de técnicas específicas que permitan la integración CAD/CAE, el estudio realizado en *Kookmin University* en Corea del Sur, consiste en la instauración de un sistema que crea y manipula un modelo maestro único, que contiene diferentes tipos de todos los modelos geométricos necesarios para CAD y CAE, tanto un modelo sólido (CAD) y un modelo no-colector (CAE) se extraen inmediatamente del modelo maestro a través de un proceso de selección. Si se requiere un cambio de diseño, el modelo maestro es modificado por las capacidades de modelado característica del sistema. Como resultado, los modelos de diseño y análisis se modifican simultáneamente y se mantienen consistentemente. Pues como se ha referido muchas veces en el presente artículo, a pesar del uso generalizado de sistemas CAD para el diseño y sistemas CAE para el análisis, los dos procesos no están bien integrados porque los modelos CAD y CAE inherentemente utilizan diferentes tipos de modelos geométricos y no existe actualmente ningún modelo genérico y unificado que permita tanto el diseño como análisis de la información que se especifica y se comparte. Pues es el objetivo presente en que busca eliminar la anterior afirmación. (Lee, 2005)

Por otra parte, en *Hunan University* en China, realizan un sistema compuesto por 4 capas, que son un módulo CAD basado en un árbol de procesos, un solucionador de simulación de elementos, un módulo de re-análisis y una plataforma paralela; todos estos conforman el concepto del sistema de integración CAD/CAE desarrollados por estos autores, que aunque es un poco complejo de comprender, se aplica típicamente durante los procedimientos de diseño de bucle cerrado (por ejemplo, optimización de adaptación y optimización topológica). Las

ventajas que consideran los autores en el desarrollo del sistema permiten que los modelos CAD y FEM (análisis ingenieril mediante elementos finitos) estén unificados por una superficie de subdivisión a la cual llaman ES-FEM. Donde el usuario puede convertir perfectamente cualquier modelo CAD en un modelo FEM basado en la subdivisión de superficies. A su vez, las modificaciones en las mallas se pueden reflejar directamente en un modelo CAD y ambos procedimientos de re-mallado y re-modelado CAD se pueden evitar, acortando considerablemente el tiempo necesario para el modelado.(Wang et al., 2015)

Continuando con la indagación de trabajos enfocados específicamente en la integración CAD/CAE y en la optimización, no se debe descartar el trabajo realizado en *Southeast University* en China; cuyo fin propone la creación de un método integrado de CAD, CAE y optimización multi-objetivo. Donde se puede agregar que la verdadera optimización de un producto es la optimización multi-objetivo, debido a que los problemas reales en general involucran más de un objetivo a la vez. Dicho trabajo se constituye por tres pilares importantes que son: el modelado de prototipos, que es básicamente un desarrollo evolutivo con retroalimentación que permite ir realizando las mejoras necesarias en cada etapa del perfeccionamiento de un producto; el respectivo análisis por elementos finitos o en otras palabras el análisis ingenieril o CAE; y finalmente, procedimientos de optimización. Este método integrado lleva a cabo sus tres pilares fundamentales al momento de diseñar un nuevo producto, para el caso de estudio particular del presente trabajo, el producto que valida este método de diseño y optimización es un recogedor de cerezas. Al definir la realización de una optimización multi-objetivo. Se hace necesaria la creación de algoritmos evolutivos multi-objetivos para lograr buenas compensaciones entre los objetivos en conflicto, ya que en este método para diseñar un nuevo producto, sólo las entradas y las salidas deben ser definidas, mientras que, las variables del diseño corresponden exclusivamente

a las dimensiones geométricas. Lo anterior, lleva a la deducción que el pilar de mayor relevancia es el de modelado de prototipos. (Xu & Chen, 2009)

El enfoque propuesto en un trabajo realizado por *Istituto per la Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche* en Italia, es el tema de la realización de interoperabilidad entre la arquitectura CAD y modelos de simulación usando información característica del modelo CAD. Se sabe que, durante el ciclo de vida de un producto, en la actividad de modelado de dichos productos se tiene que realizar varias etapas de simulaciones y análisis. Entonces se requieren múltiples puntos de vista de un producto para llevar a cabo las tareas de desarrollo involucradas. A su vez, los autores consideran que dentro de un entorno de diseño cooperativo, entre más rápido se lleva a cabo el desarrollo de un proceso, inevitablemente, varias actividades se ejecutan en paralelo. Por lo tanto, los diseñadores puede que tengan que realizar modificaciones adicionales, incluso después de un análisis que ya se ha llevado a cabo en una versión dada del modelo CAD. Esta operación implica un cuestionamiento de la validez de los análisis ya realizados, sin embargo, este cuestionamiento o reevaluación no necesariamente significa que se requiere un nuevo análisis, pero más exactamente, si es necesario evaluar o cuantificar su impacto sobre la validez de los resultados obtenidos anteriormente. Esta evaluación no es posible si no existe una interacción real entre ambos modelos. Si los modelos CAD y de simulación son interoperables, algún mecanismo de software podría ser proporcionado para evaluar el impacto de los cambios en la geometría en el modelo de simulación asociado, haciendo cumplir así la coherencia entre estos modelos. (Hamri, Léon, & Giannini, 2004)

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 CAD

Según Núñez, Romero, & del Barrio Morón (2011), en un sentido amplio, se puede entender el Diseño Asistido por Computador (CAD) como la aplicación de la informática al proceso de diseño. Puntualizando la definición, se entenderá por sistema CAD, un sistema informático que automatiza el proceso de diseño de algún tipo de ente, para descartar, como sistemas CAD las aplicaciones que incidan tan solo en algún aspecto concreto del proceso de diseño.

Los medios informáticos se pueden usar en la mayor parte de las tareas del proceso, siendo el dibujo el punto en el que más profusamente se ha utilizado. Una herramienta CAD es un sistema software que aborda la automatización global del proceso de diseño de un determinado tipo de ente. El éxito en la utilización de sistemas CAD, radica en la reducción de tiempo invertido en los ciclos de exploración. Fundamentalmente por el uso de sistemas gráficos interactivos, que permiten realizar las modificaciones en el modelo y observar inmediatamente los cambios producidos en el diseño.

El desarrollo de un sistema CAD se basa en la representación computacional del modelo. Esto permite realizar automáticamente el dibujo de detalle y la documentación del diseño, y posibilita la utilización de métodos numéricos para realizar simulaciones sobre el modelo, como una alternativa a la construcción de prototipos.

El ciclo de diseño utilizando un sistema CAD se ve afectado, tan solo, por la inclusión de una etapa de simulación entre la creación del modelo y la generación de bocetos. Esta simple modificación supone un ahorro importante en la duración del proceso de diseño, ya que permite adelantar el momento en que se detectan algunos errores de diseño.

2.2.1.1 Diseño de curvas y superficies

A continuación, a partir de lo explicado por Torres (s.f.), este tema aborda un aspecto más concreto del modelado geométrico: la representación de curvas y superficies. Ambas comparten los mismos fundamentos matemáticos y las mismas técnicas.

A nivel matemático, las curvas y superficies se pueden representar como ecuaciones de varias formas, atendiendo a como aparezcan las distintas variables involucradas:

- Ecuaciones explícitas, en las que aparece de forma explícita una de las variables en función de las otras dos. Estas expresiones se suelen utilizar para curvas (ver Figura 1) y superficies univaluadas (ver Figura 2), como las que se suelen obtener como resultado de procesos de medida experimental (por ejemplo, presión en puntos de la superficie de la tierra o elevación de un camino). La evaluación de la superficie es muy fácil. Sin embargo es difícil utilizarlas para casos generales, dado que las superficies que nos encontramos en la realidad y que queremos modelar no serán en general univaluadas.

En 3D,

- Superficies:

$$z = f(x,y) \quad (1)$$

$$y = f1(x),\ z = f2(x) \quad (2)$$

- Curvas en el espacio:

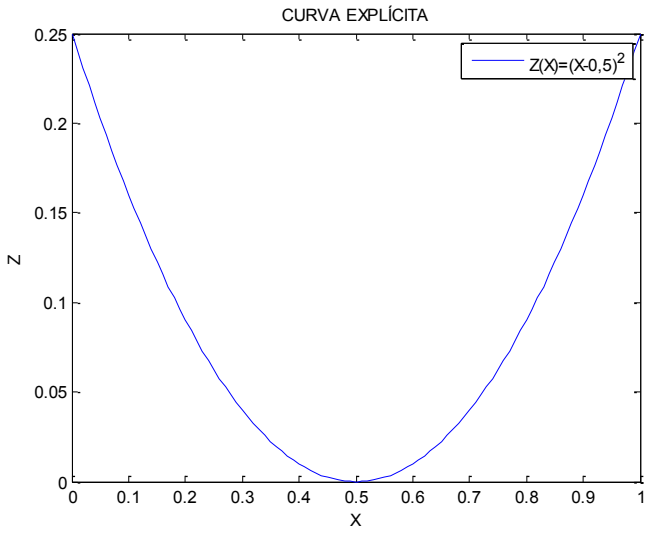
$$y = f1(x),\ z = f2(x)$$

En 2D,

- Curva en el plano:

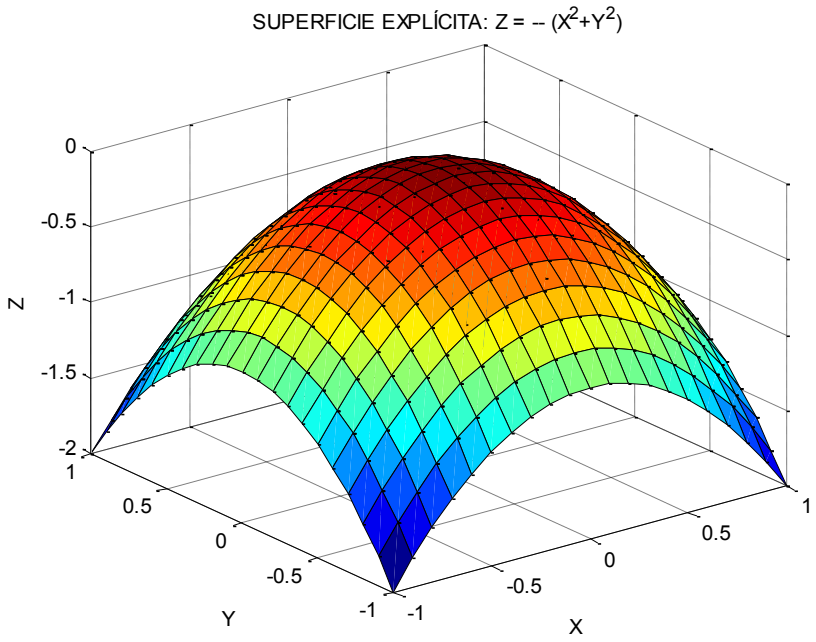
$$y = f(x) \quad (3)$$

Figura 1. Ejemplo de curva explícita



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Ejemplo de superficie explícita



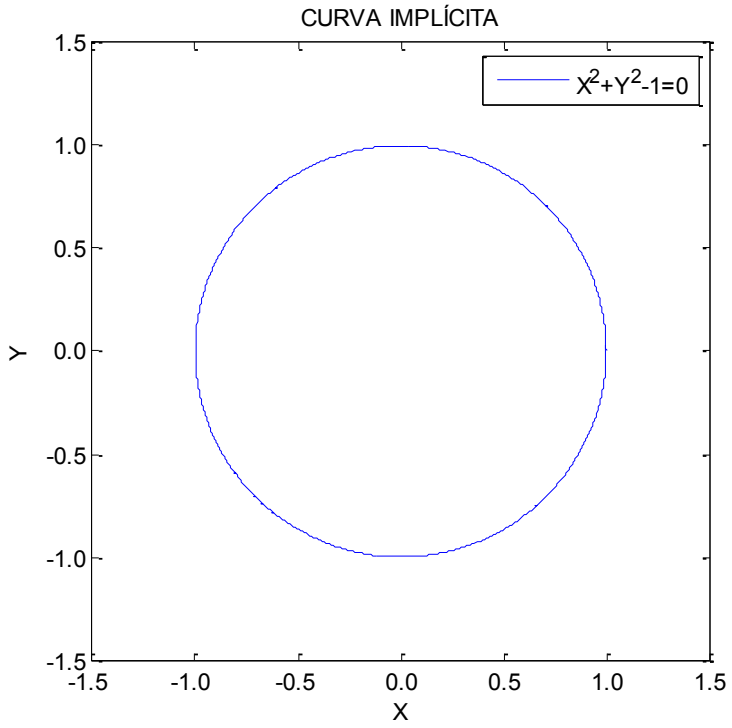
Fuente: Elaboración propia

- Ecuaciones implícitas, expresadas como una ecuación de las variables igualada a cero. En ellas no aparece ninguna variable despejada, por lo que su evaluación puede ser compleja. Un caso notable de curvas y superficies que se pueden expresar usando ecuaciones implícitas son las cuadráticas (ver Figura 3). Las ecuaciones implícitas poseen la ventaja de ser orientables, es decir, es factible determinar hacia qué lado de la superficie, o curva, se encuentra un punto sustituyendo sus coordenadas. Pero, a su vez pueden ser difíciles de evaluar. A partir de una expresión explícita se puede obtener una implícita. Obviamente, el reciproco no es siempre cierto.

Este tipo de expresión tendrá una de las formas siguientes:

- f(x,y,z) = 0
- f(x,y) = 0

Figura 3. Ejemplo de curva implícita



Fuente: Elaboración propia

- Ecuaciones paramétricas. La curva o superficie se describe basada en un conjunto de parámetros que la recorren, como un conjunto de ecuaciones que permiten obtener cada una de las coordenadas a medida que el parámetro evoluciona sobre el elemento. Una curva se expresa usando un parámetro, u, que toma valores en un intervalo predeterminado, y dos o tres

ecuaciones (según que se defina en el plano o el espacio). Así, una curva en el plano se define mediante el par de ecuaciones:

$$x = f1(u) \quad (4)$$

$$y = f2(u) \quad (5)$$

$$\text{Donde } u \in [u1,u2]$$

Así pues, una superficie se describe en base a dos parámetros, (u, v), que describen dos direcciones ortogonales sobre ella, y a tres ecuaciones que expresan las coordenadas en base a estos parámetros:

$$x = f1(u,v), \quad (6)$$

$$y = f2(u,v), \quad (7)$$

$$z = f3(u,v) \quad (8)$$

Modificando los valores de los parámetros se recorre la superficie, obteniéndose las coordenadas de los puntos que están sobre ella.

Las expresiones paramétricas presentan la ventaja de ser flexibles, aunque no son orientables. Por otra parte, cualquier expresión explícita se puede poner, trivialmente, en forma paramétrica. En aplicaciones de diseño se suelen utilizar expresiones paramétricas por su generalidad. No obstante, no es suficiente con la utilización de una expresión paramétrica. La necesidad de editar la curva, o superficie, obligaría a modificar, tanto los intervalos de variación de los parámetros como las funciones que describen las coordenadas (f1, f2 y f3). Esto último no es factible, en un caso general, a menos que se fije la forma de estas funciones, haciendo que su

modificación implique el cambio de un número reducido de parámetros cuyo efecto en la forma de la curva sea predecible. Una forma de conseguir esto es utilizar funciones polinómicas:

$$X(u) = X0 + X1 \cdot u + X2 \cdot u\ 2 + ... \qquad (9)$$

El conjunto de curvas que se pueden generar dependiendo del grado de los polinomios usados. En cualquier caso, la especificación de una curva se hace con una secuencia finita de parámetros, tal como se pretendía. No obstante, tal como se decía, eso no es suficiente para el diseño de curvas, se necesita, además, que los parámetros que introduzca el usuario sean relevantes para él, es decir, que el usuario pueda intuir el valor de los parámetros a partir de la forma de la curva. La relación entre la forma de la curva y los coeficientes del polinomio.

Se puede ver como establecer la relación entre parámetros relevantes para el usuario y los coeficientes del polinomio con un ejemplo. Supóngase que se utiliza polinomios de grado uno, esto es:

$$X(u) = X0 + X1 \cdot u \qquad (10)$$

$$Y(u) = Y0 + Y1 \cdot u \qquad (11)$$

Donde, $u \in [0,1]$

La curva generada será la recta que pasa por los puntos (X0,Y0) y (X0+X1,Y0+Y1). Si se considera como intervalo de variación del parámetro el [0,1], la curva generada será la línea delimitada por estos puntos (ver Figura 4). Parece natural que el usuario introduzca los puntos extremos de

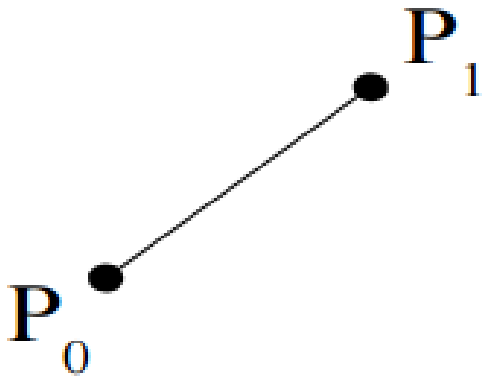
la línea para especificar está, y que los valores de los parámetros se obtengan de estos. El cálculo de los coeficientes puede realizarse como sigue:

$$(X0,Y0) = P0 \quad (12)$$

$$(X0+X1,Y0+Y1) = P1 \Rightarrow (X1,Y1) = P1 - P0 \quad (13)$$

Donde P1 y P0 son los puntos extremos (notaremos los puntos y vectores en negrita, esto es: P(u) = (P.x(u),P.y(u),P.z(u))). Generalizando, éste un método satisfactorio para expresar curvas y superficies es definirlas a partir de un conjunto finito de puntos de control.

Figura 4. Línea generada por polinomios de grado 1.

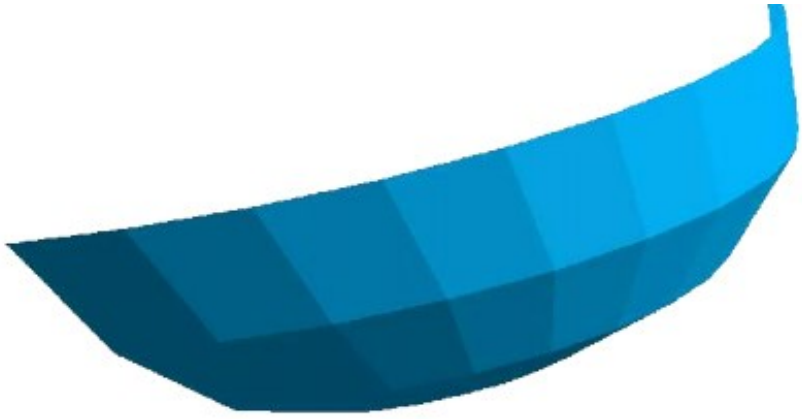


Fuente: Torres, J. C. Diseño de curvas y superficies [imagen]. Recuperado de: http://control.fcfm.buap.mx/investigacion/congresos/Tema%204%20Diseno%20de%20curvas%20y%20superficies.pdf

- Dibujo de curvas

Es necesario visualizar los elementos generados. El método más simple para visualizar una curva es el basado en la aproximación del segmento por una poligonal. Para ello basta con evaluar la curva en una secuencia de valores de parámetros, dibujando la poligonal que une los puntos así obtenidos (ver Figura 5). Si el conjunto de puntos generados es suficientemente grande, no se apreciará la aproximación. Cabe aclarar que aunque los puntos en coordenadas paramétricas estén equiespaciados, no implican que los puntos evaluados en coordenadas reales también lo estén. Existen métodos adaptativos, basados en la elección de los vértices de la poligonal en función de la curvatura o de la distancia al último punto. Se puede observar que, en cualquier caso, lo que se aproxima es la imagen y no la representación de la curva en sí.

Figura 5. Dibujo de una superficie como una malla de triángulos



Fuente: Torres, J. C. Diseño de curvas y superficies [imagen]. Recuperado de: http://control.fcfm.buap.mx/investigacion/congresos/Tema%204%20Diseno%20de%20curvas%20y%20superficies.pdf

- Visualización de superficies en CAD

El método descrito previamente para dibujar una curva nos permite aproximar una superficie paramétrica por una malla de triángulos. La calidad de la imagen depende del número de parches, y también de cómo se dibujen éstos. Otra alternativa es basarse en algoritmos para realizar el test de intersección rayo-superficie, lo que permite visualizar la superficie usando trazado de rayos.

2.2.1.2 Métodos de diseño

La mayor parte de loa métodos de diseño de curvas y superficies se basan en la utilización de puntos de control a partir de los cuales se define ésta como un promedio de los puntos de control:

$$P(u) = \sum_{i=1}^{n} Pi \cdot Bi\,(u) \qquad \textbf{(14)}$$

Donde Pi son los puntos de control y $Bi\,(u)$ son funciones de forma, dadas en forma paramétrica.

Existen diversos métodos de diseño de curvas, con diferentes características. Entre estas, cabe destacar el carácter del método (que puede ser local o global) y el comportamiento respecto a los puntos de control (interpolante o no). Un método tiene carácter local cuando la modificación de un punto de control afecta solamente a la forma de la curva, o superficie, en las proximidades del punto de

control. Por el contrario, en un método global, la modificación de un punto de control afecta a toda la curva, o superficie. Es más fácil editar una curva o superficie utilizando un método local, ya que permite ajustar la forma de la curva trozo a trozo. Se dice que un método interpola a los puntos de control cuando el elemento generado (curva o superficie) pasa por ellos.

Habitualmente es necesario usar polinomios continuos a trozos, para conseguir métodos de diseño local, lo que influye en el grado de continuidad de la curva. El grado de continuidad indica el número de veces que se puede derivar su ecuación obteniendo una función continua. Geométricamente esto está relacionado con la continuidad del elemento. Una curva con continuidad C^0 es continua, pero su pendiente no. Si la continuidad es C^1 la curva y su pendiente son continuas (ver Figura 6).

La continuidad depende de la forma en que está parametrizada la curva. Para que la curva sea continua en un punto, sus vectores tangentes a izquierda y derecha deben coincidir. No obstante, la magnitud del vector tangente no influye en la apreciación que podemos hacer de continuidad en el punto. Por este motivo, se suele hablar de continuidad geométrica, notada con G, en lugar de continuidad matemática. Una curva tiene continuidad geométrica en un punto si las tangentes a izquierda y derecha tienen la misma dirección, independientemente de la magnitud del vector tangente. Por este motivo, la continuidad matemática implica continuidad geométrica (salvo el caso especial en que el vector tangente es nulo). Normalmente se requiere como mínimo continuidad G^1 y con frecuencia G^2.

También se debe tener en cuenta la influencia del grado del polinomio de las funciones de forma. Cuando mayor sea el grado del polinomio más restricciones podremos aplicar a la curva (ya que hay más coeficientes), pero también será mayor oscilación de ésta, y más complicado su cálculo.

Figura 6. Grados de continuidad



Fuente: Torres, J. C. Diseño de curvas y superficies [imagen]. Recuperado de: http://control.fcfm.buap.mx/investigacion/congresos/Tema%204%20Diseno%20de%20curvas%20y%20superficies.pdf

Así pues, se continúa con las curvas de Bézier, los splines y los B-Splines (ver Tabla 1). Las curvas de Bézier destacan por su simplicidad de formulación, tanto en la forma de Bézier usando polinomios de Bernstein, como en el planteamiento de De Casteljau. Los splines tienen una utilidad muy limitada en diseño, aunque son una buena opción cuando se quiere un método que interpole los puntos de control. Las curvas B-Splines a diferencia de las curvas anteriores, permiten controlar el grado de continuidad. Por otro lado, es posible obtener el método de Bézier como caso particular de B-Spline.

Tabla 1. Característica de algunos métodos de diseño de curvas

Método	Grado del polinomio	Interpola	Carácter	Continuidad
Lineal	1	Si	Local (2)	C^0
Bézier	n-1 (n: número de puntos de control)	No (sólo extremos)	Global (n)	C∞
Spline local	3	Si	Local (4)	C^1
Spline global	3	Si	Global	G^2
B-spline	Ajustable	No	Local (ajustable)	Ajustable
B-spline (cúbico)	3	No	Local (4)	G^2

Fuente: Torres, J. C. Diseño de curvas y superficies [tabla]. Recuperado de: http://control.fcfm.buap.mx/investigacion/congresos/Tema%204%20Diseno%20de%20curvas%20y%20superficies.pdf

Independientemente del método usado, la descripción de la curva se puede realizar usando notación matricial, separando la dependencia con el parámetro relacionado a los puntos de control. Así, para el caso de interpolación lineal, podemos expresar la ecuación:

$$P(u) = \sum_{i=1}^{n} Pi \cdot Bi\,(u) \qquad \textbf{(15)}$$

Con:

$$B_0(u) = 1-u \qquad \textbf{(16)}$$

$$B_1(u) = u \qquad \textbf{(17)}$$

Para n=2, en la forma:

$$P\,(u)\;=\;P0\;\cdot\;B0\,(u)\;+\;P1\;\cdot\;B1\,(u) \qquad \textbf{(18)}$$

A su vez, representando los puntos de control en un vector columna:

$$P\,(u) = \begin{pmatrix} \mathrm{B}_0(\mathrm{u}) \\ \mathrm{B}_1(\mathrm{u}) \end{pmatrix} \cdot \begin{matrix} P_0 \\ P_1 \end{matrix} \qquad \textbf{(19)}$$

Y separando en la primera matriz la dependencia en u como un vector fila:

$$P\,(u) = (1 \quad u) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \end{pmatrix} \qquad \textbf{(20)}$$

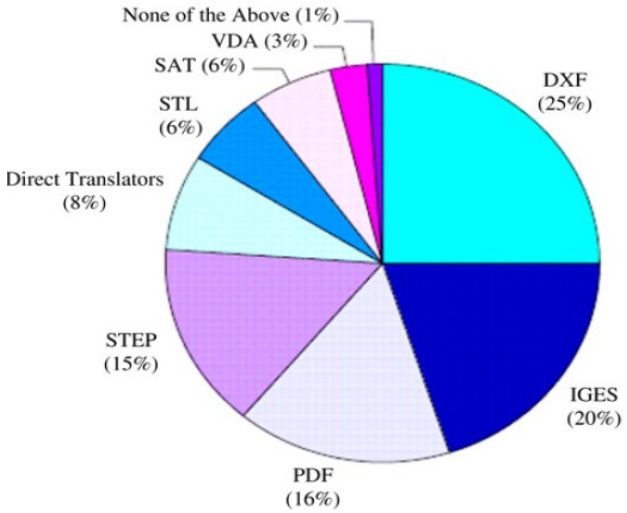
Se puede establecer que en general, la curva se puede expresar como una ecuación matricial en la que interviene una matriz de potencias del parámetro, una matriz de coeficientes (cuyos valores dependerán del método de diseño) y una matriz de puntos de control.

2.2.1.3 Estándares de intercambio en el CAD

Algunos de los formatos dominantes y estándares que se encuentran en el CAD (ver Figura 7) son definidos y mantenidos por empresas comerciales con ánimo de lucro (tales como: DXF por Autodesk y Adobe PDF Systems), así pues, éstos poseen una gran base de usuarios. Otros, por otra parte, son fijados y mantenidos por organizaciones de estándares como el ANSI (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares) para el caso de IGES e ISO (Organización Internacional de. Normalización) para el caso de STEP. Se puede observar en la Figura 7 que los estándares IGES y STEP, relacionados con las traducciones directas de archivos CAD, conforman el 43% de formatos CAD más usados en

Europa y Norteamérica en el año 2008. Un tema común en estos formatos y estándares es permitir la información geométrica por ordenador. (Srinivasan, 2008)

Figura 7. Estimación del uso reciente de formatos de intercambio de datos CAD, en Europa y América del Norte.



Fuente: Srinivasan, V. (2008). Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends [imagen].

A continuación se presentan generalidades de los estándares IGES y STEP:

- IGES: éste archivo de intercambio CAD, surgió por primera vez en Estados Unidos, en 1981. Proporciona un formato de datos para describir el diseño de productos y su fabricación, los cuales han sido creados y almacenados en soporte informático. Dicha información, incluye dibujos, modelos “Wireframe” (tipo alambre) tridimensionales, y modelos de superficie. El formato IGES está diseñado para ser independiente en todos los sistemas CAD / CAM / CAE.

La especificación IGES define un formato de archivo neutral para el intercambio de información de definición de producto. Este archivo neutro puede estar en uno de los tres formatos: ASCII, ASCII comprimido o binario. Cabe aclarar que el formato ASCII es el más utilizado. Este formato se basa en los registros de longitud fija de 80 caracteres. El formato de archivo ASCII consta de cinco secciones, tales como: la sección de inicio, la sección global, la sección de directorio, la sección de parámetros, y una sección terminal.

Las entidades en un archivo IGES se pueden dividir en dos tipos, entidad geométrica y entidad sin geometría, el archivo tipo IGES los utiliza para representar el modelo completo del producto. (Xiao, Chen, & Han, 1996)

- STEP: el archivo STEP hace parte de la norma internacional ISO 10303 para el intercambio de datos de producto en formato electrónico, esta norma fue publicada en el año 1994. Sin embargo “El trabajo con STEP realmente comenzó a mediados de la década de 1980. Los avances en las ciencias de la computación e ingeniería de software de ese entonces ya había indicado que era el formato más apto y preferible para estandarizar modelos de información a comparación de los demás”. (Srinivasan, 2008) Desde entonces, la norma ha sido ampliamente utilizada para el intercambio de modelos de diseño asistido por ordenador (CAD), entre los diferentes sistemas dentro empresas, y también entre las cadenas de suministro de las empresas en la ingeniería. La parte más utilizada de la norma en la actualidad es el protocolo de aplicación ISO 10303- 203 (AP203: Configuración controlada del diseño mecánico de piezas y ensambles), que prevé el intercambio de “Wireframe” (tipo alambre),

superficies y representación de contorno (B-rep) en modelos sólidos, junto con los datos administrativos asociados.

El estándar STEP se divide en muchas partes. Estas partes abarcan temas tales como: los métodos utilizados para presentar la norma, arquitecturas de aplicación, los procedimientos de pruebas de conformidad, modelos de información de recursos y protocolos de aplicación. Las partes STEP se pueden dividir en método de descripción, modelos de información, protocolos de aplicación, métodos de aplicación y herramientas de conformidad. Cabe destacar que las implementaciones STEP se dividen en varias categorías. Los traductores principalmente toman datos de sistemas pre-existentes y la convierten en un archivo definido STEP-AP. (Pratt & Kim, 2006)

2.2.1.4 Operaciones CAD y sus errores funcionales potenciales

Stroud y Nagy (2011) presentan las operaciones CAD más comunes, con las cuales se puede llegar a trabajar, así como también, se describen los errores potenciales que se pueden obtener a partir de esas operaciones, que pueden ser producidos ya sea por: el tipo de software CAD, el usuario, o el archivo de exportación. Todos esos errores potenciales, cobran su importancia, ya que pueden llegar a afectar de manera negativa los análisis en CAE. La descripción de éstas operaciones y errores potenciales, se explican a continuación:

- Operaciones booleanas

Las operaciones booleanas están presentes lo general en algún lugar de forma explícita, pero, en general se utilizan en la realización de otras operaciones. Por esta razón, y por su importancia histórica, se presentan en primera instancia. Las operaciones booleanas, también conocido el "Set de operaciones" o "Set de operaciones booleanas", se combinan dos objetos en una de tres maneras principales. Hay, de hecho, otras técnicas relacionadas, pero las tres combinaciones principales se conocen como: ADICIÓN (o UNIÓN), SUSTRACCIÓN (o DIFERENCIA) y la INTERSECCIÓN.

Las operaciones booleanas son operaciones bastante robustas, generalmente con parámetros simples. Como funciones internas que deben proporcionar los códigos de retorno de modo que, en el plano CAD, el implementador puede elegir si desea o no imprimir un mensaje. Algunas advertencias opcionales podrían ser:

- Un objeto dentro de otro. En la adición puede no hacer ningún cambio o la devolución del objeto añadido. Para la sustracción esto podría eliminar todo el objeto o crear una cavidad. Para intersección esto está bien.
- Los objetos no se tocan. Para la adición esto crearía un objeto de múltiples piezas. Para la sustracción esto significaría ningún cambio. Para intersección esto está bien.
- Objetos se tocan a lo largo de un borde o vértice. Sólo para adición, esto significa que un elemento que no es múltiple se ha creado.

- Operaciones de extrusión

En los sistemas CAD modernos hay dos tipos de extrusión. El primer tipo es donde una extrusión se hace de una forma 2D inicial. El segundo tipo es una extrusión donde se hace como un incremento de un sólido 3D existente. El segundo tipo es más complicado porque se trata de una operación booleana. El booleano puede ser una operación adición o sustracción para crear el resultado.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser potenciales errores son:

- Vector nulo (para la extrusión lineal).
- Definición nula de eje (para la extrusión circular).
- Ángulo de cero (para extrusión circular).
- Longitud de cero (en la ruta de definición para el barrido a lo largo de una trayectoria).
- Ruta cerrada (para barridos a lo largo de una ruta). Esto podría ser manejado, por lo que es un error opcional.
- La ramificación de la ruta alambre (para barridos a lo largo de una trayectoria). Una vez más, esto podría ser manejado por lo que es un error opcional.
- Forma sólida abierta (sólo es un error si el sistema CAD no puede manejar la combinación entre chapas y objetos sólidos). Si no es un error tal vez debería dar una advertencia.

- Más de dos bordes en un vértice de la forma siendo extruida (esto es un error común).

➢ Operaciones de reflejo y simetría

La reflexión, a veces conocida como simetría, hace que sea posible la creación de parte de un objeto y completarlo en una sola operación mediante la creación y unión de la parte simétrica.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- La superficie de reflexión no es plana.
- Posiblemente el objeto cruza el plano de reflexión.

➢ Dar a una cara una nueva superficie (SETSURF)

SETSURF fue uno de los primeros métodos para establecer la geometría compleja en un modelo y para la manipulación de la geometría de una manera controlada. Esto fue desarrollado por Graham Jared en el sistema de construcción. Operaciones similares aparecen en la extrusión, cuando se utilizan las opciones: "Extrusión hasta… " o " Extruir hasta que ... ".

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- La superficie no se intersecta circundante a la geometría.
- Los elementos desaparecen de su sitio, posiblemente una advertencia.

➢ Ajuste

El ajuste es una operación que estaba presente en el sistema de investigación BUILD y que todavía existe, pero es menos común en sistemas CAD modernos. Es utilizado para ajustar la geometría de ciertas caras. Es más fácil de aplicar a una cara directamente, si se aplica a un borde o vértice, entonces es necesario ajustar las caras de los alrededores, así recalculando sus superficies.

Algunas condiciones que deben revisarse, y que son errores potenciales son:

- Tipo de ajuste no válido.
- Tratar de sobre-ajustar un elemento ya restringido.

➢ Adición de un ángulo de inclinación

La adición de un ángulo de inclinación es una operación estrechamente asociada a la fabricación de moldes. Desde este punto de vista, es un poco extraño para incluirlo como parte del diseño asistido por ordenador. La razón de que está presente puede ser histórica. Una de las primeras operaciones locales en el sistema de construcción desarrollado a finales de la década de 1970 fue una

operación para añadir un ángulo de inclinación. El proyecto de ésta operación se basó originalmente en otra: la de ajuste y, por tanto, está relacionada con ésta.

Algunas condiciones que deben revisarse y que hacen parte de los errores potenciales son:

- Ángulo de inclinación de cero (debe verificarse obligatoriamente).
- Topología posiblemente modificada.

➢ Biselados

El biselado es una operación que sustituye bordes afilados por pequeñas caras planas en ángulo, con las caras adyacentes al borde inicial. Así que, ésto podría hacerse para quitar un borde afilado, añadir material a una extrusión o por razones estéticas, por ejemplo.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- Cara, borde o vértice nulos.
- Profundidad de cero o negativa.
- Algunos elementos desaparecen, que pueden rodear el borde o vértice que está siendo biselado.

- Filetes y redondeos

El filete o el redondeo es similar a la operación de achaflanado, pero la geometría es diferente. De hecho podrían ser tratados en la misma sección, pero no están porque complicaría la distinción de los casos.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- Radios de cero o radios negativos.
- Geometría de filete demasiado compleja.
- Desaparecen parcialmente los filetes.
- El radio del redondeo puede ser demasiado grande como para que el inicio o final de la topología desaparezca.

- Pliegue de objetos

La operación del pliegue una parte es crear objetos de paredes finas de sólidos. Así como, la operación de crear un objeto de lámina y luego añadirle espesor. La operación se produjo, posiblemente y originalmente, como resultado de diseñar piezas en un refrigerador. Hubo un deseo de diseñar una caja que contiene los componentes eléctricos como un sólido para el diseño general y luego convertirlo en un objeto de paredes finas, como parte del proceso de detalle.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- Un objeto de lámina dado. La operación de espesor puede ser separada.
- Alambre-objeto dado.
- El grosor interior o exterior es negativo.
- El grosor interior o espesor exterior, son ambos cero.

➢ Despliegue de objetos

Esta operación es opuesta a la de pliegue de objetos.

Un error potencial puede ser que el objeto obtenido sea un objeto de alambre, pero el algoritmo usado en CAD, debe ser capaz de manejar los objetos volumétricos u objetos de lámina.

➢ Dar espesor a objetos de lámina

Esta es una operación de conversión de la otra forma desde objetos de lámina a objetos volumétricos.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- El espesor negativo.
- Grosores de valor cero.
- Cuerpo de alambre.

➢ Llenar objetos de pliegue cerrados

Se toma un objeto de lámina que no tiene bordes afilados y de la cual se saca el interior. Exactamente lo opuesto de las primeras etapas de la operación de pliegues.

El problema más común es que un objeto de lámina no cerrada se obtenga. Los límites deben indicarse gráficamente. La comprobación de una lámina abierta se hace mediante la comprobación de los bordes agudos descritos en la lámina a engrosar.

➢ Dar espesor a objetos alambre

El modelo de alambre se crea como un conjunto de aristas con perfiles asignados. La idea es permitir a los usuarios crear formas esqueléticas simples y luego realizan una conversión automática a modelos volumétricos, como por ejemplo en los enrutamientos de tubería.

Los errores potenciales pueden presentarse si es un borde o bordes sin un perfil asignado, o pueden ser perfiles con degeneración.

- Solevación

La solevación es una operación que se genera a partir de una serie de secciones o perfiles. Hay dos clases de solevación, una que es de superficie y otra que es sólida.

Algunas condiciones que deben revisarse y que pueden ser errores potenciales son:

- Auto-intersección de la interpolación de curvas o superficies.
- Secciones de piezas múltiples.
- Menos de dos secciones (se necesitan por lo menos dos).
- Mezcla de secciones abiertas y cerradas.

- Patrones

La creación de patrones, por lo general, se asocian tanto con objetos o con operaciones. A su vez, hay patrones de tipo rectangular o circular. Las condiciones que pueden llegar a generar errores potenciales son:

- Número de patrones X y Y que son de valor cero.
- Distancia de X y Y aproximadamente de cero.
- Número del patrón circular menor a uno.
- Radio del patrón circular aproximadamente de cero.

2.2.2 CAE

Según Urrutia (s.f.), CAE se entiende como Ingeniería Asistida por Ordenador o "Computer Aided Enginering", tecnología que se ocupa del uso de sistemas informáticos para analizar la geometría generada por las aplicaciones de CAD, permitiendo al diseñador simular y estudiar el comportamiento del producto para refinar y optimizar dicho diseño.

El método de análisis por ordenador más ampliamente usado en ingeniería es el método de elementos finitos o FEM (Finite Element Method). Se utiliza para determinar tensiones, deformaciones, transmisión de calor, distribución de campos magnéticos, flujo de fluidos y cualquier otro problema de campos continuos que serían prácticamente imposibles de resolver utilizando otros métodos.

En este método, la estructura se representa por un modelo de análisis constituido de elementos interconectados que dividen el problema en elementos manejables por el computador. Como se ha mencionado anteriormente, el método de elementos finitos no requiere más que un modelo abstracto de descomposición espacial de la propia geometría del diseño. Dicho modelo se obtiene eliminando los detalles innecesarios de dicha geometría o reduciendo el número de dimensiones. Por ejemplo, un objeto tridimensional de poco espesor se puede convertir en un objeto bidimensional cuando se hace la conversión al modelo de análisis. Por tanto, es necesario generar dicho modelo abstracto de forma interactiva o automática para poder aplicar el método de elementos finitos. Así pues, una vez creado dicho modelo, se genera la malla de elementos finitos para poder aplicar el método.

Cuando se están realizando investigaciones para determinar automáticamente la forma de un diseño, integrando el análisis y la optimización; se asume que el diseño tiene una forma inicial simple a partir de la cual el procedimiento de optimización calcula los valores óptimos de ciertos parámetros para satisfacer un cierto criterio al mismo tiempo que se cumplen restricciones, obteniéndose la forma óptima con dichos parámetros.

La ventaja del análisis y optimización de diseños es que permite determinar cómo se va a comportar el diseño y eliminar errores sin la necesidad de gastar tiempo y dinero en la construcción y evaluación de prototipos, así que, la optimización temprana que permiten las herramientas CAE, supone un gran ahorro de tiempo y una notable disminución de costos.

2.2.2.1 Procedimiento general para la solución de problemas estructurales-estáticos

Rao (2011) muestra que la solución de un problema general continuo, por el método de elementos finitos, siempre sigue un proceso ordenado paso a paso. Con referencia a los problemas estructurales-estáticos, el procedimiento paso a paso puede enunciarse como sigue:

- Paso 1: Discretización de la estructura

  La primera etapa en el método de elementos finitos, es dividir la estructura o solución región, en subdivisiones o elementos. Por lo tanto, la estructura debe ser modelada con elementos finitos adecuados.

- Paso 2: La selección de un modelo de interpolación o desplazamiento adecuado

Dado que la solución desplazamiento de una estructura compleja bajo cualquier condición de carga especificada, no se puede predecir exactamente, se asume alguna solución adecuada dentro de un elemento a la aproximación de la solución desconocida. La solución debe ser asumida desde un punto de vista computacional simple, pero debe satisfacer ciertos requisitos de convergencia. En general, la solución o el modelo de interpolación se toma en forma de un polinomio.

- Paso 3: Derivación de matrices de rigidez y vectores de carga

A partir del modelo de desplazamiento asumido, la matriz de rigidez $[K^{(e)}]$ y el vector de carga $\vec{P}^{(e)}$ del elemento e se deriven mediante el uso de cualquiera de las condiciones de equilibrio o un principio variacional adecuado.

- Paso 4: Montaje de las ecuaciones de los elementos para obtener las ecuaciones generales de equilibrio

Puesto que la estructura se compone de varios elementos finitos, las matrices de rigidez individuales y vectores de carga deben ser ensamblados de una manera adecuada, entonces las ecuaciones generales de equilibrio tienen que ser formuladas como:

$$\underline{[K]\vec{\varphi}} = \underline{\vec{P}} \qquad \textbf{(21)}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez, $\vec{\varphi}$ es el vector de desplazamientos nodales, y $\vec{P}$ es el vector de fuerzas nodales para la estructura completa.

- Paso 5: Solución para los desplazamientos nodales desconocidas

Las ecuaciones generales de equilibrio tienen que ser modificadas para tener en cuenta las condiciones de frontera del problema. Después de la incorporación de las condiciones de frontera, las ecuaciones de equilibrio pueden expresarse como:

$$[K]\vec{\varphi} = \vec{P} \qquad (22)$$

Para los problemas lineales, el vector $\vec{\varphi}$ puede resolverse muy fácilmente. Sin embargo, para problemas no lineales, la solución tiene que ser obtenida de una secuencia de pasos, con cada paso, implica la modificación de la matriz de rigidez $[K]$ y/o el vector de carga $\vec{P}$.

- Paso 6: Cálculo de tensiones y esfuerzos de elementos

A partir de los desplazamientos nodales conocidos $\vec{\varphi}$, en caso necesario, las tensiones y esfuerzos de los elementos, se pueden calcular utilizando las ecuaciones necesarias de mecánica estructural o de sólidos.

2.2.3 Rutinas CAD/CAE

En («Flow Chart for Finite Element Analysis – Overall Steps for FEA, FEM or CAE», s. f.), se muestra que el procedimiento que debe seguir un usuario, para la realización de un análisis de elementos finitos completo, es como sigue:

- Crear un modelo CAD 3D: se utiliza cualquiera de las herramientas de modelado CAD 3D como: ProE, Catia, y Solid Edge, etc., para crear la geometría 3D de la pieza y/o ensamblaje de los cuales se desea realizar el análisis por elementos finitos.

- “Limpiar” el modelo CAD 3D: algunas características de la geometría CAD 3D pueden no ser tan importantes para el análisis por elementos finitos, y aumentan la complejidad de mallado drásticamente; así pues se quitan esas características del modelo CAD.
- Guardar la geometría CAD 3D en un formato neutro: se guarda la geometría CAD 3D en un formato neutral como IGES, STEP, etc. Aunque, algunos de los paquetes de análisis por elementos finitos permiten importar la geometría directamente desde algunos paquetes CAD.
- Importar la geometría CAD 3D al paquete de análisis por elementos finitos.
- Definición de las características del material: se necesita configurar en el paquete de análisis por elementos finitos qué el material es utilizado en las piezas. Para este proceso debe establecerse características como: el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y todas las demás propiedades necesarias y requeridas para el análisis por elementos finitos.
- Mallado: en enmallado es una operación fundamental en el análisis por elementos finitos. En esta operación, la geometría de CAD se divide en un gran número de trozos pequeños. Las piezas pequeñas se denominan elementos. La precisión del análisis y su duración, dependen del tamaño de malla.
- Solución: en este paso se le indica al paquete de elementos finitos que resuelva el problema, para propiedades de los materiales, condiciones de contorno y tamaño de malla, definidos anteriormente.

- Post-procesamiento: se identifican los resultados de la solución en este paso. Los resultados pueden verse en varios formatos, tales como: gráficas, valores, animaciones, etc.

3 MARCO METODOLÓGICO

Para la realización del proyecto se inició con la fase de investigación, en la cual se debe realizar una recopilación de información para el desarrollo del estado del arte, por medio de bases de datos especializadas, artículos científicos, textos, cursos, videos, etc., acerca de la generación de geometrías en herramientas CAD y su interacción con las herramientas CAE. Igualmente, se consultó sobre este tipo de herramientas informáticas disponibles en la Universidad Distrital F.J.D.C., esto con el fin de seleccionar las más adecuadas para la investigación y así mismo, se buscó tutoriales, manuales, videos, cursos, textos, etc., para reconocer operativamente el funcionamiento, las características y manipulación de cada uno, a partir de las necesidades del proyecto.

Una vez se obtuvo el conocimiento necesario, se comenzó la fase de modelado, en la cual se generaron los distintos modelos, inicialmente se definieron los tipos de geometrías, las operaciones, las dimensiones, los tipos de software CAD y los archivos de exportación que fueron usados. Posteriormente, se crearon tres piezas acorde a un diseño de experimentos de cuatro factores, los cuales involucran: cuatro tipos de software CAD, tres procesos de modelamiento y tres archivos de exportación CAD.

A partir de lo anterior, se comenzó la fase de simulación de cada una de las piezas, en la que se hizo uso de la herramienta CAE (ANSYS Workbench®), mediante análisis estático-estructural, con enmallados finos por defecto y con condiciones de frontera que se explican en el Capítulo 5.

Con base en los resultados obtenidos, que corresponden a las deformaciones totales máximas y a los esfuerzos equivalentes máximos, se identificó la influencia de cada uno de los factores del diseño experimental, a partir de un análisis de medias. Asimismo, se compararon dichos resultados experimentales con valores de referencia, obtenidos de las simulaciones por elementos finitos con enmallados controlados (para cada una de las piezas) y cuyas condiciones de simulación son explicadas en el Capítulo 5.

Todo lo anterior conllevó a inferir, en el análisis de resultados (Capítulo 5), cuáles estrategias de generación de geometría y exportación del CAD, son más convenientes y aproximadas para la realización de simulaciones por elementos finitos.

4 DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1 SELECCIÓN GEOMETRÍAS

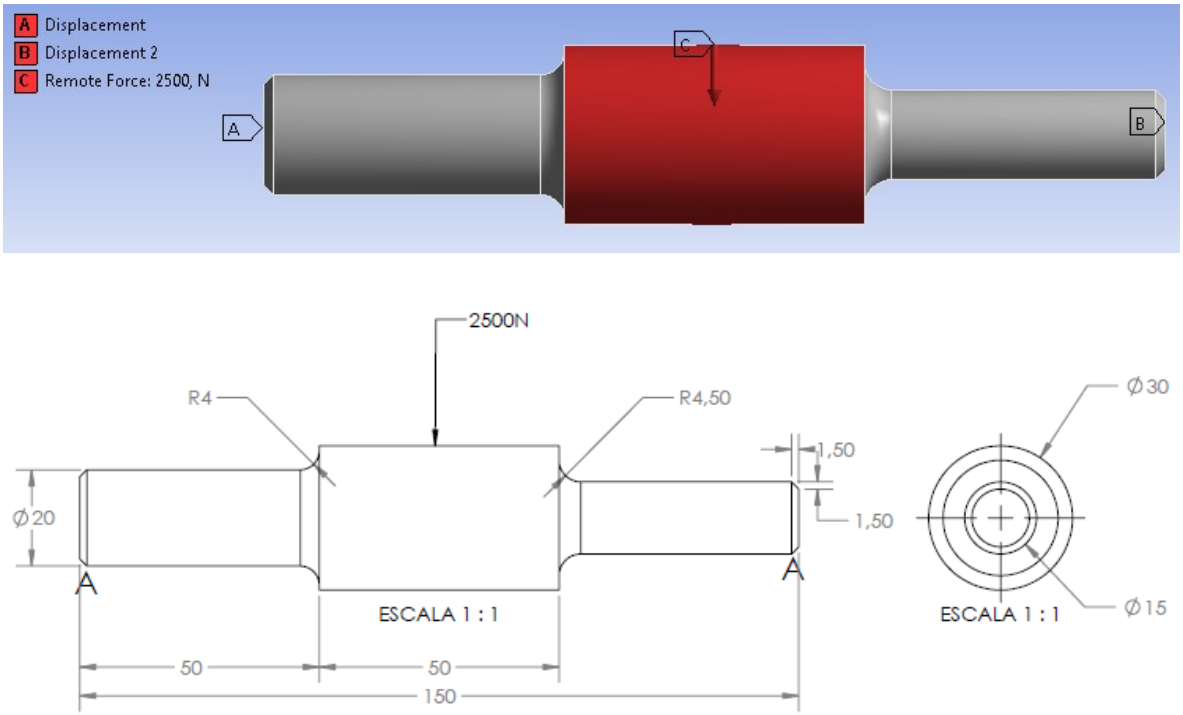
En esta sección se indican las distintas piezas que se utilizaron en el diseño de experimentos, igualmente se muestran las distintas variantes en la generación de la geometría para cada una de ellas, esto con el fin de analizar su posible influencia en los resultados CAE.

Cabe aclarar que en el presente estudio no se tienen en cuenta tolerancias de ningún tipo, en cuanto a la representación de las piezas en el modelado CAD. Igualmente, no se considera ninguna clase de rugosidad en los experimentos generados.

Además, se decide trabajar con dimensiones simples y geometrías controladas (prismáticas y cilíndricas, sin tantas operaciones CAD involucradas), ya que de esta forma se puede reducir considerablemente la influencia a causa del punto flotante en los resultados CAE.

4.1.1 Pieza 1: Eje

Figura 8. Características y dimensiones del eje



Fuente: Elaboración propia

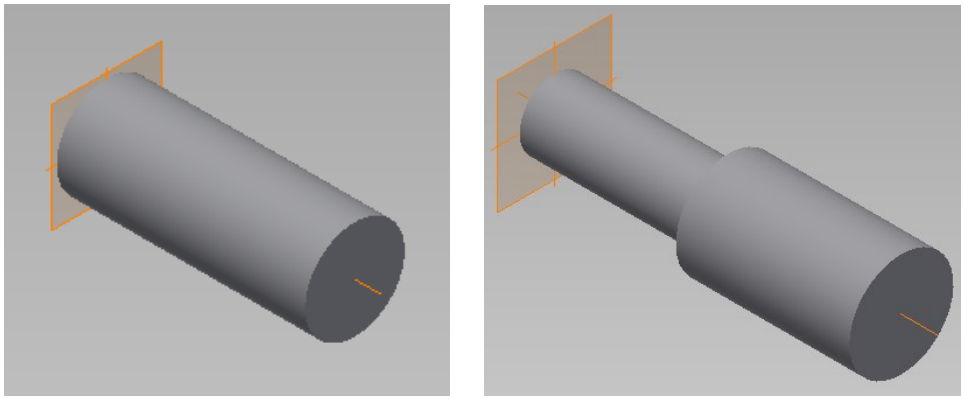
Una vez definidas tanto las dimensiones como el tipo de análisis a realizar, se genera el modelado de la pieza teniendo en cuenta una de las variables de estudio, como lo es la forma en la que se genera la geometría del eje. Se forman tres diferentes combinaciones de operación en la generación de la geometría que se describen a continuación:

Operación 1: Adición de material

La primera forma de realizar la pieza es a partir de extrusiones, para comenzar se dibuja un círculo de 20 mm de diámetro y se extrude 50 mm. (Figura 9 - izquierda). Luego se realiza el mismo procedimiento, pero se selecciona la cara donde

terminó la extrusión anterior y se dibuja un círculo de 30 mm de diámetro y se extrude 50 mm. (Figura 9 - derecha).

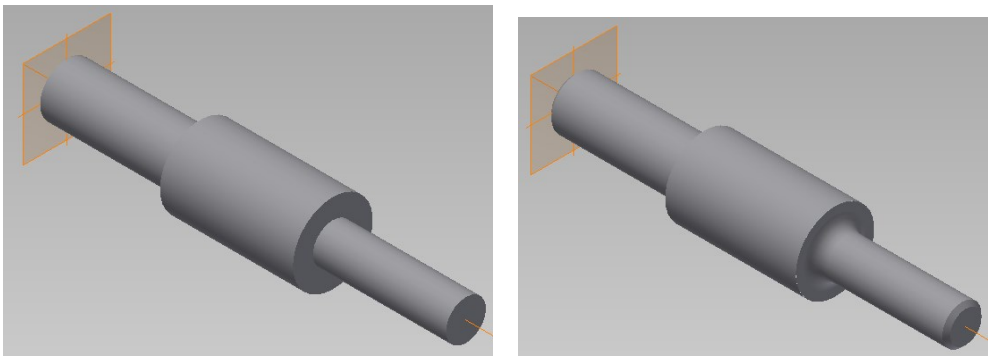
Figura 9. Pasos uno y dos de la operación número uno del eje



Fuente: Elaboración propia

A partir de la extrusión anterior se realiza el último escalón de la pieza, dibujando un círculo de 10 mm de diámetro y se extrude 50 mm (Figura 10 - izquierda). Para finalizar, se realizan las operaciones correspondientes con los chaflanes de 1,5 mm en los extremos y los filetes de 4 mm y 4,5 mm correspondientes con el eje (Figura 10 - derecha).

Figura 10. Pasos tres y cuatro de la operación número uno del eje

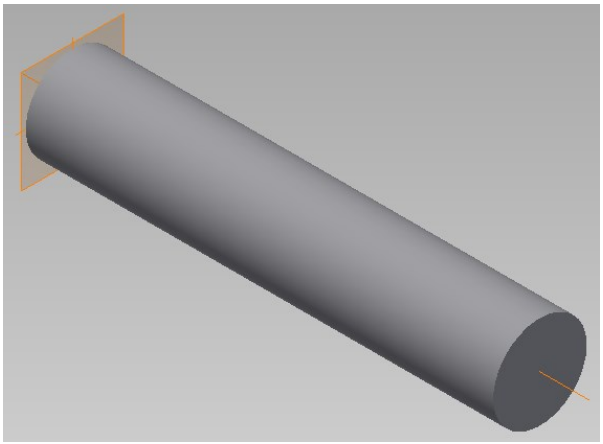


Fuente: Elaboración propia

Operación 2: Sustracción de material

La segunda forma de realizar el eje, es a partir de un sólido extruido al que se le quita material en una sola operación por revolución. Se dibuja un círculo de 30 mm de diámetro y se extrude 150 mm (Figura 11).

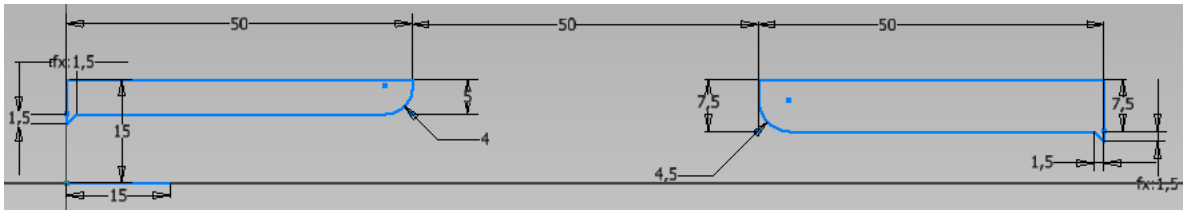
Figura 11. Paso uno de la operación número dos del eje



Fuente: Elaboración propia

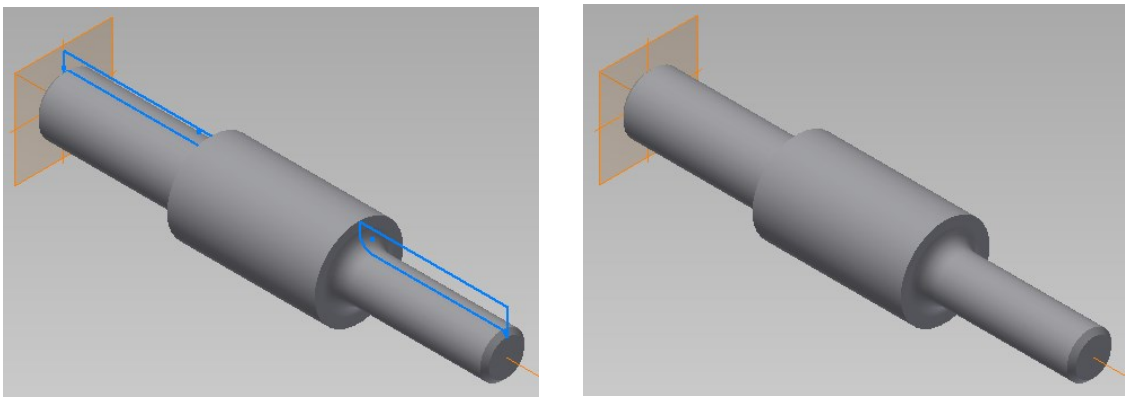
Luego se elimina el material que no hace parte del eje final, para ello se realiza un boceto (Figura 12) y se corta por revolución completa (Figura 13).

Figura 12. Boceto para realizar el corte por revolución



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Boceto de corte y eje terminado

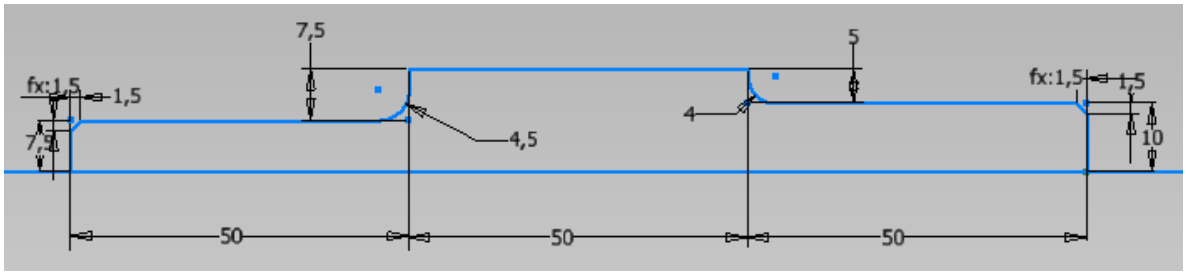


Fuente: Elaboración propia

Operación 3: Revolución

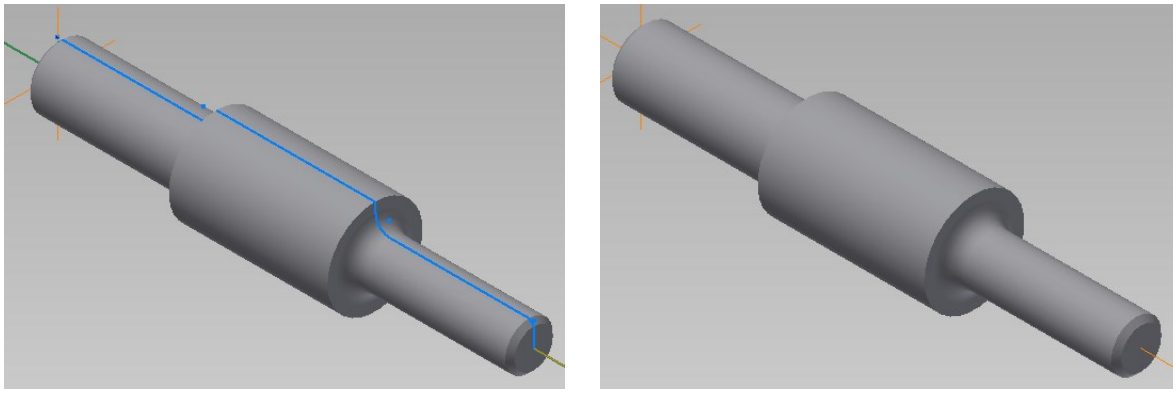
La tercera forma de realizar el eje es la más común y la más fácil, ya que se ejecuta en una sola operación de revolución. Se dibuja un boceto con las dimensiones finales de la pieza (Figura 14) y se revoluciona. (Figura 15)

Figura 14. Boceto con las dimensiones finales del eje



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Pieza terminada por revolución

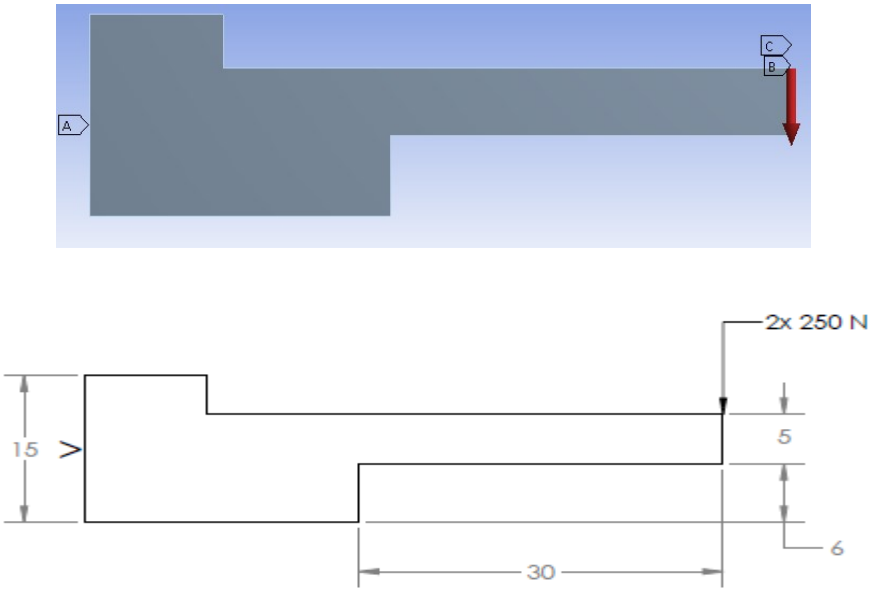


Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Pieza 2: Bloque Prismático

La pieza número dos es una figura compuesta por prismas con ángulos rectángulos. Una vez definidas tanto las dimensiones como el tipo de análisis y siguiendo la metodología de la pieza anterior, se genera el modelado de la pieza teniendo en cuenta la forma en la que se genera la geometría del bloque prismático. Se forman tres diferentes combinaciones de operación en la generación de la geometría que se describen a continuación:

Figura 16. Pieza número dos, soporte y cargas (Superior) y dimensiones (inferior)

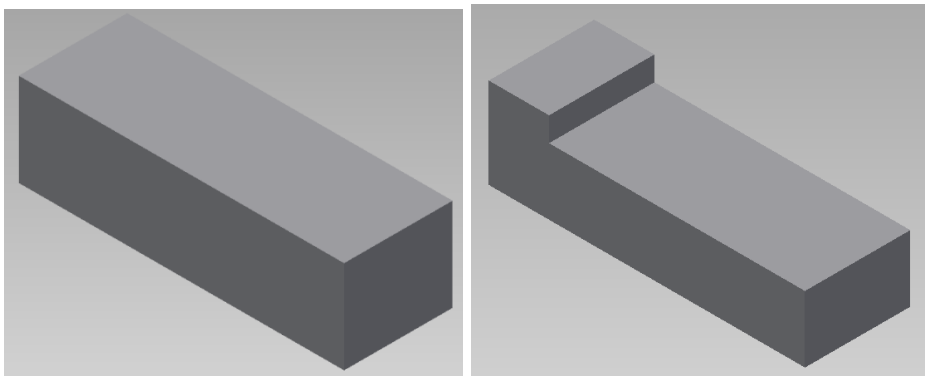


Fuente: Elaboración propia

Operación 1: Sustracción de material

En esta operación se inicia con un bloque solido de 15 mm x 17,5 mm, extruido a 52,5 mm (Figura 17 - izquierda) y a partir de éste se empieza a eliminar las partes que no corresponden con la pieza del bloque prismático. Se realiza un corte de 17,5 mm x 42,5 mm, con una profundidad de 4 mm de la parte superior del bloque prismático a la parte inferior (Figura 17 - derecha).

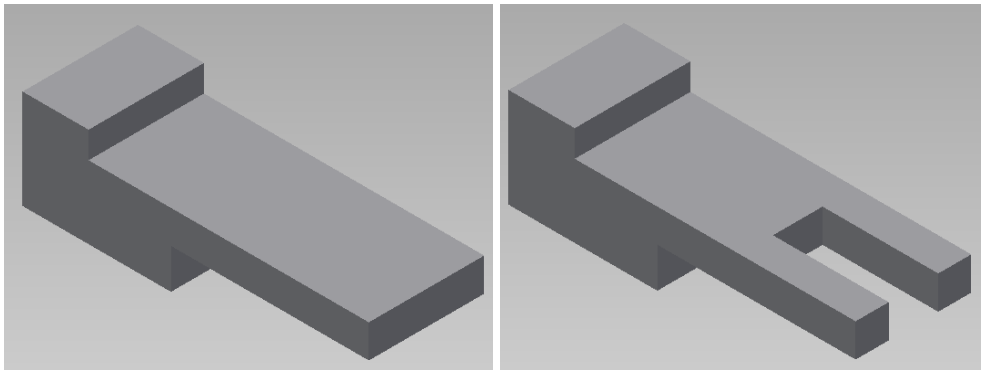
Figura 17. Pasos uno y dos de la operación número uno del bloque prismático



Fuente: Elaboración propia

A continuación se realiza un segundo corte de 6 mm x 30 mm, con 17,5 mm de profundidad desde la parte frontal del bloque prismático a la parte posterior (Figura 18 - izquierda). Por último, se elimina un prisma con ángulo rectángulo de 7,5 mm x 17,5 mm ubicado en el centro derecho del bloque prismático, con una profundidad de 5 mm (Figura 18 - derecha).

Figura 18. Pasos tres y cuatro de la operación número uno del bloque prismático

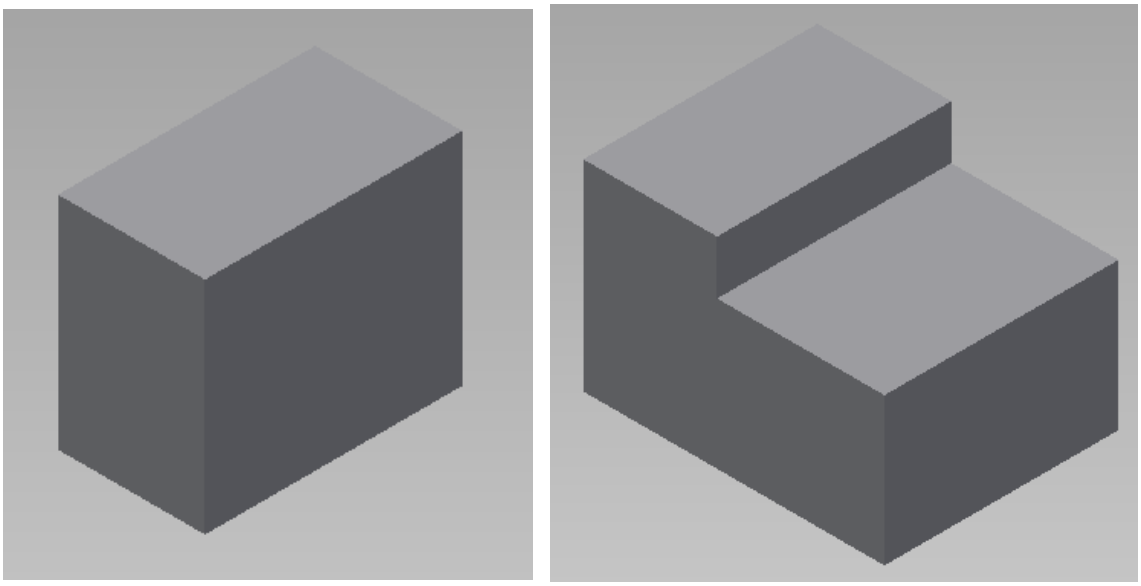


Fuente: Elaboración propia

Operación 2: Adición de material

La segunda forma de realizar el bloque prismático, es agregando material o realizando extrusiones para cada una de las partes que componen la pieza. Para comenzar, se dibuja un rectángulo de 15 mm x 17,5 mm y se extrude 10 mm (Figura 19 - izquierda). A continuación, se realiza un segundo rectángulo de 11 mm x 17,5 mm sobre la cara derecha de mayor área del prisma anterior, y se extrude 12,5 mm hacia afuera (Figura 19 - derecha).

Figura 19. Pasos uno y dos de la operación número dos del bloque prismático

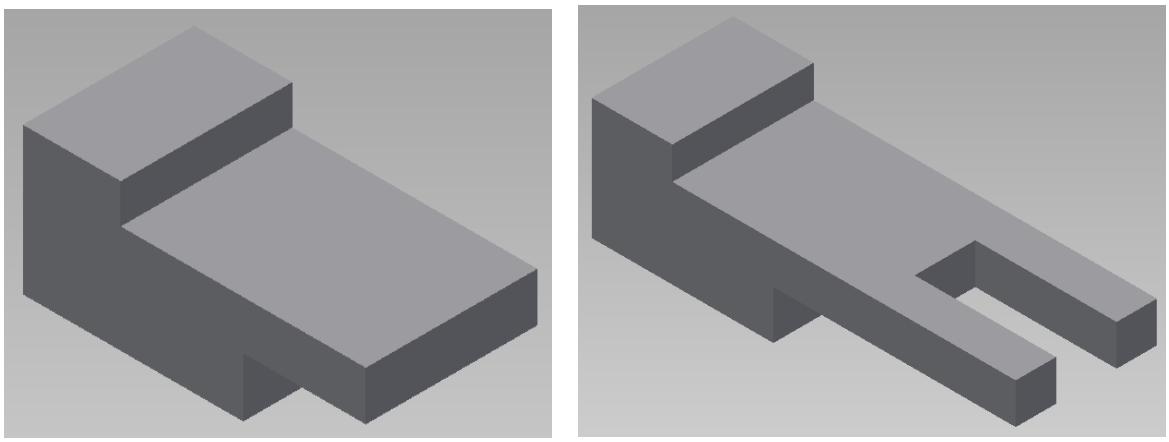


Fuente: Elaboración propia

Luego de lo anterior, se realiza un rectángulo de 5 mm x 17,5 mm en la cara exterior del prisma anterior, en esta cara en la parte superior, con una extrusión de 12,5 mm (Figura 20 - izquierda). Por último, en la cara exterior derecha del prisma realizado en el paso anterior, y en los extremos de dicha cara, se realiza dos

cuadrados de 5 mm de lado, uno a cada lado, que es extruido a 17,5 mm como se indican en la Figura 20 (Derecha).

Figura 20. Pasos tres y cuatro de la operación número dos del bloque prismático

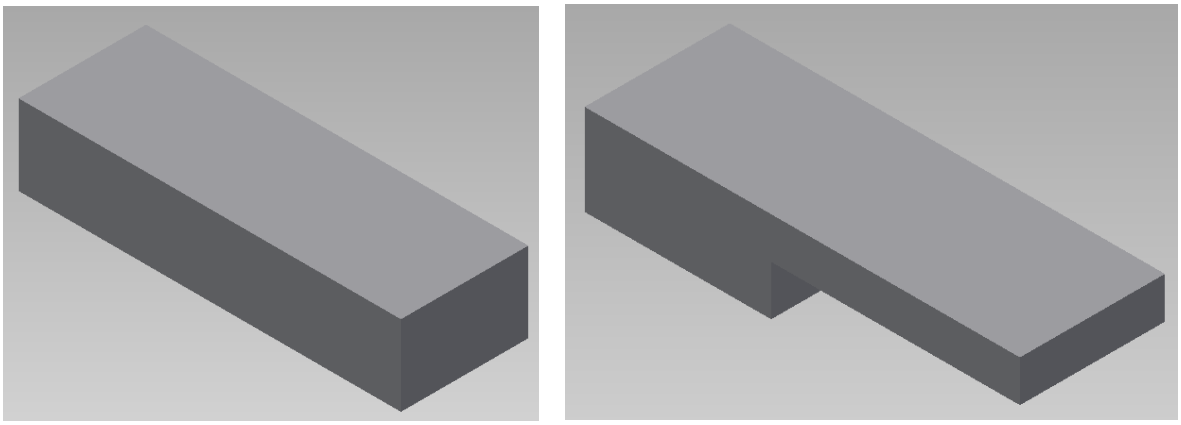


Fuente: Elaboración propia

Operación 3: Adición y sustracción de material (Mixto)

La última forma de realizar el bloque prismático, es mediante la combinación de la extrusión y la eliminación de material. Para comenzar, se dibuja un rectángulo de 17,5 mm x 52,5 mm y se extrude 11 mm, de esta forma se modela un bloque sólido (Figura 21 - izquierda). Una vez se tiene el bloque prismático, se elimina un extremo, se dibuja un rectángulo de 6 mm x 30 mm en la cara frontal del prisma realizado anteriormente, y se corta 17,5 mm, como se observa en la Figura 21 (Derecha).

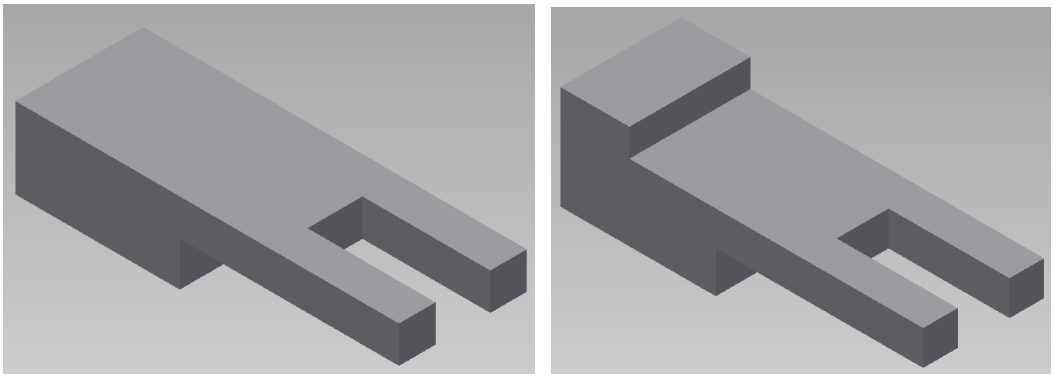
Figura 21. Pasos uno y dos de la operación número tres del bloque prismático



Fuente: Elaboración propia

Luego se corta otro rectángulo, sobre la cara del extremo derecho de la pieza, se realiza un rectángulo de 5 mm x 7,5 mm y se corta 17,5 mm (Figura 22 - izquierda). Por último, se realiza una extrusión sobre la cara superior de la pieza, en el extremo izquierdo, se dibuja un rectángulo de 10 mm x 17,5 mm y es extruido a 4 mm (Figura 22 - derecha).

Figura 22. Pasos tres y cuatro de la operación número tres del bloque prismático

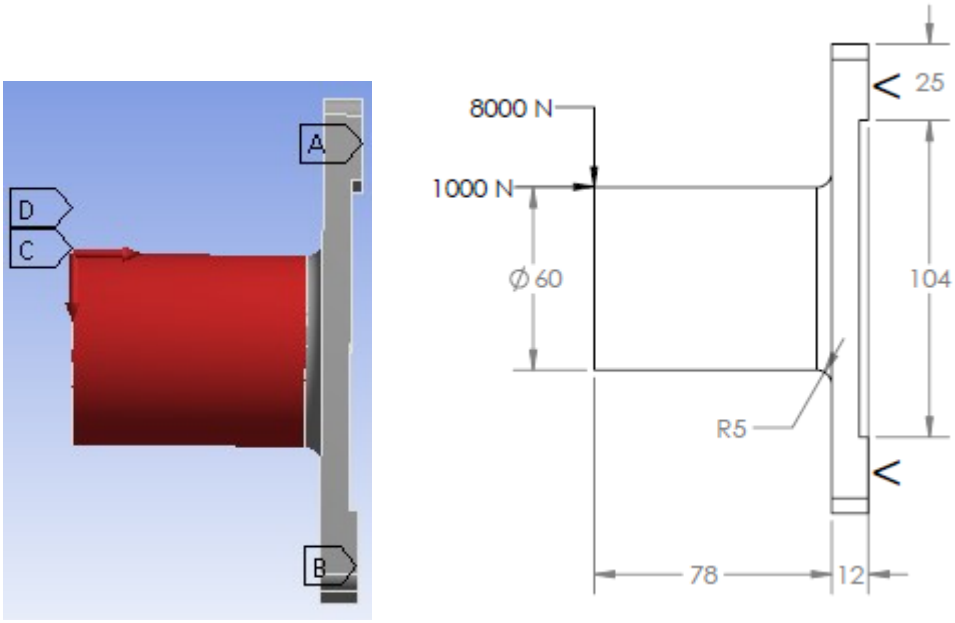


Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Pieza 3: Placa

La última pieza es una placa, y siguiendo una vez más con la metodología de las piezas anteriores, se genera el modelado de la pieza teniendo en cuenta la forma en la que se genera la geometría de la placa (Figura 23). Se forman tres diferentes combinaciones de operación en la generación de la geometría, que se describen a continuación:

Figura 23. Pieza número tres, fuerzas y dimensiones generales

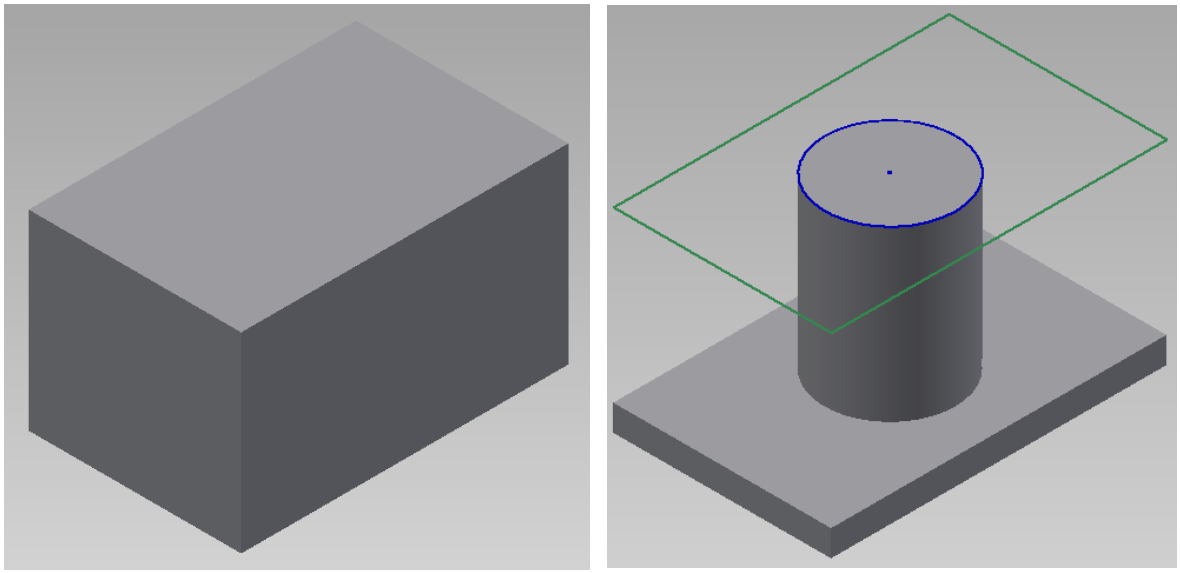


Fuente: Elaboración propia

Operación 1: Sustracción de material

Para comenzar, esta operación parte de un prisma solido de 100 mm x 154 mm, que es extruido a 90 mm, en el cual se elimina material para formar la placa de montaje (Figura 24 - izquierda). Una vez se tiene el bloque, se dibuja un rectángulo de 100 mm x 154 mm y un círculo de 60 mm de diámetro en el centro del rectángulo y se corta 78 mm hacia abajo (Figura 24 – derecha).

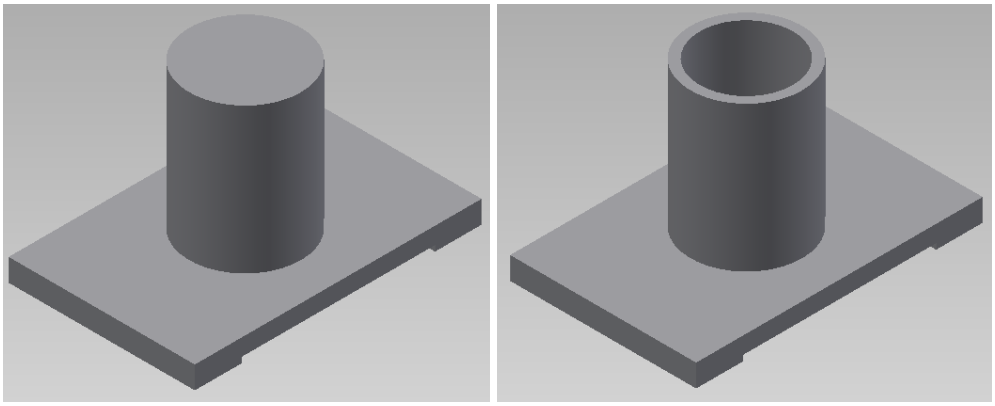
Figura 24. Pasos uno y dos de la operación número uno de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

Ahora se dibuja un rectángulo de 3 mm x 104 mm sobre la cara exterior derecha de la base (en esta cara en el borde inferior a 25 mm del borde exterior), y se corta 100 mm (Figura 25 - izquierda). A continuación se hace el agujero en el centro de la figura, para ello se dibuja un circuló de 50 mm sobre la cara superior del cilindro y se corta hacia abajo 90 mm (Figura 25 - derecha).

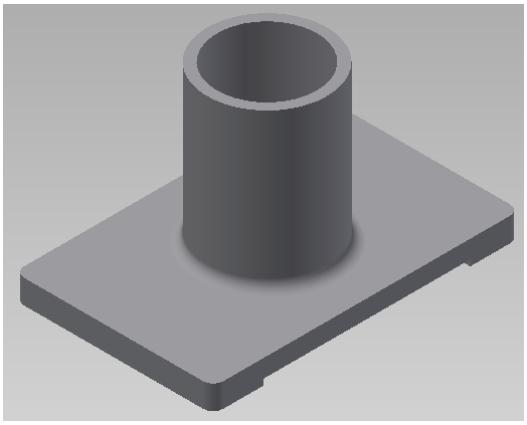
Figura 25. Pasos tres y cuatro de la operación número uno de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

Por último, se realizan los filetes en la unión del cilindro con el bloque inferior y en las cuatro esquinas del mismo, con un radio de 5 mm (Figura 26).

Figura 26. Paso cinco de la operación número uno de la placa de montaje

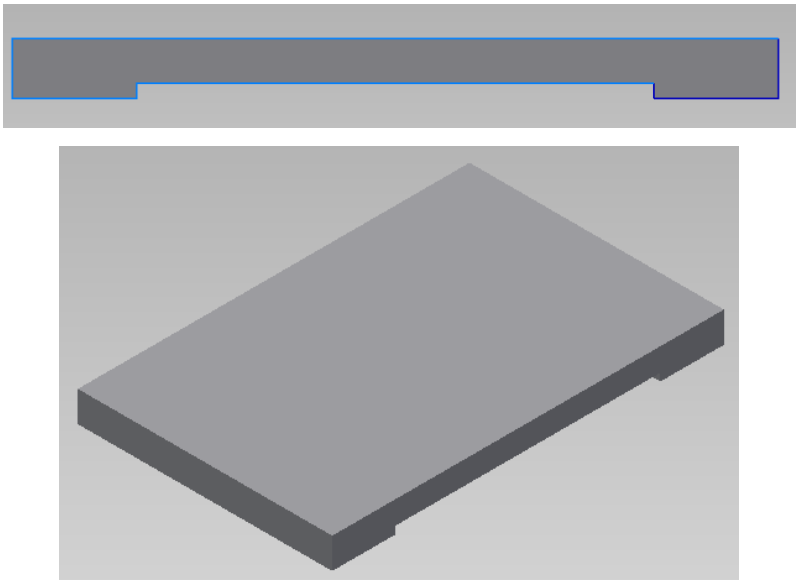


Fuente: Elaboración propia

Operación 2: Adición de material

En la segunda forma de generar la geometría, se toma en cuenta la extrusión para agregar las partes sólidas y un corte para generar el agujero en el cilindro. Se dibuja el perfil de la base con un ancho de 154 mm y una altura de 12 mm, el escalón inferior es de 3 mm de alto y 104 mm, y es extruido a 100 mm (Figura 27).

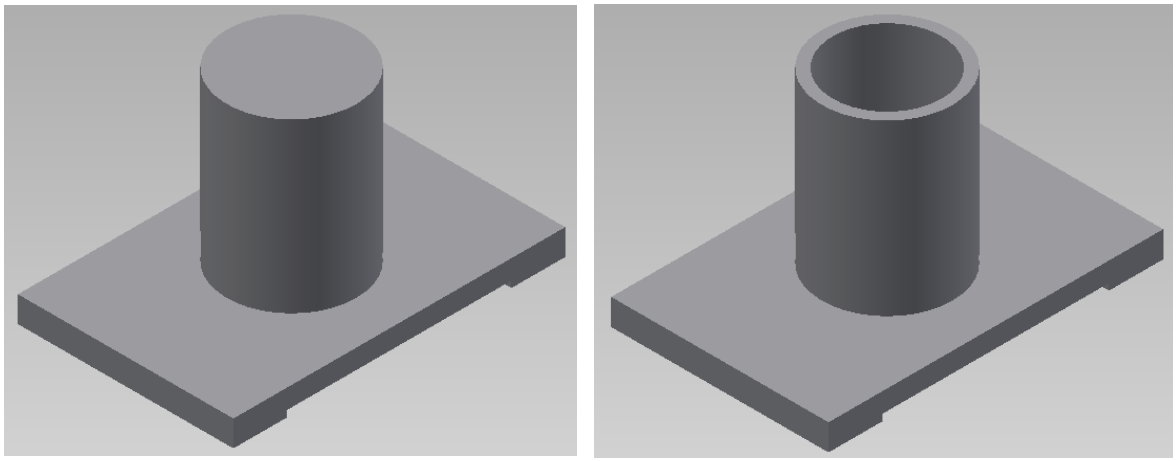
Figura 27. Paso uno de la operación número dos de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

Luego se dibuja un cilindro de 60 mm de diámetro y es extruido a 78 mm hacia arriba de la base modelada anteriormente (Figura 28 - izquierda). Una vez echo lo anterior, se dibuja un círculo de 50 mm sobre la cara superior del cilindro y se corta hacia la pieza 90 mm (Figura 28 - derecha).

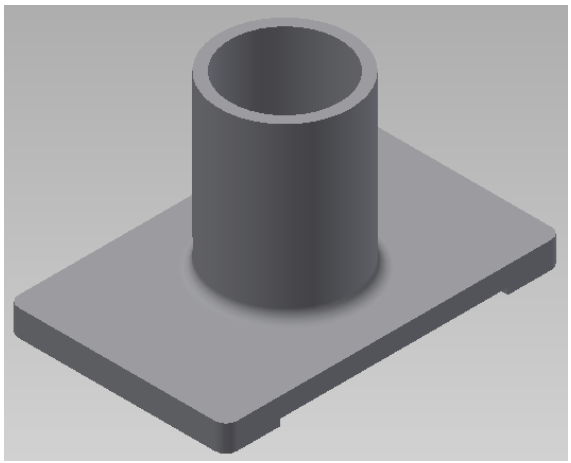
Figura 28. Pasos dos y tres de la operación número dos de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

Por último, se generan los filetes en la unión de la base con el cilindro y en las cuatro esquinas de la base con un radio de 5 mm (Figura 29).

Figura 29. Paso cuatro de la operación número dos de la placa de montaje

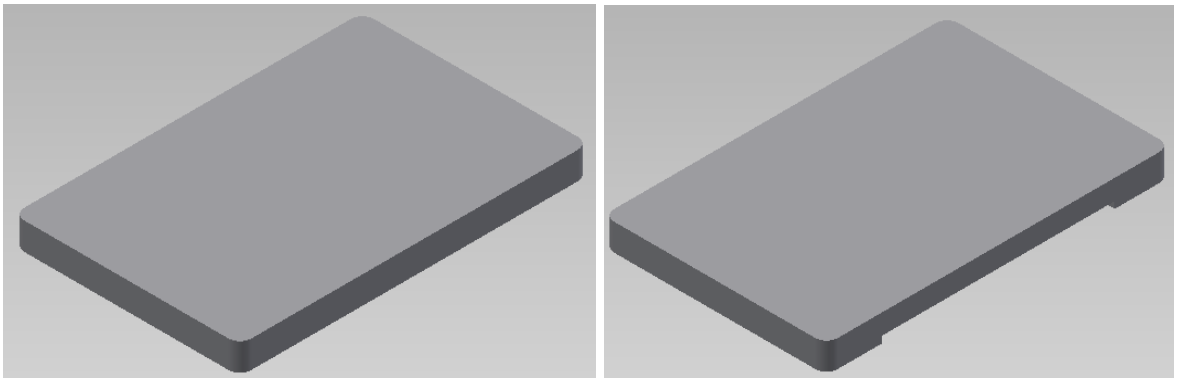


Fuente: Elaboración propia

Operación 3: Adición y sustracción de material

La última forma de generar la geometría de la pieza es generando partes solidas mediante extrusiones y luego cortando o eliminando material en las partes. Se dibuja un rectángulo de 100 mm x 154 mm y es extruido a 5 mm (Figura 30 - izquierda). Una vez echo lo anterior, se corta un rectángulo de 104 mm x 3 mm en la cara lateral del bloque, cortando 100 mm (Figura 30 - derecha).

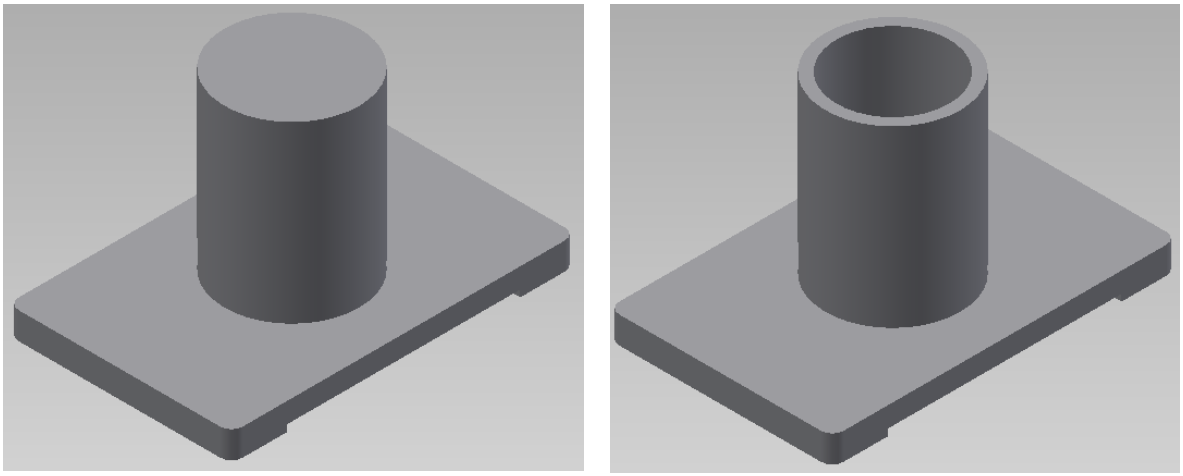
Figura 30. Pasos uno y dos de la operación número tres de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se dibuja un círculo de 60 mm sobre la cara del bloque y es extruido a 78 mm hacia arriba para generar el cilindro (Figura 31 - izquierda). A partir de lo anterior, en la cara superior del cilindro se dibuja un círculo de 50 mm y se corta 100 mm (Figura 31 - derecha).

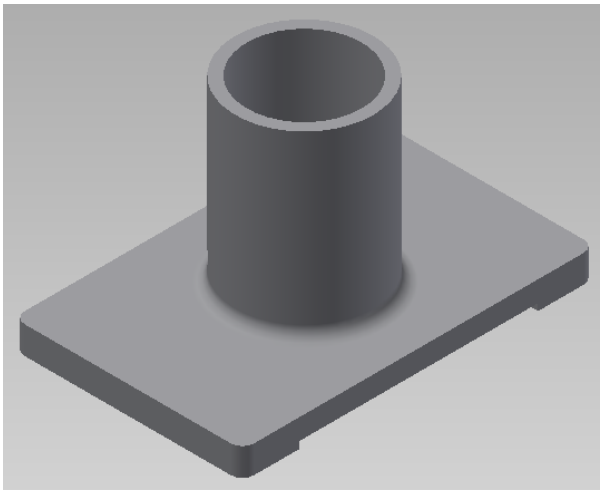
Figura 31. Pasos tres y cuatro de la operación número tres de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

Por último, se generan los filetes en la unión de la base con el cilindro y en las cuatro esquinas de la base con un radio de 5 mm (Figura 32).

Figura 32. Paso cinco de la operación número tres de la placa de montaje



Fuente: Elaboración propia

4.2 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES Y NIVELES

Para llevar a cabo el diseño de experimentos, se determinan tres diferentes factores como lo son: el software CAD en el que se crean los modelos, las operaciones usadas en la generación de geometría y la forma en la que se importan los modelos al software CAE.

En el factor de software CAD, se seleccionaron cuatro niveles o cuatro diferentes Software CAD como lo son: SolidWorks®, Autodesk Inventor®, el modelador de geometrías de Ansys Workbench® y el Siemens NX®.

Asimismo, la forma en la que se genera la geometría tiene tres niveles, que son las operaciones usadas para la realización de las geometrías en los modelos, como lo son: Adición de material, sustracción de material y el tercer nivel cambia con base en la pieza, en el eje corresponde a la operación de revolución y en el bloque y la placa corresponden a una mezcla de operaciones de agregar y cortar material.

El último factor que se toma en cuenta es el de la forma en la que se relacionan los software CAD y CAE, el primer nivel corresponde al formato de exportación del modelo CAD en IGES, el segundo nivel es el tipo de archivo STEP, y el tercer nivel es el que se realiza de forma directa entre el CAD y el CAE sin necesidad de archivos de exportación.

4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

A partir de lo establecido en el Numeral 4.2, se realiza para cada pieza una serie de experimentos utilizando cada uno de los factores descritos, pero modificando los niveles para cada caso, como se muestra en la Tabla 2, para este caso el número de experimentos es de treinta y seis (resultado de las posibles combinaciones de los diferentes niveles de los factores A, B y C, ver Tabla 3).

$$N = 4\ (A) * 3\ (B) * 3(C) = 36$$

Tabla 2. Diseño experimental

Factor / Nivel	Software (A)	Operaciones (B)	Exportación (C)
1	Solidworks	Adición de material	IGES
2	Inventor	Sustracción de material	STEP
3	Ansys Workbench (modelador de diseño)	Revolución o Mixta	Directamente desde el software
4	Siemens NX	----------	----------

Fuente: Elaboración propia

Los diferentes modelos generados se usan como archivos de entrada para un posterior análisis en el software CAE; y de esta forma, obtener como resultados de salida deformación total y esfuerzo equivalente. Con el fin de identificar la influencia de cada uno de los factores en los resultados obtenidos.

Tabla 3. Combinaciones de experimentos

EXP	A	B	C
1	A1	B1	C1
2	A1	B1	C2
3	A1	B1	C3
4	A1	B2	C1
5	A1	B2	C2
6	A1	B2	C3
7	A1	B3	C1
8	A1	B3	C2
9	A1	B3	C3
10	A2	B1	C1
11	A2	B1	C2
12	A2	B1	C3
13	A2	B2	C1
14	A2	B2	C2
15	A2	B2	C3
16	A2	B3	C1
17	A2	B3	C2
18	A2	B3	C3
19	A3	B1	C1
20	A3	B1	C2
21	A3	B1	C3
22	A3	B2	C1
23	A3	B2	C2
24	A3	B2	C3
25	A3	B3	C1
26	A3	B3	C2
27	A3	B3	C3
28	A4	B1	C1
29	A4	B1	C2
30	A4	B1	C3
31	A4	B2	C1
32	A4	B2	C2
33	A4	B2	C3
34	A4	B3	C1
35	A4	B3	C2
36	A4	B3	C3

Fuente: Elaboración propia 1

5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Inicialmente, los resultados obtenidos de las simulaciones para cada una de las piezas (cuyas condiciones son explicadas en los Numerales: 5.2, 5.3 y 5.4) y que hacen parte del diseño experimental explicado en el Numeral 4.3, se muestran en los Diagramas mostrados en el presente Capítulo.

Posteriormente, se hace un análisis de medias (ANOM) mostrado mediante gráficos de líneas, en los cuales es posible identificar los resultados promedio de los niveles de cada factor experimental. Lo anterior, debido a que no hay cambios en los resultados entre las corridas de cada simulación, lo cual hace que no se produzca varianza, por lo tanto, no se hace uso del método de análisis de varianza (ANOVA) para el análisis de resultados.

Adicionalmente, se obtienen resultados de simulaciones con enmallados controlados (los cuales se aproximan a valores más confiables), que son comparados con el ANOM. Todo lo anterior, hace evidente cómo cada uno de estos factores y niveles ejercen sus influencias en los resultados sobre las deformaciones totales máximas y los esfuerzos equivalentes máximos, obtenidos en cada una de las simulaciones.

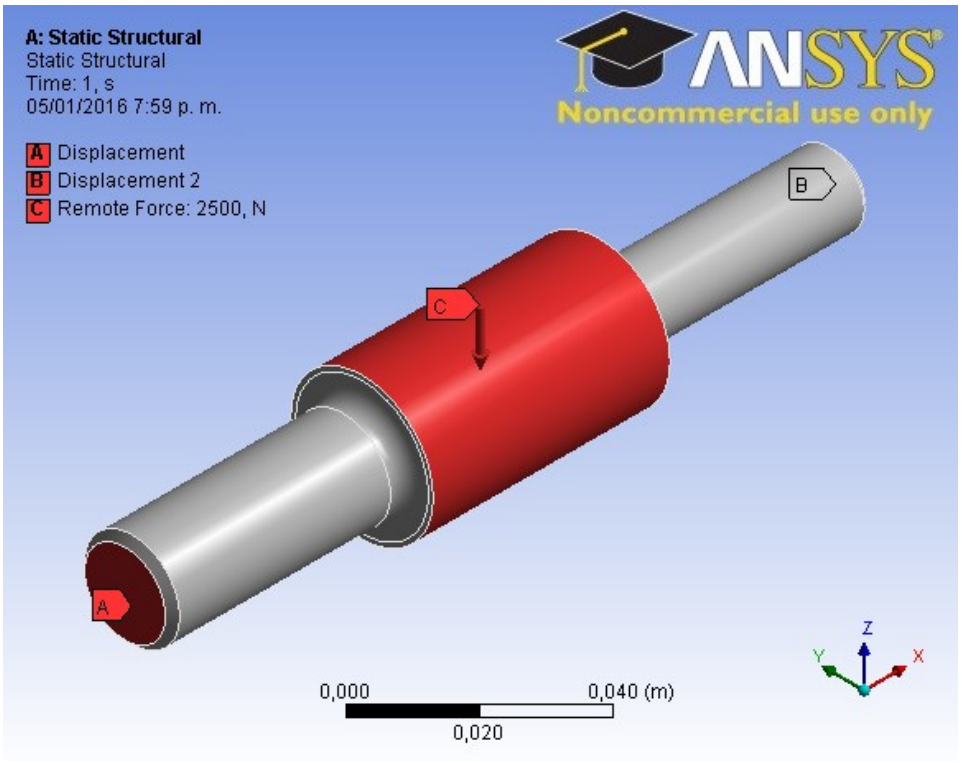
Finalmente, las gráficas de líneas que representan los análisis de medias, son explicadas y analizadas en el presente Capítulo, con el fin de posteriormente

concluir las influencias de cada una factores y niveles, y asimismo, con base en éstos obtener combinaciones, que sugieran las generaciones en CAD más convenientes en piezas con características geométricas similares.

5.2 PIEZA 1: EJE

5.2.1 Condiciones de simulación

Figura 33. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 1



Fuente: Elaboración propia

Para las condiciones de todas las simulaciones por elementos finitos de la pieza 1 (eje), realizadas en el software Ansys Workbench se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Las simulaciones son llevadas a cabo por análisis de estática estructural.
- El material utilizado en las simulaciones es Acero estructural A-36.
- El enmallado es fino por defecto y no hay controles de mallado adicionales realizados manualmente.
- Las restricciones en los apoyos son de tipo simple (desplazamiento en el eje Z), éstas están ubicadas en las caras planas que se localizan en los extremos de la pieza (ver Figura 33).
- La carga que se aplica en el eje es remota, corresponde a una fuerza de 2500 N en dirección Z-, se localiza justo en el centro de la pieza a lo largo del eje X (ver Figura 33), sometiéndola a flexión.
- Finalmente, los resultados evaluados en las simulaciones corresponden a la deformación total máxima y al esfuerzo equivalente máximo (von-Mises).

5.2.2 Simulación con enmallado controlado

A partir de la simulación del eje con el enmallado controlado (bajo las mismas condiciones de simulación explicadas en el Numeral 5.2.1), se obtienen valores de referencia para la deformación total máxima y el esfuerzo equivalente máximo, para ser comparados con las simulaciones experimentales.

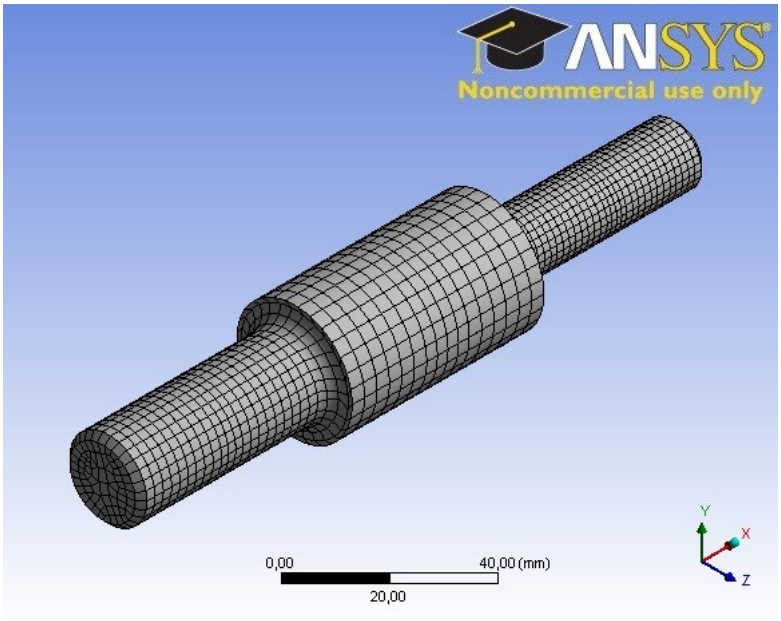
Los controles de enmallado utilizados para llevar a cabo la simulación por elementos finitos, en el software Ansys® Workbench, se relacionan a continuación:

- Método de hexaedro dominante
- Mapeo de caras en la discretización de la pieza.
- Enmallado con elementos finos.

- Tamaño de elemento por defecto.
- Alta suavidad en el tamaño de los elementos.
- Transición lenta entre los elementos.
- Las demás configuraciones son por defecto.

Así mismo, en la Figura 34 se puede observar la imagen del enmallado controlado. Los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos, a partir de éste enmallado, corresponden a una deformación total máxima de 0,098374 mm y un esfuerzo equivalente máximo de 204,19 MPa.

Figura 34. Discretización del eje con enmallado controlado

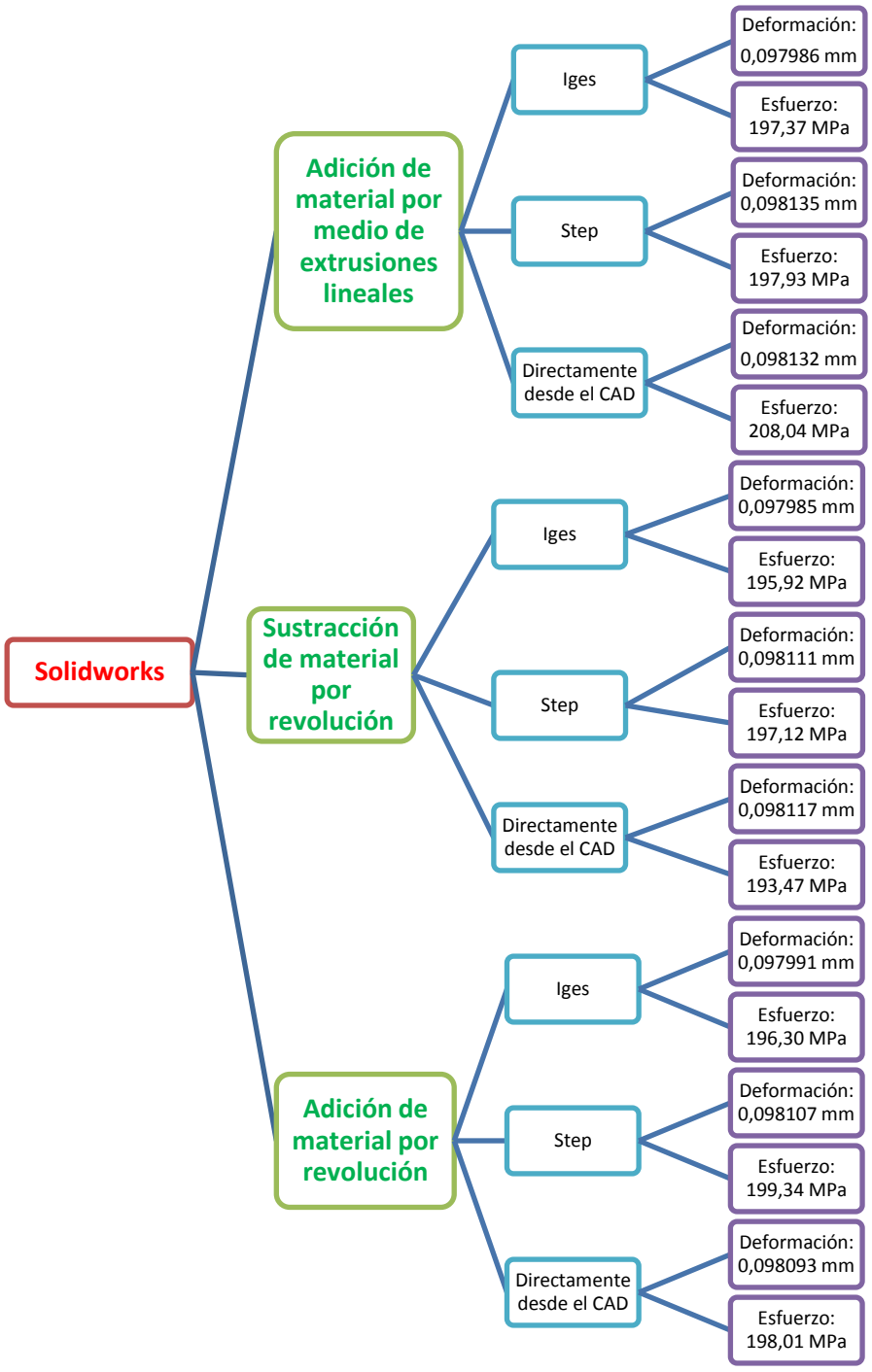


Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Presentación de resultados experimentales

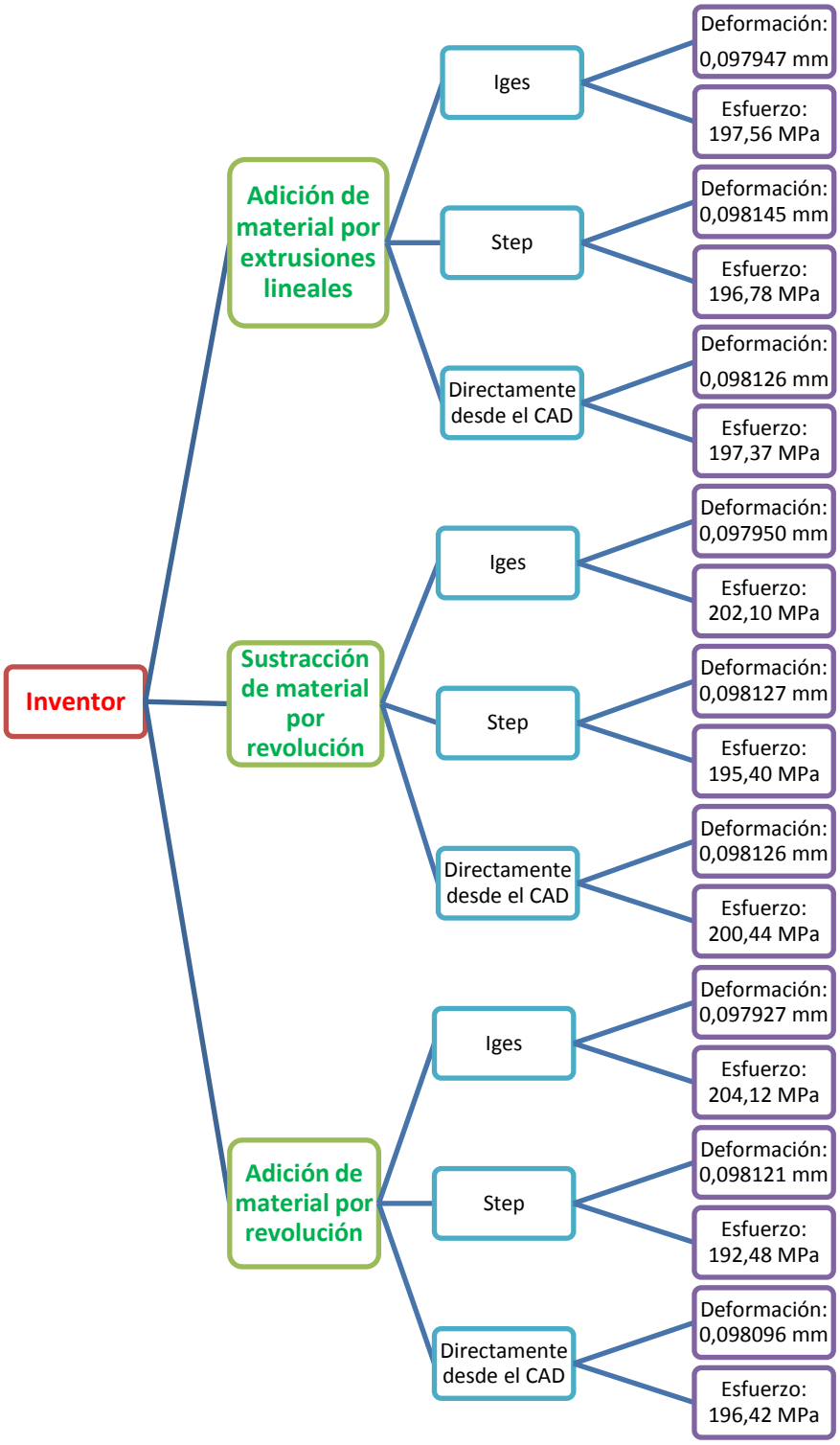
A continuación se presentan los resultados experimentales, de deformación total máxima y esfuerzo equivalente máximo, de cada una de las simulaciones realizadas, discriminadas principalmente por software CAD, seguido de las operaciones de generación de geometría y por último el factor de la importación de la geometría al CAE.

Diagrama 1. Resultados pieza 1 - software Solidworks



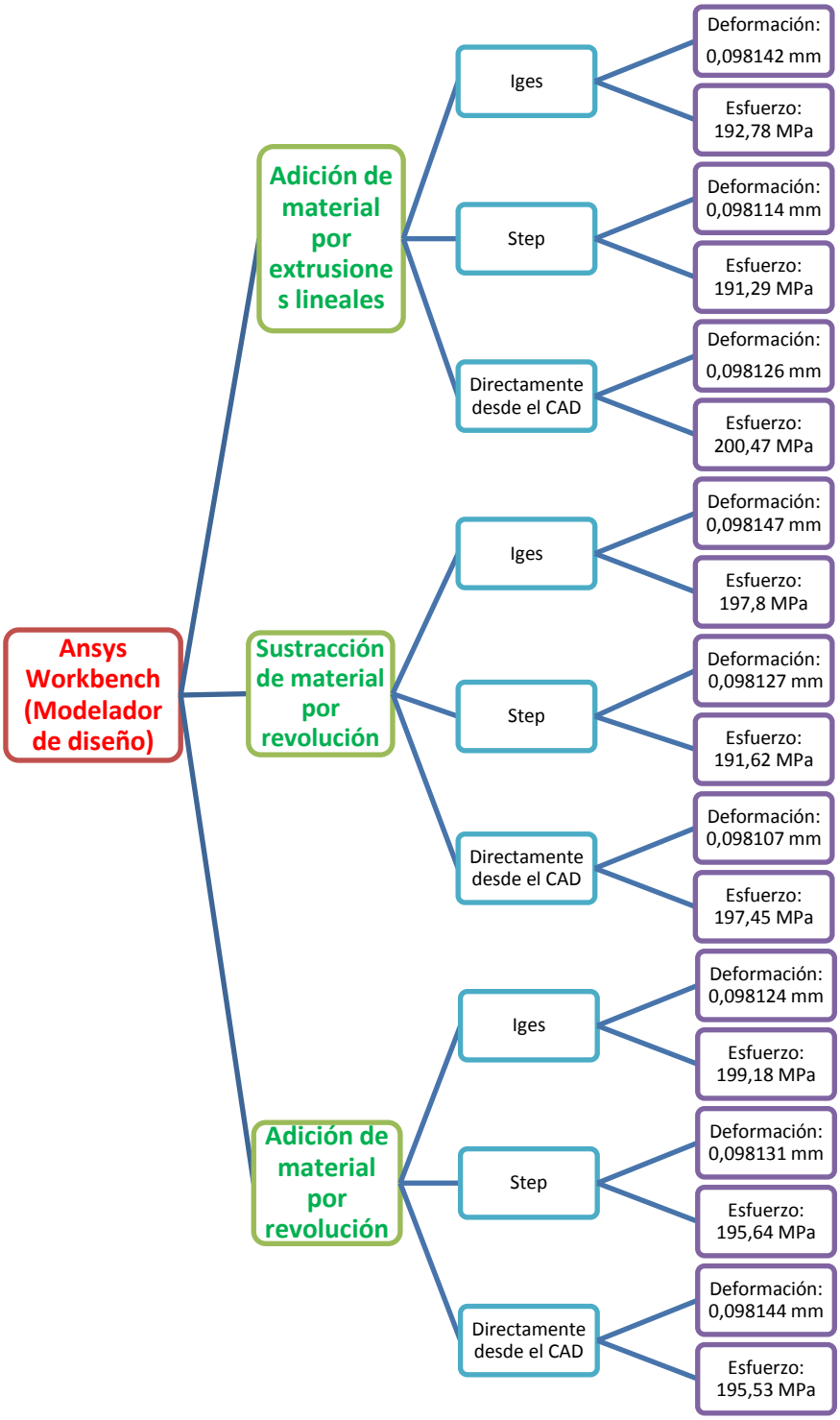
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 2. Resultados pieza 1- software Inventor



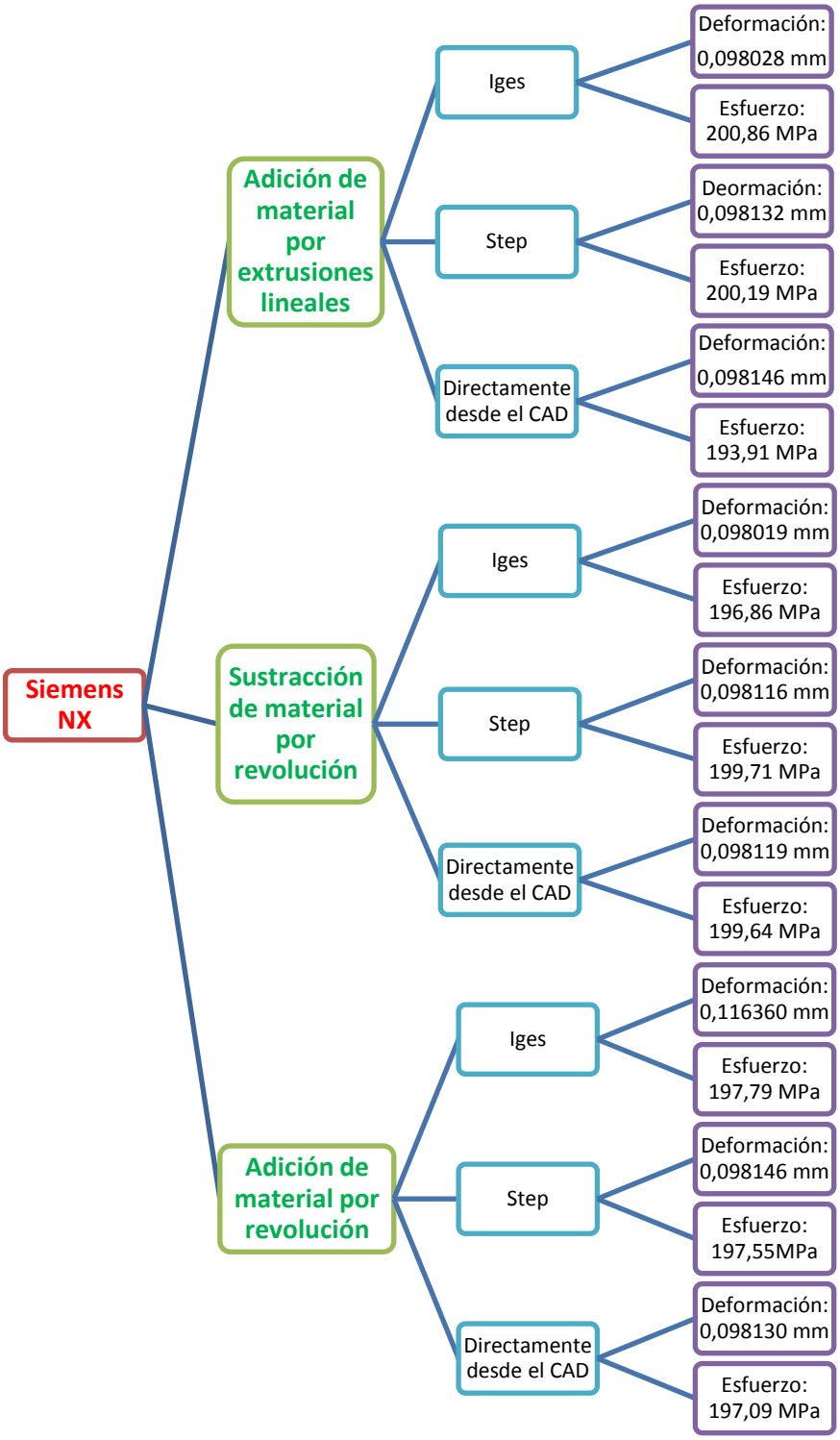
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 3. Resultados pieza 1 - software Ansys Workbench



Fuente: Elaboración propia

Diagrama 4. Resultados pieza 1 - software Siemens NX



Fuente: Elaboración propia

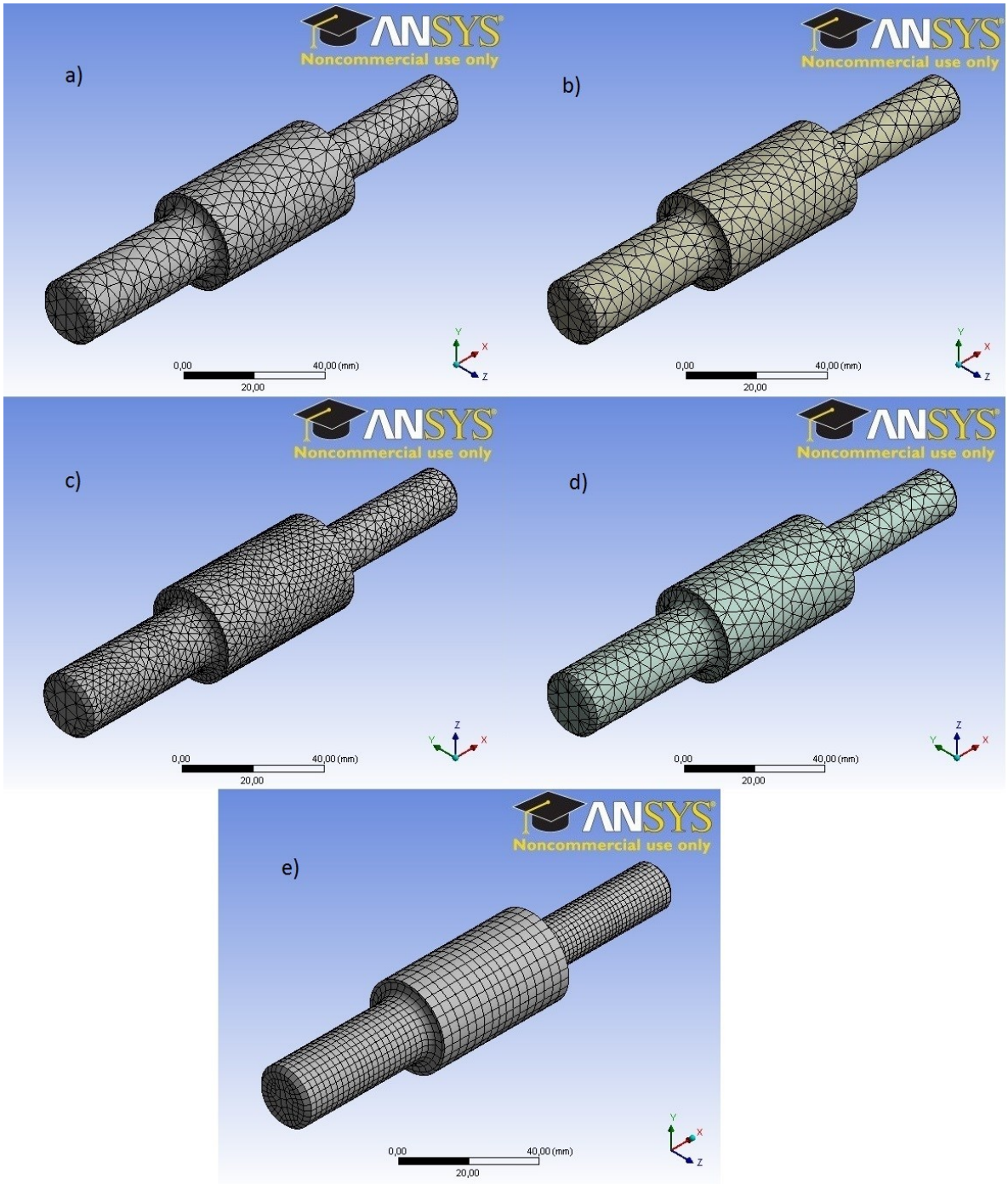
5.2.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos

A continuación, se muestra algunos mallados de los experimentos en el eje, que corresponden a los realizados en las simulaciones del software CAE, adicionalmente, se comparan discriminando por cada uno de los factores y con el enmallado controlado.

- Factor CAD:

En la Figura 35, se observa gráficamente como varia la forma en la que se genera el enmallado fino por defecto, en el eje, cuando se utilizan diferentes software CAD y se mantiene la generación de geometría por extrusiones lineales con archivo de exportación IGES. En cuanto al enmallado, se ve que en el Literal *c* se forman una mayor cantidad de elementos y de nodos, lo que hace una malla más fina y continua en más lugares que las demás, siendo la que más se acerca al de la mostrada en el Literal *e* que es una malla elaborada con un refinamiento manual; las transiciones en los cambios de sección no son suaves, y son prácticamente iguales en todos los CAD; tanto en el Literal *a* como en *d*, se presenta una lineal horizontal que atraviesa toda la pieza de lado a lado, generando una concentración de nodos en dicha parte, igualmente, se presentan mallas que no son uniformes. Por otro lado, el enmallado de ésta pieza, cambia bastante con respecto al generado por mallado controlado (Literal *e*), en el cual los elementos son: hexaédricos, muy uniformes, y no se observan cambios en las vecindades de cada elemento.

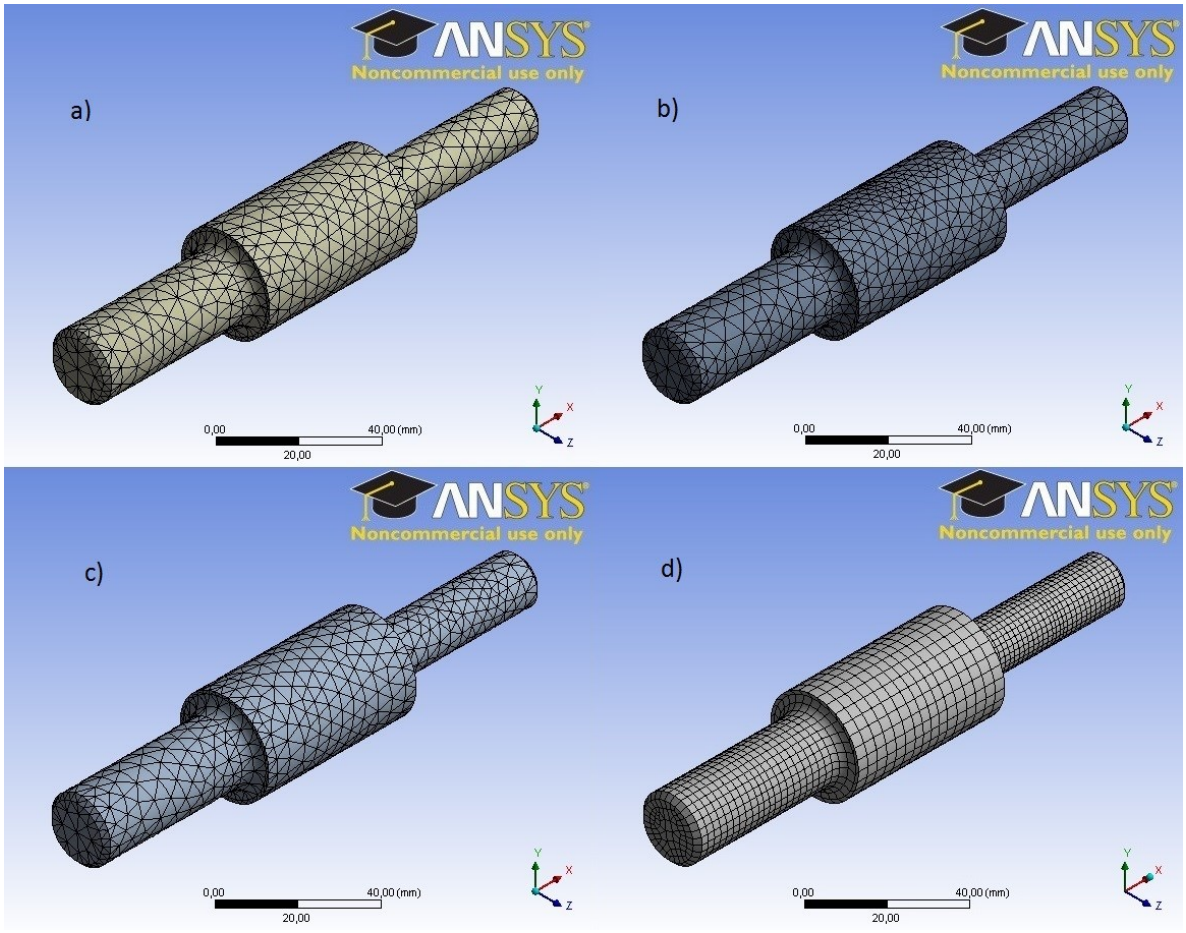
Figura 35. Enmallados del eje variando CAD. a) A1-B1-C1, b) A2-B1-C1, c) A3-B1-C1, d) A2-B1-C1 y e) enmallado refinado



Fuente: Elaboración propia

- Factor generación de geometría:

Figura 36. Enmallados del eje variando operaciones. a) A2-B1-C1, b) A2-B2-C1, c) A2-B3-C1 y d) enmallado refinado



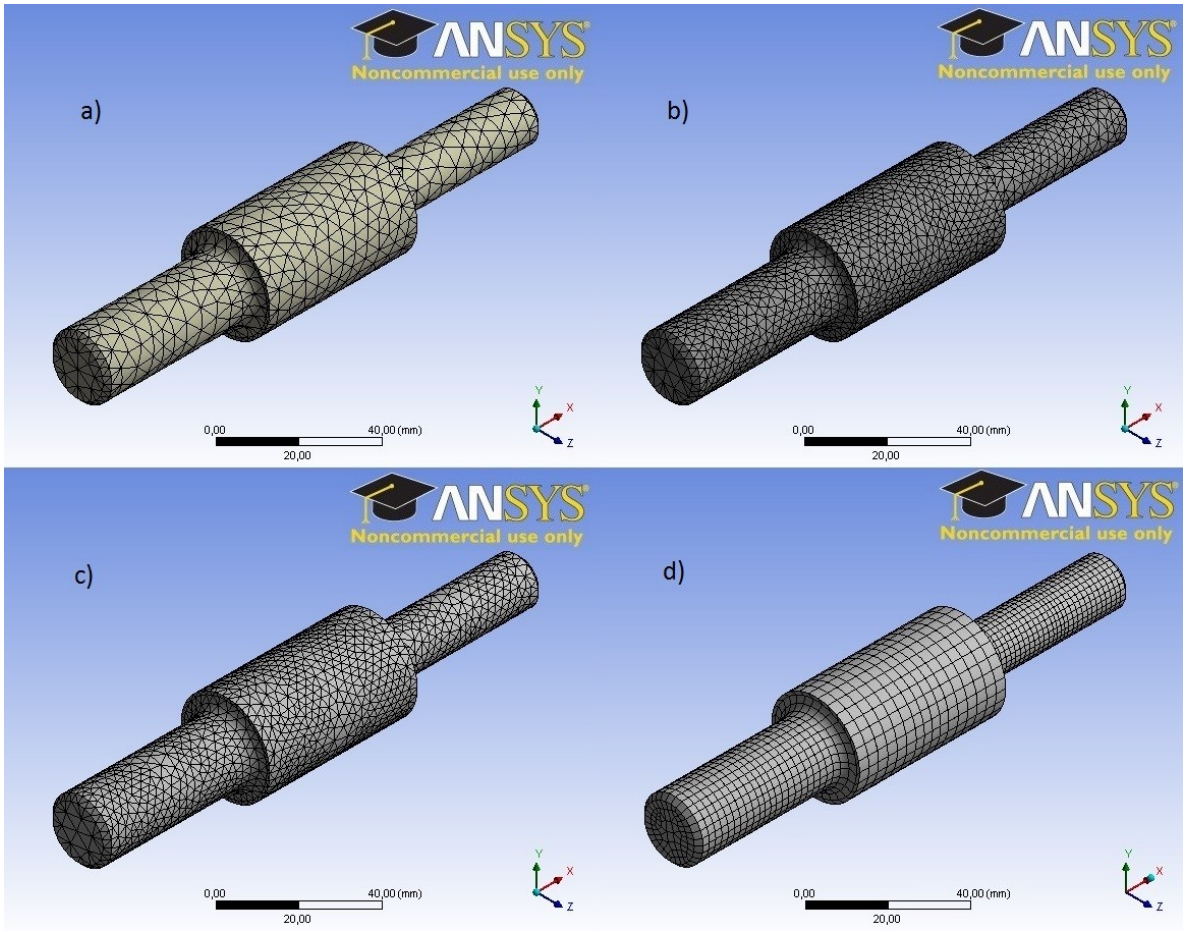
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los efectos de la generación de la geometría en los enmallados, en la Figura 36 se ve la comparación, usando el mismo software CAD como Inventor® y el tipo de exportación IGES. En el Literal *a* y *c*, se aprecia un menor número de elementos, lo que hace que se genere una malla más grande y no tan uniforme, en el Literal *b*, se ven zonas con un tamaño de los elementos muy pequeños y otras zonas con tamaños grandes, generando discontinuidad en la malla como

parches; en los cambios de sección no se aprecia cambios significativos, sin embargo, las transiciones no son suaves, las Literales *a, b* y *c* se alejan bastante de ser similares al Literal con refinamiento controlado *d*.

- Factor archivo de exportación:

Figura 37. Enmallados del eje variando archivo de exportación. a) A2-B1-C1, b) A2-B1-C2, c) A2-B1-C3 y d) enmallado refinado



Fuente: Elaboración propia

Para los archivos de exportación y siguiendo la metodología, se mantuvo el software Inventor® y la generación de geometría de extrusiones lineales, como se aprecia en la Figura 37. La diferencia más notable es la del Literal *a* de archivo IGES, ya que tiene una malla más grande, un menor número de nodos genera unos elementos más grandes, por otro lado se observa el Literal *b* de archivo STEP, que tiene un enmallado más fino, debido a una mayor cantidad de nodos que hace que tenga más elementos y más compactos, siendo esta la de la malla más continua; en la figura *c* de exportación directa, hay una mezcla de los dos anteriores archivos, se ven parches, mayormente con elementos finos pero en varias zonas con elementos grandes, generando discontinuidades en el enmallado. En cuanto a las transiciones de los cambios de sección, el Literal *b* y *c* son más suaves y continuos en estos puntos que los del Literal *a*.

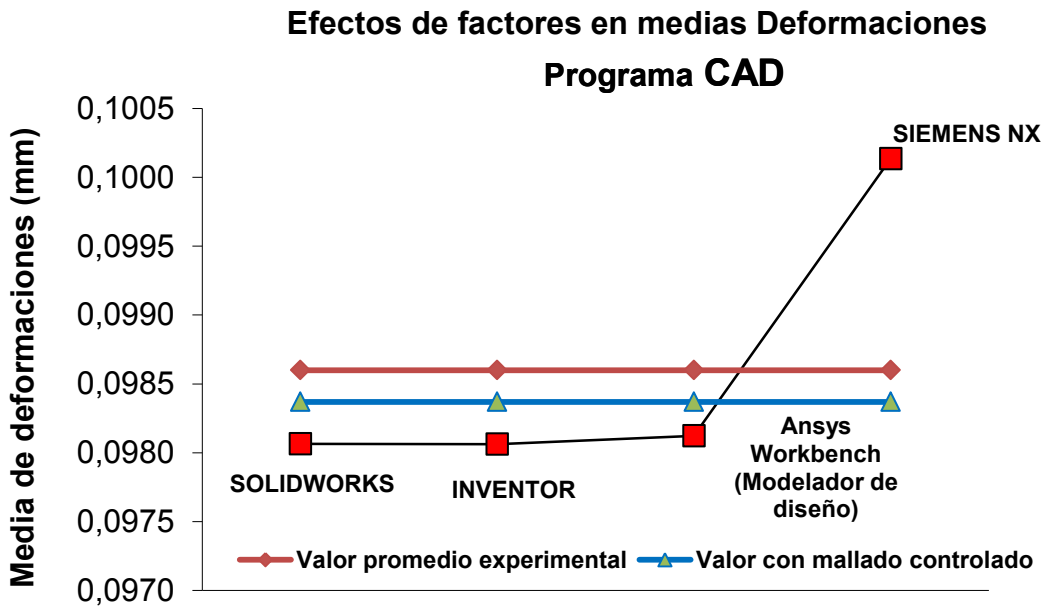
Con base en las Figuras presentadas anteriormente, se puede concluir que, el archivo de exportación es el que genera una mayor variabilidad en la generación de los mismos (seguido de la generación de geometría), perturbando el número de nodos, tamaño de elementos, continuidad de la malla y suavidad en los cambios de sección. De esta forma, los resultados de deformación total máxima y esfuerzos equivalentes máximos se pueden ver levemente alterados debido a la baja uniformidad del enmallado en toda la pieza del eje.

5.2.5 Análisis de resultados

En esta sección, se analiza en detalle los efectos de cada uno de los factores involucrados en el diseño de experimentos para la pieza número uno, para el eje, a partir de los resultados mostrados anteriormente (Diagrama 1-Diagrama 4),

comparados con el valores promedios y con los obtenidos mediante el mallado controlado.

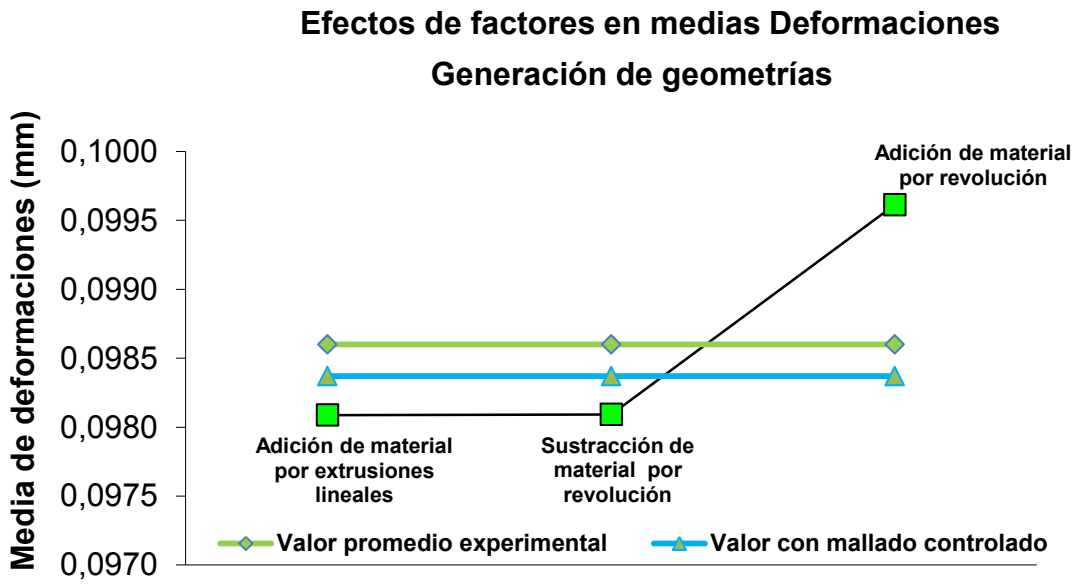
Figura 38. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 38 se puede observar gráficamente el efecto del tipo de software CAD usado en los resultados del valor medio de las deformaciones en el eje. Se puede apreciar que el rango de los resultados más extremos es muy pequeño, del orden de los 2 micrómetros. Por lo tanto, en el caso del eje la influencia que tiene el software CAD no es muy significativa en el resultado de la deformación media, igualmente los resultados son muy cercanos al valor con mallado controlado. Sin embargo cabe resaltar que el programa que se comporta diferente a los demás es el de Siemens NX®, el cual tiene una media levemente superior, lo que hace que se aumente el valor promedio experimental.

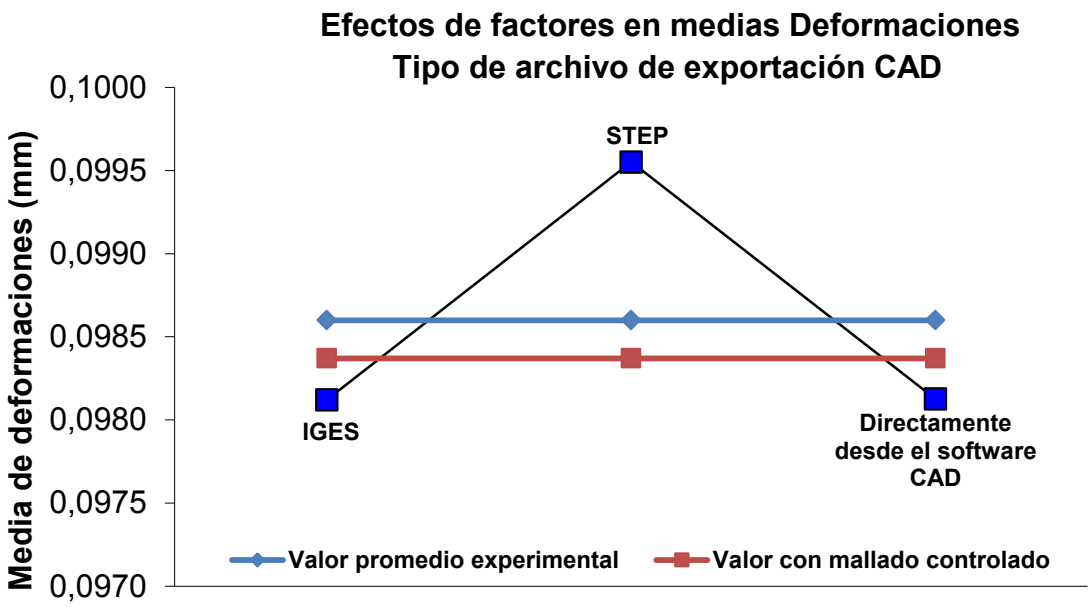
Figura 39. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39, se observa el efecto de la forma de generar la geometría en la media de la deformación en el eje. Igual que en el factor uno, el rango de valores extremos en la deformación es muy pequeño (del orden de 1,5 micrómetros). Debido a lo anterior, la forma de generación de la geometría no tiene una influencia significativa en la media de las deformaciones en la pieza del eje, cabe resaltar que la operación de adición de material por revolución tuvo una media mayor que las otras dos operaciones y se alejó más del valor con mallado controlado.

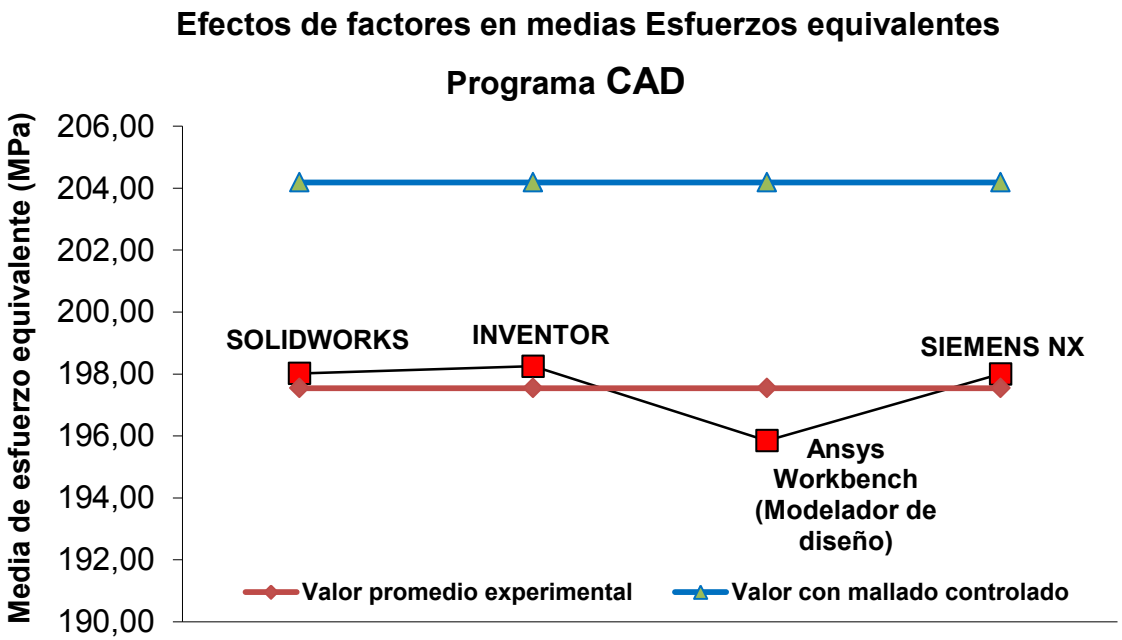
Figura 40. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40, se observa el efecto del tipo de archivo de exportación en la media de la deformación en el eje. Igual que en los demás factores, el rango de valores extremos en la deformación es muy pequeño (del orden de 1,5 micrómetros). Debido a lo anterior, el tipo de archivo de exportación no tiene una influencia significativa en la media de las deformaciones en la pieza del eje. Por otro lado, el archivo de exportación STEP tuvo una media más alta que los demás tipos, y debido a la escala de la gráfica se aumenta una diferencia que es casi imperceptible.

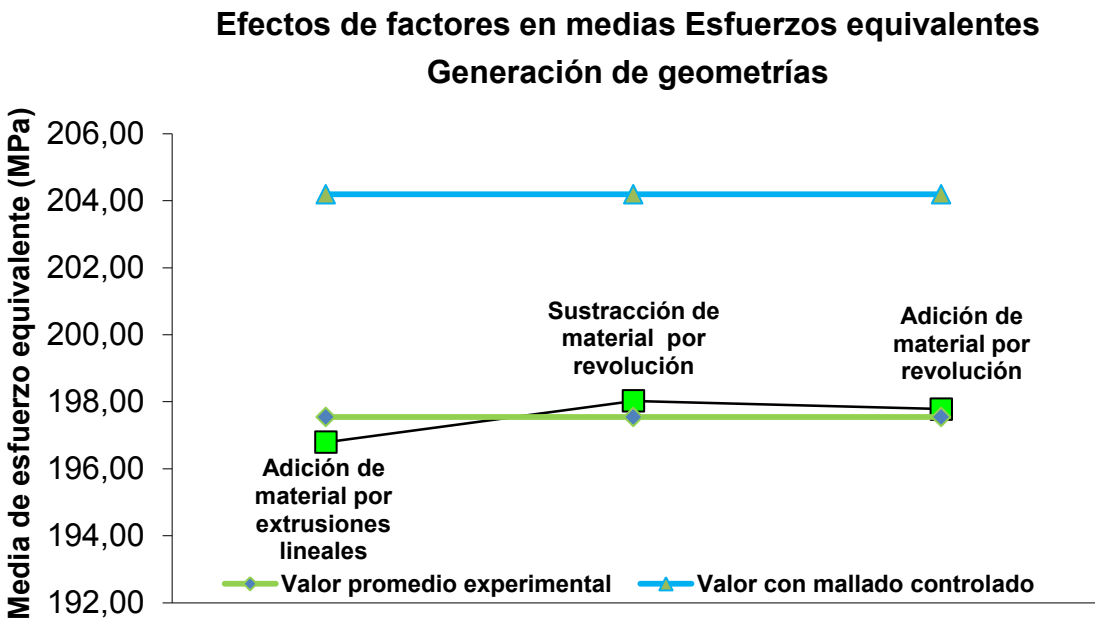
Figura 41. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

El efecto que tienen los programas CAD en las medias de los esfuerzos equivalentes en el eje, se puede observar en la Figura 41, en ella se aprecia el reducido rango de diferencia en los resultados, del orden de los 2,15 MPa que se da principalmente por la media del software Ansys Work Bench®, que es la más baja y la más alejada del valor promedio. Se puede afirmar que el software CAD no es muy sensible en la influencia de los resultados en el esfuerzo equivalente para un eje, pero existe una diferencia significativa del resultado con un mallado controlado y el promedio de los resultados de los esfuerzos, de alrededor de 6,65 Mpa.

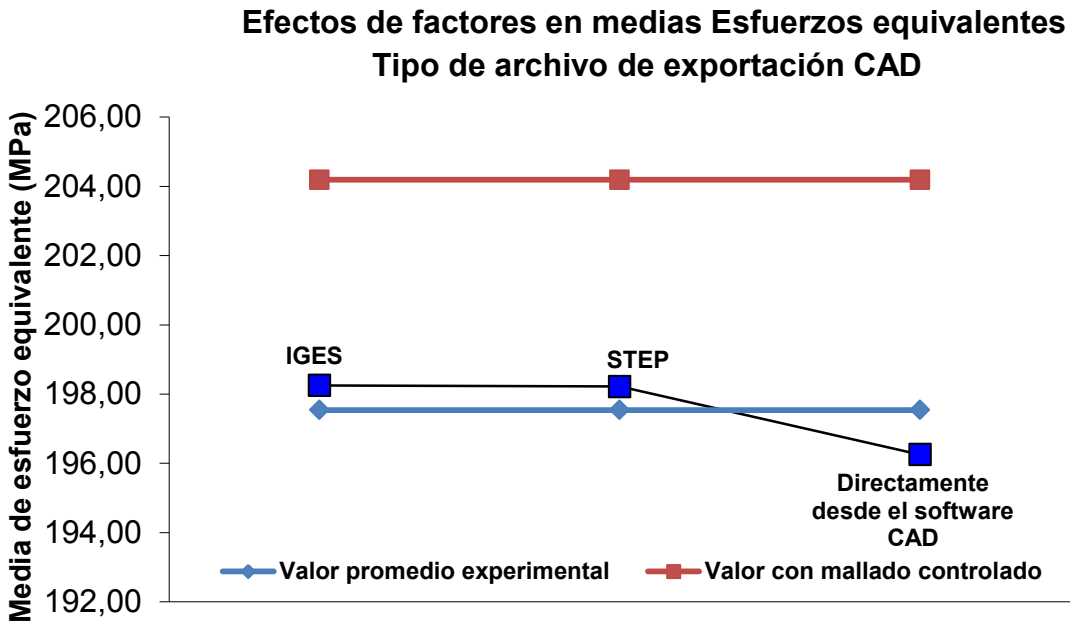
Figura 42. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los efectos de las operaciones de generación de geometría en el esfuerzo equivalente para un eje, en la Figura 42 se observa que no hay una diferencia visualmente apreciable entre los tres diferentes niveles de operaciones, con un rango máximo de 1,24 MPa; siendo el más sensible al cambio la operación de adición de material. Cabe resaltar en esta gráfica, que existe una diferencia mayor entre el promedio de los tres resultados de esfuerzos y el valor con mallado controlado, de cerca de 6,65 MPa.

Figura 43. Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza uno



Fuente: Elaboración propia

Para finalizar con la pieza del eje, en la Figura 43 se aprecia la influencia que tiene la forma en la que exporta la geometría al CAE, entre los tres resultados no hay mucha diferencia, solo un cambio de 2 MPa entre los archivos IGES – STEP y la exportación directa, siendo esta última el nivel más sensible. Cabe resaltar que existe una diferencia de 6,65 MPa entre el valor promedio experimental y el valor con mallado controlado.

Por otro lado, en la pieza número uno todos los experimentos generaron resultados en la deformación total muy cercanos al valor teórico con mallado controlado, siendo el más cercano el realizado con software CAD del modelador de Ansys® Workbench, usando solo adición de material y exportando la geometría en el archivo IGES (A3-B1-C1) con una diferencia de solo 0,00025 mm por debajo.

Sin embargo, el experimento más alejado fue el del software Siemens NX®, adición de material por revolución y archivo de exportación IGES (A4-B3-C1), con una diferencia de 0,0179 mm por encima.

Para los resultados del esfuerzo equivalente, todos los experimentos se comportan de manera diferente, el experimento que más se acerca al valor teórico con mallado controlado es el realizado con software Inventor®, adición de material por revolución y archivo de exportación IGES (A2-B3-C1), con una diferencia de 0,07 MPa por debajo. No obstante, el experimento que peor se comporto es el realizado con el software del modelador de Ansys® Workbench, adición de material y archivo de exportación STEP (A3-B1-C2), con una diferencia de 12,9 MPa por debajo del valor teórico.

Todo lo anterior y con base en los resultados, conlleva a inferir a continuación las combinaciones, entre los distintos niveles, que más se aproximan a los valores máximos, con enmallado controlado para la deformación total máxima y esfuerzo equivalente máximo para el eje.

Diagrama 5. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima del eje



Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 5, se observa los distintos niveles de cada factor, que se sugieren utilizar para realizar las simulaciones sobre un eje, y que se aproximan a los valores de la deformación total máxima con enmallados controlados.

Diagrama 6. Combinaciones más aproximadas para los esfuerzos equivalentes máximos del eje



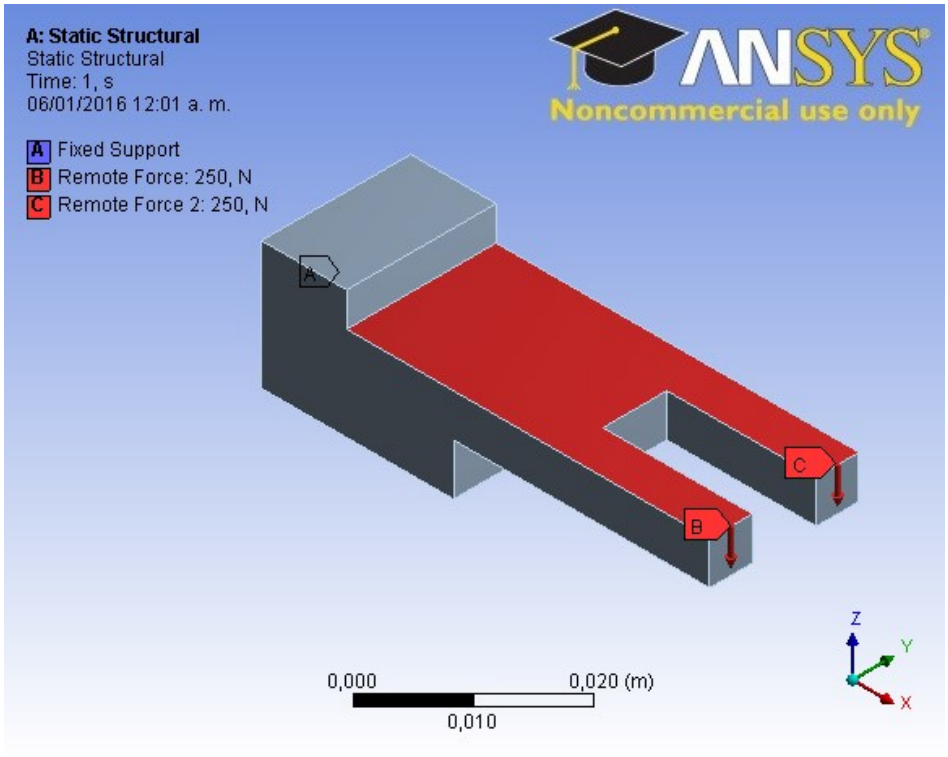
Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 6, se observa los distintos niveles de cada factor, que se sugieren usar para realizar las simulaciones sobre un eje, y que se aproximan a los valores de los esfuerzos equivalentes máximos con enmallados controlados.

5.3 PIEZA 2: BLOQUE PRISMÁTICO

5.3.1 Condiciones de simulación

Figura 44. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 2



Fuente: Elaboración propia

Las condiciones para todas las simulaciones por elementos finitos que corresponden a la pieza 2, son las siguientes:

- Todas las simulaciones son llevadas a cabo por análisis de estática estructural.
- El material utilizado en las simulaciones es Acero estructural A-36.
- El enmallado es fino por defecto y no hay controles de mallado adicionales realizados manualmente.

- Se dispone de una restricción de tipo soporte fijo en la parte posterior del bloque, así como se muestra en la Figura 44 señalado con la letra A.
- Se aplican dos cargas (de 250 N cada una) en los extremos del bloque y en dirección Z-. Estas cargas están señaladas en la Figura 44 con las letras B y C. A su vez, dichas cargas efectúan flexión en voladizo sobre la pieza.
- Finalmente, los resultados evaluados en las simulaciones corresponden a la deformación total máxima y al esfuerzo equivalente máximo (von-Mises).

5.3.2 Simulación con enmallado controlado

A partir de la simulación del bloque prismático con el enmallado controlado (bajo las mismas condiciones de simulación explicadas en el Numeral 5.3.1), se obtienen valores de referencia para la deformación total máxima y el esfuerzo equivalente máximo, para ser comparados con las simulaciones experimentales.

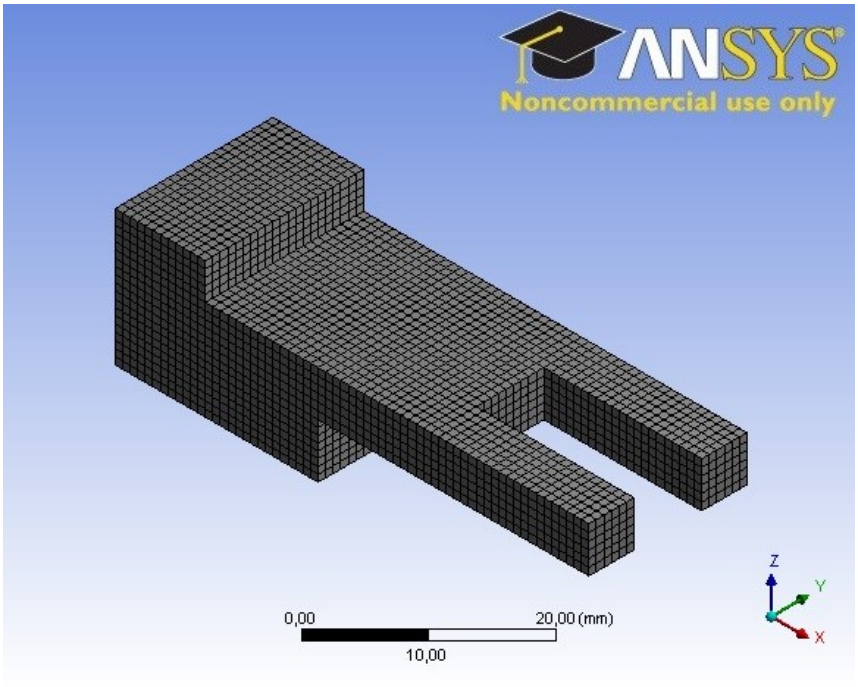
Los controles de enmallado utilizados para llevar a cabo la simulación por elementos finitos, en el software Ansys® Workbench, se relacionan a continuación:

- Método de hexaedro dominante
- Mapeo de caras en la discretización de la pieza.
- Enmallado con elementos finos.
- Tamaño de elemento por defecto.
- Alta suavidad en el tamaño de los elementos.
- Transición lenta entre los elementos.
- Las demás configuraciones son por defecto.

Así mismo, en la Figura 45 se puede observar la imagen del enmallado controlado. Los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos, a partir de éste

enmallado, corresponden a una deformación total máxima de 0,16762 mm y un esfuerzo equivalente máximo de 234,39 MPa.

Figura 45. Discretización del bloque prismático con enmallado controlado

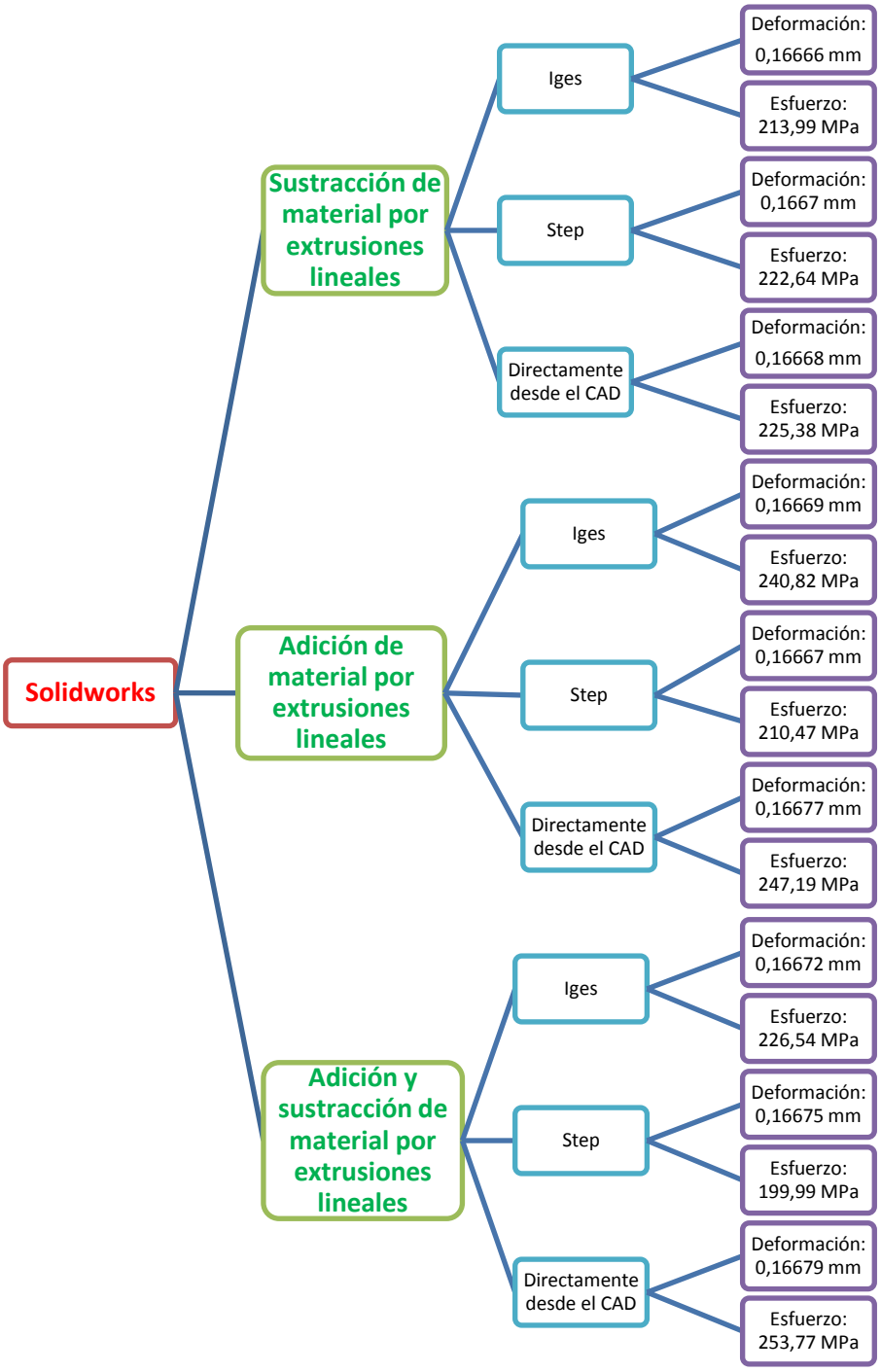


Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Presentación de resultados experimentales

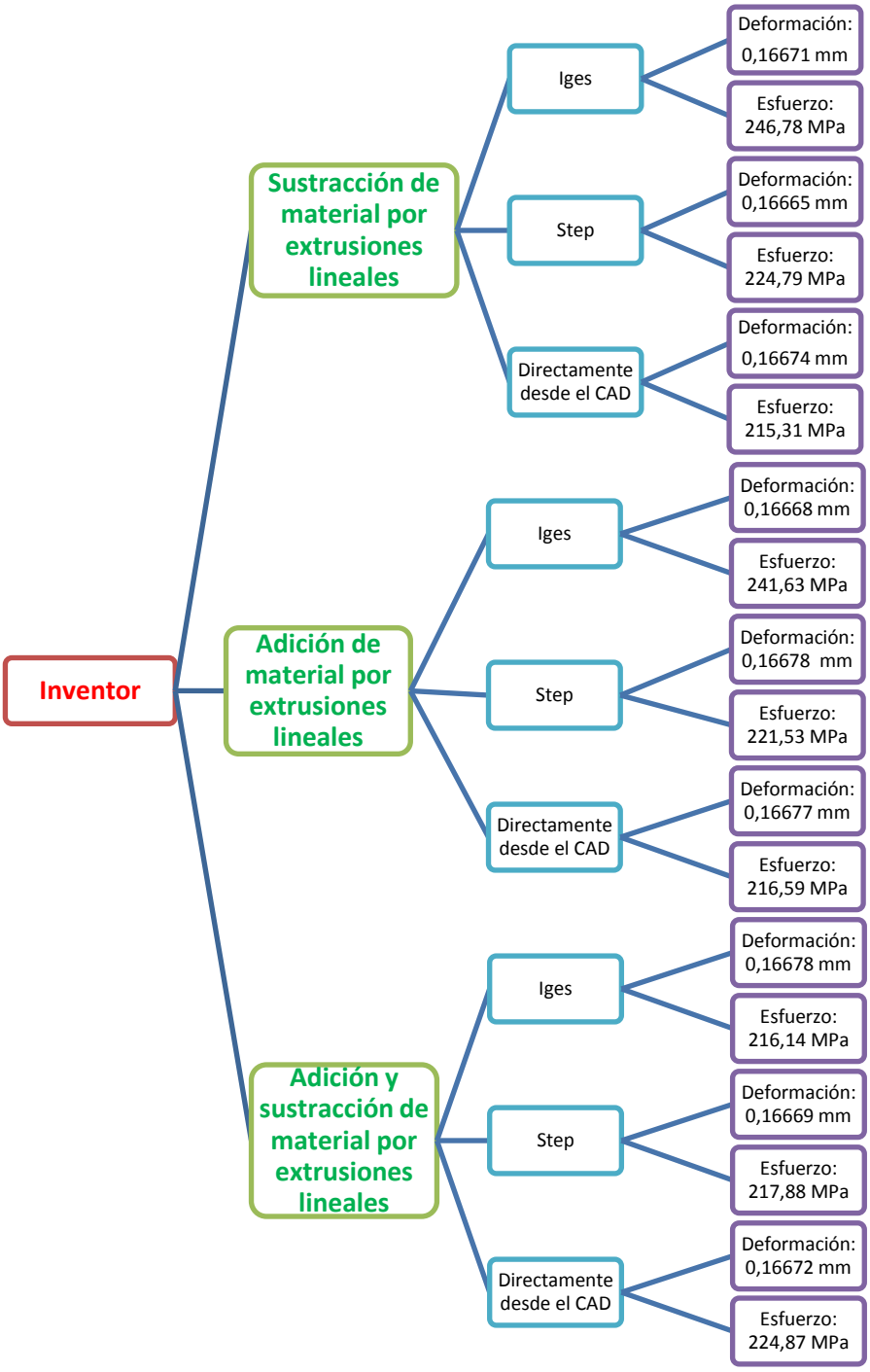
A continuación se presentan los resultados experimentales, de deformación total máximo y esfuerzo máximo, de cada una de las simulaciones realizadas de la pieza dos, el bloque prismático, discriminadas principalmente por software CAD, seguido de las operaciones de generación de geometría y por último el factor de la importación de la geometría al CAE.

Diagrama 7. Resultados pieza 2 - software Solidworks



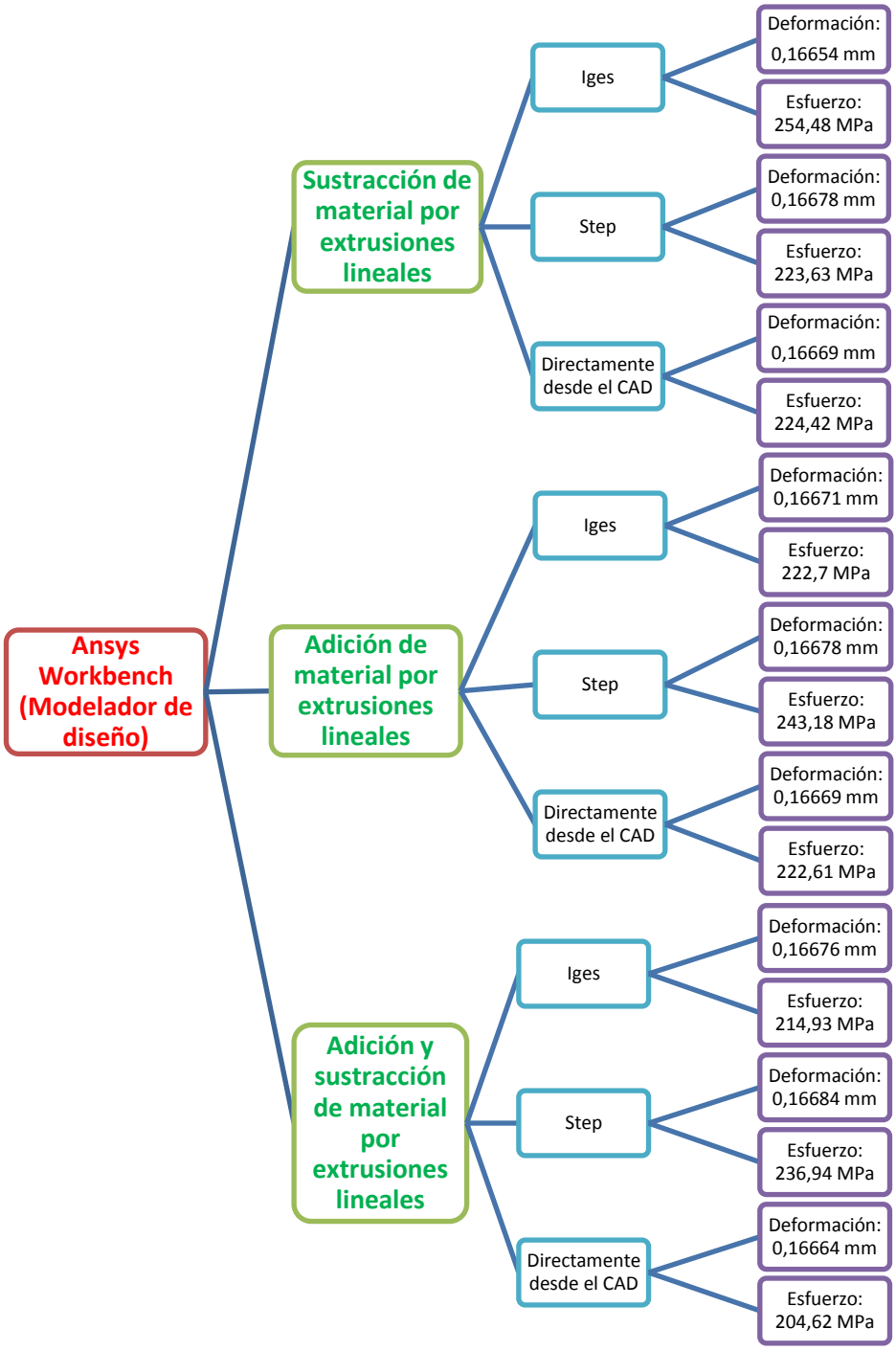
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 8. Resultados pieza 2 - software Inventor



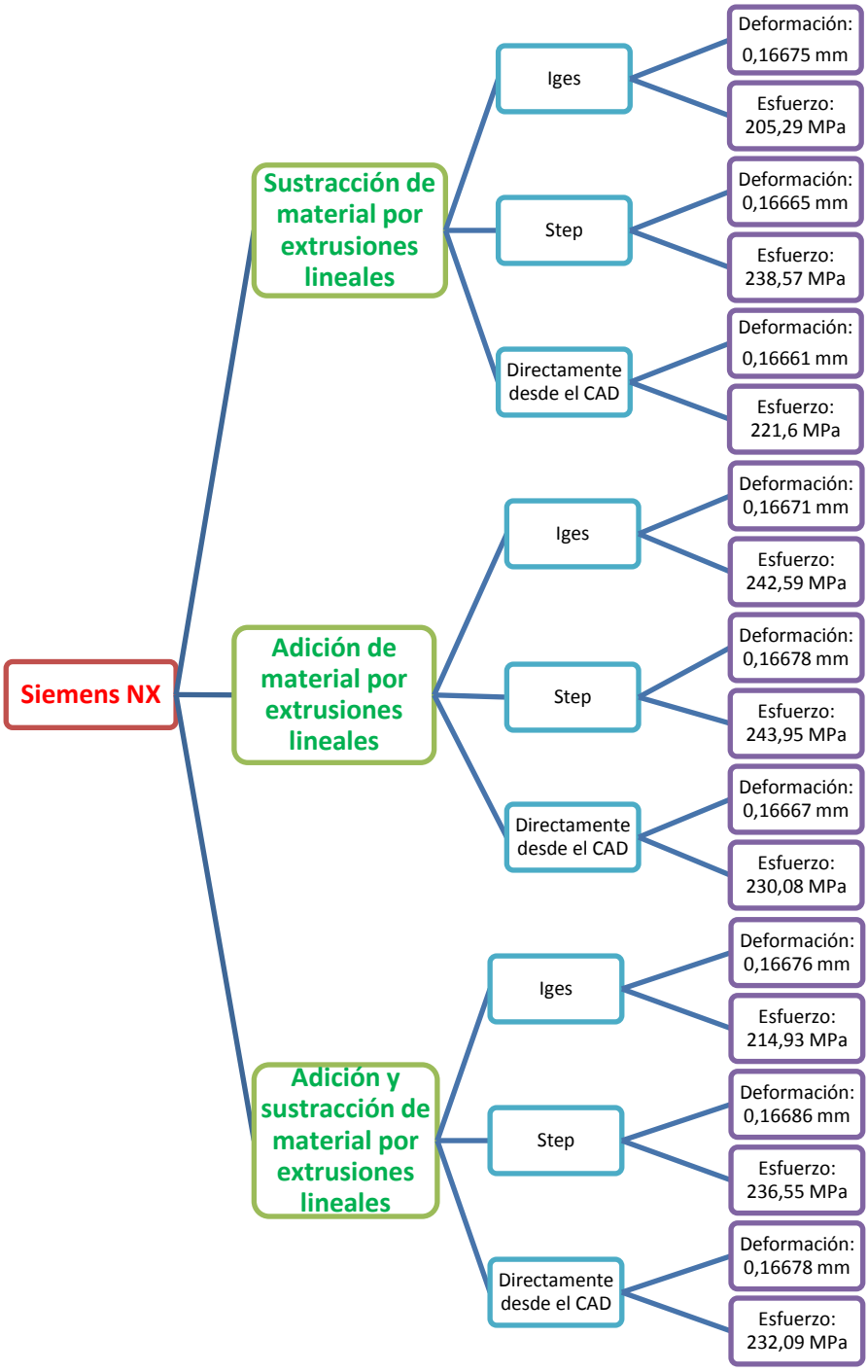
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 9. Resultados pieza 2 - software Ansys Workbench



Fuente: Elaboración propia

Diagrama 10. Resultados pieza 2 - software Siemens NX



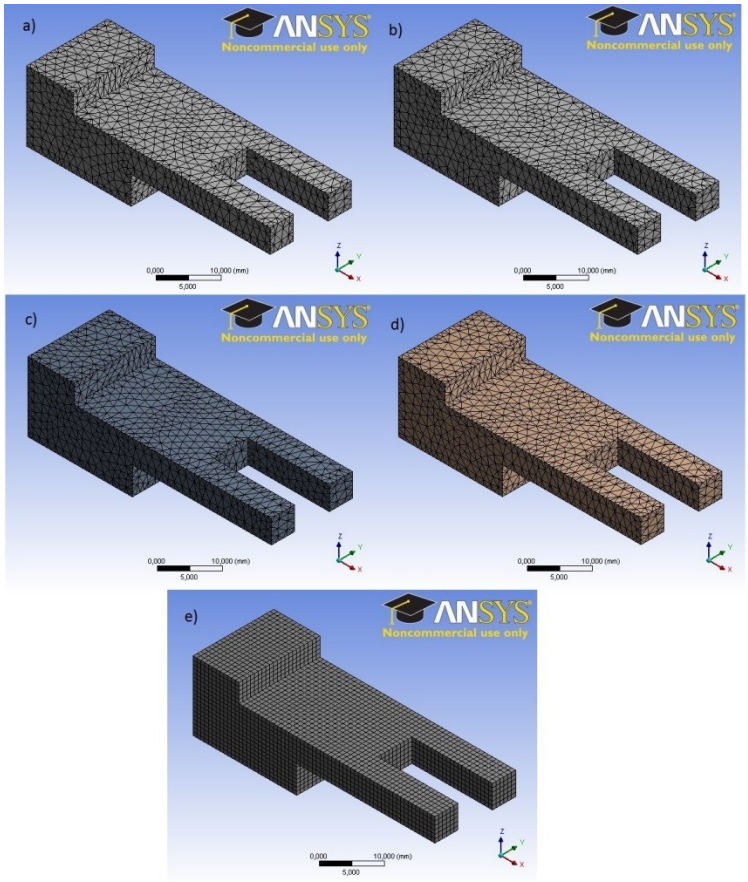
Fuente: Elaboración propia

5.3.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos

A continuación, se muestra algunos mallados de los experimentos en el bloque prismático, que corresponden a los realizados en las simulaciones del software CAE, adicionalmente, se comparan discriminando por cada uno de los factores y con el enmallado controlado.

- Factor CAD:

Figura 46. Enmallados del bloque prismático variando CAD. a) A1-B2-C3, b) A2-B2-C3, c) A3-B2-C3, d) A4-B2-C3 y e) enmallado refinado

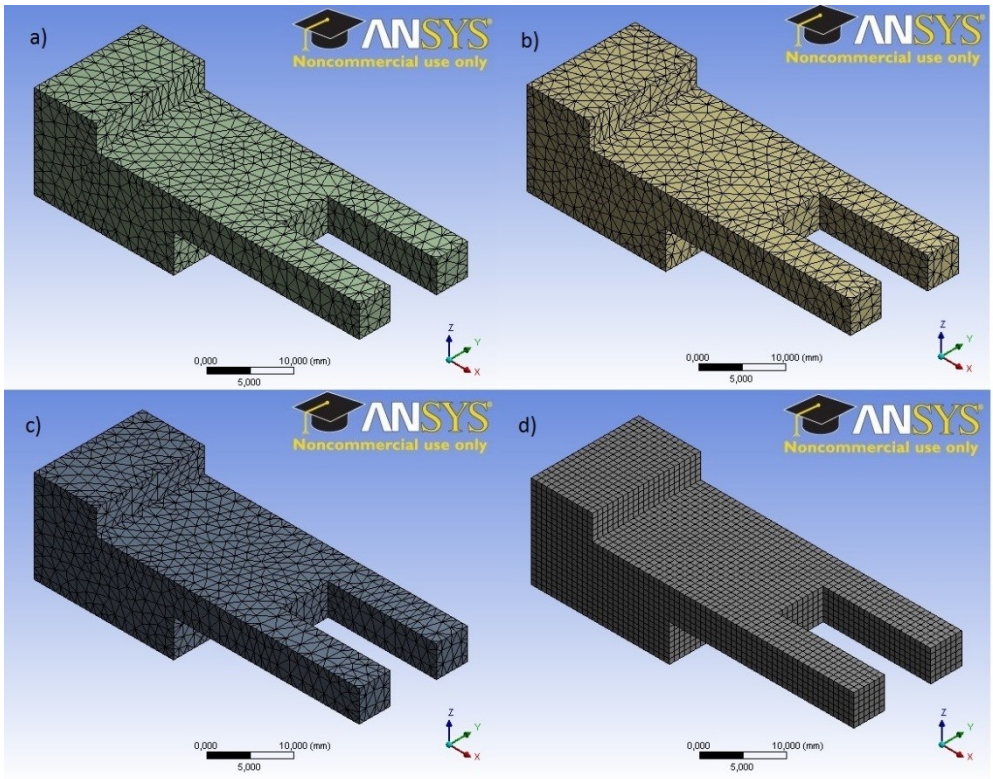


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 los enmallados que corresponden a los Literales *a*, *b* y *c*, se puede evidenciar que son muy parecidos entre sí. Éstos no tienden a ser uniformes, los elementos cambian de tamaño a lo largo de la pieza, los elementos son más pequeños en los bordes que en los centros de las caras, e incluso en las vecindades de cada elemento no haya uniformidad entre sí. Por otro lado, dichos enmallados, cambian bastante con respecto al generado por mallado controlado (Literal *e*), en el cual los elementos son: hexaédricos, más pequeños, muy uniformes, y no se observan cambios en las vecindades de cada elemento.

- Factor generación de geometría:

Figura 47. Enmallados del bloque prismático variando generación de geometría. a) A3-B1-C2, b) A3-B2-C2, c) A3-B3-C2 y d) enmallado refinado

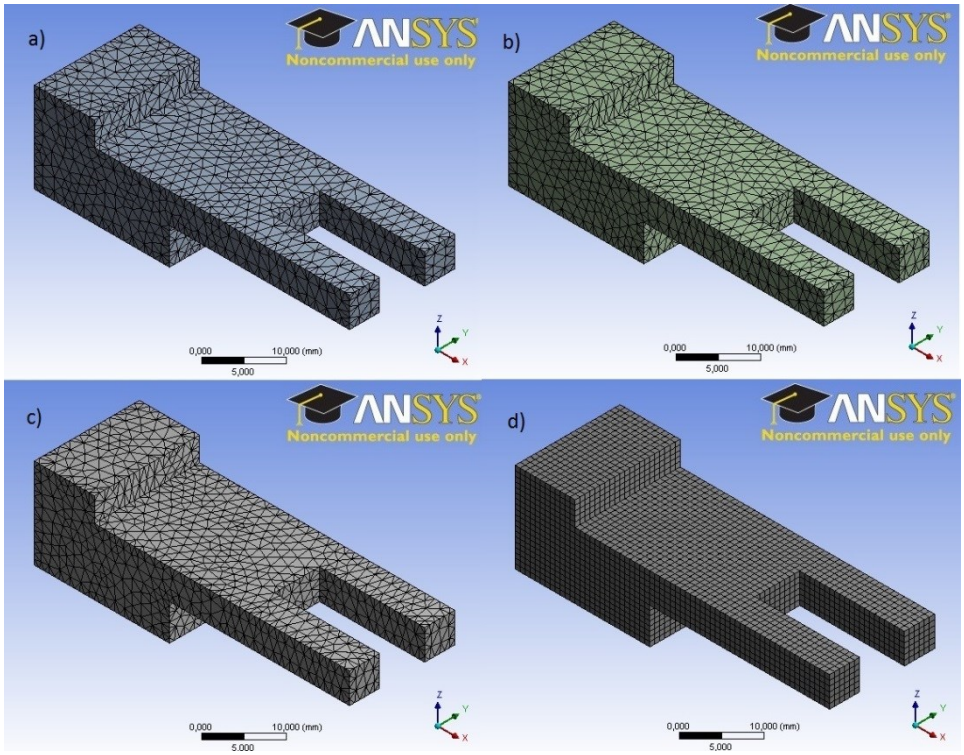


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47, se tienen algunos de los enmallados de los experimentos con el bloque prismático, con el software CAD Ansys® Workbench, y el archivo de exportación STEP, pero variando las operaciones de generación geométrica. En los Literales *a*, *b* y *c*, se evidencia que los mallados son parecidos, que no hay uniformidad en la distribución de los elementos, los tamaños de los elementos son diferentes, y tienden a ser más pequeños cuando se enmalla los bordes y los vértices de la pieza. Por otra parte, los elementos de los Literales *a*, *b* y *c*. son de tipo tetraédrico, mientras que en el mallado en el Literal d, contiene elementos de tipo hexaédrico, adaptándose mejor a la discretización de la pieza.

- Factor archivo de exportación:

Figura 48. Enmallados del bloque prismático variando archivo de exportación. a) A4-B1-C1, b) A4-B1-C2, c) A4-B1-C3 y d) enmallado refinado



Fuente: Elaboración propia

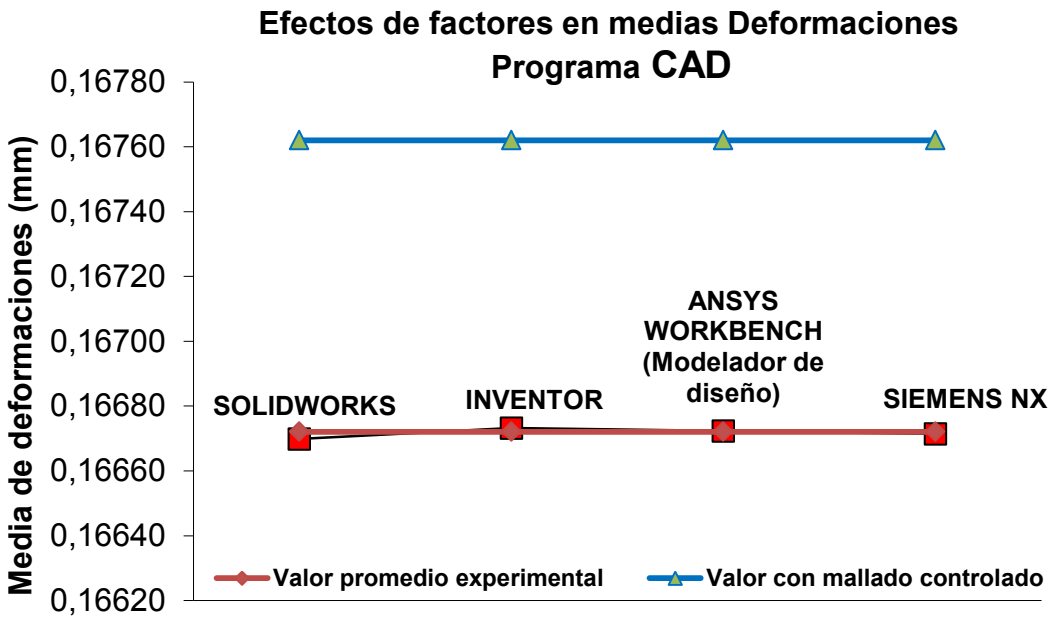
Algunos mallados de los experimentos con el bloque prismático, que corresponden a los realizados con el software CAD Ansys® Workbench, y la sustracción de material por extrusiones lineales, pero variando el tipo de archivo de exportación son mostrados en la Figura 48. En los Literales *a*, *b* y *c*, se muestra que los mallados son bastante similares, tienden a ser uniformes en las caras, pero los elementos cercanos a los bordes o vértices son más pequeños. El tipo de elemento tetraédrico, en comparación con el mallado controlado de tipo hexaédrico (Literal d), hace evidenciar que hay un comportamiento del mallado más disperso en los cambios de sección, en el caso del bloque prismático.

Con base en lo anterior, sucede en las Figuras de los enmallados del bloque prismático, en los cuales no se nota que algún tipo de experimento (de hecho, en ninguno que haga parte de la totalidad de los experimentos del bloque) sea relevantemente diferente a los otros. Sin embargo, en el bloque prismático se presenta una gran variabilidad de resultados entre experimentos, que se evidencia más en los esfuerzos equivalentes máximos que en las deformaciones totales máximas, con lo cual, se concluye que se presenta divergencia en los resultados obtenidos, aún incluso, cuando los enmallados (realizados únicamente por defecto, sin refinamientos adicionales) son similares.

5.3.5 Análisis de resultados

En esta sección, se analiza en detalle los efectos de cada uno de los factores involucrados en el diseño de experimentos para la pieza número dos, para el bloque, a partir de los resultados mostrados anteriormente (Diagrama 7 - Diagrama 10), comparados con el valores promedios y con los obtenidos mediante el mallado controlado.

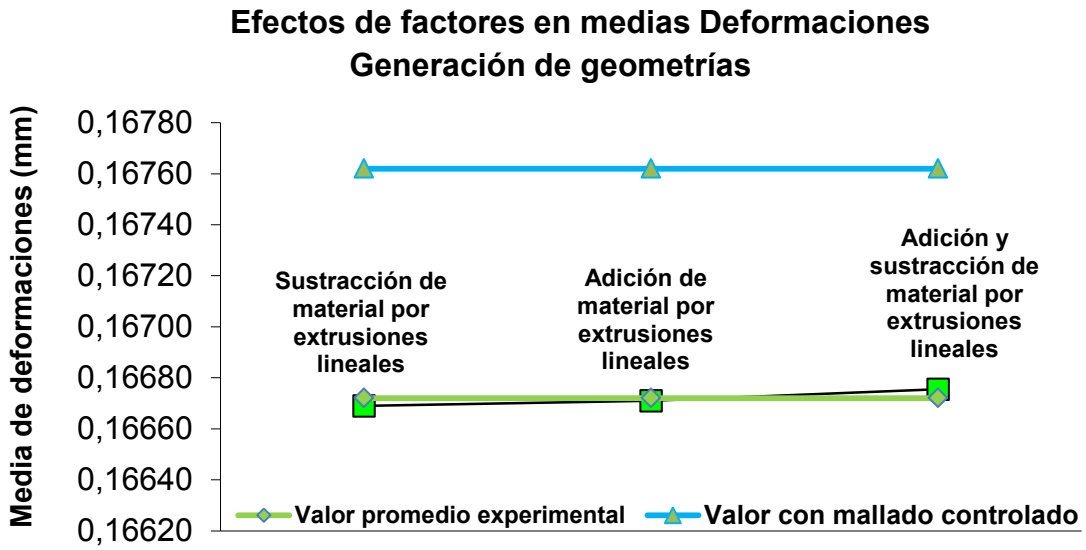
Figura 49. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49, se observa el efecto del factor del programa CAD en las medias de la deformación en el bloque, la diferencia máxima entre los resultados obtenidos es de 0,02 micrómetros. Por lo tanto, el software CAD no influye en la deformación de piezas similares al bloque, igualmente, el valor con mallado controlado es muy similar al del valor promedio experimental, con una diferencia de 0,8 micrómetros, de esta forma en la gráfica se ve una mayor diferencia debido a la escala usada para mostrar los resultados.

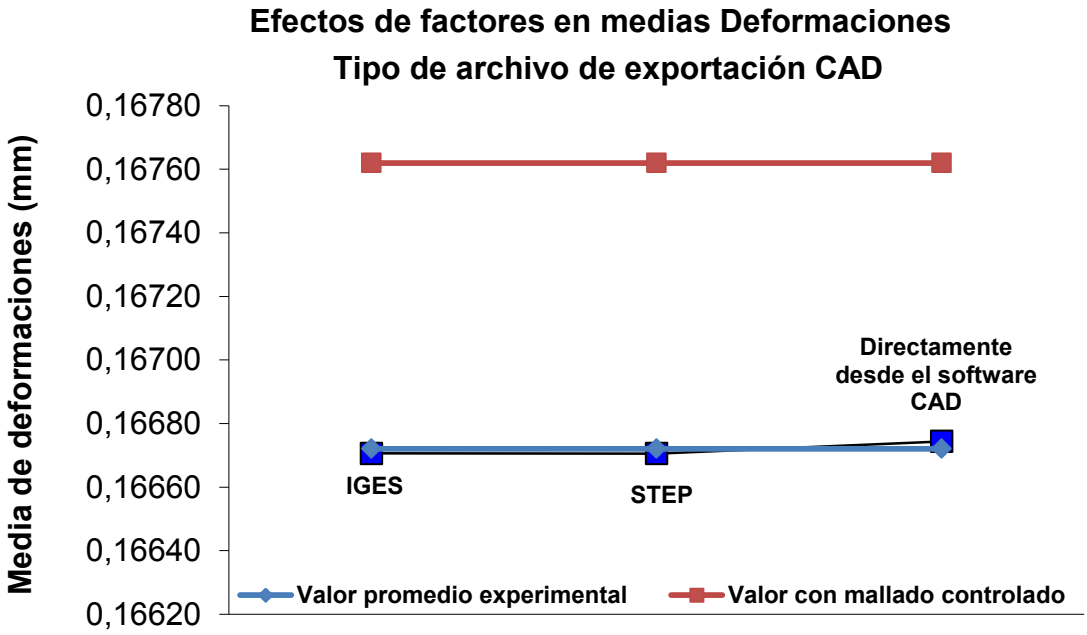
Figura 50. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la forma de generación de la geometría, en la Figura 50 se aprecia la influencia en la media de la deformación. La diferencia más grande es de 0,03 micrómetros, de esta forma la generación de geometrías no tiene una influencia significativa en la deformación de piezas como el bloque. Igualmente que en el factor del software CAD, el valor con mallado controlado está por encima de los resultados promedios, pero la diferencia es de solo 0,89 micrómetros, mucho menor de lo que aparenta la gráfica debido a la escala de la misma.

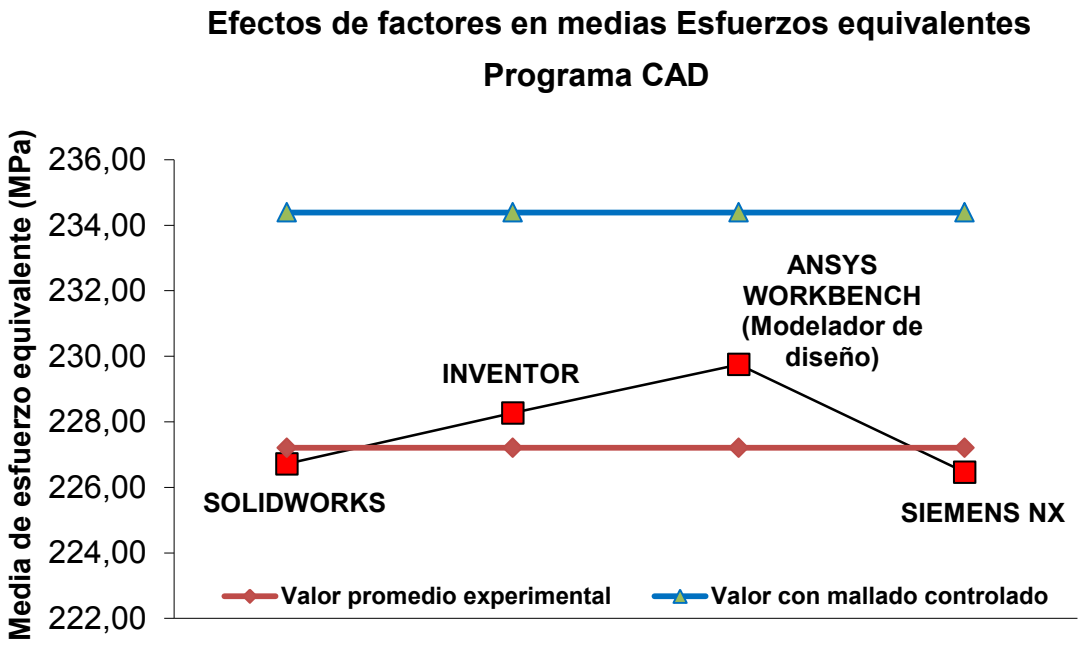
Figura 51. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

Para los resultados de la media de las deformaciones y la influencia que tiene la forma en la que se exportan los modelos CAD, se pueden observar en la Figura 51, donde una vez más no se ve un efecto claro sobre los resultados de la deformación, la diferencia máxima entre los tres niveles es de 0,01 micrómetros, además la diferencia con el resultado con mallado controlado es del orden de 0,9 micrómetros.

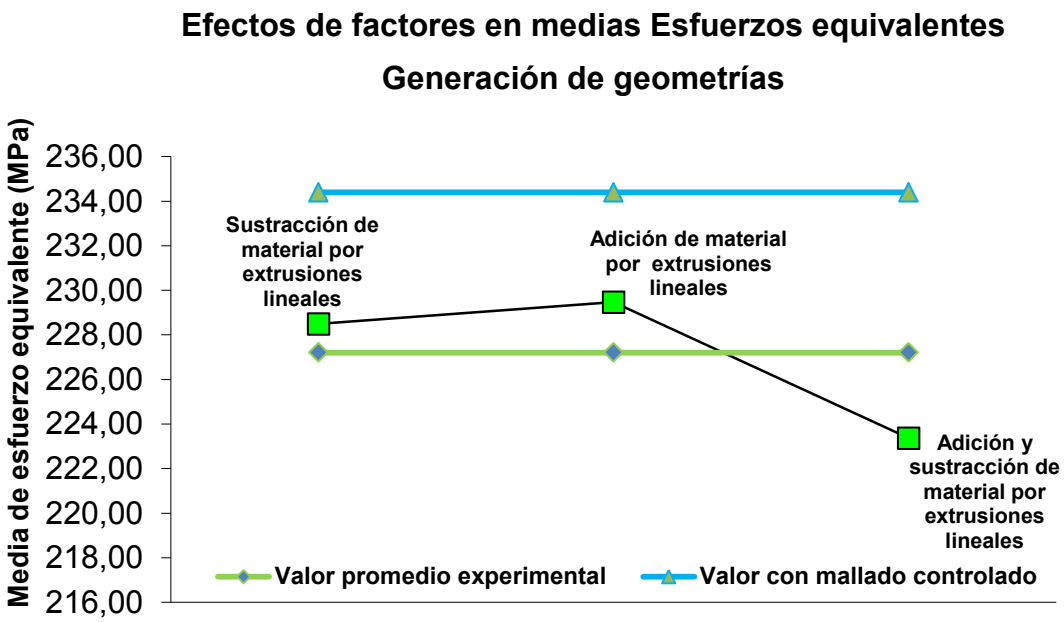
Figura 52. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los esfuerzos equivalentes, en la Figura 52 se aprecia el efecto del programa CAD en los resultados del esfuerzo equivalente en la pieza del bloque prismático. A diferencia de los resultados en la deformación, existen diferencias entre un software y otro, siendo el rango más amplio de 3,29 MPa, es decir, que no es muy significativo el programa de modelamiento en los resultados de esfuerzo equivalente. Sin embargo, se observa que el software Ansys® Workbench se acerca mucho más al valor real que los demás programas, con una diferencia de 4,64 MPa, mientras Solidworks® fuel que más se alejó con una diferencia de 7,67 MPa.

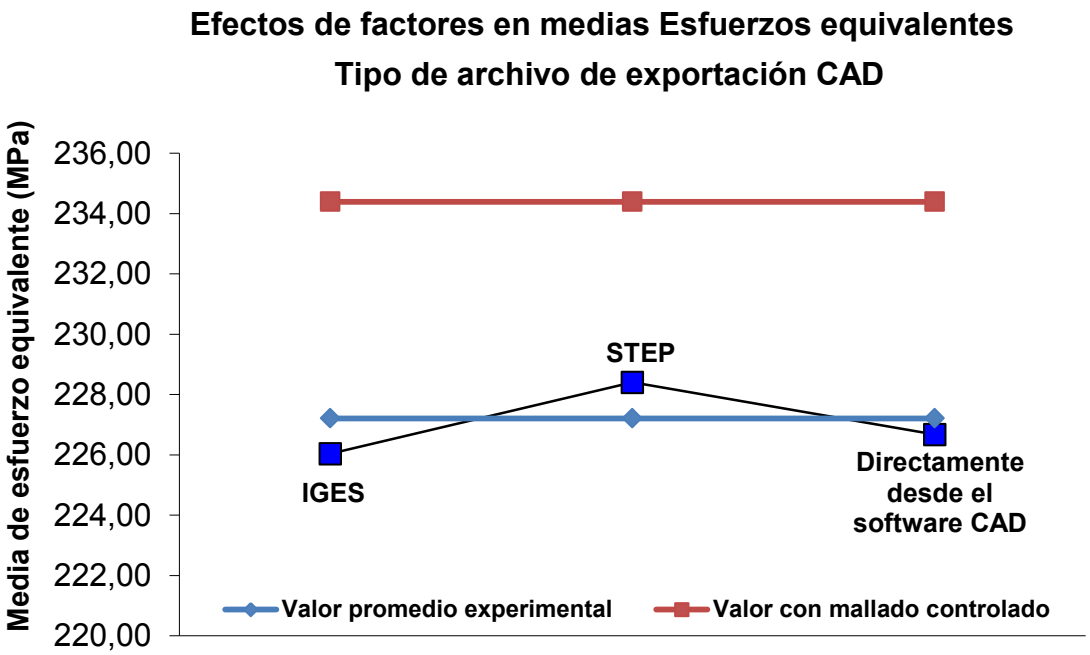
Figura 53. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 53, se observa como la generación de la geometría influye en la media del esfuerzo equivalente para la pieza del bloque. La principal diferencia se encuentra entre las operaciones de adición de material y el uso mixto de adición y sustracción de material, que es de 6,11 MPa, siendo esta última la que más se aleja del promedio, por lo tanto, la forma de generar la geometría tiene un efecto significativo en la media del esfuerzo equivalente para la pieza del bloque. Igualmente, las operaciones de adición y sustracción de material se encuentran más cerca del valor real con una diferencia de 5,9 MPa y 4,92 respectivamente, pero con la operación mixta de adición y sustracción ocurre lo contrario, y se encuentra a 11,03 MPa del valor real.

Figura 54 Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza dos



Fuente: Elaboración propia

Para terminar con el bloque, en la Figura 54 se puede observar la influencia del tipo de archivo de exportación CAD en los resultados de las medias de los esfuerzos equivalente. El rango máximo entre los resultados es de 2,36 MPa, por lo que el tipo de archivo no tiene efectos significativos en los resultados del esfuerzo equivalente en el bloque. Sin embargo, dichos resultados se alejan de los valores reales, siendo el más sensible el archivo IGES, con una diferencia de 8,35 MPa, y el que más se aproxima al valor real es el archivo STEP con una diferencia de 5,99 MPa.

En cuanto al diseño de experimentos, en la pieza número dos todos los experimentos generaron resultados en la deformación total muy similares al valor teórico con mallado controlado, siendo el más cercano el realizado con software

CAD Siemens NX®, con sustracción de material y exportando la geometría en el archivo STEP (A4-B3-C2), con una diferencia de solo 0,00076 mm por debajo. Sin embargo, el experimento más alejado fue el del software Ansys® Workbench, adición de material y archivo de exportación IGES (A3-B1-C1), con una diferencia de 0,00108 mm por debajo.

Para el esfuerzo equivalente, todos los experimentos se comportan de manera variada, el experimento que más se acerca al valor teórico con mallado controlado es el realizado con software Siemens NX®, operación mixta (adición y sustracción de material) y archivo de exportación STEP (A4-B3-C2), con una diferencia de 2,16 MPa por encima. No obstante, el experimento que más se aleja es el realizado con el software del modelador de Solid Works®, operación mixta y archivo de exportación STEP (A1-B3-C2), con una diferencia de 34,4 MPa por debajo del valor teórico.

Todo lo anterior y con base en los resultados, conlleva a inferir a continuación las combinaciones, entre los distintos niveles, que más se aproximan a los valores máximos, con enmallado controlado para la deformación total máxima y esfuerzo equivalente máximo para el eje.

Por otro lado, desde los análisis de algunos mallados de la pieza del bloque prismático (ver Numeral 5.3.4), en comparación a los resultados de deformaciones totales máximas y esfuerzos equivalentes máximos, se puede deducir que la variabilidad entre estos resultados es alta, y que aún, cuando los enmallados obtenidos en los experimentos con ésta pieza tienden a ser parecidos, los resultados no convergen entre sí.

Diagrama 11. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima del bloque prismático



Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 11, se observa los distintos niveles de cada factor, que se sugieren usar para realizar las simulaciones para un bloque prismático, y que se aproximan a los valores de las deformaciones totales máximas con enmallados controlados.

Diagrama 12. Combinaciones más aproximadas para esfuerzo equivalente máxima para el bloque prismático



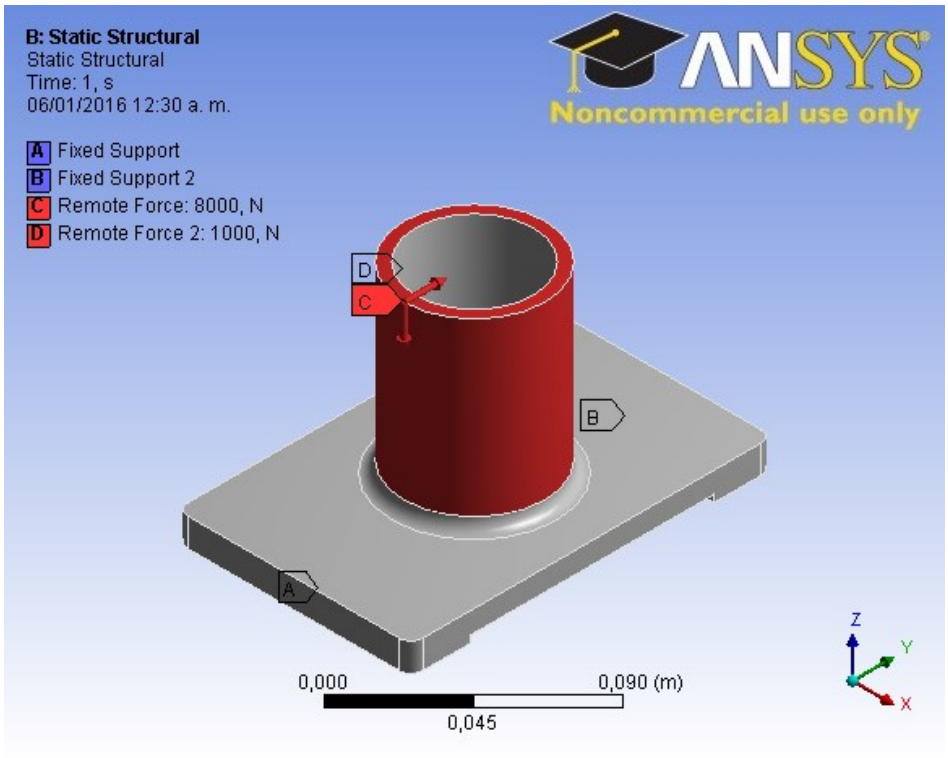
Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 12, se observa los distintos niveles de cada factor, que se sugieren usar para realizar las simulaciones para un bloque prismático, y que se aproximan a los valores de los esfuerzos equivalentes máximos con enmallados controlados.

5.4 PIEZA 3: PLACA

5.4.1 Condiciones de simulación en los experimentos

Figura 55. Condiciones de simulación en Ansys - pieza 3



Fuente: Elaboración propia

Para los análisis por elementos finitos que corresponden a la pieza 3, las condiciones de simulación son las siguientes:

- Todas las simulaciones son llevadas a cabo por análisis de estática estructural.
- El material utilizado en las simulaciones es Acero estructural A-36.
- El enmallado es fino por defecto, por tanto, no hay controles de mallado adicionales realizados manualmente.

- Se dispone de dos restricciones de tipo soporte fijo en la parte inferior de la placa, así como se muestra en la
- Figura 55, dichas restricciones están señaladas con las letras A y B.
- Se aplican dos cargas sobre la placa. Una carga corresponde a 8000 N en dirección Y+ y efectúa flexión sobre la parte cilíndrica de la pieza, así como se muestra en la
- Figura 55 y se señala con la letra C. La otra carga corresponde a 1000 N aplicada en dirección Z-, ésta carga se señala con la letra D en la
- Figura 55 y efectúa compresión sobre la parte cilíndrica de la pieza.
- Finalmente, los resultados evaluados en las simulaciones corresponden a la deformación total máxima y al esfuerzo equivalente máximo (von-Mises).

5.4.2 Simulación con enmallado controlado

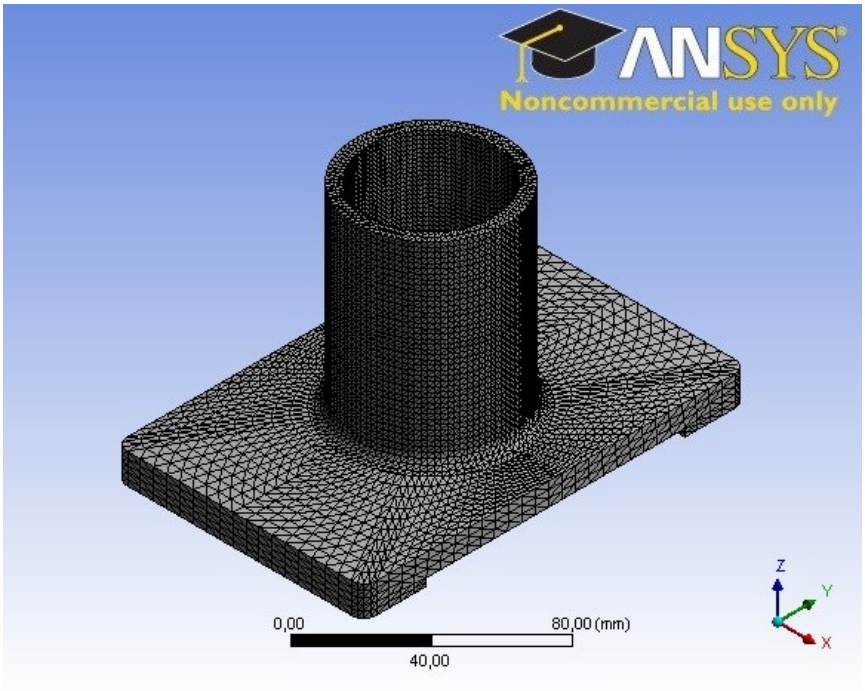
A partir de la simulación de la placa con el enmallado controlado (bajo las mismas condiciones de simulación explicadas en el Numeral 5.4.1), se obtienen valores de referencia para la deformación total máxima y el esfuerzo equivalente máximo, para ser comparados con las simulaciones experimentales.

Los controles de enmallado utilizados para llevar a cabo la simulación por elementos finitos, en el software Ansys® Workbench, se relacionan a continuación:

- Mapeo de caras en la discretización de la pieza.
- Enmallado con elementos finos.
- Tamaño de elemento por defecto.
- Alta suavidad en el tamaño de los elementos.
- Transición lenta entre los elementos.
- Las demás configuraciones son por defecto.

Así mismo, en la Figura 56 se puede observar la imagen del enmallado controlado. Los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos, a partir de éste enmallado, corresponden a una deformación total máxima de 0,11402 mm y un esfuerzo equivalente máximo de 217,53 MPa.

Figura 56. Discretización de la placa con enmallado controlado

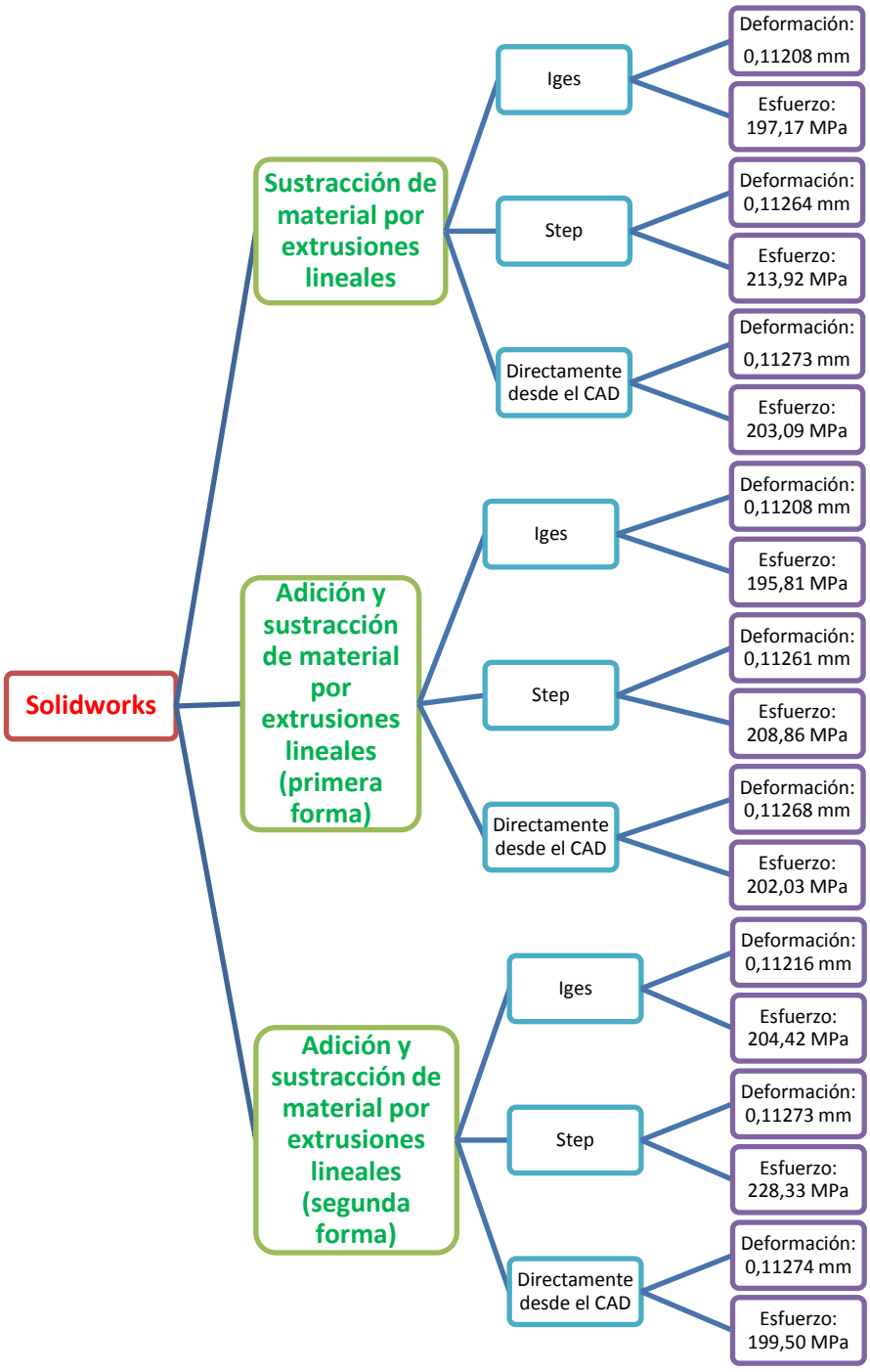


Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Presentación de resultados experimentales

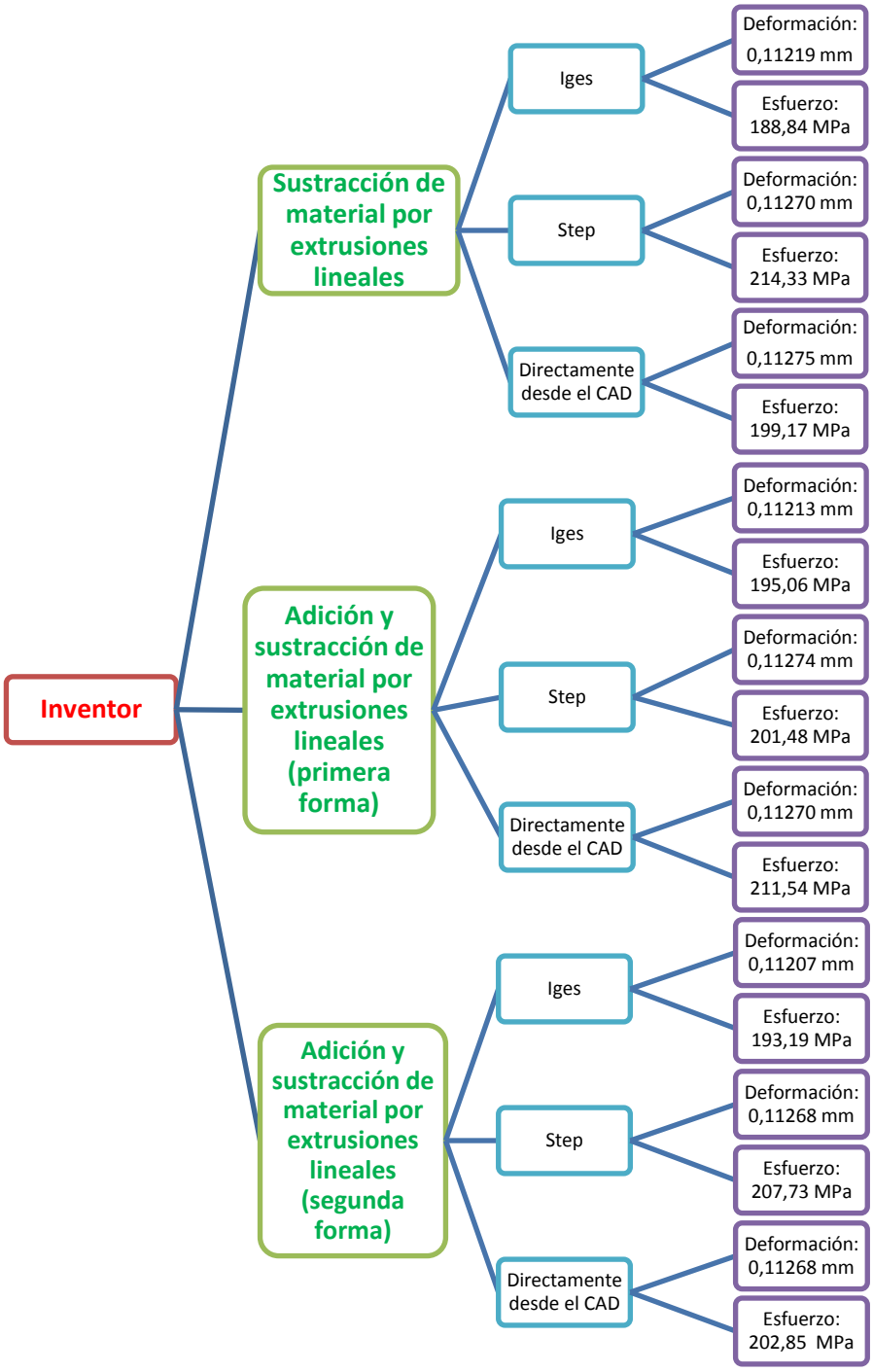
A continuación se presentan los resultados, de deformación total máxima y esfuerzo equivalente máximo, de cada una de las simulaciones experimentales realizadas de la pieza tres, la placa, discriminadas principalmente por software CAD, seguido de las operaciones de generación de geometría y por último el factor de la importación de la geometría al CAE.

Diagrama 13. Resultados pieza 3 - software Solidworks



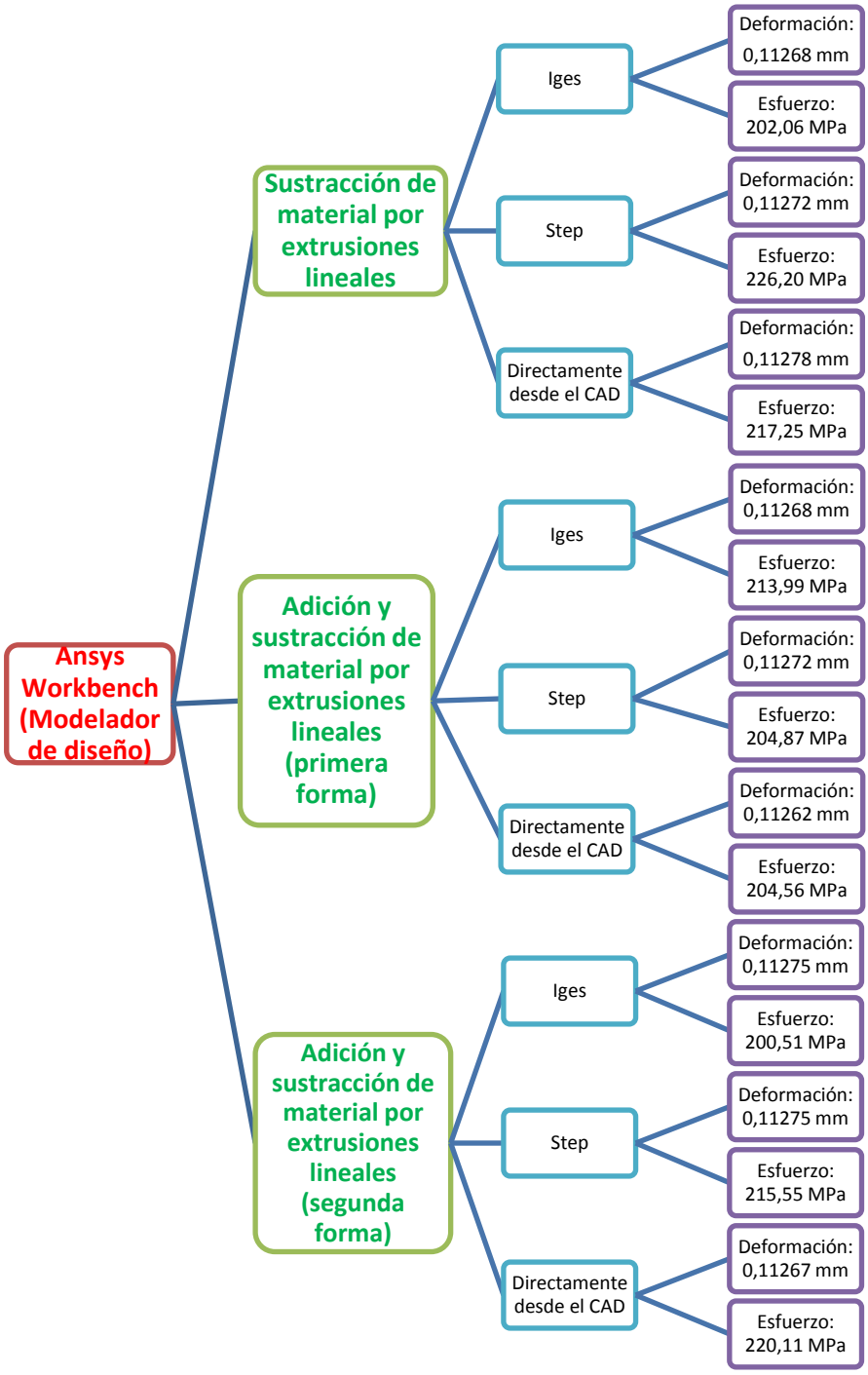
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 14. Resultados pieza 3 - software Inventor



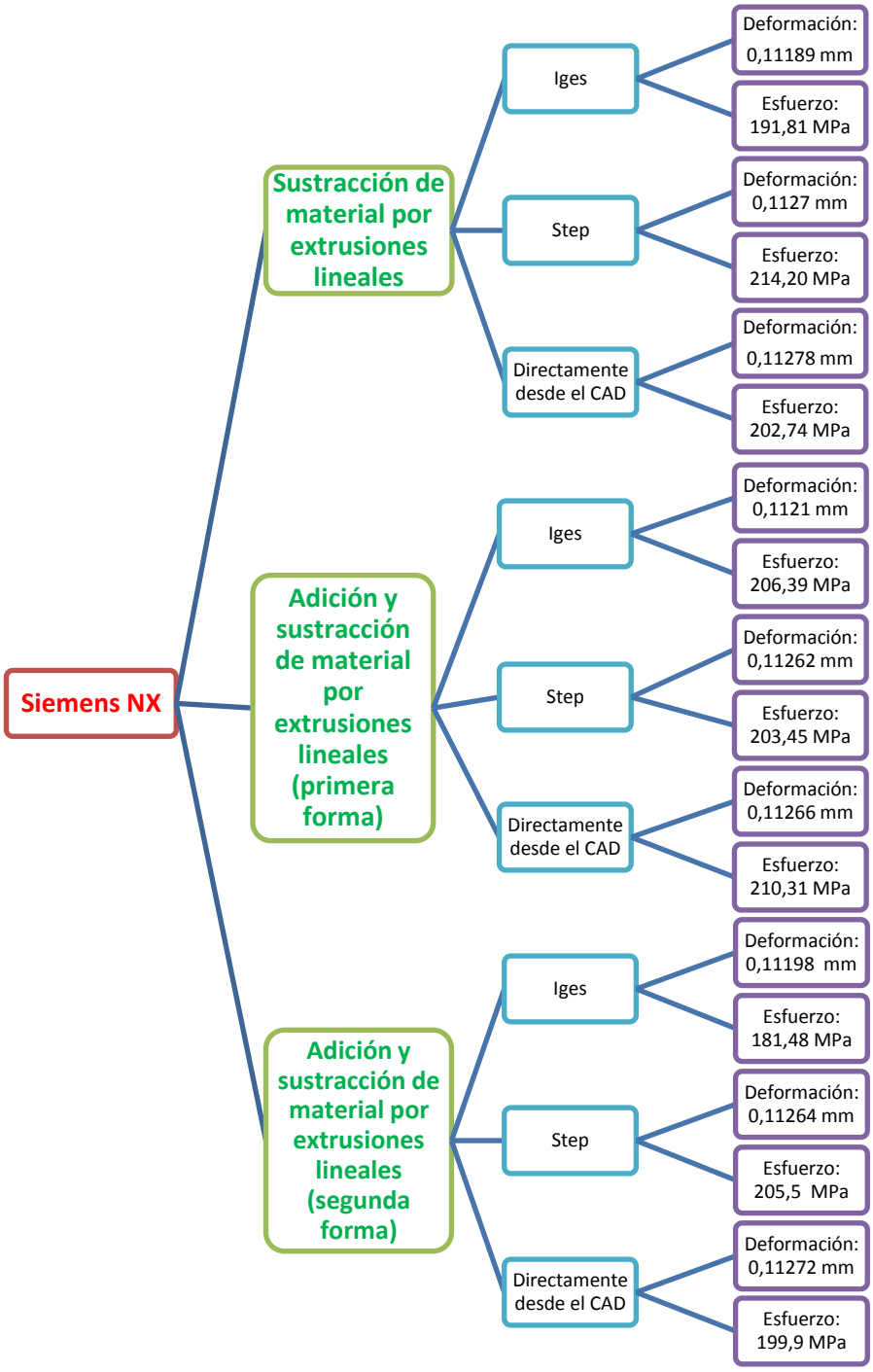
Fuente: Elaboración propia

Diagrama 15. Resultados pieza 3 - software Ansys Workbench



Fuente: Elaboración propia

Diagrama 16. Resultados pieza 3 - software Siemens NX



Fuente: Elaboración propia

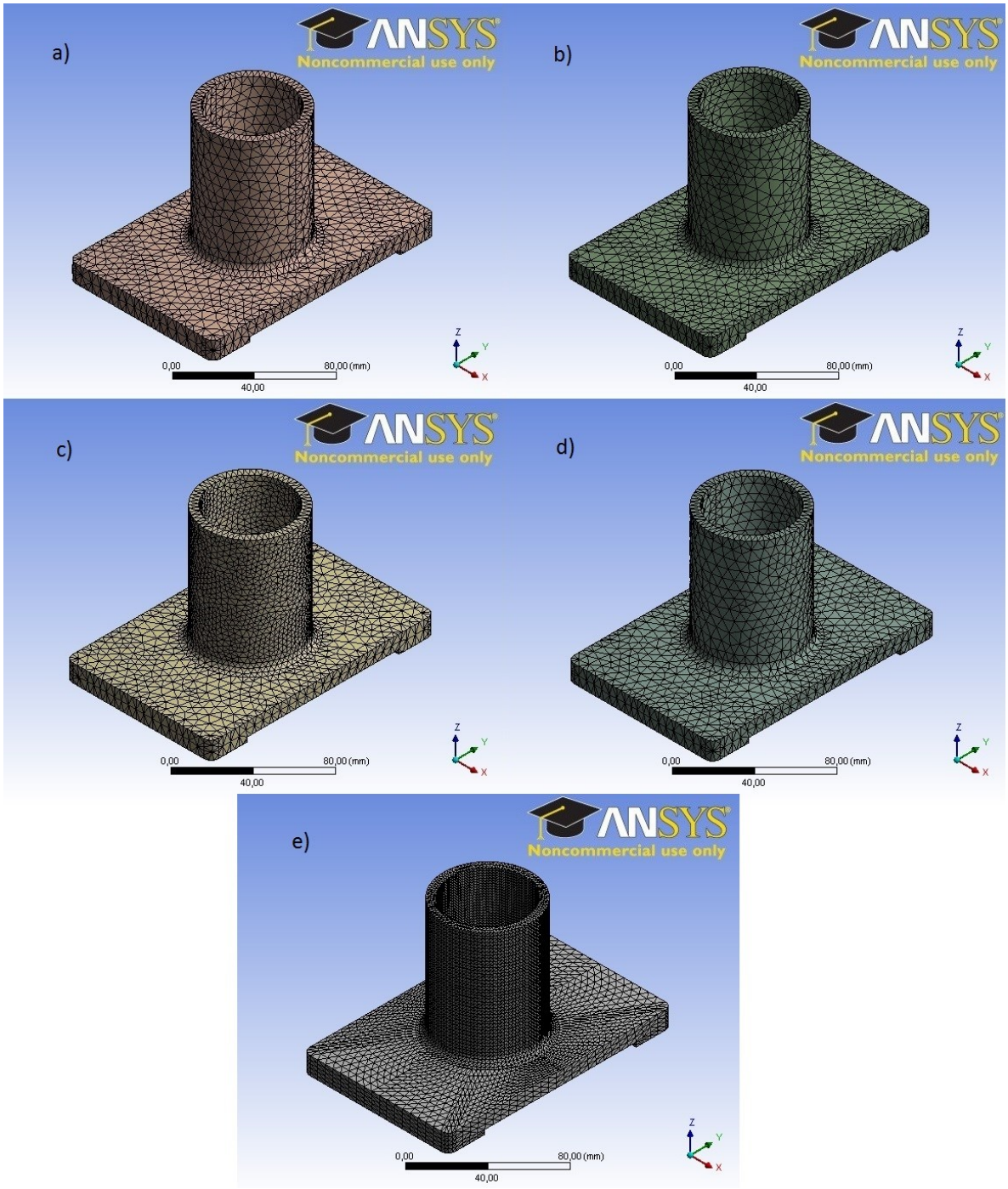
5.4.4 Análisis de algunos enmallados, a partir de los experimentos

A continuación, se muestra algunos mallados de los experimentos de la placa, que corresponden a los realizados en las simulaciones del software CAE, adicionalmente, se comparan discriminando por cada uno de los factores y con el enmallado controlado.

- Factor CAD:

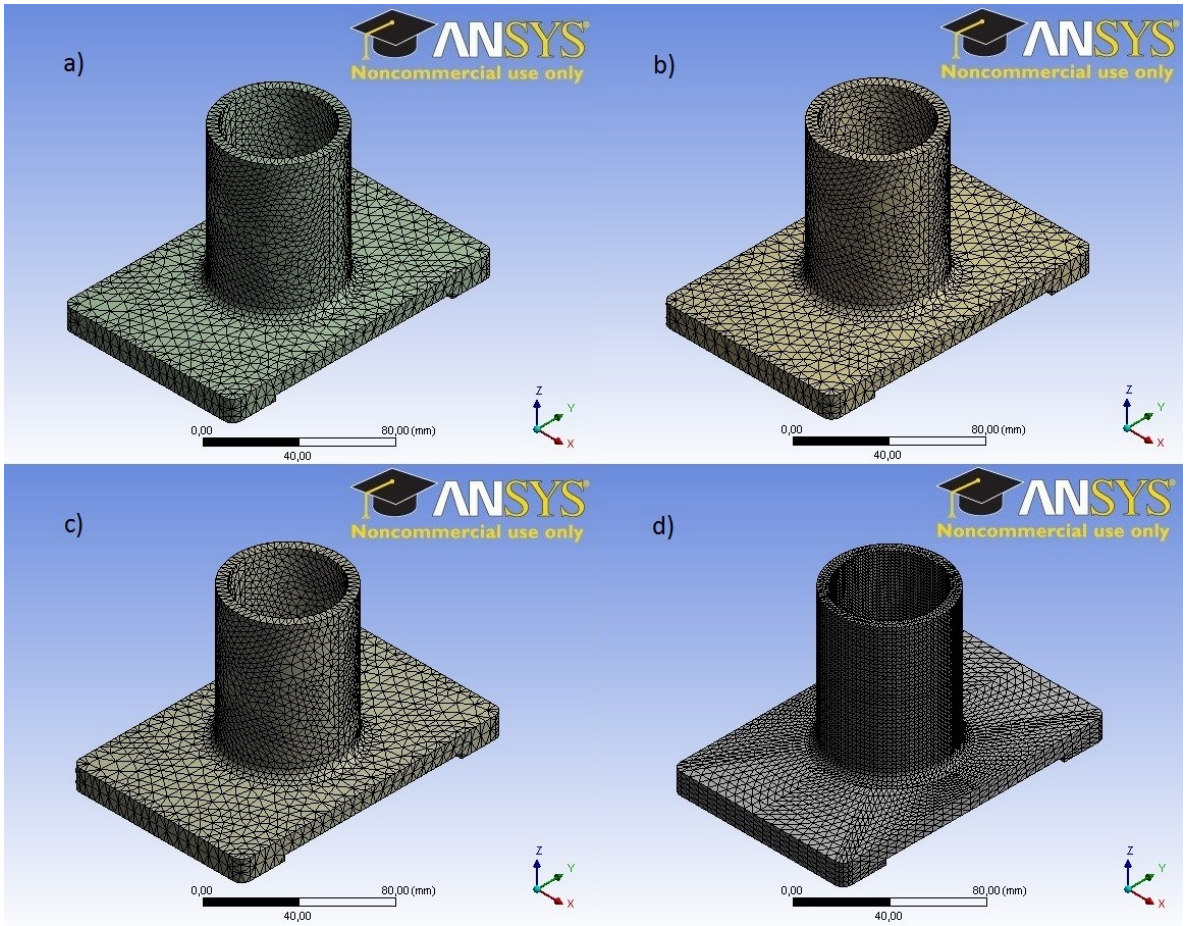
Con base en la Figura 57, en la cual se varía el nivel del software CAD, dejando la generación de geometría por operaciones mixtas (adición y sustracción de material – primera forma-) y el archivo de exportación IGES. En los Literales *a*, *b* y *d* se observa un enmallado muy similar entre sí, con un número de elementos bajo, lo que genera un tipo de malla grande y tiende a no ser uniforme a lo largo de la pieza, en las secciones más reducidas se encuentran elementos muy pequeños en comparación con los de caras más grandes, igualmente los cambios de sección no se dan de manera suave. Por otro lado, en el Literal *c* se ve dos enmallados diferentes, primeramente en la base de la pieza se ven elementos más grandes y desordenados, la segunda se da en el cilindro con una malla más fina y más uniforme, sin embargo también en las secciones más reducidas hay elementos pequeños y el cambio de sección no es suave. Cabe resaltar que ninguna de las cuatro mallas generadas por defecto, se aproxima a la del Literal *e*, ya que las primeras son con elementos tetraédricos, mientras el otro contiene elementos de tipo hexaédrico (no en su totalidad), que se adaptan mejor a la pieza.

Figura 57. Enmallados de la placa variando CAD. a) A1-B2-C1, b) A2-B2-C1, c) A3-B2-C1, d) A4-B2-C1 y e) enmallado refinado



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Enmallados de la placa variando la generación de geometría. a) A1-B1-C2, b) A1-B2-C2, c) A1-B3-C2 y d) enmallado refinado

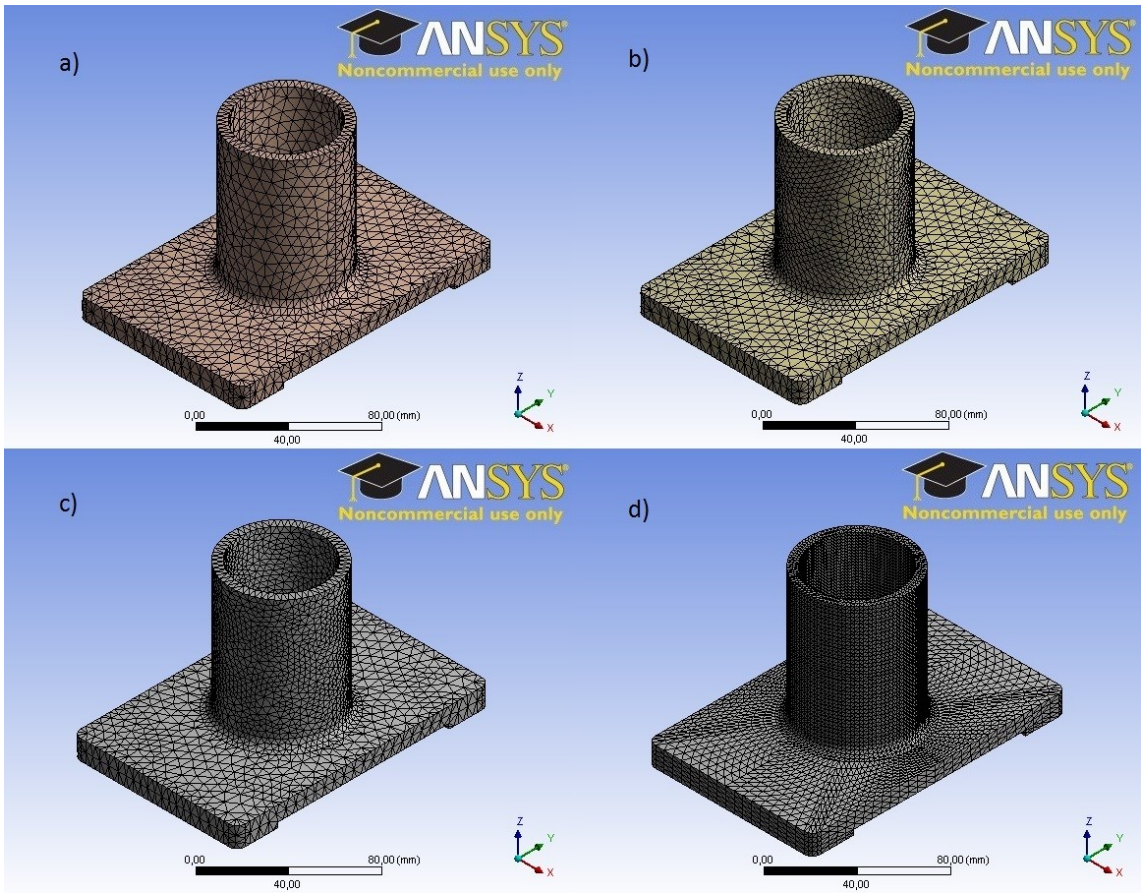


Fuente: Elaboración propia

Algunos de los experimentos realizados con la placa, se aprecia que la forma en la que se genera el enmallado cambia, como se puede ver en la Figura 58, en la que se mantiene el tipo de software CAD como lo es Solidwoks® y el archivo de exportación STEP, y se varia la forma en la que se genera la geometría. En este caso para la pieza de la placa en los Literales *a, b* y *c* se observan figuras muy similares, en la base se presenta una malla con elementos tetraédricos grandes y descontinuos, en las secciones reducidas se ve una mayor concentración de nodos con elementos pequeños, el cambio de sección se genera de forma no muy suave; en cuanto al cilindro se aprecia una malla más fina que la anterior y tiende

a ser uniforme, a excepción de algunas zonas que generan parches. Estas mallas tienen diferencias significativas en cuanto a uniformidad y suavidad comparadas con el mallado controlado (Literal *d*), ya que este presenta elementos (predominantemente, no totalmente) hexaédricos que se adaptan mejor a esta geometría.

Figura 59. Enmallados de la placa variando el archivo de exportación. a) A1-B2-C1, b) A1-B2-C2, c) A1-B2-C3 y d) enmallado refinado



Fuente: Elaboración propia

Con base en la información de la Figura 59, en la que se varia el tipo de archivo de exportación, pero manteniendo el software CAD Solidworks® y las operaciones en la geometría mixta (adición y sustracción de material –primera forma-). La

diferencia más significativa se da en el Literal *a* (IGES), donde se observa un tipo de enmallado más descontinuo y con elementos más grandes que en los otros archivos de exportación, en el cilindro se aprecian dos líneas verticales que lo cruzan de lado a lado. En los Literales *b* y *c,* en el cilindro se ven una malla más fina, con elementos más pequeños y en algunas de las áreas tiende a ser uniforme, en el archivo STEP (literal *b*) se observan parches de elementos más grandes. En general, los tres archivos tienen una concentración mayor de nodos en las secciones reducidas, lo que las hace más uniformes en comparación a las demás caras, los cambios de sección no se dan de manera suave; el archivo de exportación directa (Literal *c*) es el que más se aproxima al enmallado controlado con elementos hexaédricos.

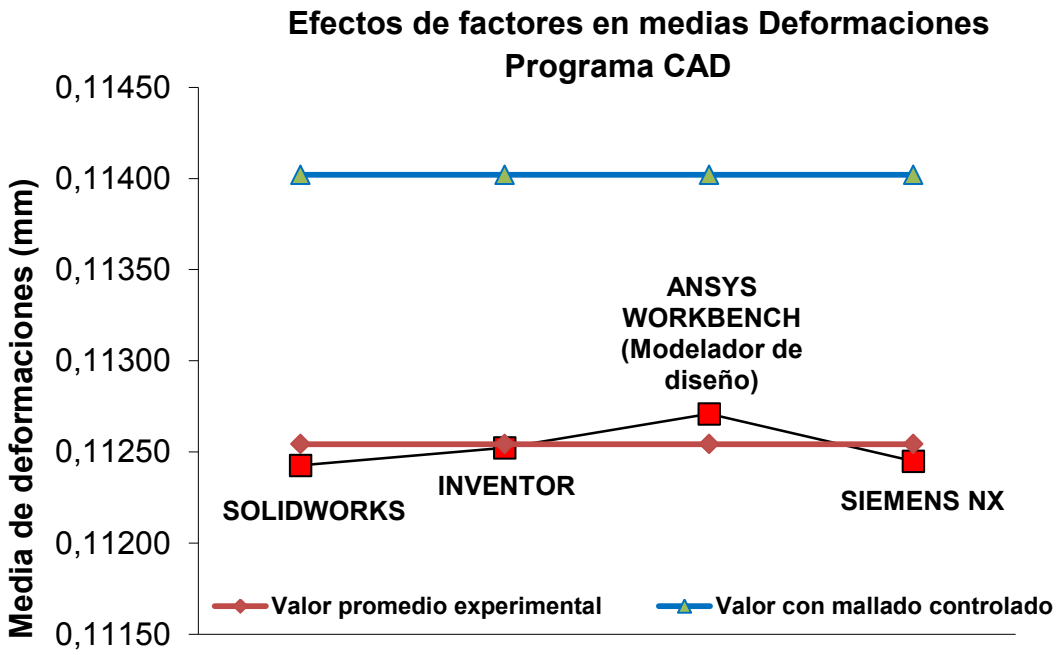
Finalmente, se concluye que en la placa ocurre una situación parecida a la del eje, debido a que los tamaños de elementos en los enmallados se ven afectados, principalmente, desde los archivos de exportación; los que a su vez, generan la mayor alteración entre los resultados experimentales de deformación total máxima y esfuerzos equivalentes máximos. Por otro lado, cabe destacar que la generación de enmallado en la pieza de la placa, visualmente varían los elementos de un mismo experimento, de una malla fina a una gruesa, ya que posiblemente la generación del enmallado se da en diferentes direcciones (de arriba hacia abajo y viceversa).

5.4.5 Análisis de resultados

En esta sección, se analiza en detalle los efectos de cada uno de los factores involucrados en el diseño de experimentos para la pieza número tres, para la placa, a partir de los resultados mostrados anteriormente (Diagrama 13 -

Diagrama 16), comparados con el valores promedios y con los obtenidos mediante el mallado controlado.

Figura 60. Efecto del software CAD en la media de las deformaciones de la pieza tres

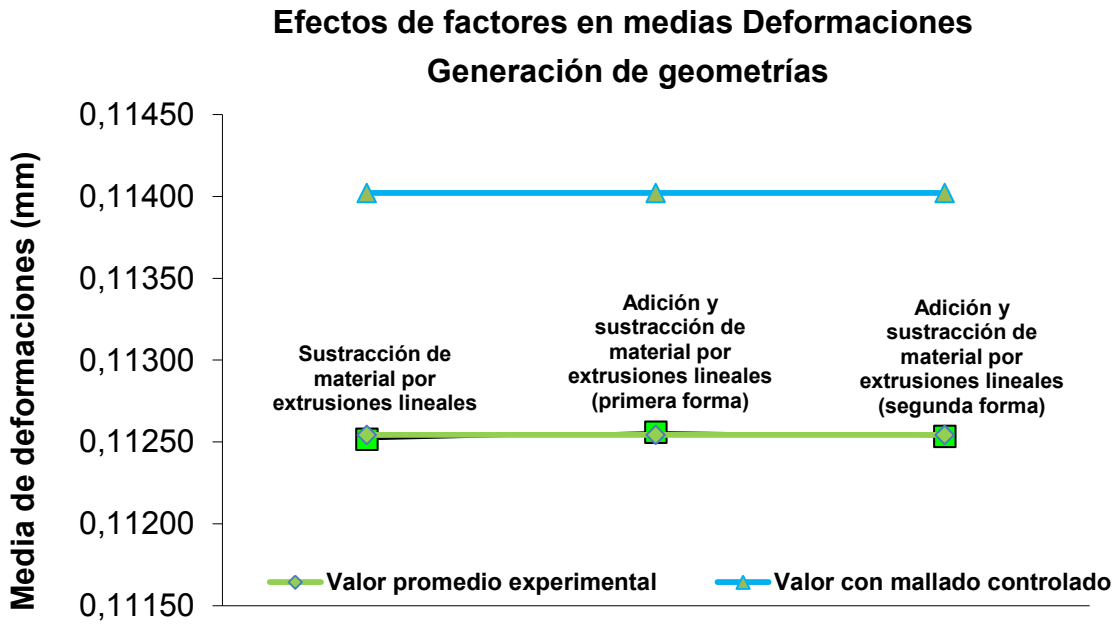


Fuente: Elaboración propia

Con base en la información de la

Figura 60, en la que se observa los efectos de los programas CAD sobre las medias de la deformación. Los resultados muestran que el rango de valores más amplio es de 0,28 micrómetros, es decir, que el software de generación de geometría no tiene una influencia significativa en los resultados de las deformaciones totales para la pieza tres o similares. Cabe resaltar que dichos resultados no se alejan demasiado del valor teórico con mallado controlado, siendo el más aproximado el software Ansys® con una diferencia de 1,29 micrómetros por debajo.

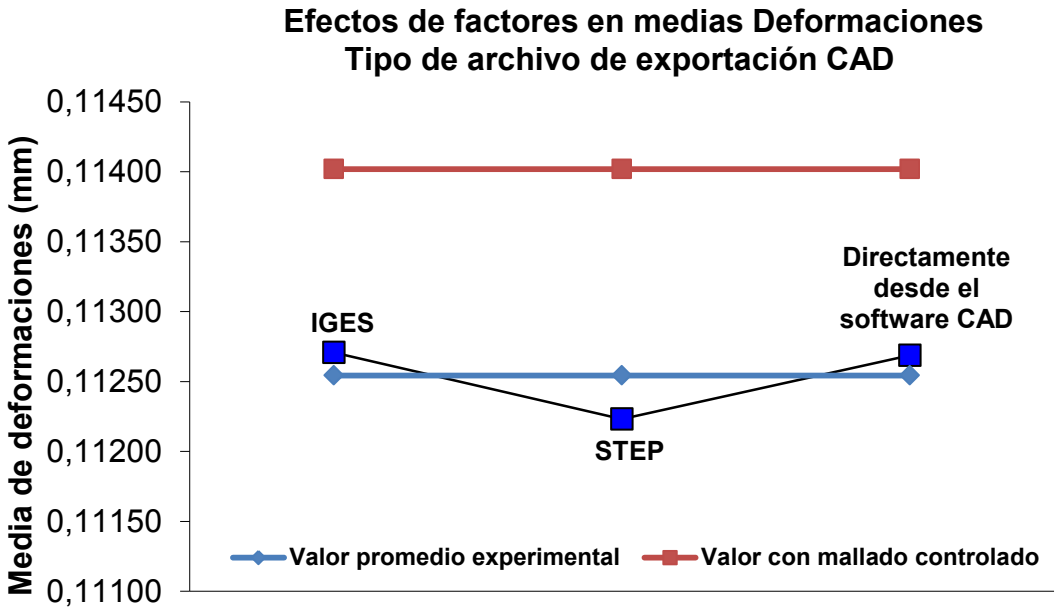
Figura 61. Efecto de la generación de geometría en la media de las deformaciones de la pieza tres



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 61 se muestra los resultados de las medias de deformación total para el factor de la generación de geometrías, se puede observar que este factor no es muy sensible en los resultados, ya que la diferencia máxima entre las medias es de 0,02 micrómetros. Es decir, que la generación de geometría no tiene efectos significativos en la deformación total para la pieza tres, además, los resultado no se alejan demasiado del valor teórico con mallado controlado, siendo el más cercano la operación dos, adición y sustracción de material por extrusiones lineales (primera forma), con una diferencia de 1,44 micrómetros por debajo.

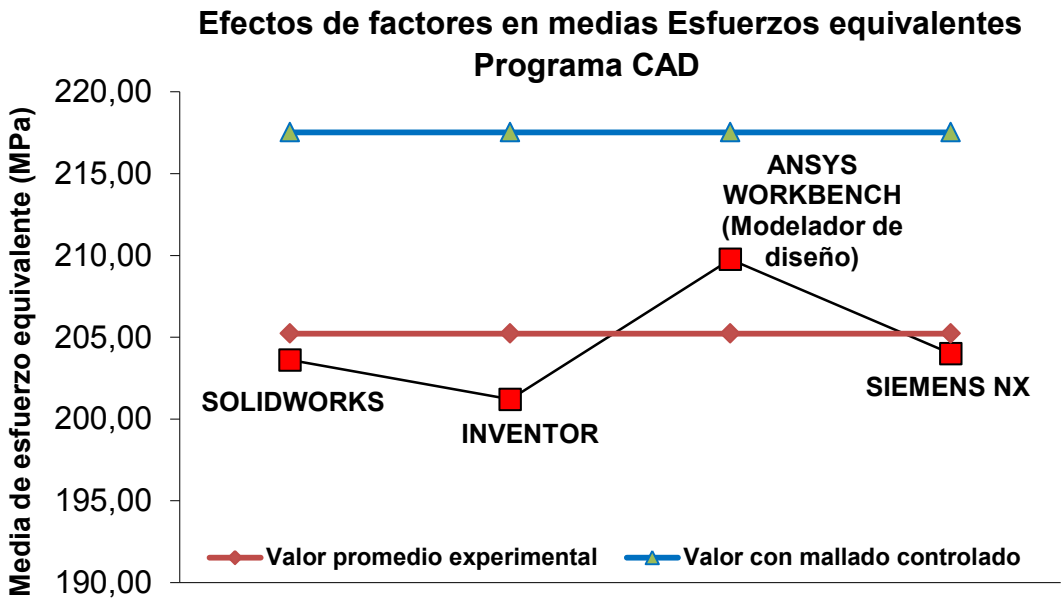
Figura 62. Efecto del tipo de archivo en la media de las deformaciones de la pieza tres



Fuente: Elaboración propia

Los efectos del tipo de exportación CAD en los resultados de medias de deformación total se aprecian en la Figura 62, donde se observa que el rango más amplio de resultados se da entre los archivos IGES y STEP, con una diferencia de 0,48 micrómetros. Por lo tanto, el tipo de archivo de exportación no tiene efectos significativos en la deformación total para la pieza tres, sin embargo, los resultados se acercan al valor teórico con mallado controlado, siendo el más cercano el archivo IGES con una diferencia de 1,29 micrómetros por debajo.

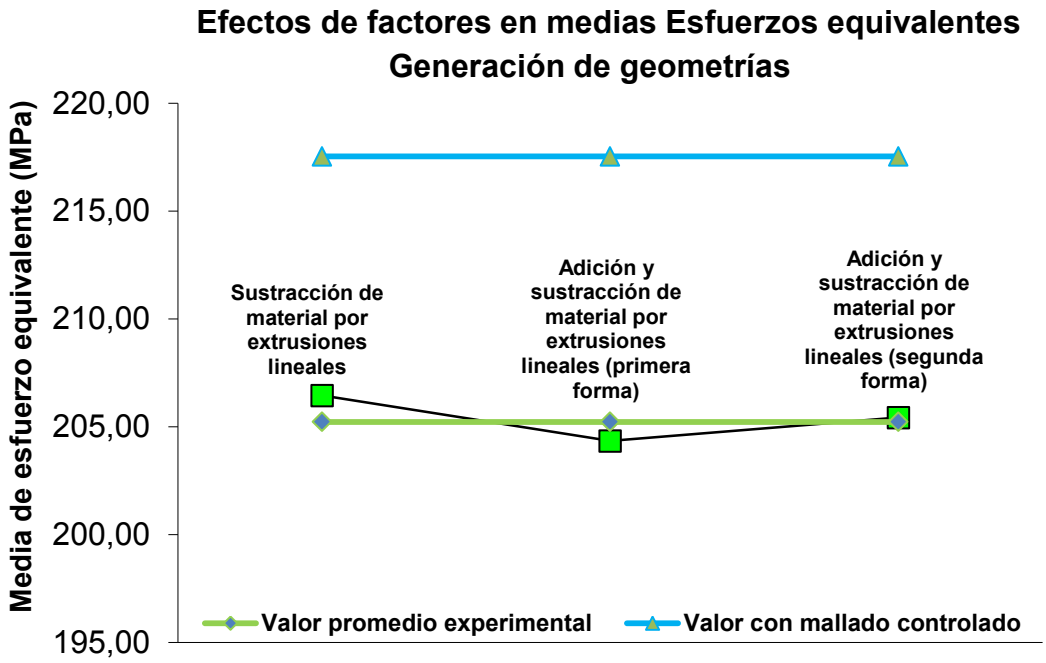
Figura 63. Efecto del software CAD en la media de los esfuerzos de la pieza tres



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los efectos del programa CAD en las medias de los esfuerzos equivalentes, en la Figura 63 se observa que el rango más amplio de los resultados es de 8,26 MPa, que es entre Inventor® y Ansys®, de esta forma existe una leve influencia de los software CAD sobre las medias de los esfuerzos equivalentes. Igualmente, hay una diferencia con el valor teórico de mallado controlado y los resultados de las medias, el factor más cercano es el de Ansys Workbench® con una diferencia de 7,77 MPa por debajo, mientras que el más alejado es el de Inventor® con 16,33 MPa por debajo.

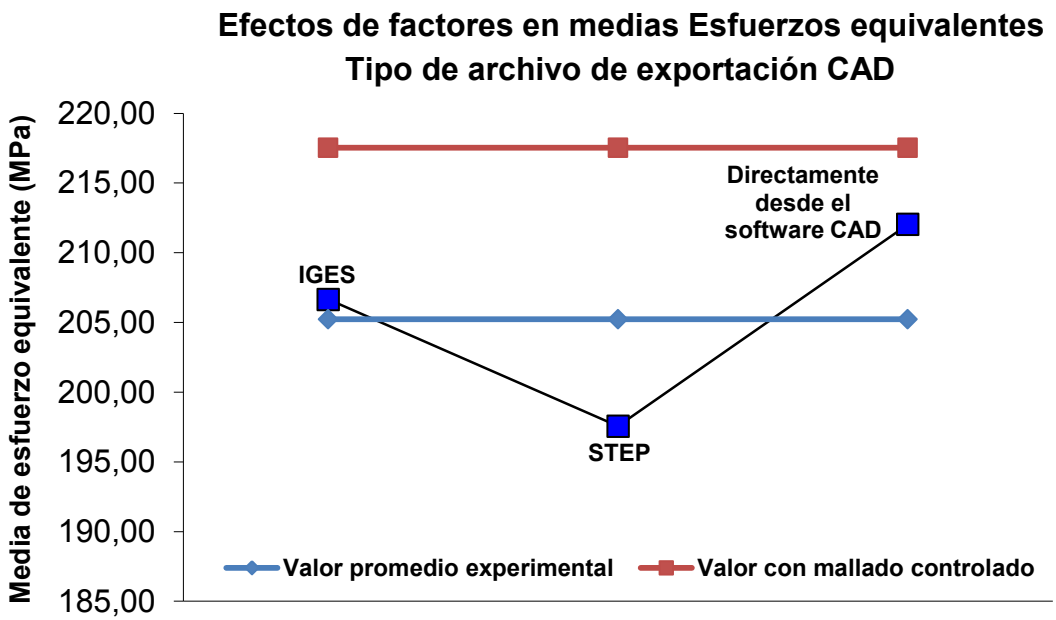
Figura 64. Efecto de la generación de geometría en la media de los esfuerzos de la pieza tres



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64, se muestra los efectos de la generación de geometrías sobre las medias de los esfuerzos equivalentes, a diferencia de la Figura 63, la forma de generar la geometría no influye significativamente en los esfuerzos equivalentes, ya que la diferencia más amplia en los resultados es de 2,1 MPa. Cabe aclarar, que dichos resultados se alejan del valor teórico con mallado controlado, el valor más cercano es la operación uno, sustracción de material por extrusiones lineales, con 11,08 MPa de diferencia por debajo, mientras que la más alejada es la operación dos, adición y sustracción de material por extrusiones lineales (primera forma), con una diferencia de 13,18 MPa de diferencia.

Figura 65. Efecto del tipo de archivo en la media de los esfuerzos de la pieza tres



Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 65, donde se muestra los efectos del factor de los tipos de archivo de exportación CAD sobre las medias de los esfuerzos equivalentes, se observa que este factor influye mucho en los esfuerzos equivalentes de la pieza tres, ya que la diferencia más amplia entre los niveles es de 14,48 MPa que se da entre el archivo STEP y la exportación directa desde el software CAD. No obstante, hay que resaltar que la exportación directa se acerca más que los otros niveles al valor teórico con mallado controlado, con una diferencia de 5,49 MPa por debajo, por otro lado el archivo STEP es el que más se aleja del valor teórico con una diferencia de 19,97 MPa por debajo.

No obstante, en la pieza número tres todos los experimentos en la deformación total generaron resultados muy cercanos al valor teórico con mallado controlado, en este caso los más cercanos son los realizados con software CAD del

modelador de Ansys® Workbench, usando solo sustracción de material y exportando la geometría directamente desde el CAD (A3-B1-C3) y el del software Siemens NX®, sustracción de material y exportando la geometría directamente (A4-B1-C3), con una diferencia de solo 0,00122 mm por debajo. Por otro lado, el experimento más alejado fue el del software Siemens NX®, adición de material y archivo de exportación IGES (A4-B1-C1), con una diferencia de 0,00211 mm por debajo.

En cuanto a los resultados del esfuerzo equivalente, todos los experimentos se comportan de manera diferente, el experimento que más se acerca al valor teórico con mallado controlado es el realizado con software Ansys® Workbench, sustracción de material y exportación directa (A3-B1-C3), con una diferencia de 0,28 MPa por debajo. Sin embargo, el experimento que más se aleja es el realizado con el software Siemens NX®, operación mixta (primera forma) y archivo de exportación IGES (A4-B3-C1), con una diferencia de 36,05 MPa por debajo del valor teórico.

Todo lo anterior y con base en los resultados, conlleva a inferir a continuación las combinaciones, entre los distintos niveles, que más se aproximan a los valores máximos, con enmallado controlado para la deformación total máxima y esfuerzo equivalente máximo para el eje.

Diagrama 17. Combinaciones más aproximadas para deformación total máxima de la placa



Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 17, se observa los distintos niveles de cada factor, que se sugieren usar para realizar las simulaciones de la placa, y que se aproximan a los valores de las deformaciones totales máximas con enmallados controlados.

Diagrama 18. Combinaciones más aproximadas para esfuerzo equivalente máximo de la placa



Fuente: Elaboración propia

En el Diagrama 18, se observa los distintos niveles de cada factor, que se siguieren usar para realizar las simulaciones de la placa, y que se aproximan a los valores de los esfuerzos equivalentes máximos con enmallados controlados.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En cuanto a la metodología para llevar a cabo el presente proyecto, hubo principalmente un inconveniente, con respecto al desarrollo del análisis de resultados, puesto que, entre las corridas realizadas a cada una de las combinaciones del diseño de experimentos, no se encontraron cambios en los resultados (entre corrida y corrida), por lo cual, no se pudo establecer un análisis de varianza (ANOVA) para éstos. Por consiguiente, se utilizó un análisis de medias (ANOM), en los que intervinieron los factores y niveles.

- A partir de pruebas experimentales para geometrías simples (de tipo prismático y cilíndrico), se encontró que la utilización de diferentes niveles, desde el CAD, en las piezas del eje y la placa, que los cambios son significativos en los enmallados para el software Ansys® Workbench, sin embargo, en la pieza del bloque prismático no se evidenciaron diferencias significativas entre experimentos (Capítulo 5). En relación con los resultados, los cambios en las deformaciones totales máximas no son significativos, para ninguna de las tres piezas, y la variabilidad se presenta únicamente para la placa en los esfuerzos equivalentes máximos entre los software Inventor® y Ansys® Workbench. Cabe resaltar, que los resultados que mejor se aproximan a los valores obtenidos por enmallado controlado, fueron los realizados con el software Ansys® Workbench.

- En cuanto al factor de generación de geometría, tanto en el eje, como en el bloque prismático y la placa, no hay una diferencia significativa en el enmallado generado para cada uno de los experimentos de dichas piezas (Capítulo 5). En correlación con los resultados obtenidos de deformación total máxima, para cada una de las tres piezas, no se observan cambios significativos. Por otro lado, con respecto al esfuerzo equivalente máximo,

es más significativo solamente en el bloque, debido a la utilización de la adición de material y el uso mixto de adición y sustracción de material. Entre los valores más cercanos a los obtenidos por enmallado controlado, se encuentran, la sustracción de material por revolución en el eje y la adición de material por extrusiones lineales en el bloque, sin embargo, en la placa no se encuentran variaciones en los resultados, que se aproximen al valor de referencia de la simulación con enmallado controlado.

- El factor en el que más cambios significativos se obtuvieron, fue en el tipo de archivo de exportación. Con respecto al enmallado de los experimentos de cada una de las piezas, se evidencia un cambio significativo (Capítulo 5), tanto para el eje como para la placa, en los archivos IGES, ya que se presentan enmallados con elementos más grandes, menor número de nodos y transiciones no tan suaves; mientras que en el bloque no se observan variaciones entre mallas. En relación con los resultados para la deformación total máxima, en las tres piezas, no se presentaron diferencias significativas. Por el lado de los resultados de los esfuerzos equivalentes máximos, las diferencias fueron despreciables para el eje y el bloque prismático, aunque para la placa, el tipo de archivo de exportación sensibiliza ampliamente los valores obtenidos. Cabe destacar que, el tipo de archivo de exportación que más se aproxima al valor de referencia con enmallado controlado, para el valor de esfuerzo equivalente máximo, se presenta únicamente en la placa y corresponde al archivo de exportación directo desde el CAD.

- Entre los resultados de las simulaciones experimentales estático-estructurales por el método de los elementos finitos, llevadas a cabo en el software Ansys® Workbench (Capítulo 5), se puede concluir que los tres factores CAD (software o herramienta CAD, operaciones geométricas y archivos de exportación), que fueron propuestos y analizados en el presente trabajo de grado, representan cambios más significativos en las

soluciones mostradas para los esfuerzos equivalentes máximos que en las deformaciones totales máximas.

- Por otro lado, la bibliografía consultada (Capítulo 2) en el presente documento, permite concluir que las adecuadas simulaciones en CAE, a partir de modelos CAD, pueden ser llevadas a cabo desde diferentes estrategias por parte de los usuarios, entre las cuales se destacan: la compatibilidad de enmallados de las geometrías entre los sistemas CAD y CAE, el manejo de topologías y/o ediciones geométricas en CAD (por ejemplo; arboles de generación, operaciones geométricas en y el manejo de diversas características geométricas correlacionadas) y las interfaces computacionales que intentan unificar el CAD con el CAE (por ejemplo: archivos neutros y software CAD/CAE no convencionales).

- El aporte del proyecto a los autores, fue principalmente el de adquirir algunos conocimientos, acerca del uso adecuado de las herramientas informáticas CAD y CAE, con relación a su utilización, en el campo de la mecánica computacional. Así mismo, se creó conciencia en lo que se refiera a la planeación, en el momento de hacer uso del diseño asistido por computador, ya que de esta forma, se puede reducir el gasto de dinero y tiempo en el diseño mecánico. Por otro lado, se abre la posibilidad y la intención, por parte de los autores, de continuar con esta línea de investigación, para la realización de trabajos futuros.

6.2 Recomendaciones

- Al establecer el estado del arte alrededor de la generación de geometrías CAD tridimensionales (que hace parte del Capítulo 2), se resalta la importancia de la comprobación y verificación de las operaciones realizadas en los software CAD para la mitigación de posibles errores en el CAE. Asimismo, es importante aclarar que las complejidades en las operaciones

geométricas que se manejan en los modelos CAD, pueden afectar la elaboración de los enmallados, y por consiguiente afectar la discretización de los modelos en CAE. (White, Saigal, & Owen, 2003)

- Así mismo, se debe tener en cuenta los procedimientos en la generación en CAD, ya que posteriormente no solo afecta al CAE, como se demostró en el presente estudio, sino también posiblemente al diseño, desarrollo y fabricación del producto. Ya que, la información emitida desde el CAD puede contener errores, ya sea en su generación o en la exportación, para una futura vinculación a la ingeniería concurrente.

- Por otro parte, se recomienda continuar con este estudio, a partir de la influencia del CAD en las simulaciones por el método de los elementos finitos en comportamientos multi-físicos, tales como: dinámico, térmico, vibracional, electromagnético, etc. Así como también, el presente trabajo se podría desarrollar, a través de casos reales aplicados a nivel empresarial y/o industrial.

- Debido a que existe una variabilidad en los resultados experimentales, obtenidos en el presente trabajo, y con base en la bibliografía consultada, conlleva a concluir que, en general, aún no es adecuada la integración CAD/CAE. A partir de lo anterior, una alternativa que se denomina isogeometría, (que se desarrolla en la actualidad mediante el uso de geometrías exactas, tanto en el CAD como en el CAE) puede llegar a ser ampliamente usada. (Cottrell et al., 2009)

BIBLIOGRAFÍA

Boussuge, F., Léon, J.-C., Hahmann, S., & Fine, L. (2014). Idealized Models for FEA Derived from Generative Modeling Processes Based on Extrusion Primitives. En J. Sarrate & M. Staten (Eds.), *Proceedings of the 22nd International Meshing Roundtable* (pp. 127-145). Cham: Springer International Publishing. Recuperado a partir de http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-02335-9_8

Cottrell, J. A., Hughes, T. J. R., & Bazilevs, Y. (2009). *Isogeometric analysis: toward integration of CAD and FEA*. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley.

Cuillière, J.-C., Francois, V., & Drouet, J.-M. (2013). Automatic 3D mesh generation of multiple domains for topology optimization methods. En *Proceedings of the 21st International Meshing Roundtable* (pp. 243–259). Springer. Recuperado a partir de http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33573-0_15

Flow Chart for Finite Element Analysis – Overall Steps for FEA, FEM or CAE. (s. f.). Recuperado 25 de enero de 2016, a partir de http://www.brighthubengineering.com/cad-autocad-reviews-tips/66732-what-are-the-steps-required-to-perform-a-finite-element-analysis/

Foucault, G., Cuillière, J.-C., François, V., Léon, J.-C., & Maranzana, R. (2008). Adaptation of CAD model topology for finite element analysis. *Computer-Aided Design*, *40*(2), 176-196. http://doi.org/10.1016/j.cad.2007.10.009

Gelgele, H. L. (2006). Study of CAD-integrated analysis for complex structures. En *Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in Product Design, Manufacturing, and Management* (pp. 673–678). Springer. Recuperado a partir de http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-34403-9_93

Hamri, O., Léon, J. C., & Giannini, F. (2004). A new approach of interoperability between CAD and simulation models. *Proceeding of the TMCE, Lausanne, Switzerland*. Recuperado a partir de http://www.researchgate.net/profile/Okba_HAMRI/publication/259873506_A_new_approach_of_interoperability_between_CAD_and_simulation_models/links/0deec52e59ce8a885a000000.pdf

Hamri, O., Léon, J.-C., Giannini, F., & Falcidieno, B. (2010). Software environment for CAD/CAE integration. *Advances in Engineering Software*, *41*(10-11), 1211-1222. http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.07.003

Lee, S. H. (2005). A CAD–CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques. *Computer-Aided Design*, *37*(9), 941-955. http://doi.org/10.1016/j.cad.2004.09.021

McMillan, A. J. (2015). Geometry generation challenges for modelling and analysis of micro-structured materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *74*, 012010. http://doi.org/10.1088/1757-899X/74/1/012010

Nolan, D. C., Tierney, C. M., Armstrong, C. G., & Robinson, T. T. (2015). Defining Simulation Intent. *Computer-Aided Design*, *59*, 50-63. http://doi.org/10.1016/j.cad.2014.08.030

Núñez, C. V., Romero, C., & del Barrio Morón, A. (2011). Diagnóstico asistido por computador (CAD) para la detección y diagnóstico precoz del cáncer de mama. En *Nuevas técnicas de procesado de imágenes médicas: ingeniería biomédica* (pp. 71–80). Universidad de Castilla-La Mancha. Recuperado a partir de http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3844671

Paramo, G. J. (2012). Aplicaciones de los sistemas CAD/CAM en la manufactura moderna. *Revista Universidad EAFIT*, *34*(110), 11–25.

Park, H.-S., & Dang, X.-P. (2010). Structural optimization based on CAD–CAE integration and metamodeling techniques. *Computer-Aided Design*, *42*(10), 889-902. http://doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.003

Pratt, M. J., & Kim, J. (2006). Experience in the exchange of procedural shape models using ISO 10303 (STEP). En *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling* (pp. 229–238). ACM. Recuperado a partir de http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1128920

Rao, S. S. (2005). *The finite element method in engineering* (4th ed). Amsterdam ; Boston, MA: Elsevier/Butterworth Heinemann.

Srinivasan, V. (2008). Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends. *Computer-Aided Design*, *40*(7), 738-749. http://doi.org/10.1016/j.cad.2007.06.006

Stroud, I., & Nagy, H. (2011). *Solid Modelling and CAD Systems*. London: Springer London. Recuperado a partir de http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-259-9

Sypkens Smit, M., & Bronsvoort, W. F. (2009). Efficient tetrahedral remeshing of feature models for finite element analysis. *Engineering with Computers*, *25*(4), 327-344. http://doi.org/10.1007/s00366-009-0123-8

Tierney, C. M., Sun, L., Robinson, T. T., & Armstrong, C. G. (2015). Generating Analysis Topology using Virtual Topology Operators. *Procedia Engineering*, *124*, 226-238. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.135

Torres, J. C. (s. f.). Diseño de curvas y superficies. Recuperado a partir de http://control.fcfm.buap.mx/investigacion/congresos/Tema%204%20Diseno%20de%20curvas%20y%20superficies.pdf

Urrutia, J. R. Z. (s. f.). VISION GENERAL SOBRE LA UTILIZACION DE SISTEMAS ASISTIDOS POR COMPUTADOR EN LA INDUSTRIA NAVAL. Recuperado a partir de http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfciz.95v/doc/bmfciz.95v.pdf

Wang, H., Zeng, Y., Li, E., Huang, G., Gao, G., & Li, G. (2015). «Seen Is Solution» (SIS), a CAD/CAE integrated parallel reanalysis design system. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. http://doi.org/10.1016/j.cma.2015.10.022

White, D. R., Saigal, S., & Owen, S. J. (2003). Meshing Complexity of Single Part CAD Models. En *IMR* (pp. 121–134). Recuperado a partir de http://imr.sandia.gov/papers/imr12/white03.pdf

Xiao, T., Chen, T., & Han, X. (1996). Automatic generation of B-rep model based on IGES. En *Emerging Technologies and Factory Automation, 1996. EFTA'96. Proceedings., 1996 IEEE Conference on* (Vol. 2, pp. 580–585).

IEEE. Recuperado a partir de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=573949

Xia, Z., Wang, Q., Wang, Y., & Yu, C. (2015). A CAD/CAE incorporate software framework using a unified representation architecture. *Advances in Engineering Software*, *87*, 68-85. http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.05.005

Xu, B., & Chen, N. (2009). An integrated method of CAD, CAE and multi-objective optimization. En *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009. CAID & CD 2009. IEEE 10th International Conference on* (pp. 1010–1014). IEEE. Recuperado a partir de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5375416