

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

**Obtención de un Diseño CAD Optimizado Topológicamente Utilizando una Nube
de Puntos**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARACIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

POR:

SILVESTRE CANO VALADEZ

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2006

Agradecimientos

A mi asesor, Pedro Orta, por ayudarme a lograr este objetivo.

A mis sinodales, Dr. Hugo Elizalde y Dr. Ricardo Ramírez por su apoyo y sus consejos para lograr un buen trabajo.

A todos aquellos que de alguna manera influyeron en el buen cumplimiento de este trabajo.

Dedicatoria

A mi familia, mi papa, mi mamá y mi hermano.

A Ivonne.

A Martín, Miguel, Israel, Oscar, Juan Pablo.

Por su apoyo en cada momento para seguir adelante.

Índice

Resumen	4
Capítulo 1. Introducción	6
Hipótesis	7
Objetivo	7
Justificación	8
Alcances y Limitaciones.....	9
Capítulo 2. Estado del Arte	10
Tipos de Optimización	10
Herramientas de Optimización Topológica.....	11
Automatización del Diseño	13
Herramientas de Automatización del Diseño	13
Optimización en Suspensiones Automotrices	16
Capítulo 3. Nubes de Puntos	20
Capítulo 4. Metodología.....	24
Capítulo 5. Caso de Estudio 1.	27
Capítulo 5. Aprendizaje del Proceso (Lessons to Learn)	43
Generación de archivo *.iges	43
Archivo *.stl.....	44
Nube de puntos	45
Capítulo 6. Caso de Estudio 2	48
Capítulo 7. Resultados	64
Capítulo 8. Conclusiones	66
Referencias	68
Apéndice A. Suspensiones	73
Apéndice B. Suavización de Superficies.....	81

Índice de Figuras

Figura 1. Etapas de la Metodología Aplicada.....	26
Figura 2. Modelo en Solid Edge.....	28
Figura 3. Aplicación de las restricciones de grados de libertad.....	29
Figura 4. Pieza con restricciones y fuerza aplicada.	29
Figura 5. Desplazamientos.	30
Figura 6. Esfuerzos.	30
Figura 7. Aplicación de la respuesta de volumen.....	31
Figura 8. Aplicación de límites permisibles en desplazamiento.....	31
Figura 9. Aplicación de objetivo de minimizar volumen.....	31
Figura 10. Resultado de optimización.....	32
Figura 11. Detalle del resultado de la optimización.....	33
Figura 12. Superposición de pieza original y optimizada.	34
Figura 13. Acercamiento de superposición.....	34
Figura 14. Superposición de las piezas, la pieza original esta en la cara interna.	35
Figura 15. Detalle de la segunda superposición.	36
Figura 16. Pieza importada directamente a 3DReshaper Application como *.stl.....	37
Figura 17. Archivo *.stl importado en 3DReshaper Application como nube de puntos.	38
Figura 18. Conversión de nube de puntos a una superficie, eliminando el posible ruido.	39
Figura 19. Suavización de la superficie.	40
Figura 20. Superficie obtenida sin eliminar el ruido.....	41
Figura 21. Suavización de la superficie sin filtrar.	41
Figura 18. Brazo de control mallado.	49
Figura 19. Restricciones aplicadas a la pieza.	50
Figura 20. Restricción central.	50
Figura 21. Aplicación de las fuerzas.	51
Figura 22. Esfuerzos en la pieza.	52
Figura 23. Desplazamientos en la pieza.	52
Figura 25. Modelo optimizado.....	53
Figura 26. Modelo optimizado, vista 2.	54
Figura 27. Modelo optimizado, vista 3.	54
Figura 28. Nube de puntos del modelo optimizado.	55
Figura 29. Primer modelo obtenido con la nube de puntos.	56
Figura 30. Pantalla para manejo de puntos.	58
Figura 31. Modelo final.	58

Figura 32. Modelo en Solid Edge.....	59
Figura 33. Otra vista del modelo en Solid Edge.....	59
Figura 34. Primera vista en Adams.....	60
Figura 35. Segunda vista en Adams.....	60
Figura 36. Tercera vista en Adams.....	61
Figura 37. Restricciones de la pieza en Adams.....	61
Figura 38. Resultados del análisis en Adams.....	62
Figura 39. Desplazamientos en la pieza final.....	62
Figura 40. Esfuerzos en la pieza final.....	63
Figura 42. Ensamble de suspensión con resorte.....	74
Figura 43. Suspensión de doble brazo A.....	75
Figura 44. Suspensión con solo un brazo A.....	75
Figura 45. Suspensión multi-brazo.....	76
Figura 46. Sistema de suspensión ULSAS.....	77

Resumen

En los últimos años han aparecido muchas herramientas que permiten obtener diseños precisos, óptimos y en tiempos más cortos. Estas herramientas han ido mejorando y han permitido cada vez más aplicaciones en diferentes áreas del diseño. El uso correcto de ellas trae consigo resultados aplicables a productos, diseños o sistemas reales.

La problemática que se tiene en la optimización de los diseños lleva a pensar en la posibilidad de tener resultados útiles y no solo aproximaciones que deban recibir trabajo extra para poder ser acertadas. La decisión sobre las características que se tienen que considerar en una optimización puede llevar a cometer errores que no permitan tener un resultado correcto. Las herramientas de optimización pueden dar una idea del resultado que se requiere, pero no siempre se llega a un modelo exacto.

La optimización topológica es una herramienta auxiliar para obtener diseños con formas o características modificadas de acuerdo con los requerimientos que se hayan planteado. Este tipo de optimizaciones ayudan a obtener diseños más ligeros, con menos material y que sin embargo cumplan con las características funcionales requeridas en el diseño.

Obtener un modelo final a partir del resultado de una optimización puede no ser una tarea tan fácil. El resultado no siempre es útil para ser importado en un software CAD o para ser sometido a algún análisis que permita determinar si el resultado obtenido cumple con las características necesarias. El procedimiento común ha sido que a partir del resultado que se tiene, se diseñe una pieza similar que pueda ser manufacturable.

En este trabajo se muestra el proceso que se llevó a cabo para obtener una pieza optimizada que pudo importarse en programas de CAD y ser sometida a análisis. Para poder tener un diseño final, el resultado de una pieza sometida a optimización topológica, se transformo a una nube de puntos mediante la cual se pudo crear una superficie que limitara el sólido que sería importado en otros programas. El proceso de utilizar una nube de puntos implica conocer las características de la pieza deseada para poder reconocer todas sus características como pueden ser los agujeros.

La pieza que se obtuvo fue sometida a análisis dinámicos y estáticos para probar la utilidad del modelo obtenido. Este modelo si pudo cumplir con las condiciones requeridas para ser analizadas.

Los ejemplos de aplicación que se llevaron a cabo están relacionados con sistemas de suspensión automotriz. Esto no quiere decir que el trabajo hecho sea únicamente aplicable a este campo. Otros tipos de piezas pueden pasar por el proceso de optimización y de nube de puntos que se llevan a cabo en este estudio. La diferencia estaría en la complejidad de los modelos que podría llegar a traer consigo un mayor tiempo necesario en el proceso.

En la revisión que se hizo de la literatura y de los estudios hechos, no se encontró un sistema o un método parecido que se haya utilizado para poder obtener un resultado similar. El proceso utilizando una nube de puntos no ha sido explotado como una opción de transformar o de traducir modelos. Este espacio abrió la posibilidad de considerarlo como una opción para trabajar y obtener resultados.

Capítulo 1. Introducción

Actualmente el peso en un vehículo es un factor a considerar debido a que se requiere consumir menos combustibles. Por esta razón, la optimización de peso puede ser muy importante. Esto permitiría que los vehículos tuvieran un mejor desempeño y que fueran más eficientes. Se han hecho pruebas de optimización de peso en diferentes partes de los vehículos. Aunque principalmente este tipo de adelantos se han concentrado en los materiales. Un ejemplo de ellos son las carrocerías y motores de aluminio que actualmente tienen algunos coches. La suspensión de los autos es un sistema que se ha tratado de optimizar. Debido a su función, se han hecho algunos cambios en su diseño, sin embargo, ha sido difícil obtener un modelo que reduzca considerablemente el peso de esta parte del vehículo.

La suspensión de un vehículo tiene como finalidad absorber las desigualdades del terreno sobre el que se desplaza, a la vez que mantiene las ruedas en contacto con el suelo, proporcionando a los pasajeros un adecuado nivel de confort y seguridad de marcha, y protegiendo la carga y las piezas del automóvil.

El peso del vehículo se descompone en dos partes denominadas: masa suspendida, la integrada por todos los elementos cuyo peso es soportado por el bastidor o chasis, y masa no suspendida, constituida por el resto de los componentes. El enlace entre ambas masas lo materializa la suspensión.

Hoy en día existen diferentes herramientas para optimización como optimizadores de forma. La optimización de forma se busca integrar y desarrollar metodologías que permitan encontrar nuevos y mejores diseños estructurales basados en la forma como elemento resistente, es decir, la obtención de diseños con menor concentración de esfuerzos, entre otros criterios, y que a su vez se construyan con la menor cantidad de material.

Para poder llevar a cabo los análisis de optimización, existen programas computacionales que nos ayudan en gran medida a resolver los sistemas. Estos programas se pueden ligar de manera que una modelación se puede llevar a hacer diferentes análisis para después llevarla una solución de optimización. Algunos de estos programas se basan en elementos finitos complejos para hacer los análisis de

tipo estructural y la optimización. Este tipo de herramientas se pueden conocer como optimizadores que ligan programas.

Las reducciones de tiempo y la automatización de procesos se vuelven muy importantes en este tipo de análisis. Como el estado del modelo original va cambiando con el tiempo, de acuerdo con las fuerzas y reacciones presentes, es necesario hacer ajustes al sistema. De esta manera se tiene que hacer un ciclo en el cual se puedan generar nuevos modelos y hacer los análisis respectivos a los mismos. Esto permitiría reducir el tiempo de los análisis y poder hacer varios casos en los cuales se representen diferentes situaciones que se presentan en la suspensión.

Las herramientas computacionales que existen permiten llevar a cabo los diferentes análisis que pueden ser requeridos. Sin embargo, en algunos casos se tienen limitantes y puede ser necesario llevar a cabo desarrollos que ayuden a obtener los resultados deseados. Para poder lograrlo es necesario ligar los sistemas CAD con paquetes que permitan hacer los análisis de los diferentes sistemas. Esta necesidad puede generar una nueva área de trabajo, en la cual se deben romper las barreras computacionales y los paradigmas existentes respecto a estos sistemas. En un futuro se busca poder ligar totalmente estos sistemas de manera que se puedan llevar a cabo análisis más completos, en menos tiempo y que permitan obtener mejores desarrollos.

Hipótesis

Un modelo sometido a una optimización topológica puede ser utilizado en un programa CAD para ser analizado nuevamente utilizando una nube de puntos como medio para llevar el modelo final optimizado a un sólido que pueda ser importado.

Objetivo

Obtener un sólido optimizado que pueda ser importado en un programa CAD utilizando una nube de puntos como medio para la obtención del modelo final.

Justificación

La competencia y la necesidad de tener ciclos de vida más cortos en los productos necesitan herramientas y procesos que distingan a las firmas de ingeniería y manufactura. Cada empresa necesita desarrollar procesos de diseño que les garanticen obtener ventajas sobre sus competidores. En este aspecto deben buscar desarrollar productos en menos tiempo, y que les generen costos menores, cumpliendo con lo que demandan los consumidores.

Para lograr lo anterior, se han desarrollado herramientas de optimización que permitan productos adecuados en menor tiempo. Con ello se puede reducir la cantidad de material utilizado y por lo tanto la masa, para al mismo tiempo obtener otras ventajas en los diseños. Reducir el peso sin afectar la rigidez en los medios de transporte se ha convertido en una tarea importante para las empresas.

Asimismo, se ha buscado reducir cada vez más el tiempo que se requiere para llevar a cabo los análisis de los productos y tener resultados que permitan tomar una decisión sobre los mismos. Con este motivo el proceso de diseño ha comenzado a ser automatizado para obtener resultados acertados. Se han desarrollado herramientas computacionales que pueden ayudar para lograr este ciclo de diseño. Sin embargo los resultados no siempre son acertados. En ocasiones se obtienen formas que no pueden ser manufacturadas o que no cumplen con los requerimientos para poder llevar los productos al mercado.

Han aparecido herramientas que ayudan a realizar partes del proceso de manera automatizada. Algunas de ellas están muy enfocadas a procesos de calidad. Es necesario definir parámetros mediante los cuáles se llevará a cabo el proceso y se seleccionará el resultado adecuado. Este tipo de programas llevan a cabo diseños de experimentos de manera automatizada [31].

En este trabajo se busca obtener un diseño optimizado, topológicamente, que mediante una nube de puntos se llevará a un diseño CAD final. Se busca que la optimización se lleve a cabo sin necesidad de hacer un diseño de experimentos y sólo respetando los niveles permisibles de desplazamiento, deformación, esfuerzo, según sea el caso. En el proceso se llevaría a cabo una optimización topológica. Se busca reducir la cantidad de material, y por lo tanto la masa, para obtener el resultado.

Cuando se obtiene un diseño optimizado, el diseñador debe generar una pieza similar a la que se obtuvo. No se puede trabajar directamente con el modelo que se obtiene. Los resultados obtenidos pueden no ser exportables o las características que presentan deben ser modificadas para poder tener modelos útiles y que puedan llevarse a la realidad.

Alcances y Limitaciones

Este estudio determinará una forma de llevar un modelo optimizado a un modelo CAD final. El medio por el cual se llevará a cabo este paso es una nube de puntos. La aplicación de nubes de puntos no ha sido considerada como una opción útil para el diseño en cuanto a obtención de sólidos se refiere. Se pretende probar que puede ser una opción real, aplicable, que puede arrojar características útiles y modelos factibles de ser analizados y procesados.

El software con que se cuenta no permite llevar a cabo Análisis de Elementos Finitos Dinámicos, por lo que en este caso no se llevará a cabo esta parte. Tampoco se llevaron a cabo análisis de fatiga. Los análisis que se llevarán a cabo son estáticos. Los análisis de optimización que se mostrarán son de tipo topológico. En estos análisis se pretende hacer cambios en la forma de los modelos únicamente estableciendo valores límite para los desplazamientos.

Debido a la cantidad de piezas del sistema de suspensión completo y a los requerimientos que se tenía, el sistema resultaba complejo de manejar para poder llevar a cabo el análisis. Se decidió empezar con una sola pieza, seleccionando el brazo superior, para tenerlo como base y de ahí generar los pasos del proceso para poder llevar a cabo, posteriormente, un posible análisis del sistema completo.

El programa utilizado no permite aplicar una fuerza cíclica para simular oscilaciones en el sistema. La aplicación de una fuerza puntual representa una opción viable, sin embargo el programa no permite la transmisión del movimiento, por lo que sólo se pueden analizar piezas sencillas sin presentar uniones.

Capítulo 2. Estado del Arte

En los últimos años se han desarrollado herramientas que permiten obtener estudios más precisos y en menor tiempo. Es este capítulo se muestran los logros que se han obtenido en cuanto a Optimización y Automatización del Diseño. Asimismo se mencionan los tipos de optimización que existen. Conocer lo que se ha hecho en cada caso, ayudará a determinar los campos de aplicación que se tengan y las áreas en las que es posible tener oportunidad de trabajar. Al tener un caso de estudio aplicado a suspensiones automotrices, también se mostrarán los estudios que se han hecho relacionados con la optimización de suspensiones.

Tipos de Optimización

Dentro de los problemas de optimización se pueden distinguir varias clases: [58, 59]

- Optimización Paramétrica. Cuando se supone un sistema que depende de una serie "n" parámetros de entrada, puede decirse que la respuesta del sistema es aceptable si se encuentra en un rango determinado de valores dentro de una tolerancia. La variación de los parámetros de entrada puede llevar a obtener una solución óptima. En este caso se habla de una Optimización Paramétrica.
- Optimización de Dimensiones. Se refiere a la determinación de dimensiones geométricas específicas para una clase de diseño preseleccionado, tal como el espesor de una placa, el tamaño de un armazón o la determinación del radio de un elemento circular. Puede ser considerado como un caso específico de la optimización paramétrica.
- Optimización de Formas. Este tipo de optimización introduce variables adicionales que permiten el movimiento de la frontera. Debido al incremento en la dificultad relativa con la optimización de tamaño, los cambios geométricos pueden ser limitados. Sin embargo, ha ganado importancia en las industrias aeronáutica y automovilística.
- Optimización Topológica. Involucra modificaciones tanto de forma como de dimensiones. Las modificaciones topológicas pueden tratarse en ensambles completos. Los componentes en el ensamble pueden ser modificados y se pueden agregar componentes, quitar o mover componentes en el ensamble en el intento de generar un diseño mejorado.
- Optimización Topográfica. Este tipo de optimización se enfoca en la modificación de las características de placas o estructuras planas.

Herramientas de Optimización Topológica

Para poder llevar a cabo análisis de optimización se han desarrollado herramientas computacionales. Entre estas herramientas se encuentran:

- MSC Software. Esta empresa distribuye el software MD NASTRAN, para elementos finitos. Su solucionador es muy poderoso y confiable, lo cual constituye su principal ventaja. Una combinación de simuladores de movimiento con análisis de esfuerzo permite obtener simulaciones dinámicas y de análisis fem sin necesidad de transferir archivos entre programas. El optimizador permite que se exploren diferentes opciones de diseño restringidas a ciertos parámetros como puede ser el esfuerzo. La optimización topológica se lleva a cabo utilizando un método llamado Aproximación por Densidades, en el cual la densidad y el módulo de Young son considerados como variables intermedias de diseño en cada elemento. [32, 33]
- ANSYS. Para llevar a cabo una optimización utiliza Design Space Shape Wizard. Este programa permite remover hasta 50% del material. Dependiendo del problema de diseño, se seleccionan las condiciones de carga y de frontera, mientras que el programa proporcionará condiciones inteligentes de carga y apoyo. Se puede observar cómo el material se va removiendo conforme se lleva a cabo la optimización. El programa muestra una secuencia de formas correspondientes a las iteraciones que se llevan a cabo. El método de Algoritmos Genéticos es utilizado en este software para llevar a cabo la optimización. [34]
- Pro/Engineer Mechanical. Este programa puede llevar a cabo análisis estáticos de esfuerzos y deformaciones, cálculo de frecuencias naturales, respuestas térmicas, pandeo, pre-esfuerzo y vibración. Este programa hace el mallado automático sin intervención del usuario. Para llevar a cabo la optimización se deben definir los parámetros que permitan cambiar la forma del objeto. PRO-MECHANICA puede realizar estudios de sensibilidades que permitan seleccionar las variables que se deben incluir en el estudio de optimización para seleccionar sólo las que tengan un impacto importante en el objetivo. Para la resolución del problema se puede escoger el algoritmo de diseño entre algoritmo de programación cuadrática secuencial (SQP) y

el algoritmo de proyección de gradientes (GDP). Es distribuido por la empresa PTC Software. [35]

- Altair Optistruct. Este software utiliza un método dual de optimización para poder resolver problemas complejos. Se pueden especificar restricciones de frecuencia, volumen, masa, desplazamiento o combinaciones de las mismas. La masa inicial se distribuye uniformemente en el espacio de diseño. Esta masa se va redistribuyendo dentro del espacio de diseño para obtener la máxima rigidez. Las propiedades del material se consideran uniformes u homogéneas en cada elemento. El software supone el espacio de diseño como un medio poroso con un gran número de huecos. Las dimensiones se varían en cada hueco para crear una estructura con la máxima rigidez o frecuencia máxima. Las funciones objetivo pueden ser combinaciones de resultados de análisis. Al igual que MSCNtran, Optistruct utiliza un método de densidades para llevar a cabo los análisis de optimización topológica.[36]
- OPTDES X. Este software fue desarrollado en la Universidad de Brigham Young y se distribuye a través de Design Synthesis. Es un programa de optimización de propósito general donde se puede definir un problema a optimizar usando diversos algoritmos, explorar su sensibilidad y obtener representaciones gráficas de la solución. Este programa soporta optimización continua y discreta, o combinaciones de ambas. El programa funciona con un método de prueba y error en el que se le introduce un rango de valores y se llevan a cabo análisis utilizando este rango. Este programa no es muy utilizado actualmente, sólo para aplicaciones académicas, sobre todo en la universidad que lo desarrolló, su distribución comercial no es muy común. Para resolver los problemas de optimización, se puede elegir entre varios métodos, el más usado es el de Algoritmos Genéticos. [37, 41]

Existen otras herramientas como Visual DOC, Optimus y Model Center. Estos programas sin embargo no llevan cabo optimizaciones topológicas. Se basan en el uso de parámetros de diseño de experimentos para obtener una solución óptima. [31]

Automatización del Diseño

Hoy en día se trata de utilizar sistemas que de manera automatizada puedan llevar a cabo las simulaciones requeridas. De esta manera se ha llegado al concepto de Diseño Automatizado. En él se requiere generar un modelo de CAD automáticamente teniendo las restricciones del problema y tratando de llegar a un objetivo predeterminado con el cual se generarán las opciones necesarias. El diseño automatizado trata de obtener un producto final de calidad mediante el uso de sistemas tecnológicos que permitan ahorrar tiempo y llevar a cabo análisis y simulaciones adecuadas.

El diseño automatizado permite obtener modelos para llevarlos a simulaciones y mediante los resultados volver a tener modelos CAD que permitan la planeación de manufactura para un producto. Así se puede llevar a cabo un análisis FEM, un análisis de optimización, análisis de fatiga, entre otros utilizando un modelo original para llegar a un modelo final que cumpla con los requerimientos originales que se plantearon.

Utilizando este método de diseño se han obtenido resultados importantes en diferentes sistemas. La empresa Vulcanworks desarrolló un sistema para poder obtener un diseño final óptimo de un vehículo con celdas de combustible [13]. En este trabajo se llevaron a cabo diferentes tipos de análisis en los sistemas de automóvil que permitieron obtener los resultados. Se tomó en cuenta la presión, temperatura, eficiencia, rigidez, sistemas adicionales, etc., que podrían alterar las condiciones en las que pudiera estar envuelto el automóvil de manera que no afectara el resultado final de la celda. Este diseño se realizó mediante varias iteraciones en el sistema que permitieron finalmente llegar al resultado deseado.

Los resultados que se han obtenido hacen pensar que es posible obtener diseños óptimos y mejorar los productos en muchos aspectos. Las herramientas que al mismo tiempo se han desarrollado permiten tener un apoyo para lograr los mejores diseños.

Herramientas de Automatización del Diseño

En los últimos años se han desarrollado programas que permiten llevar a cabo procesos de diseño automatizados. En estos casos el usuario introduce los

parámetros que desea modificar en el sistema y el programa automáticamente realiza las iteraciones necesarias y modifica los modelos de acuerdo con un diseño de experimentos programado. De esta manera se puedan ligar varios programas para hacer cambios y análisis en piezas hasta decidir cuál es el modelo óptimo.

Uno de estos programas es ModeFrontier, desarrollado por ESTECO. Este programa se desarrolló entre 1996 y 1999, como un esfuerzo colaborativo entre varias empresas y Universidades de la Unión Europea entre las cuales se encuentran British Aerospace, Daimler Benz Aerospace, Università degli Studi di Trieste, Calortecnica, entre otras [25]. El software ModeFrontier fue el resultado comercial de los estudios que se realizaron de los cuales surgió la empresa ESTECO, que actualmente se encarga de la distribución de este programa.

Este programa ofrece varios algoritmos para optimización, además de un ambiente enfocado a diseño mediante cadenas o flujos. Entre las características que tiene se encuentran [25]:

- Herramientas intuitivas para la integración asistida de cálculos mediante cadenas, permitiendo lógicas complicadas con las que se puede trabajar con procesos reales en donde se necesitan condiciones especiales. Por ejemplo, se puede detener una simulación en el momento en que no se cumplen ciertas condiciones.
- Se pueden utilizar diferentes aplicaciones y lenguajes (java, xml) para llevar a cabo cálculos en ambientes heterogéneos, cálculos concurrentes, y readaptabilidad en una base de datos de diseño.
- Contiene herramientas y algoritmos para analizar ambientes de diseño mediante Diseño de Experimentos, Superficies de Respuestas Simples (lineal, cuadrática) y Avanzadas (Gaussianas, Redes Neuronales), algoritmos de optimización, criterios de toma de decisiones mediante la elección de preferencias, herramientas de análisis gráficos y estáticos.

Utilizando estas características del programa, se pueden llevar a cabo combinaciones como hacer cálculos reales y utilizar superficies de respuesta para tratar de obtener diseños optimizados bajo parámetros especificados. Asimismo se pueden llevar a cabo problemas de diseño robusto que involucren superficies de respuesta y aproximaciones multi-objeto.

Otra aplicación para automatizar los procesos de diseño es iSight. Este programa es herramienta visual y flexible usada para hacer un plan de automatización para explorar

espacios de diseño y encontrar soluciones óptimas y productivas. Las herramientas interactivas de post-procesamiento permiten ver el ambiente de diseño desde varias perspectivas o puntos de vista para asegurar que se entiende lo que se está pidiendo y se puedan tomar las decisiones correctas. [28]

Visualmente se pueden integrar los procesos utilizando esta herramienta. Se tienen interfases directas con diversos programas de análisis y diseño para tener una interacción eficiente que arroje mejores resultados. Entre los programas incluidos están Excel, Word, MATLAB, Ansys, Pro/E. El software iSight permite la integración de herramientas de ingeniería para aplicar rápidamente Diseño de Experimentos, Optimización, Métodos de Aproximación y Métodos de Calidad. [29]

El proceso de iSight comprende cuatro etapas básicas [30]:

1. Integración del proceso. Especifica cómo se ejecuta el proceso, qué códigos se requieren, cuál es el orden de ejecución, cómo se pasan los datos en los procesos. La estrategia que utiliza iSight es el acoplamiento rápido de programas de simulación, lenguajes de programación y formatos. La interfase permite visualizar el flujo de datos y controlarlo, de una manera jerárquica que provee una fácil navegación en el proceso. Estas características permiten llevar a cabo procesos de diseño optimizado multidisciplinario.
2. Definición del Problema. Una vez que el proceso se ha definido, el usuario establece las entradas, salidas, límites, valores iniciales y objetivos. El usuario también define una estrategia de para el estudio que se va a llevar a cabo, la cual depende del tipo de problema que se vaya a llevar a cabo. En esta etapa se describe el por qué se va a llevar a cabo el proceso. También es necesario definir el método de optimización (técnicas numéricas, técnicas exploratorias), aproximación (series de Taylor, superficie de respuesta), diseño de experimentos (factorial completo, estudio de parámetros) y calidad (Monte Carlo, Taguchi, Six Sigma).
3. Automatización Inteligente del Diseño. Una parte que lleva tiempo en el proceso de diseño es la iteración para seleccionar la mejor alternativa, Se utilizan diferentes algoritmos para poder obtener la respuesta que se busca. En esta etapa se ligan los métodos seleccionados anteriormente.
4. Análisis de Datos y Visualización. El proceso se puede monitorear en tiempo real para observar las tendencias que se presentan. El programa ofrece varias herramientas para visualizar los resultados. Estas

herramientas son ayudas para determinar si el diseño final cumple con los requerimientos deseados.

Este tipo de programas obtienen resultados a partir de un diseño de experimentos. El usuario debe incluir parámetros de diseño para encontrar una solución. De esta manera el resultado está limitado a lo que se haya introducido. De alguna manera sabe que el diseño final se encontrará dentro de un rango establecido, pero no se conocen los valores finales que se tendrán. Estos programas no tienen una independencia en la acción para buscar un resultado [31].

Optimización en Suspensiones Automotrices

Desde hace algunos años se ha estudiado el sistema de suspensión automotriz como objeto de una optimización. Diversos autores han publicado sus resultados para dar a conocer los avances que se han logrado en el tema. Este problema de optimización no es nuevo, sin embargo ha tenido cierta complejidad que lo ha convertido en un tema de interés para personas relacionadas con la industria automotriz. Las armadoras de automóviles están muy interesadas en los resultados que pudieran tener este tipo de investigaciones, ya que podrían dotar a sus coches de mejores prestaciones.

A continuación se mencionan algunas investigaciones que se han hecho sobre el tema. No es todo lo que se ha hecho, sin embargo se consideraron como aspectos relevantes que se deben tomar en cuenta.

Fujita [1] ha hecho varios análisis relacionados con la suspensión multi brazos. Su principal rama de estudio está relacionada con los problemas que pueda traer la optimización de un sistema de este tipo. Ha tratado de hacer ver las dificultades que una persona puede atravesar cuando trata de hacer un análisis de optimización en un sistema que tiene varios brazos. Así ha llegado a proponer una estructura jerárquica en los objetivos que se deben de seguir y en la metodología a utilizar. Además ha introducido algunos sistemas de simulación y ha formulado un sistema de optimización matemática. Sus investigaciones las ha basado en la utilización de un método de algoritmos genéticos.

En el Reporte Anual de Optimización de Vehículos Pesados [3] se mencionan los logros alcanzados principalmente en camiones de gran tonelaje. Los resultados no

sólo se enfocan a sistemas de suspensión, también se dan a conocer los avances en diversos sistemas como puede ser dirección, inyección de combustible, entre otros. Los resultados que se han obtenido en estos sistemas pueden ser trasladados y se puede tratar de aplicarlos en vehículos más ligeros. La rigidez que se requiere en los vehículos pesados puede dar ideas de aplicación en pequeños autos.

Hay varios beneficios que se pueden obtener al optimizar un sistema de suspensión automotriz. A pesar de la dificultad que puede representar hacer algo de este tipo, los resultados obtenidos pueden generar grandes cambios en la industria. Esta postura es clara en Motoyama [5], quien ha trabajado para tratar de optimizar diversas partes de los sistemas de suspensión. Además ha propuesto una técnica llamada Metodología de Respuesta de Superficie, en la cual trata de obtener mejores resultados de optimización basándose en una serie de pasos a seguir.

La suspensión de un vehículo puede ser considerada como un intermediario entre el conductor y el pavimento. Quien se encuentre manejando un auto podrá sentir las inclemencias de la carretera en su manejo. No sólo él, sino que los pasajeros del auto podrán sentir los efectos de las irregularidades que se transmiten a la cabina. Es por esto que Sun [7] ha investigado y ha hecho estudios para poder hacer un diseño de suspensión "Amigable al Pavimento". Mediante este diseño se pretende que el sistema de suspensión pueda absorber las cargas generadas por el pavimento. Los estudios que ha hecho se basan en minimizar las probabilidades de que el sistema en algún momento alcance un valor pico.

En sus estudios de posgrado, Wronski [9] realizó un estudio de optimización para la suspensión de la pick up Ford F350. Se concentró en el estudio de la suspensión trasera del vehículo. Para realizar el análisis se utilizaron 7 variables de diseño y 12 parámetros fijos.

La optimización relacionada al área automotriz abarca muchas partes del auto. El mofle también ha sido objeto de estudios de optimización. Una razón para hacerlo fue poder tener un proceso de fabricación más sencillo. Al tratar de obtener este resultado se vio que mejorar este sistema podría hacer que el peso del vehículo se redujera, además de que en el auto ocuparía menos espacio este sistema. Sin embargo se observó que al hacer estos cambios se tendría que mejorar el rendimiento y trabajo del sistema haciendo que llevara a cabo sus funciones en menos espacio sin afectar el desempeño del vehículo. [18]

Afonso [17] desarrolló un estudio en el cual se da una estrategia para llevar a cabo la optimización de estructuras. En este caso se hacen elementos placa para que se pueda hacer una optimización de los cuerpos deseados. En general esta técnica se aplica para estructuras que tienen cascarones o están hechas mediante éstos.

En la mayoría de los casos, los estudios para optimización de este tipo de sistemas se realizan utilizando Algoritmos Genéticos. El sistema se modela paramétricamente de manera que pueda ser modificado dependiendo de los puntos evolutivos que se quieren analizar. De esta manera se llevan a cabo una gran cantidad de análisis al realizar pequeños cambios en cada uno de ellos que permiten llegar a un modelo óptimo.

Lamberti [20] ha desarrollado técnicas de optimización utilizando programación lineal. Sus estudios se han enfocado a la optimización de estructuras grandes. Una ventaja que él ve al utilizar optimización de modelos es la posibilidad de tener varias alternativas en los diseños para poder estudiar la mejor opción antes de poder llevar a cabo un proyecto.

Un ejemplo de esta posibilidad se llevó a cabo con la empresa Altair. Se trabajó en un proyecto en el cual se deseaba llevar a cabo el diseño de un autobús de pasajeros. Se inició tomando en cuenta las medidas que se requerían en el vehículo. Posteriormente se decidió la ubicación de las puertas y sistemas necesarios dentro del vehículo. Se analizaron diferentes configuraciones para el autobús, distribuyendo los asientos de diferentes maneras para estudiar las opciones. Asimismo se hicieron estudios de optimización de las estructuras y las configuraciones para determinar la mejor opción en el diseño del autobús. [21]

El método de algoritmos genéticos [11] se ha utilizado para tratar de obtener diseños generados de una manera que se acerque a la automatización. Así se ha trabajado en alabes de turbinas para obtener formas y ángulos que permitan tener un mejor rendimiento.

La optimización de diseños toma gran auge para poder tener menos material en las piezas y así obtener mejores rendimientos y tener menos gastos. Las herramientas

que se tengan y que se puedan desarrollar para la optimización pueden ser un factor clave en los resultados que se obtengan.

Los estudios realizados permiten que hoy en día se puedan tener sistemas eficientes y que brinden características que los usuarios piden. Las herramientas que se desarrollan y que aparecen para simplificar y complementar el trabajo ayudan a que los diseños que se realizan puedan tener la precisión necesaria. En los últimos años los resultados obtenidos han avanzado en gran medida. No se puede decir que se desarrollen productos sin que en alguna parte intervenga una herramienta de diseño que haya tenido actuación importante en el proceso.

Después de recopilar la información y analizarla, se puede observar que los estudios de optimización no han llegado a tener una aplicación que permita obtener de nueva cuenta un modelo útil con el que se pueda trabajar. Una vez que se ha obtenido un resultado de optimización, no se trabaja sobre el resultado para directamente llevarlo a seguir en las aplicaciones. Basándose en lo obtenido, se vuelve a diseñar una pieza con características similares a las arrojadas por el análisis. Esta brecha que existe se convierte en una oportunidad de estudio para poder cerrar un ciclo de diseño y obtener resultados que puedan pasar a convertirse en modelos útiles.

Los programas que se observaron tienen características que convierten a cada uno de ellos en herramientas útiles para llevar a cabo diversos tipos de análisis. Sin embargo cada uno presenta puntos particulares que lo convierten en una mejor opción. El software desarrollado por Altair (Optistruct) presenta características que lo hacen muy poderoso. La forma en la que trabaja las piezas hace que los resultados que pueden obtenerse sean muy precisos. Asimismo permite dividir las piezas o ensambles en grupos con características independientes. Este tipo de características particulares lo convierten en una muy buena opción. Este software se consideró como el que ofrecía los mayores beneficios para el estudio. Asimismo este software se tiene disponible para ser utilizado sin ningún problema y llevar a cabo el estudio.

Capítulo 3. Nubes de Puntos

En este capítulo se explican las generalidades de una nube de puntos. Asimismo se mencionan los tipos de nubes de puntos que se manejan. Este tipo de archivos pueden presentar dificultades en su manejo. La utilidad de un archivo de este tipo dependerá del ruido que tenga incluido y de las posibilidades que se tengan para regenerarla.

Una nube de puntos se refiere a un grupo de coordenadas distribuidas en un espacio de tres dimensiones que describen los contornos o características de alguna superficie. La reconstrucción de superficies precisas a partir de nubes de puntos que no muestran una organización determinada, es un problema complicado, que en ocasiones no es completamente resuelto. La generación de modelos basados en polígonos que puedan satisfacer las necesidades de visualización es necesaria en muchas aplicaciones, incluso en juegos de vídeo. El fin último siempre es encontrar una manera de crear un modelo computacional de un objeto que se asemeje lo más posible a la realidad. [42]

Los métodos para recuperar formas en 3D y modelos pueden ser divididos en 2 grupos:

- Sistemas que utilizan medidas de objetos.
- Sistemas que no utilizan ningún tipo de medidas.

En el primer grupo se pueden tener dos tipos de técnicas:

- Métodos basados en triangulación. Utilizan medidas y, dependiendo del origen de la nube de puntos, combinaciones de intensidades de luz para obtener un modelo. [43, 44]
- Métodos que no requieren correspondencias. Estos métodos estiman superficies normales en lugar en datos en 3D. [45]

Los sistemas que no utilizan medidas son básicamente desarrollados para aplicaciones de video juegos y animaciones. Por esta razón no serán tratados en este documento. [46]

Los algoritmos de reconstrucción pueden clasificarse de acuerdo al tipo de datos de entrada o a la calidad de los mismos [47]:

- Nubes de puntos desorganizadas. Los algoritmos que trabajan con datos desorganizados no tienen otra información mas que la posición espacial. No pueden asumir nada acerca de la geometría. Antes de generar una superficie, usualmente se estructuran los puntos de acuerdo con su coherencia para tratar de obtener una buena distribución de los datos. Si éstos no son distribuidos uniformemente es muy probable que no se tenga éxito en la reconstrucción.
- Nubes d puntos estructuradas. Los algoritmos basados en nubes de puntos estructuradas toman en cuenta información adicional acerca de los puntos.

Asimismo existen algoritmos que se basan en otras características como es la división espacial. Los algoritmos orientados a superficies no distinguen entre superficies abiertas y cerradas. Los algoritmos orientados a volumen trabajan particularmente con superficies cerradas. [48]

Otra clasificación se basa en el tipo de representación de la superficie, donde podemos encontrar [49, 50, 51, 52]:

- Representación paramétrica. Estos métodos representan la superficie como un número uniones superficiales descritas por ecuaciones paramétricas. Así, muchas uniones pueden ser unidas para formar una superficie continua.
- Representación implícita. Estos métodos tratan de encontrar una función suave que pase por todas las posiciones que fueron evaluaciones implícitas de un valor especificado.
- Representación simplista. En esta representación, la superficie es una colección de elementos simples, incluyendo puntos, bordes y triángulos.
- Superficies aproximadas. Este método no siempre contiene todos los puntos, pero si la mayor cantidad de puntos cercanos. Se puede utilizar una función de distancia para estimar una malla correcta

La última clasificación se puede hacer basada en las diferentes suposiciones del algortimo [53, 54]:

- Algoritmos que suponen topologías fijas. Usualmente asumen que la topología se la superficie se conoce a priori.
- Algoritmos que exploran la estructura u orientación. Este tipo de algoritmos trata de buscar patrones de comportamiento en las superficies para proponer una reconstrucción.

La conversión de los datos medidos a una superficie está generalmente basada en cuatro etapas:

1. Pre-procesamiento. En esta etapa se eliminan los datos erróneos o que pueden generar problemas.
2. Determinación de la topología global del objeto. Se llevan a cabo relaciones de vecindades entre partes adyacentes de superficies que se derivarán. Este paso puede requerir algunas condiciones específicas para preservar geometrías especiales.
3. Generación de superficies poligonales. Se llevan a cabo mallas triangulares o tetraédricas que satisfagan ciertos requerimientos de calidad.
4. Post-procesamiento. Cuando el modelo es creado, las operaciones de edición son comúnmente aplicadas para refinar y perfeccionar las superficies.

En el pre-procesamiento, se llevan a cabo las operaciones de edición de los puntos obtenidos. Se toma una muestra de los datos basada en la curvatura de los puntos. Este paso es importante para reducir la redundancia de datos y para remover cantidades de errores que puedan ser introducidos por aspectos externos. La reducción de ruido utiliza métodos estadísticos para considerar la curvatura de la superficie y tratar de preservar las características que se obtuvieron. [55, 56]

La triangulación convierte un grupo de puntos a un modelo polinomial consistente. En esta operación se parten los datos en elementos simples que puedan formar vértices, bordes y caras que se unan en bordes compartidos. Se utilizan métodos para discretizar el dominio y dividirlo en elementos pequeños. Una triangulación óptima es definida mediante ángulos, longitudes, alturas o áreas. [57]

Los polígonos creados usualmente requieren de refinarse para corregir las imperfecciones o errores en la superficie. Estas operaciones varían desde la simple edición de triángulos hasta la corrección o edición de superficies. Cuando se lleva a cabo una corrección de bordes, las caras pueden ser separadas o movidas hacia otra locación. Si se hace una inserción de triángulos los agujeros pueden ser llenados mediante la construcción de superficies poligonales que respetan las áreas alrededor. Las mallas incompletas también pueden ser corregidas al insertar triángulos. El número de polígonos puede ser reducido preservando las formas básicas y cambiando los límites de la malla. [58]

En su trabajo, Mitra [60] muestra algunas técnicas útiles para la regeneración de nubes de puntos. En estos métodos se utiliza la normalización para eliminar el ruido y generar superficies mediante los puntos.

Los archivos de nubes de puntos tienen características que pueden hacerlas útiles para los estudios. Es necesario conocer las características que pueden usarse y que pueden brindar ventajas. Asimismo, el ruido incluido es un factor importante para poder determinar si la superficie que se obtenga puede ser útil o no servirá para la causa que se busque.

Capítulo 4. Metodología

En este capítulo se explica la metodología utilizada en el proceso de estudio. Esta metodología se usa en dos ejemplos de aplicación con una pieza sencilla y otra más compleja. Ambos ejemplos están relacionados con suspensiones automotrices.

Para diseñar un producto se debe tener una idea sobre la cual se trabajará. Esta idea debe de entrar en un proceso que le permita llegar a convertirse en realidad. En la parte que interesa a este estudio, la idea o el concepto que se tiene del producto debe ser llevado a un CAD. En este sistema se podrá obtener un modelo en 3D que permita visualizar la forma y algunas características del diseño.

Una vez que se tiene la pieza en un modelo CAD, se debe continuar el proceso. Algunas de las piezas que se diseñan estarán sometidas a fuerzas o llevarán a cabo movimientos para poder hacer su funcionamiento correctamente. El análisis de estas características no siempre es sencillo. Para poder obtener un resultado que permita saber si la pieza soportará las cargas y si funcionará correctamente, es necesario hacer un Análisis Dinámico. Este será el segundo paso dentro de la Metodología. En caso de que la pieza no vaya a someterse a movimiento, este paso puede ser omitido.

El Análisis Dinámico permite obtener los valores de fuerzas o reacciones máximas en el tiempo generadas en las piezas. Es necesario conocer si los diseños soportarán las cargas y qué esfuerzos y deformaciones se generarán en el proceso. Para poder obtener estos resultados, se lleva a cabo un Análisis de Elementos Finitos. Este tercer paso ayudará a determinar si la pieza soportará los esfuerzos y si la deformación o el desplazamiento serán adecuados de acuerdo con las características que se piden en el diseño.

Si los esfuerzos son adecuados para la pieza, es posible que el diseño tenga excedentes de material o que se pueda prescindir de una parte de él. Para esto, como siguiente paso, se lleva a cabo un Análisis de Optimización. Este análisis permitirá observar si se puede remover material de alguna parte del diseño. El quitar material representa obtener diseños más ligeros. Tener menos material no debe comprometer las características que el sistema requiere. Es importante considerar que existen valores sobre los cuales se debe trabajar para que el diseño que se obtenga cumpla con los requerimientos y factores de seguridad necesarios.

El resultado del análisis de optimización no siempre puede llevarse a un modelo útil. Utilizando un archivo *.stl, el modelo final puede ser transferido y reconocido como una nube de puntos en algunos programas. Cuando se tiene una nube de puntos, se pueden unir cada uno de los puntos que la forman y obtener una superficie. Sin embargo la pieza que se genera, en primera instancia, no siempre tiene características que la hagan factible de ser utilizada. La superficie debe ser suavizada para eliminar bordes o esquinas innecesarias para el modelo.

Este paso puede resultar complicado. El ruido que puede incluir la nube de puntos puede generar problemas para la obtención de una superficie adecuada. Obtener características de este tipo de modelos depende de que tan acertado sea el método utilizado para transformarlos en superficies o en volúmenes. Se debe considerar la eliminación de puntos que pudieran no ser representativos dentro de la figura que se tiene. Asimismo la suavización de la superficie es un proceso en el cual se deben considerar las características que se buscan para obtener un resultado adecuado.

El diseño optimizado puede o no ser adecuado para llevarse a la realidad. Es posible que este diseño sea una aproximación que requiera refinarse para poder tener un diseño terminado. En este caso, el diseño obtenido se procesa para llevarse un Diseño Final CAD que permita tener un diseño terminado y aplicable a la realidad. Si el resultado no fue el correcto, es probable que se le tengan que hacer cambios a diseño y volver a analizarlo para ver si los cambios hechos no ponen en riesgo las características que el producto requiere. La decisión tomada nos llevaría a terminar el ciclo o a reiniciarlo y obtener otro diseño. Figura 1

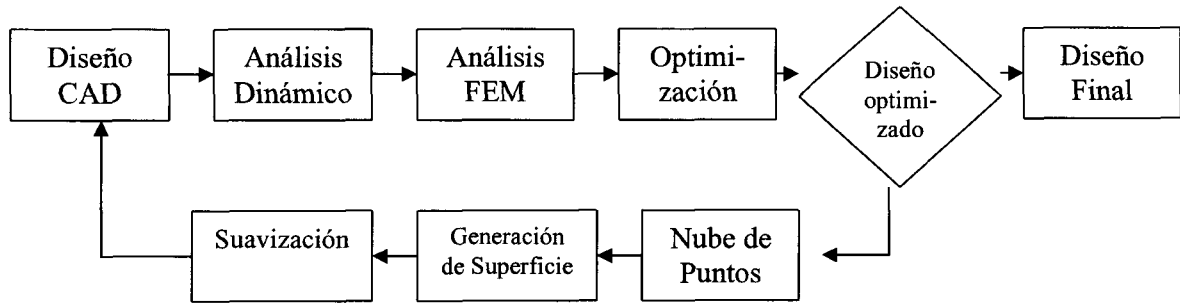


Figura 1. Etapas de la Metodología Aplicada

El resultado del análisis de optimización debe ser llevado a un modelo CAD. Para realizar este paso se utilizará la nube de puntos. En un proceso normal el diseñador debe modificar el modelo obtenido en la optimización para poder aplicar el resultado. El modelo obtenido no siempre presenta las características necesarias para que puedan ser manufacturables. El diseñador debe hacer las adecuaciones necesarias para que la pieza pueda tener las características buscadas o los requerimientos necesarios.

En este trabajo se busca obtener un resultado optimizado topológicamente y llevarlo a un modelo sólido sin necesidad de reconstruir un modelo o hacer uno nuevo. Esto se llevará a cabo manipulando un archivo de nube de puntos para generar una superficie que sea útil. Esta superficie puede necesitar una suavización, la cual también se llevará a cabo.

Esta metodología es útil para poder llevar a cabo un proceso de diseño de manera correcta. Siguiendo cada uno de los pasos antes explicados se puede lograr un resultado optimizado. La metodología puede ser aplicada a piezas sencillas o más complejas. Los programas que se utilizaron permitirán obtener resultados acertados. Utilizar algún otro programa no debería representar un cambio drástico en la metodología. Simplemente la compatibilidad de los archivos podría hacer que las herramientas cambiaran. Sin embargo, el principio de cómo aplicar las herramientas en el proceso debe ser el mismo.

Capítulo 5. Caso de Estudio 1.

En este capítulo se presenta la primera aplicación que se hizo para obtener un sistema optimizado y poder establecer la metodología para el proceso de diseño. Como un primer ejemplo de aplicación se desarrolló un sistema sencillo para llevar a cabo los análisis necesarios. Se presentará paso a paso el proceso que se llevó a cabo para obtener el resultado de la pieza optimizada.

Planteamiento del Problema.

La pieza será sometida a una sola carga, en el eje "z" de 10000N. El criterio para aplicar esta carga fue someter la pieza a un caso extremo. En este caso se pensó en una situación en la que el peso de un vehículo de 2 toneladas se repartiera únicamente en dos ruedas. De esta manera se distribuiría 1 tonelada en cada una de las ruedas. Al multiplicar por el valor de la gravedad para obtener una fuerza el resultado es aproximadamente 10000N. El análisis de la pieza se restringirá en 6 grados de libertad en los extremos. Este caso es difícil de encontrar. Sin embargo se considera para observar el comportamiento de la pieza y del programa ante una restricción que limite prácticamente todo. Con esto se pretende, al mismo tiempo de obtener un análisis de la pieza, ver las restricciones que se pueden tener con el programa.

Una vez que se obtengan resultados para esfuerzos y deformaciones o desplazamientos, se procederá a hacer el análisis de optimización. Este análisis se llevará a cabo utilizando las restricciones referentes al desplazamiento máximo que se obtenga en la pieza. Este desplazamiento establecerá el límite en el que se podrá trabajar para hacer la optimización. La optimización que se hará será una optimización topológica. El objetivo de la optimización será minimizar el volumen y la masa.

Para comenzar el análisis se diseñó una pieza utilizando Solid Edge. Esta pieza se tomó del modelo de suspensión McPherson hecho en Adams. La pieza corresponde a un brazo, conocido comúnmente como "wishbone". Esta pieza se tomó como base para poder llevar a cabo los análisis y manejarla de acuerdo con lo que se fuera requiriendo en cada programa. Se buscó una pieza sencilla que fuera relativamente fácil de manejar para poder hacer modificaciones y poder observar si los cambios que

se hacían realmente tenían un efecto y estaban funcionando adecuadamente en el proceso.

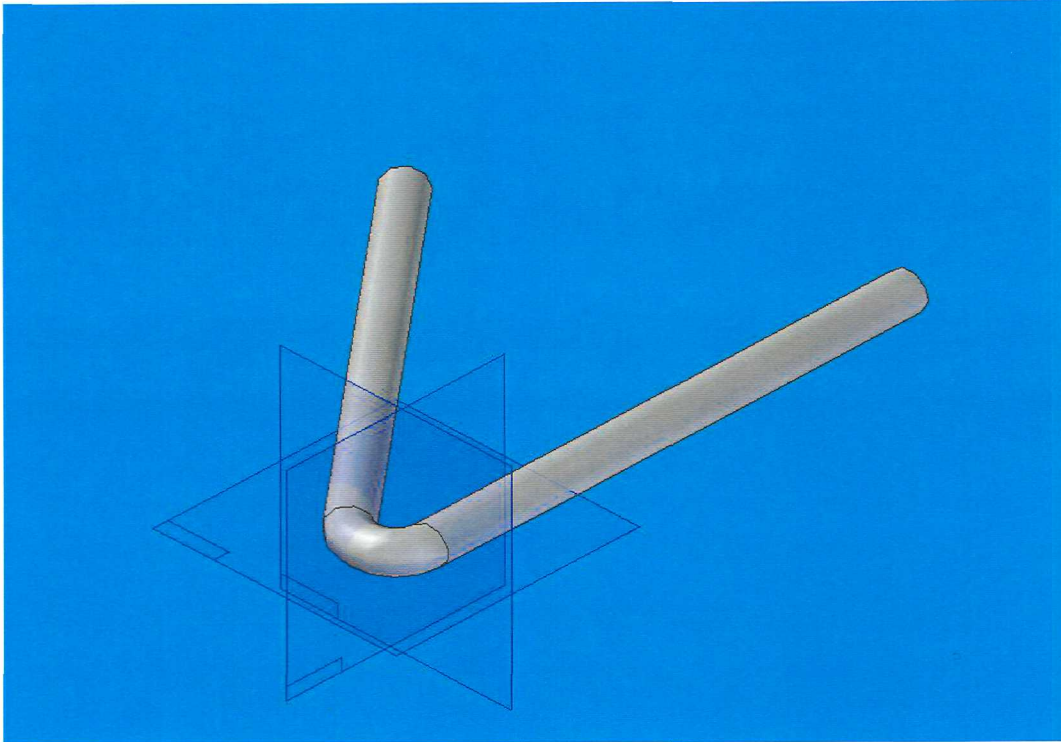


Figura 2. Modelo en Solid Edge.

Una vez que se tuvo la pieza, ésta se grabó como un archivo *.igs, de manera que pudiera ser importada en otros programas. La pieza debía ser analizada en cuanto a esfuerzos y desplazamientos, es decir, se sometió a un Análisis de Elementos Finitos. Este análisis se hizo en Hypermesh, utilizando Optistruct como el recurso para resolver el problema que se planteaba (solver).

Al modelo hecho se le asignó como material acero. Una vez asignado el material, se hizo el mallado de la pieza, utilizando una malla tetragonal tamaño 1. Asimismo se aplicaron las condiciones de frontera, restricciones y fuerzas, necesarias para llevar a cabo el análisis de acuerdo con lo que se buscaba. La pieza fue sujeta en los extremos con empotramientos, se restringieron todos los grados de libertad. Se aplicó una fuerza de 100000 N en dirección “z” positiva. La figura 4 nos muestra una vista de la pieza con las restricciones y fuerza aplicada, después de haber creado la malla. En siguiente pantalla del menú “BC”, “constraints” (figura 3) se puede observar cómo se introducen las restricciones al marcar los grados de libertad.

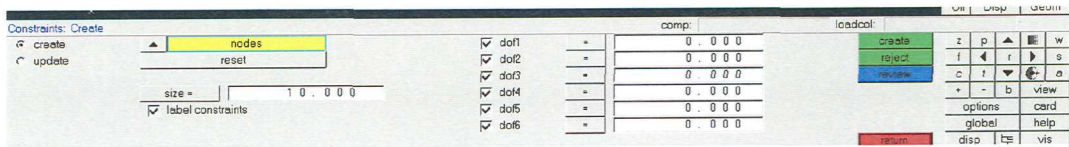


Figura 3. Aplicación de las restricciones de grados de libertad

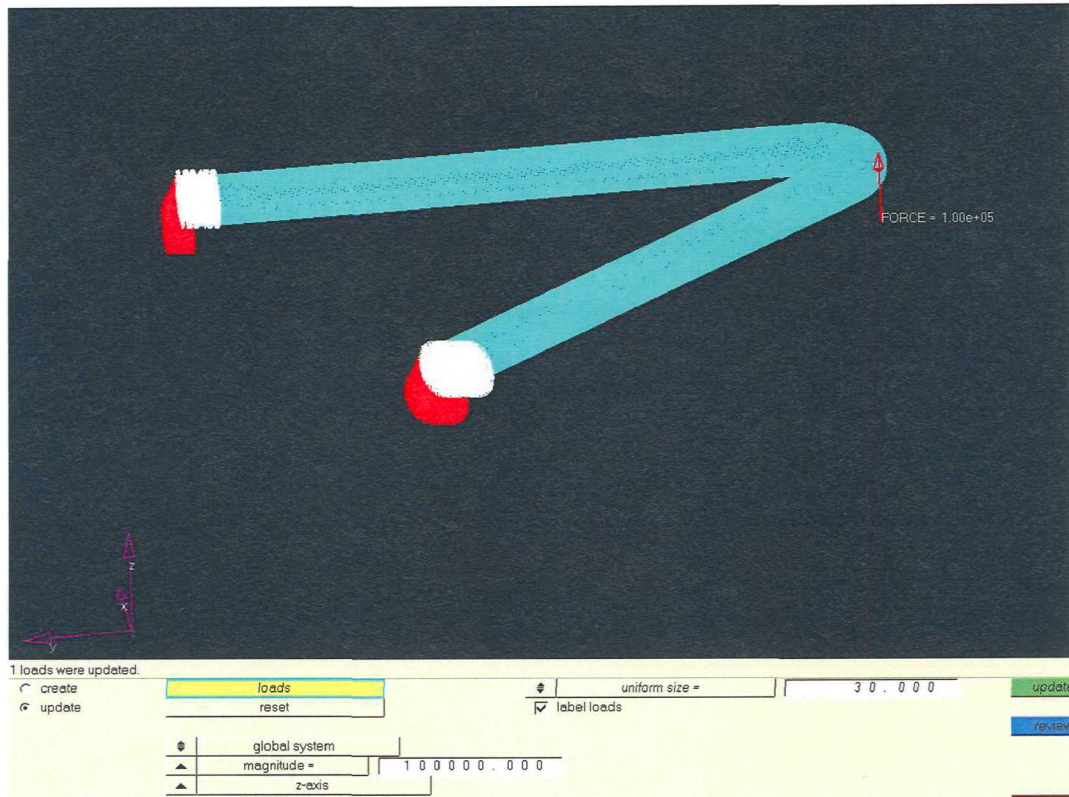


Figura 4. Pieza con restricciones y fuerza aplicada.

Al tener todas las condiciones que Hypermesh requiere para llevar a cabo un análisis, se procedió a correr el Análisis de Elementos Finitos. Se obtuvo como resultado un desplazamiento máximo de 167.7 mm (aprox. 168 mm). Este valor sería utilizado posteriormente para llevar a cabo el análisis de optimización de la pieza. La gráfica de los desplazamientos y una vista de la pieza deformada se puede observar en la figura 5.

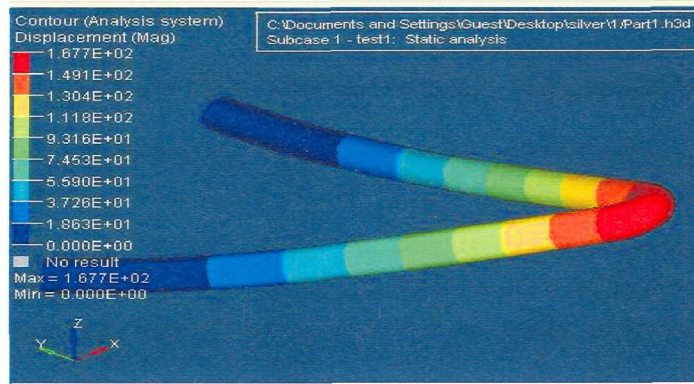


Figura 5. Desplazamientos.

También se obtuvieron los esfuerzos que se generan en la pieza.

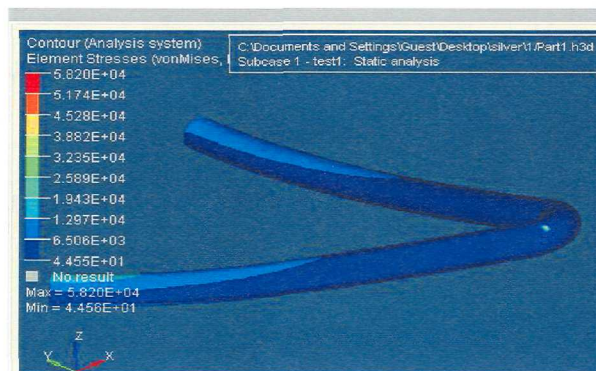


Figura 6. Esfuerzos.

Cuando se tuvieron los resultados de esfuerzos y desplazamientos se procedió a llevar a cabo un análisis de optimización de la pieza. En este caso se buscó reducir el peso del modelo original. Para poder hacerlo se utilizó la respuesta “volumefrac” (figura 7). Esta opción se puede acceder en el menú “optimization”, “responses”. Esta opción que da el programa se refiere a reducir la masa y arrojar una respuesta referente a la masa que se redujo.

Es importante notar que el desplazamiento máximo serviría como una condición para poder llevar a cabo este análisis. El valor de 168 mm daría un rango en el cual la pieza pudiera encontrarse y así poder llevar a cabo el análisis y obtener un resultado en el cual el peso del modelo disminuyera. Se utilizaron como límites superior e inferior, 190 mm y 175 mm, respectivamente. La pantalla en la figura 8 muestra la opción para introducir los valores permisibles de la restricción de desplazamiento. Se utilizaría esta

restricción de desplazamiento y no la de esfuerzos. Se estableció el objetivo de minimizar el volumen de la pieza. Esto se hace en el menú “objective” (figura 9). Así, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.



Figura 7. Aplicación de la respuesta de volumen.

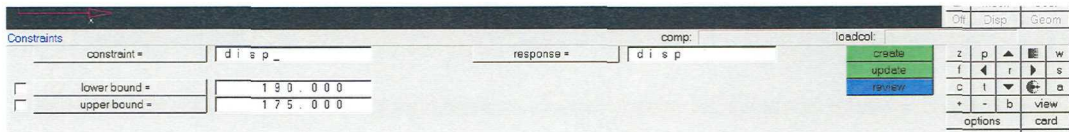


Figura 8. Aplicación de límites permisibles en desplazamiento.

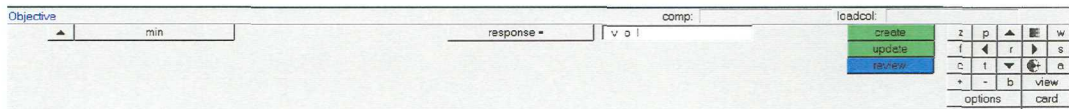


Figura 9. Aplicación de objetivo de minimizar volumen.

En la figura 10 se pueden observar partes de la pieza en las que se extrajo material durante el proceso de optimización. Se puede ver que las superficies que se generan no son regulares, contienen muchas esquinas, lo cual hace que la pieza no tenga una apariencia muy atractiva. Posteriormente se trataría de disminuir este fenómeno.

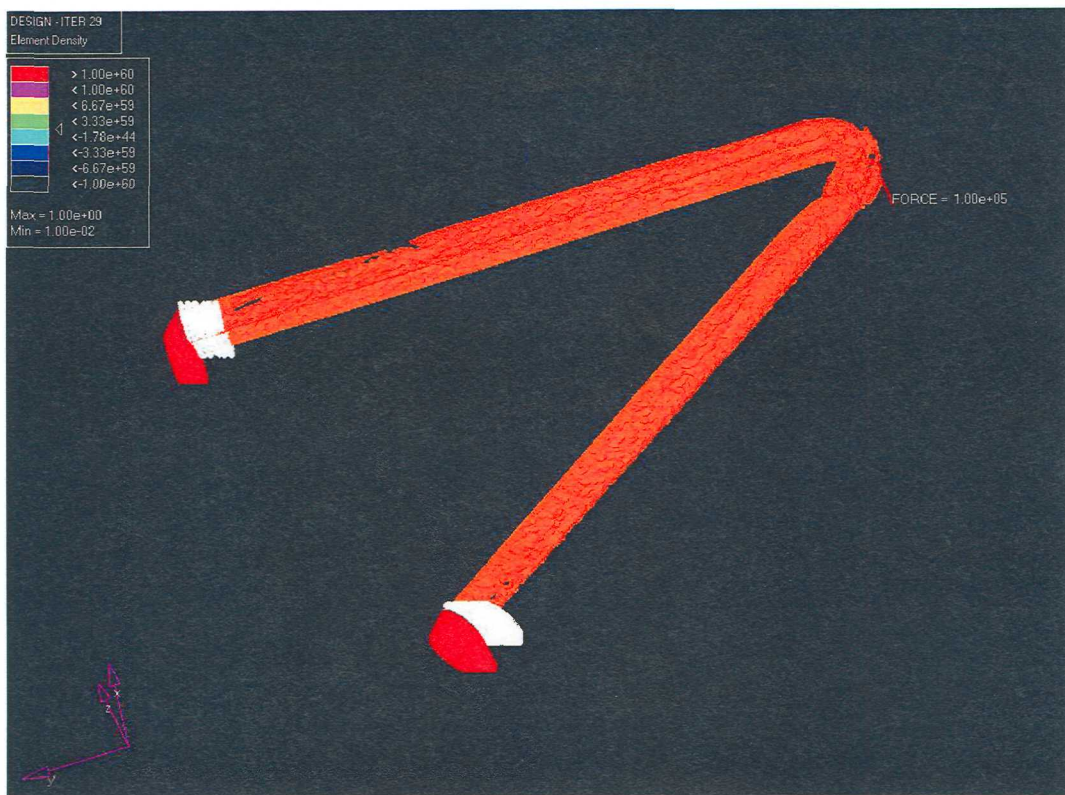


Figura 10. Resultado de optimización.

En la siguiente figura se puede observar con un poco más de detalle el resultado en algunas áreas de la pieza. Se puede ver la carencia de material en algunas zonas.

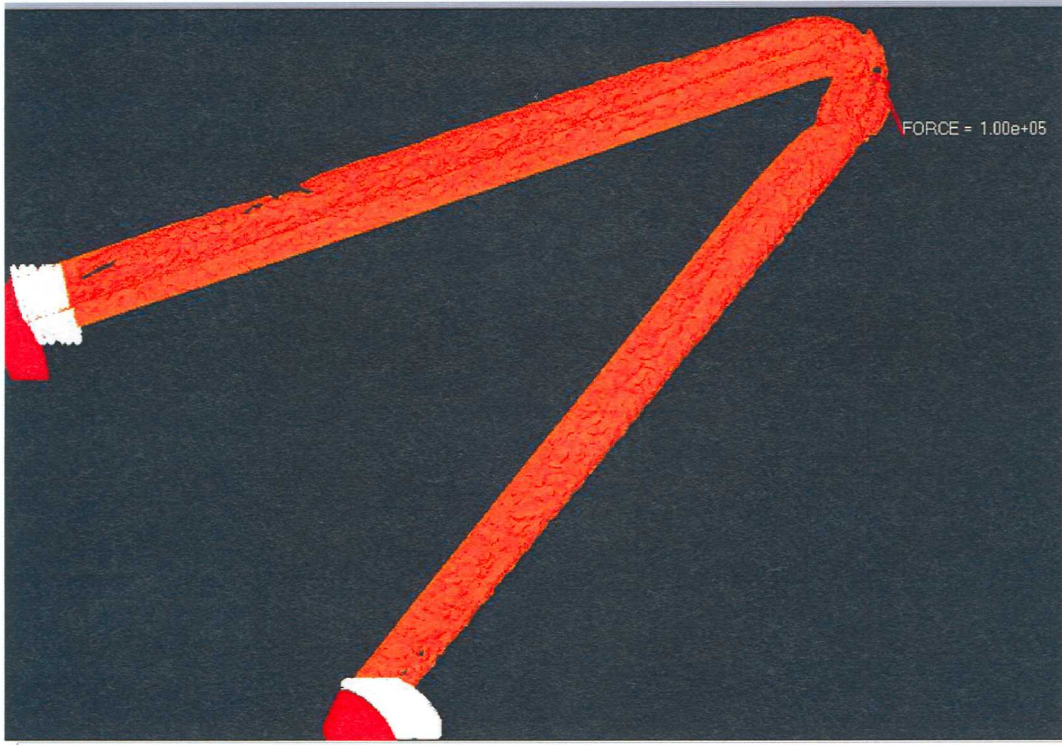


Figura 11. Detalle del resultado de la optimización.

En las siguientes figuras (figura 12 y figura 13) se puede observar la superposición de la pieza obtenida en la optimización y el modelo original. En este caso se pueden ver las caras curvas o cilíndricas que originalmente tuvo la pieza y dentro de ellas se pueden ver zonas en las cuales se quitó material de la pieza. Esta vista nos permite ver que realmente se extrajo material de la pieza. Posteriormente se puede ver un acercamiento a la pieza original con la superposición del modelo que se tiene como resultado de la optimización.

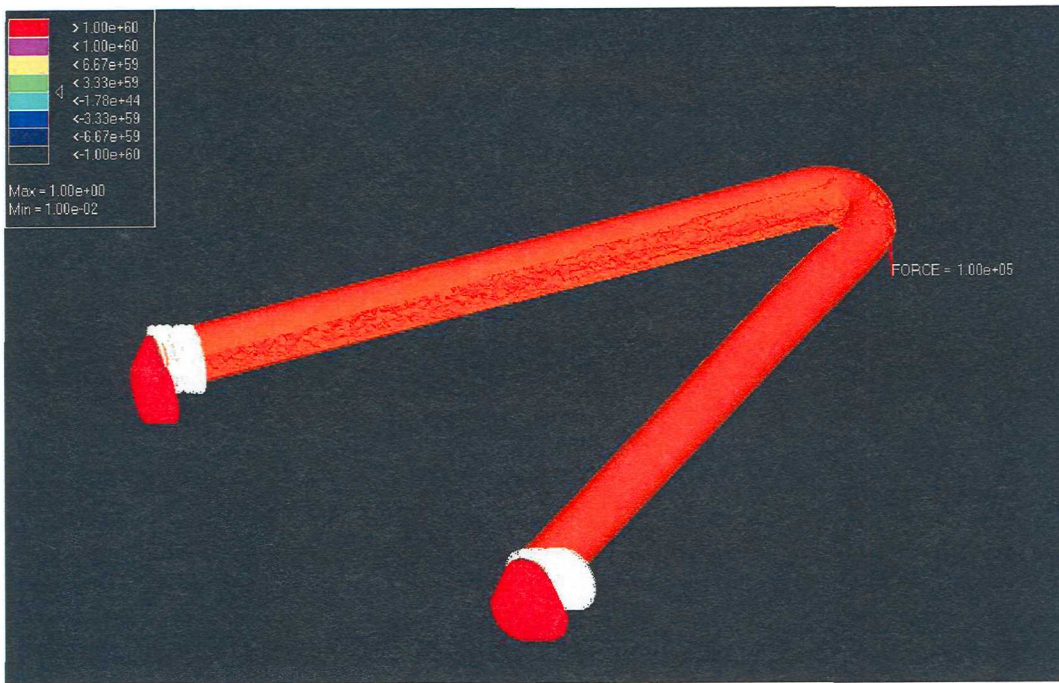


Figura 12. Superposición de pieza original y optimizada.

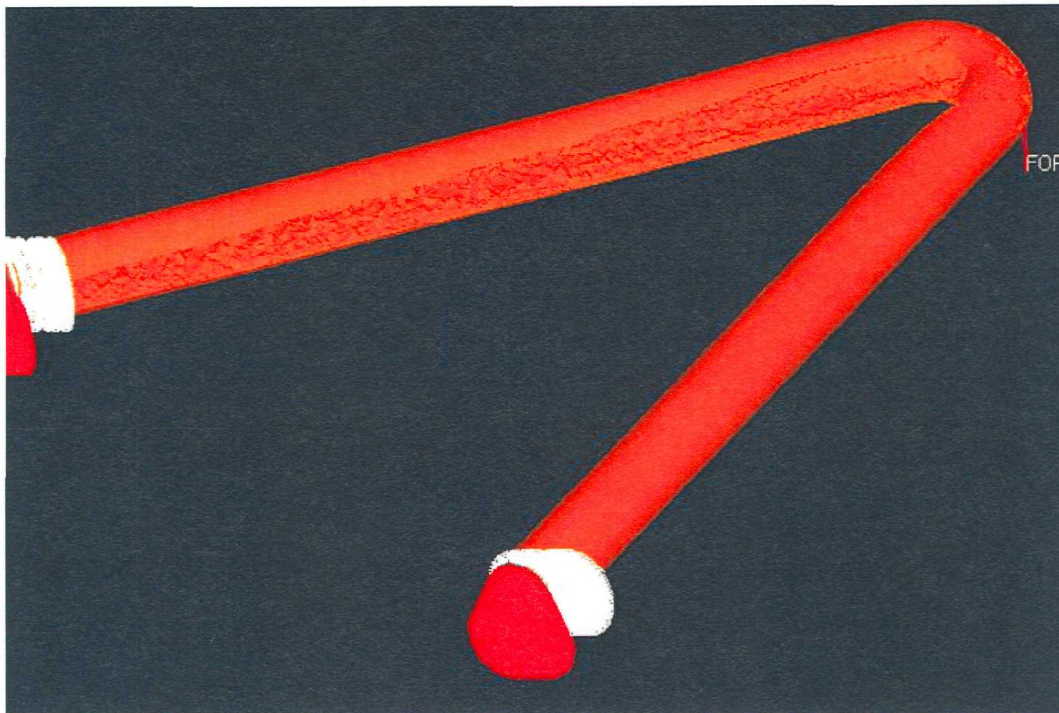


Figura 13. Acercamiento de superposición.

En las siguientes figuras, se observa otra superposición del modelo original y el optimizado. En este caso las caras interiores muestran la pieza original y se puede observar en el exterior el material que fue removido durante el proceso de optimización. Asimismo, se puede ver como en el interior se quita material y aparece un hueco o una diferencia entre el modelo optimizado y el modelo original. El acercamiento de la pieza (figura 13) ayuda a ver mejor esta característica.

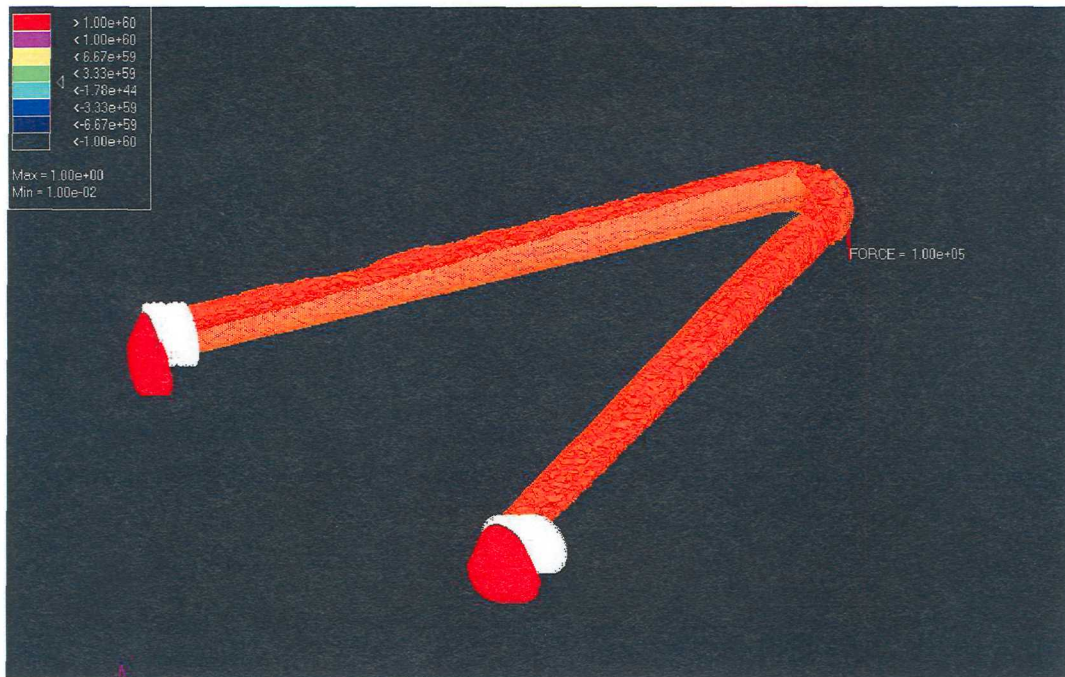


Figura 14. Superposición de las piezas, la pieza original esta en la cara interna.

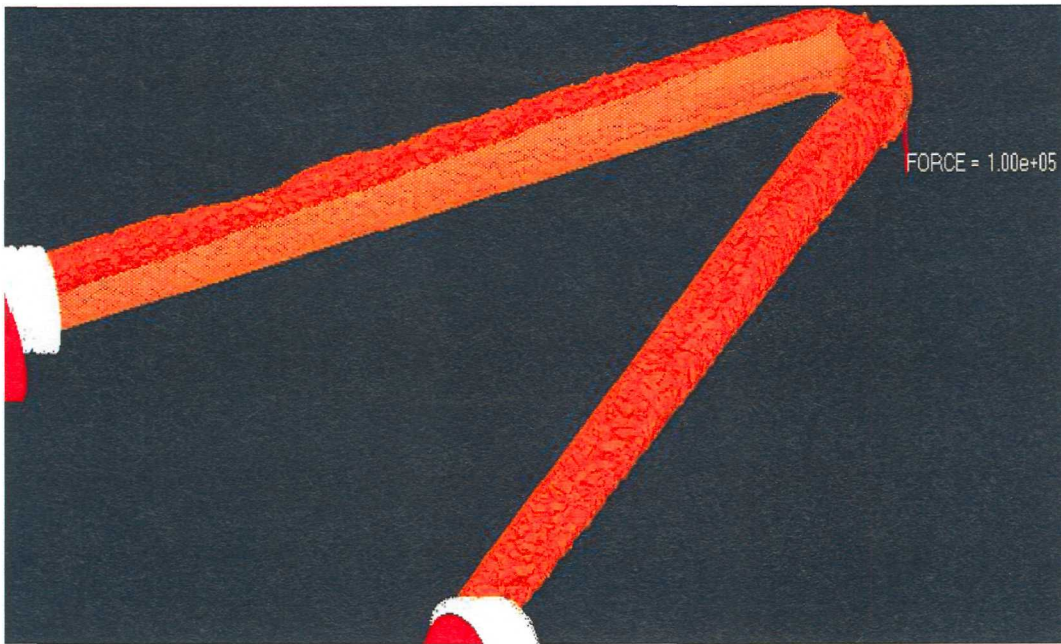


Figura 15. Detalle de la segunda superposición.

Una vez que se ha obtenido la pieza optimizada, Hypermesh da la opción de generar un archivo que pueda ser importado en programas de CAD. Se decidió obtener el modelo optimizado en formato *.stl. Este tipo de archivos contienen las coordenadas de cada una de las caras generadas en el modelo.

El modelo en formato *.stl se importó en el software 3DReshaper Application. Esta pieza pudo ser importada directamente sin necesidad de hacer ninguna modificación al archivo. En el modelo se puede observar las partes en las cuales se redujo el material de la pieza. En algunas zonas se puede ver que se remueve una gran cantidad de material. Esta reducción depende de las zonas en las que los esfuerzos hayan sido mayores o menores.

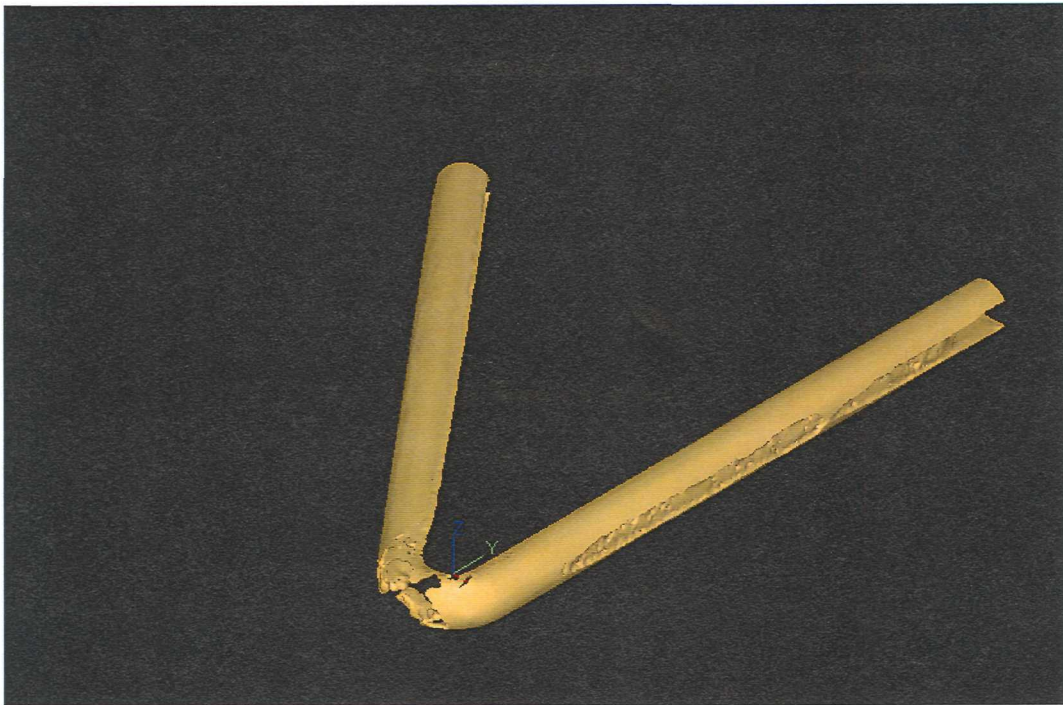


Figura 16. Pieza importada directamente a 3DReshaper Application como *.stl

Este programa tiene la característica de permitir la importación de archivos *.stl como nubes de puntos. Este tipo de nubes, normalmente se obtiene cuando se hacen escaneados de cuerpos para reingeniería o para tener modelos de algunas piezas que puedan ser difíciles de modelar.

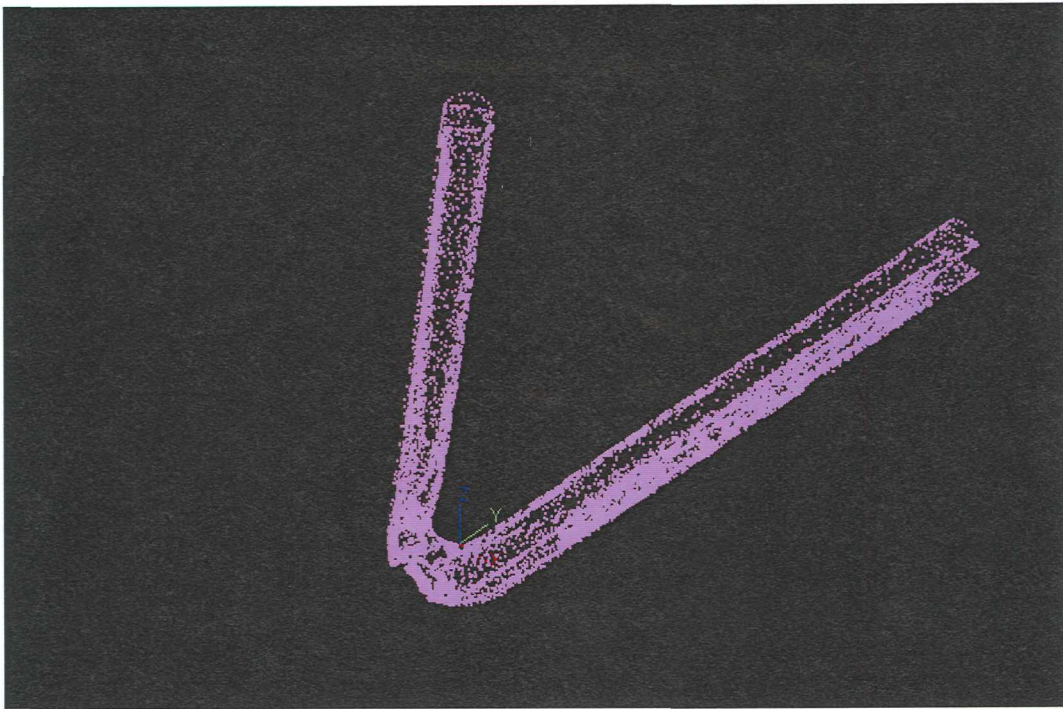


Figura 17. Archivo *.stl importado en 3DReshaper Application como nube de puntos.

Cuando se tiene una nube de puntos, es posible eliminar algunos de los puntos que pueden ser considerados como “ruido”. Se quitan puntos que pueden estar muy alejados de los demás y que en ocasiones puede considerarse que no representa, algo significativo en el modelo. Este paso también sirve para suavizar algunas partes que de otra manera podrían afectar la pieza. Una vez que se ha hecho esto, se puede generar una superficie, uniendo los puntos y generando pequeñas superficies o cuerpos que de la forma asemejada a lo que se busca. Cuando se realiza este procedimiento lo más probable es que se tengan muchas esquinas en la pieza. La figura 18 muestra el resultado de generar una superficie con la nube de puntos que se había importado, y filtrado anteriormente. En este caso al ser una pieza sencilla no hubo necesidad de llevar a cabo procesos complicados en el filtrado de los puntos ni la suavización de la superficie. El Apéndice B muestra un poco más acerca de los procesos de filtrado.

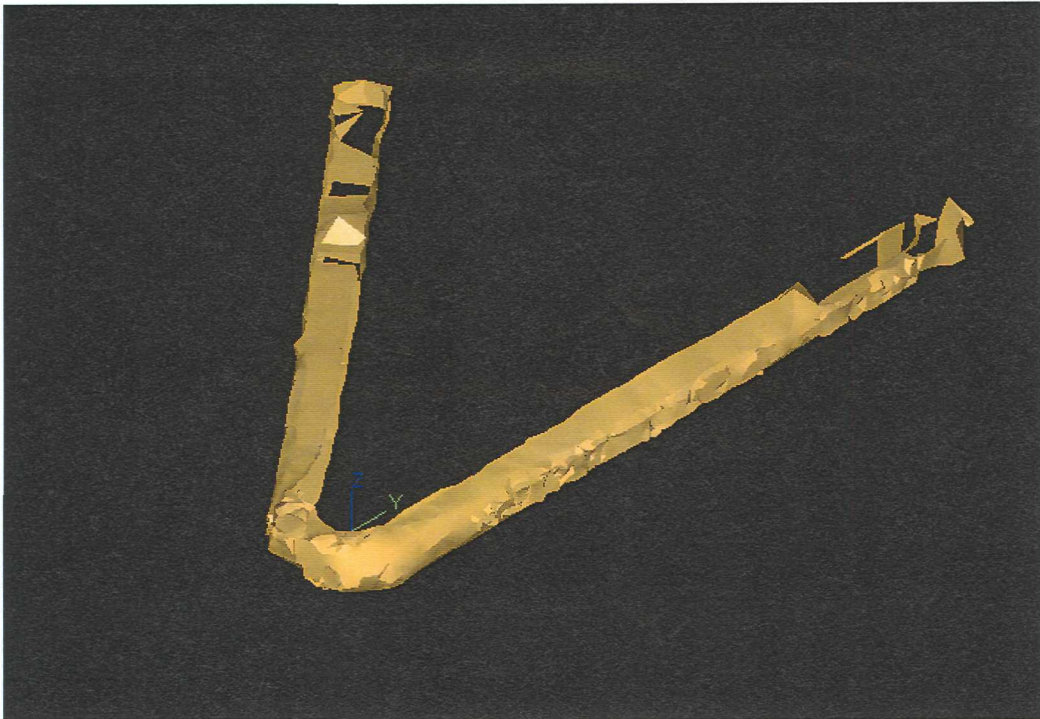


Figura 18. Conversión de nube de puntos a una superficie, eliminando el posible ruido.

En la siguiente figura se puede observar la suavización de la superficie generada. Al hacer esto, se eliminan las esquinas que la superficie haya tenido y se obtienen superficies curvas. La pieza que se obtiene puede tener un aspecto más atractivo que el anterior.

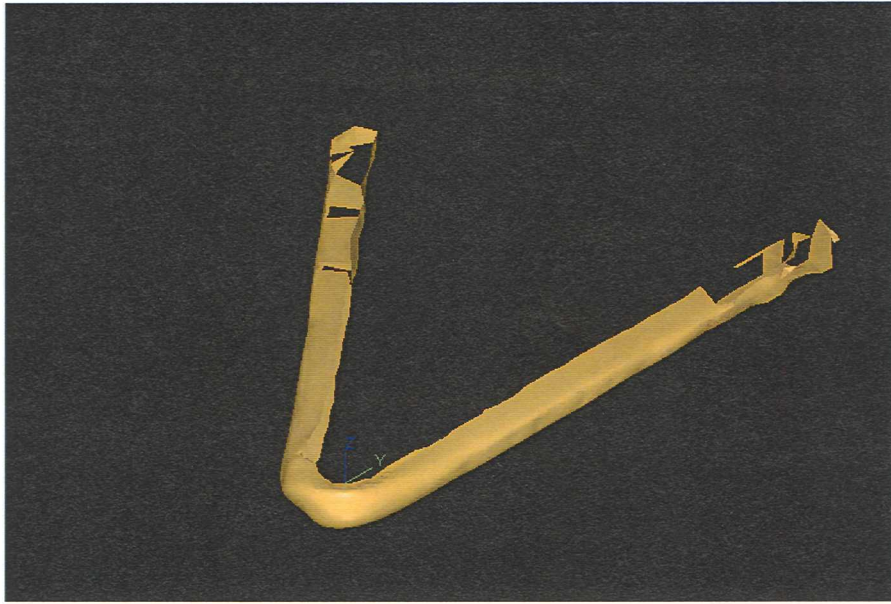


Figura 19. Suavización de la superficie.

Para hacer una comparación, la figura 20 nos muestra el resultado de la pieza obtenida sin eliminar el ruido. Se pueden observar pequeñas variaciones en la pieza, aunque las generalidades de la misma son prácticamente iguales. En este caso pudiera no resultar tan trascendente la diferencia de hacer o no el filtrado, pero normalmente es algo deseable para poder obtener mejores resultados.

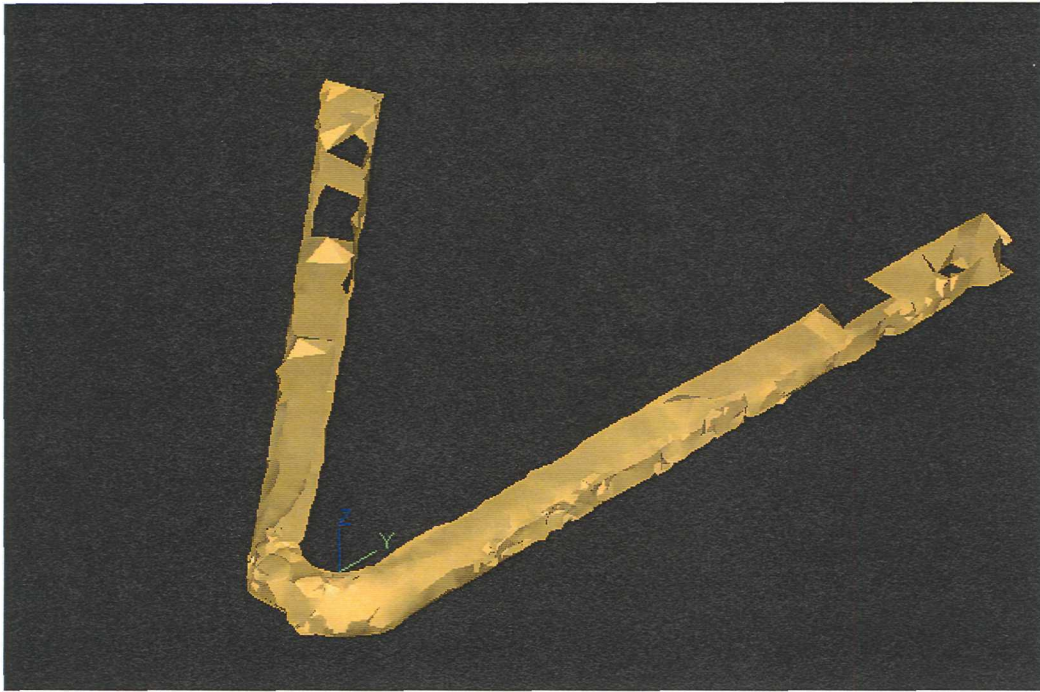


Figura 20. Superficie obtenida sin eliminar el ruido.

Asimismo, se suaviza la superficie para obtener el modelo que se muestra en la figura 21.

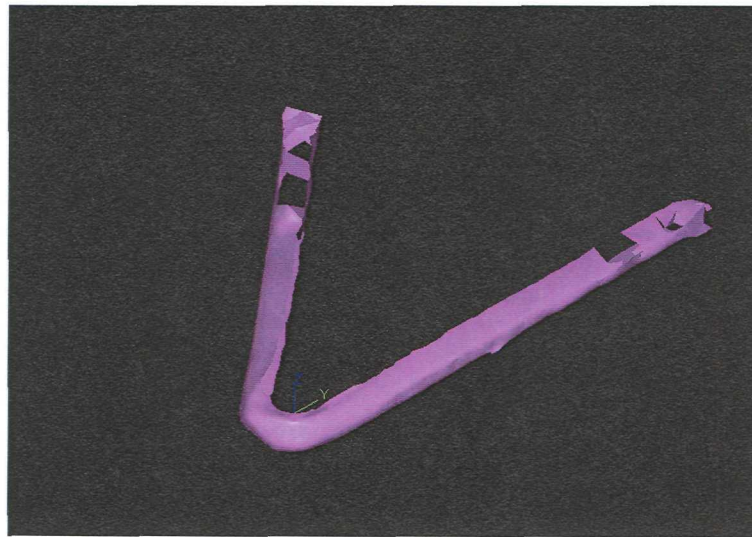


Figura 21. Suavización de la superficie sin filtrar.

Este ejemplo permitió tener un primer acercamiento con todos los programas que se utilizarían en conjunto para lograr obtener un resultado. Esta pieza es sencilla y no

refleja totalmente el trabajo que se requiere hacer para una optimización. La forma que se aprecia y el material que se quitó no son tan significativos. Sin embargo el proceso aplicado a esta pieza sirve como base para continuar con algo más complejo y obtener un resultado que de más claridad y lleve a establecer la metodología que se busca.

Capítulo 5. Aprendizaje del Proceso (Lessons to Learn)

Cuando se lleva a cabo una investigación se pueden encontrar varios caminos a seguir. Es probable que algunos de ellos no sean correctos y lleven a posibilidades que no son adecuadas. En este capítulo se explican algunas de las posibilidades que no pudieron aplicarse o que representaron una complejidad muy grande que no llevó a obtener un buen resultado. Las lecciones aprendidas en este proceso permitieron desarrollar un ejemplo más complejo de una manera más sencilla.

Generación de archivo *.iges

Después de hacer un análisis de optimización, Hypermesh ofrece la posibilidad de generar un archivo *.igs mediante la instrucción OSSmooth. Al utilizar este recurso, el programa genera un archivo que incluye el modelo optimizado en un formato que pueda ser abierto en cualquier programa CAD. En principio, esta solución parecía muy atractiva.

Se generó este archivo con los resultados obtenidos de la optimización del brazo. El programa se demora un tiempo considerable en poder generar este archivo. Aproximadamente tardó seis horas. Después de tener el archivo se observó una característica que llamaba la atención y sugería la posibilidad de que no fuera funcional. El archivo tenía una extensión mayor a 10 megas, lo que representaba algo muy extraño dado que únicamente se trataba de una pieza.

Este archivo se importó en SolidEdge y se observó que tardaba más de cuatro horas en poder abrir el archivo final. Una vez que se tenía la pieza en SolidEdge, se observó que ésta estaba construida a base de polígonos. Se podía considerar que se tenía una malla. La pieza importada no ofrecía la posibilidad de hacer muchas cosas con ella, no se podía refinar ni se podían extraer puntos que pudieran ayudar a utilizarla de otra manera.

Después de observar lo anterior, se abrió el archivo *.iges utilizando un procesador de textos para ver la estructura del mismo. Este tipo de archivos tienen un código de números mediante el cual se puede observar el tipo de geometrías que se están incluyendo en el archivo. La figura estaba hecha a base de un código que incluía el

número "128". En las especificaciones de iges, este número corresponde a una superficie "spline" racional. Se trató de extraer puntos al tener el código y ver la posibilidad de generar una nube de puntos. Sin embargo, dadas las características con las que generan estas superficies, no se podía llevar a cabo, debido a que están construidas mediante relaciones racionales que no llegan a ser constantes en cada caso por lo que se dificultaba la posibilidad de extraer la información que se quería.

Se decidió que este proceso no era la mejor opción por lo que se descartó la posibilidad de continuar con él.

Archivo *.stl

Una vez que se decidió dejar a un lado la opción del archivo *.iges, se vio la posibilidad de seguir por el mismo camino pero utilizando un archivo *.stl. Este tipo de archivo contiene la información para construir modelos a base de superficies triangulares. Cada parte del archivo tiene los vértices de una superficie así como la dirección de un vector normal a la cara que se generaría.

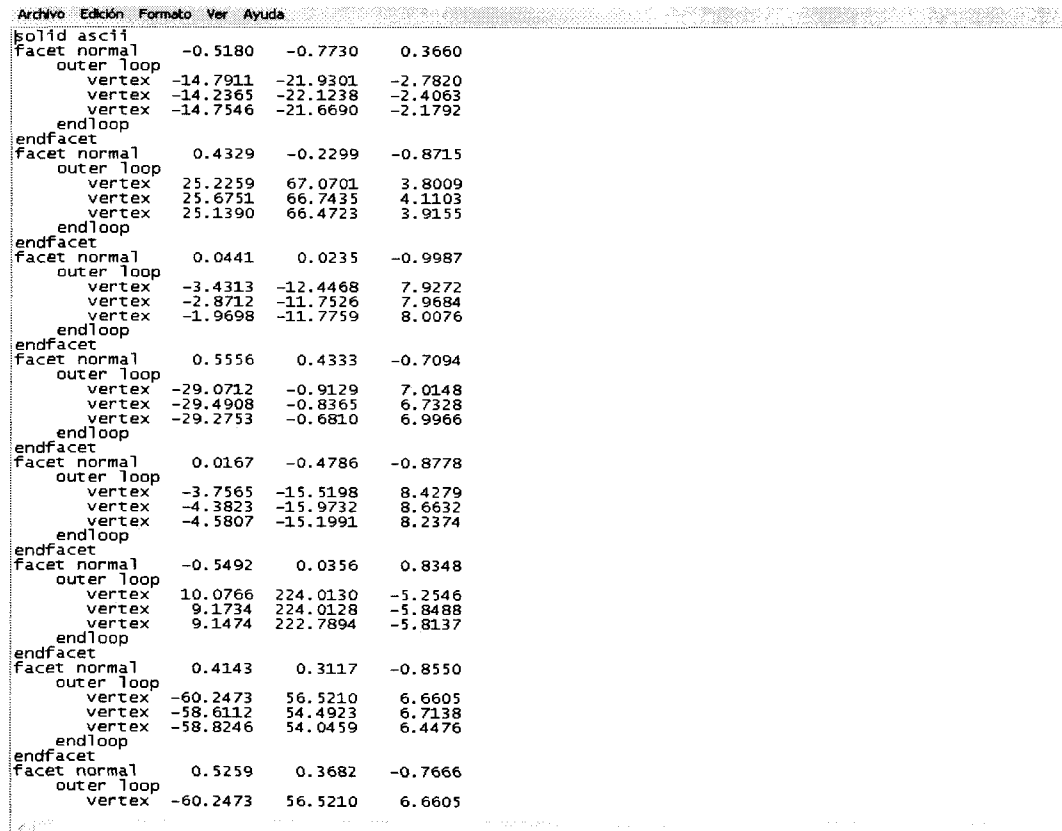
De este archivo se pensó en extraer los puntos para poder introducirlos en un programa que permitiera hacer la nube de puntos. El archivo se abrió utilizando Excel para poder tener los puntos arreglados en columnas de acuerdo con la coordenada a la que correspondieran (x,y,z). Pero había información que no se consideraba útil para poder llevar a cabo la extracción de los puntos. Así, se llegó a la conclusión de que era necesario eliminar las líneas que hacían referencia a los vectores normales a las caras de la figura. De esta manera el archivo se limitaría a tener únicamente información sobre los vértices.

En Excel, se eliminó manualmente cada una de las filas o renglones que correspondían a la información que no se requería. Se pensó que al tener únicamente los puntos se podría generar el archivo que se utilizaría para tener la nube de puntos con la cual se pudiera trabajar. Una vez que se eliminó la información no necesaria se generó un archivo *.txt que se utilizaría para tratar de obtener la nube de puntos.

Nube de puntos

Una vez que se tuvo el archivo *.txt que tentativamente contenía la información para la nube de puntos. Este archivo se trataría de abrir en ALIAS para importar la nube de puntos y de esa manera generar la superficie con la cual se pudiera trabajar. No se encontró la manera de poder importar el archivo en ALIAS. Se buscó el tipo de formato que utilizan los archivos de nubes de puntos, pero no se pudo abrir. Asimismo, se trató de importar directamente el archivo *.stl en ALIAS pero no existió la posibilidad de hacerlo.

Se puede ver en la figura X. que para cada cara el archivo *.stl da las coordenadas X, Y, Z y un vector normal a la cara para poder generar cada uno de los tetraedros que forman las piezas.



```
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
solid ascii
facet normal -0.5180 -0.7730 0.3660
  outer loop
    vertex -14.7911 -21.9301 -2.7820
    vertex -14.2365 -22.1238 -2.4063
    vertex -14.7546 -21.6690 -2.1792
  endloop
endfacet
facet normal 0.4329 -0.2299 -0.8715
  outer loop
    vertex 25.2259 67.0701 3.8009
    vertex 25.6751 66.7435 4.1103
    vertex 25.1390 66.4723 3.9155
  endloop
endfacet
facet normal 0.0441 0.0235 -0.9987
  outer loop
    vertex -3.4313 -12.4468 7.9272
    vertex -2.8712 -11.7526 7.9684
    vertex -1.9698 -11.7759 8.0076
  endloop
endfacet
facet normal 0.5556 0.4333 -0.7094
  outer loop
    vertex -29.0712 -0.9129 7.0148
    vertex -29.4908 -0.8365 6.7328
    vertex -29.2753 -0.6810 6.9966
  endloop
endfacet
facet normal 0.0167 -0.4786 -0.8778
  outer loop
    vertex -3.7565 -15.5198 8.4279
    vertex -4.3823 -15.9732 8.6632
    vertex -4.5807 -15.1991 8.2374
  endloop
endfacet
facet normal -0.5492 0.0356 0.8348
  outer loop
    vertex 10.0766 224.0130 -5.2546
    vertex 9.1734 224.0128 -5.8488
    vertex 9.1474 222.7894 -5.8137
  endloop
endfacet
facet normal 0.4143 0.3117 -0.8550
  outer loop
    vertex -60.2473 56.5210 6.6605
    vertex -58.6112 54.4923 6.7138
    vertex -58.8246 54.0459 6.4476
  endloop
endfacet
facet normal 0.5259 0.3682 -0.7666
  outer loop
    vertex -60.2473 56.5210 6.6605
```

Figura 16. Estructura de archivo *.stl

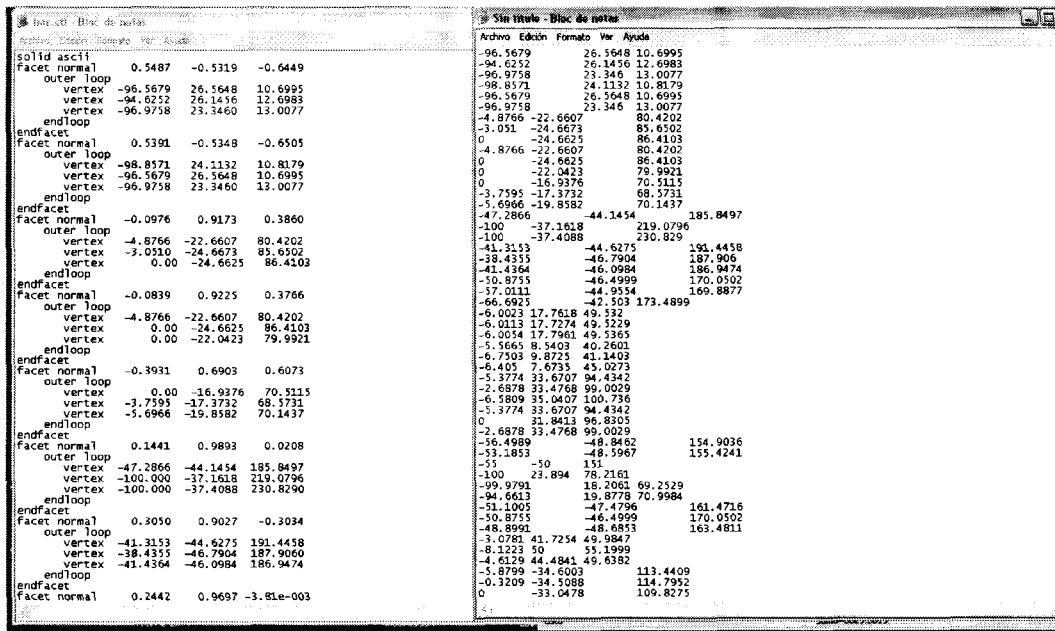


Figura 17. Comparación de archivos *.stl y nube de puntos.

Se puede observar que para pasar el archivo *.stl a una nube de punto es necesario eliminar los renglones referentes a los vectores normales de cada una de las caras. Los vértices de las caras se traducen como puntos al archivo de la nube, pero el formato se pierde. Asimismo se puede observar que el archivo *.stl muestra el inicio y el fin de cada una de las caras.

Viendo la dificultad en el manejo de estos archivos se decidió buscar otro software en el cual se pudiera llevar a cabo la acción requerida. Se encontró y se utilizó el software Point Cloud 1.0. En este programa si se pudo importar la nube de puntos con el archivo generado en Excel. El programa no permitía grabar los archivos o hacerles modificaciones considerables de manera que pudieran ser utilizados en otros programas. Se pudo observar que el archivo de puntos fue correcto, pero no se pudo obtener un resultado dado que no se podía hacer mucho en el programa.

Se decidió buscar otras opciones. El software 3D Reshaper Application ofreció la posibilidad de importar un archivo *.stl como nube de puntos de manera que el trabajo se simplificaba y se obtenía un resultado más preciso al evitar errores en el manejo del archivo de texto generado anteriormente. Asimismo, este programa ofreció la posibilidad de generar la superficie para trabajar con ella, además de suavizarla para que el resultado fuera mejor. También el software dio la posibilidad de exportar el resultado en un archivo *.stp para poder abrirlo y manejarlo en programas CAD.

Cada uno de los casos mostrados representan posibles soluciones que se consideraron pero que finalmente no resultaron adecuadas para el proceso. Sin embargo este tipo de situaciones aportan experiencia y conocimiento para tratar los diferentes casos que se presentan y poder decidir sobre la mejor opción que se tiene. Algunas cosas que en principio pueden parecer sencillas, resultan inviables o demasiado complejas al tenerlas en uso o al querer aplicarlas.

Para poder automatizar el proceso se requeriría ligar cada uno de los programas con los respectivos archivos que genera o que necesita para trabajar. El mayor reto sería conocer las características específicas de cada tipo de archivo necesario para poder acceder a cada uno de los programas sin que exista la necesidad de hacer modificaciones intermedias.

Una recomendación sería buscar la manera más sencilla de hacerlo sin tener que modificar o manejar una gran cantidad de archivos. Es necesario tener en cuenta los formatos que requieren más información así como los que dan mejores resultados o más acertados. Asimismo se deben tener muy claras las características que se tendrán en el diseño para evitar problemas y poder especificar bien cada parte.

Capítulo 6. Caso de Estudio 2

Después de haber hecho el proceso con una pieza sencilla, se analizó una pieza más complicada. Se buscó obtener algo más significativo de manera que se pudiera observar el trabajo de optimización que se lleva a cabo en una pieza para remover el material y obtener un diseño más ligero. En este capítulo se muestra el proceso que se siguió para analizar una pieza que se considerará más significativa. Al final se puede observar el resultado obtenido.

Planteamiento del problema

Esta pieza será sometida a cargas de 1000N en "X,Y, Z" en el extremo. En este caso no se pensó en una carga que pudiera llevar a condiciones extremas de sobre carga a la pieza. La carga aplicada no es muy grande, incluso puede llegar a parecer que no es una carga real que pueda presentarse. Sin embargo, al ser una carga de magnitud pequeña, los resultados que arrojará su aplicación pueden llevar a que se elimine una mayor cantidad de material en la pieza. De esta manera se podrá observar mejor el resultado obtenido y el paso de la pieza por el proceso de nube de puntos. A esta pieza se le aplicarán restricciones de: traslación en los tres ejes en el soporte inferior, traslación en "Y, Z" en el extremo superior, traslación en "Z" en el centro. Al igual que en el caso anterior, la optimización topológica se llevará a cabo utilizando restricciones de desplazamiento.

Esta segunda pieza corresponde a un brazo de control de una suspensión. La pieza haría la misma función que el modelo anterior. Se busca que haya una reducción más significativa del material para poder observar una forma final que se pudiera obtener. En la figura 18 se puede observar el mallado de la pieza.

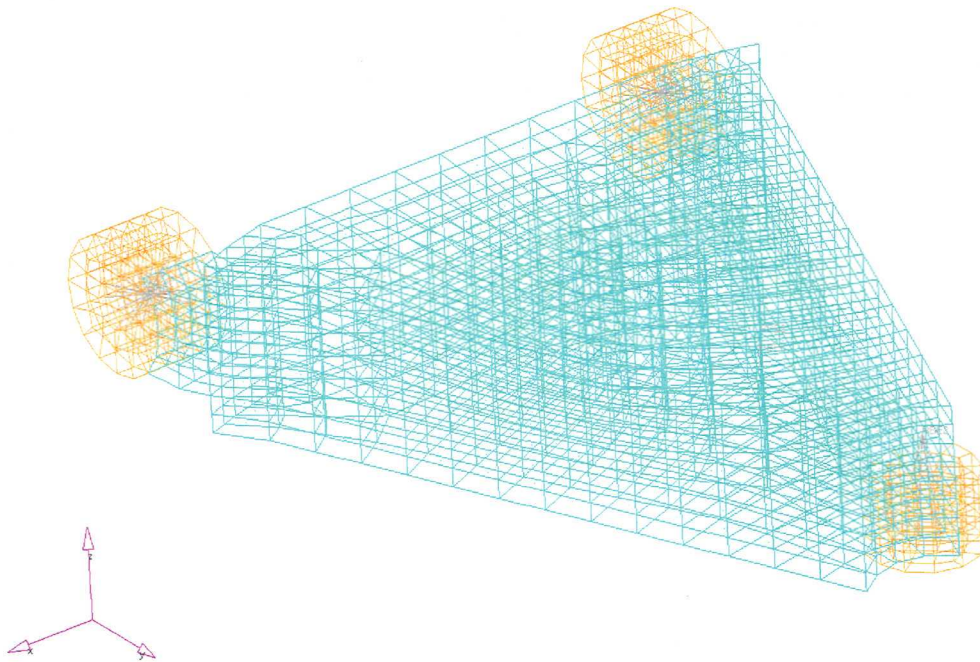


Figura 18. Brazo de control mallado.

Una vez que se tuvo la malla, se establecieron las condiciones o restricciones que tendría la pieza en el análisis. Para este caso se eliminaron los tres grados de libertad correspondientes a traslación en cada uno de los ejes, en cada punto se tenía rotación en tres ejes. Estas restricciones se aplicaron en los soportes circulares del brazo, donde se ensamblaría con el resto de la estructura, y en la parte central, donde tendría una unión con el sistema de amortiguamiento. En las figuras 19 y 20 se pueden observar las restricciones aplicadas.

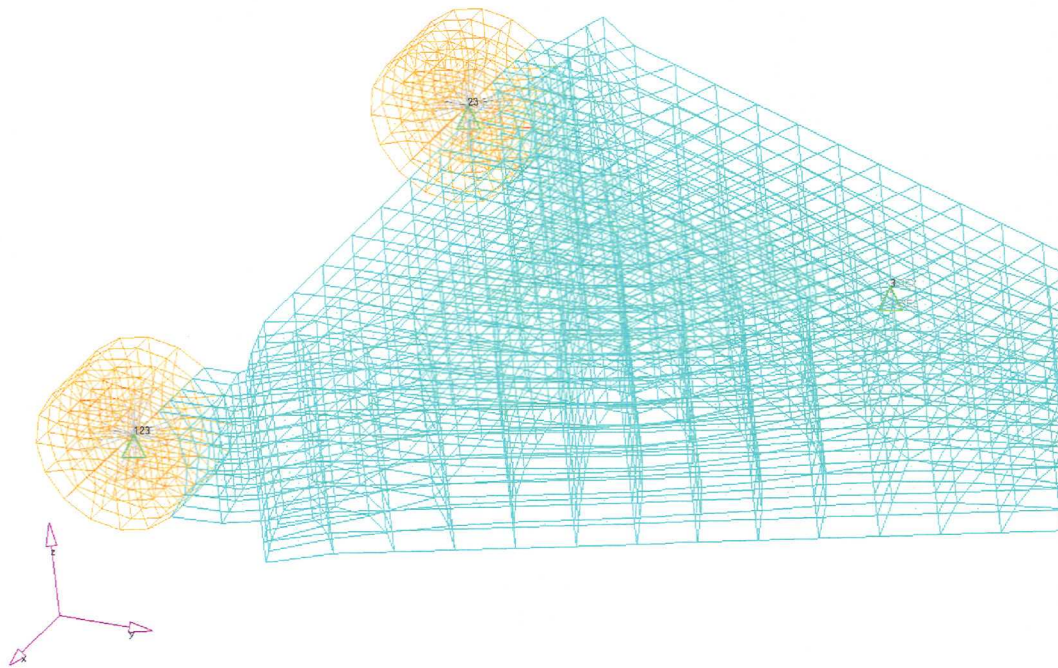


Figura 19. Restricciones aplicadas a la pieza.

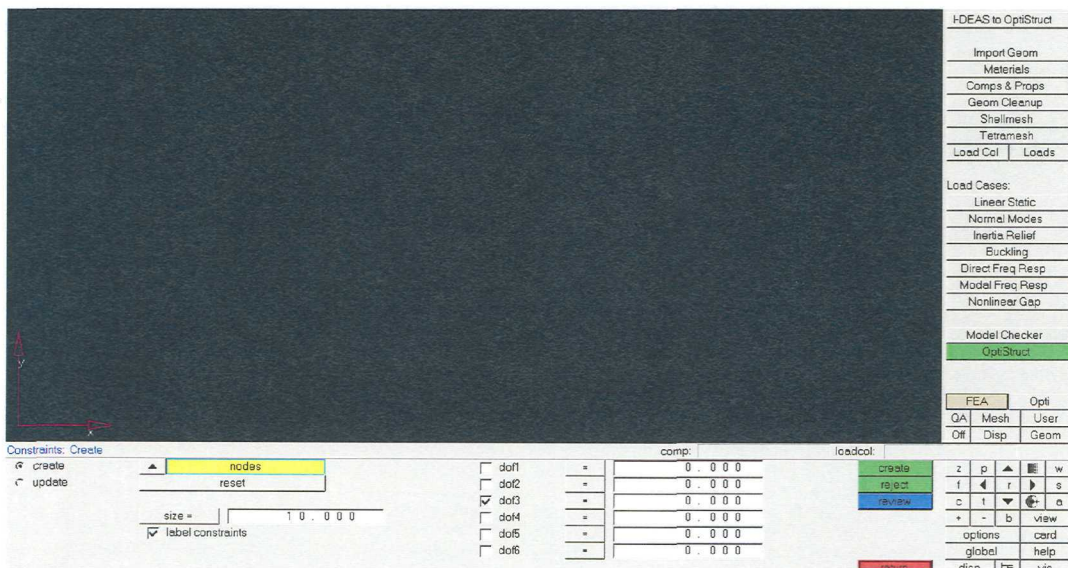


Figura 20. Restricción central.

En la siguiente figura (figura 21) se puede observar la aplicación de las fuerzas, una en cada dirección de los ejes (X, Y, Z)

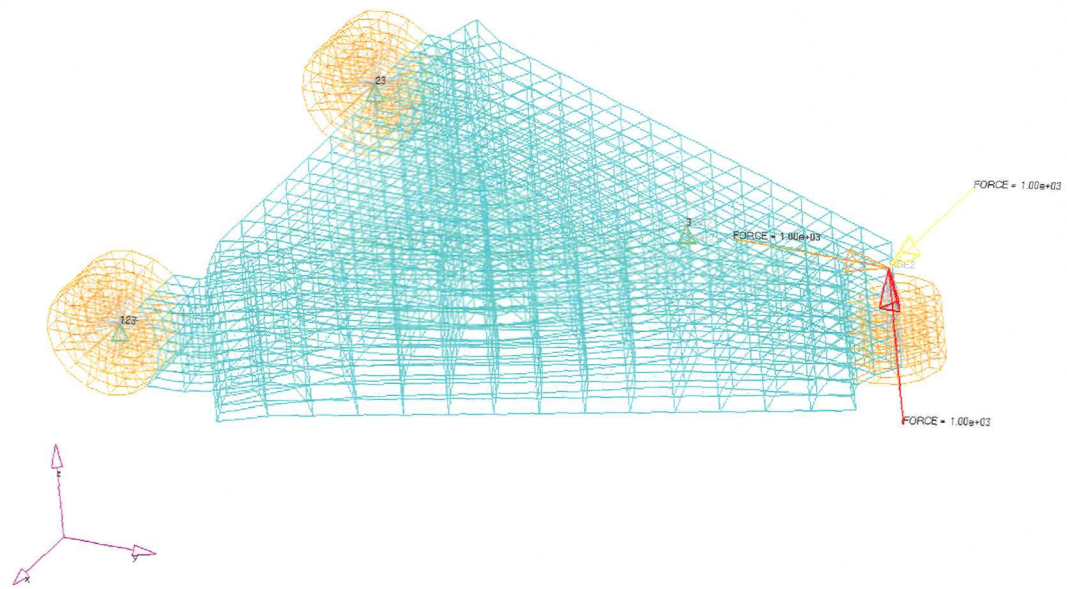


Figura 21. Aplicación de las fuerzas.

Teniendo las condiciones y las fuerzas que se aplicarían se procedió a hacer el análisis FEM que arrojaría los resultados de esfuerzos y desplazamientos en la pieza.

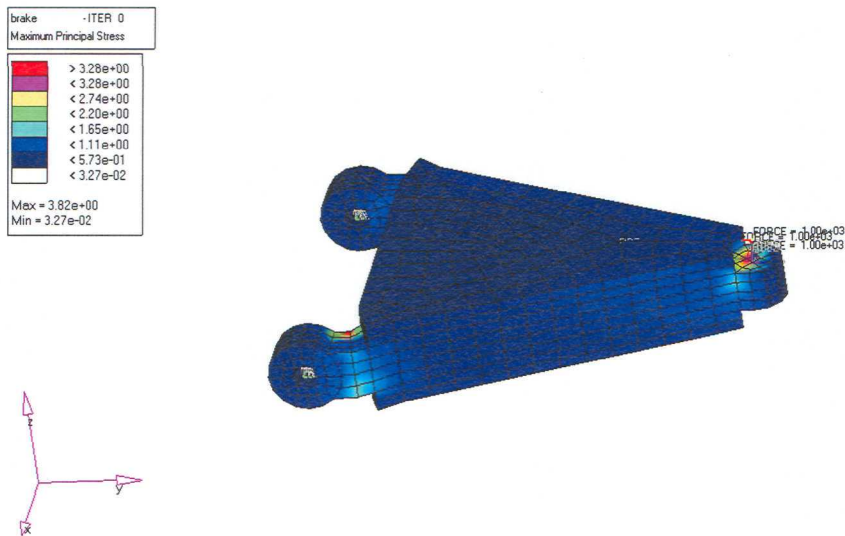


Figura 22. Esfuerzos en la pieza.

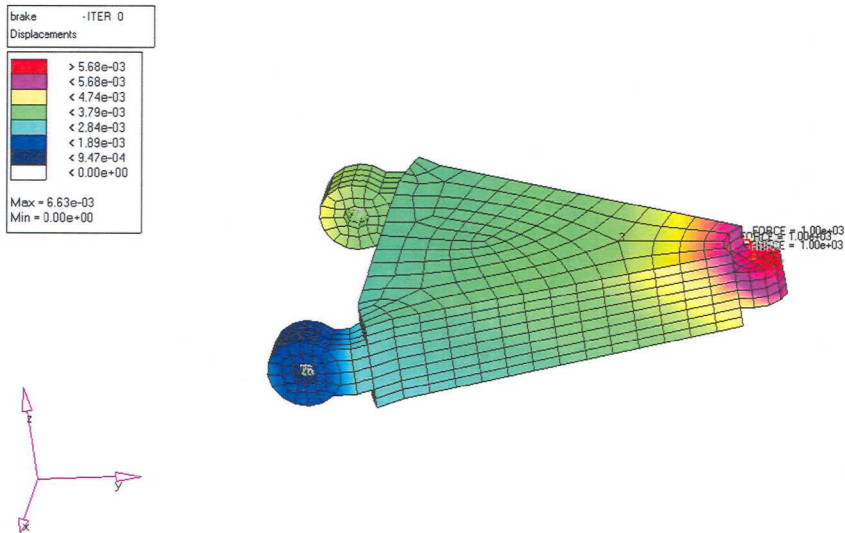


Figura 23. Desplazamientos en la pieza.

Después se hizo el análisis de optimización que arrojaría la reducción del material en la pieza que se está analizando. En este análisis se tuvo como objetivo minimizar la masa, tomando en cuenta el desplazamiento que debería tener la pieza. La aplicación de la restricción de desplazamiento se puede observar en la figura 24.



Figura 24. Restricción de desplazamiento.

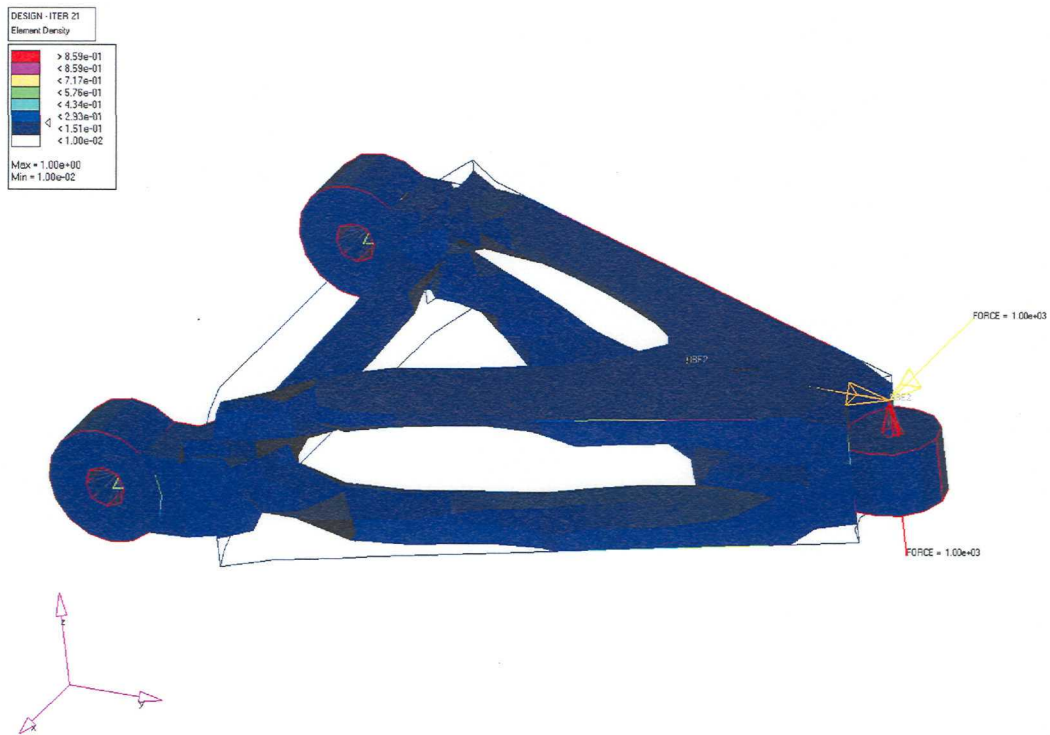


Figura 25. Modelo optimizado.

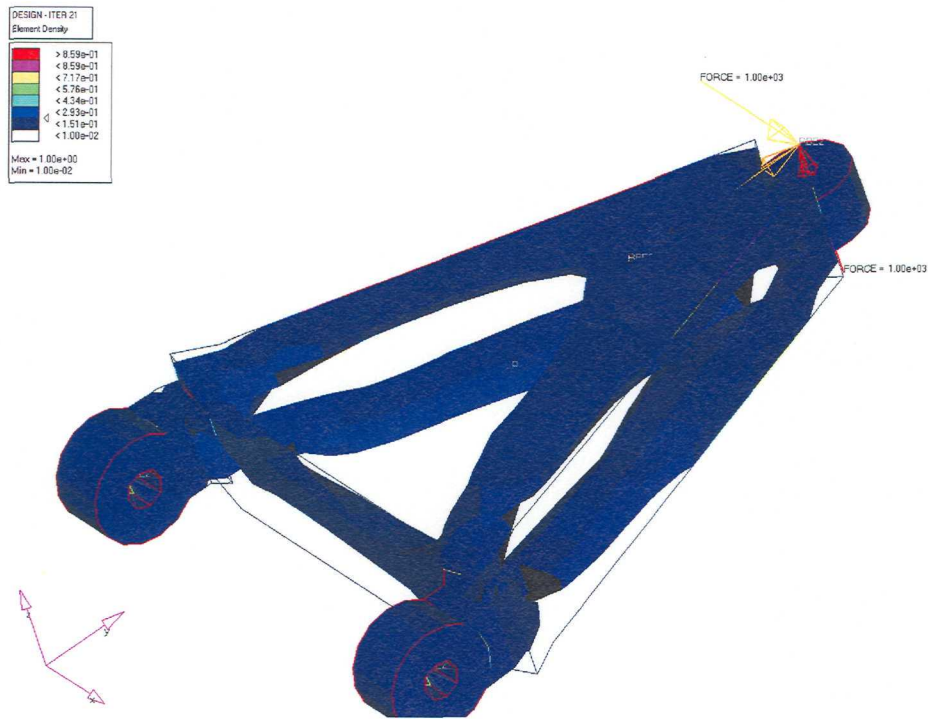


Figura 26. Modelo optimizado, vista 2.



Figura 27. Modelo optimizado, vista 3.

Es importante notar que la pieza obtenida no es simétrica. En algunos lugares se quitó más material que en otros. Se esperaba que el resultado no fuera así. Esta variación se da por las fuerzas que se aplicaron. Una de ellas (aplicada en el eje X) genera esfuerzos desiguales en cada parte de la pieza. Esto ocasiona que en una parte de ella deba haber más material para poder ofrecer la resistencia necesaria a la fuerza que se está aplicando.

La pieza obtenida se exportó de Hypermesh con formato *.stl. Utilizando este archivo se generó una nube de puntos que diera la forma obtenida y transformarla a un sólido. La nube de puntos se observa en la figura 28.

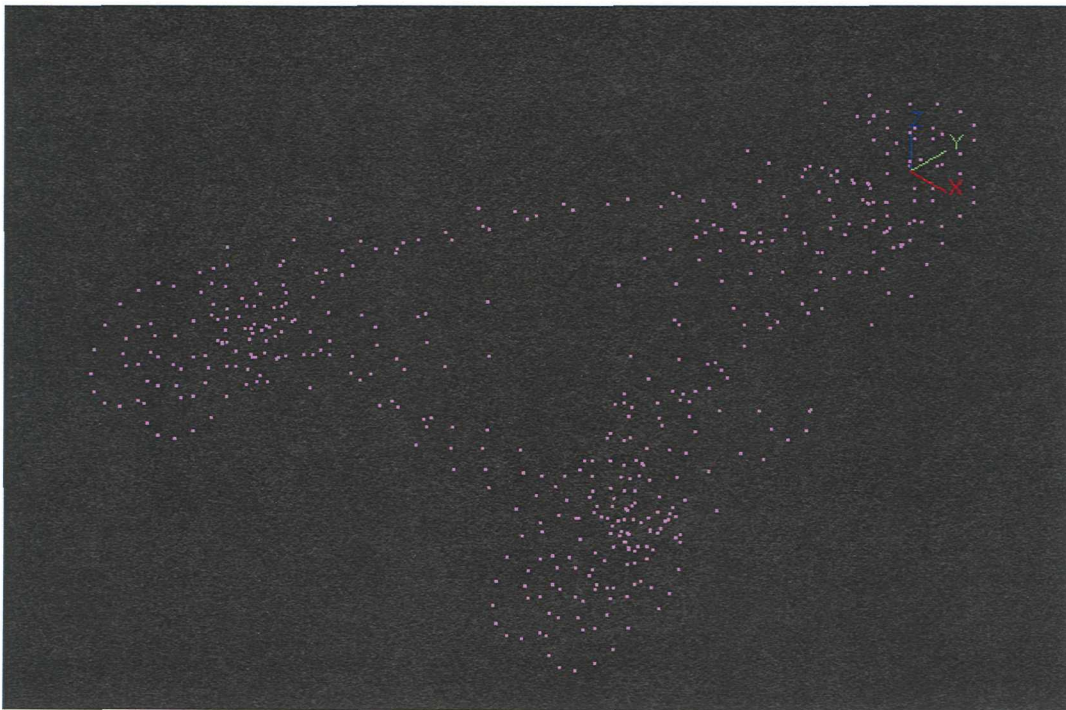


Figura 28. Nube de puntos del modelo optimizado.

Para poder transformar la pieza a un sólido es necesario considerar varios factores. En primera instancia se puede hacer una transformación directa. Sin embargo, el resultado no tiene la precisión y las características necesarias para poder ser funcional. En la figura 29 se puede apreciar que el modelo no cumple con los requerimientos. Se puede ver que se omiten los agujeros y que las formas no son precisamente adecuadas para poder trabajar con esta pieza.

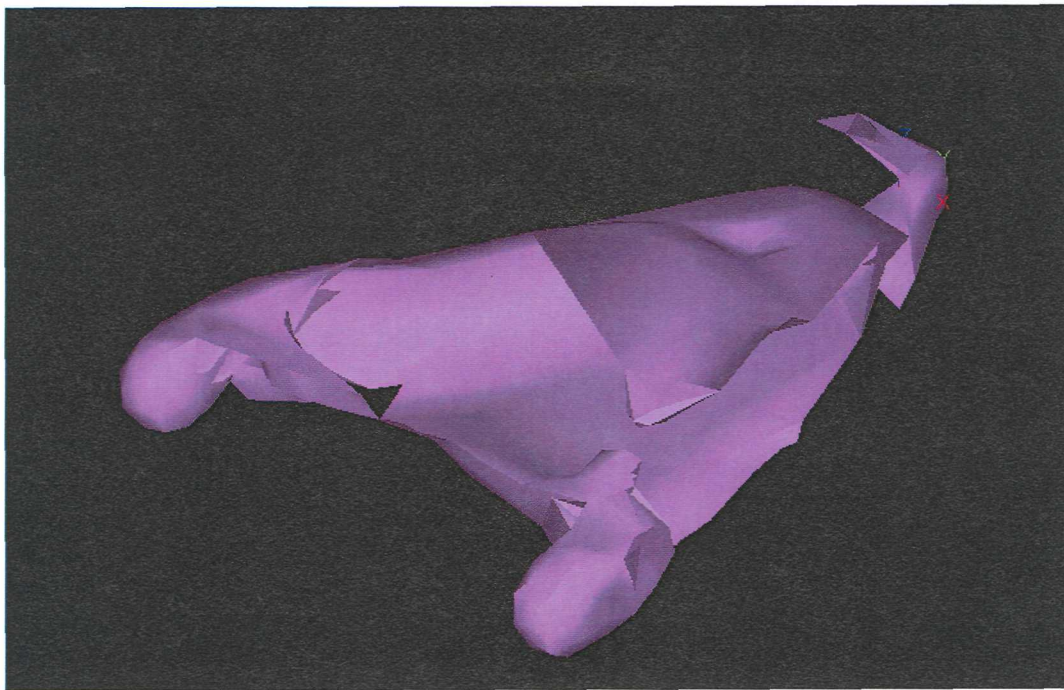


Figura 29. Primer modelo obtenido con la nube de puntos.

Debido a que estos resultados no eran del todo aceptables, se buscó otro método para poder obtener el modelo. El programa 3DReshaper ofrece la opción de obtener modelos más precisos mediante mallas más finas y reconocimiento de ciertas geometrías bajo parámetros del mallado. Asimismo, se puede utilizar un valor de desviación estándar que permita obtener modelos más cercanos a lo que se busca. La figura 31 muestra el resultado que se obtuvo utilizando estos métodos. El modelo final es más semejante a lo que se requiere y puede ser utilizado e importado con otros programas.

La técnica utilizada por 3DReshaper para eliminar el ruido consiste en proyectar una malla sobre el modelo. Se puede ajustar el paso o el tamaño que se utiliza en la malla. El programa calcula una pequeña parte de la superficie, determina el punto más cercano a esta superficie y declara un punto representativo para el elemento. Este punto se mantiene dentro de la malla y luego se declara como un vértice.

Para poder obtener una forma correcta, es necesario que se tengan una serie de puntos en la malla. Así, es necesario tener una nube de punto lo más densa posible. Entre más puntos existan, mayor es la probabilidad de obtener puntos representativos y relevantes para hacer una forma correcta.

Una vez que se han determinado los puntos que se mantendrán, es necesario decidir cuáles deben conectarse para obtener el mallado. Hay varios criterios para decidirlo. Uno de ellos es la distancia entre puntos. Se desea que los enlaces entre los puntos no interfieran con los agujeros de las piezas. El manejo de esta información puede ser delicado. El software 3D Reshaper utiliza información del tamaño de los triángulos, mantener bordes externos y crear mallas cerradas para determinar en que casos mantener los agujeros (estas opciones se encuentran la pantalla para crear la malla). La diferencia entre un agujero y un borde externo será estrictamente matemática. La diferencia estaría en la longitud y el número de triángulos que incluiría cada uno. Las opciones funcionan de la siguiente manera:

- La opción del tamaño de los triángulos tratará de detectar todos los agujeros. Se debe especificar el tamaño máximo de los triángulos, que debe ser menor que el agujero más pequeño.
- Si se selecciona mantener bordes externos, el programa buscará las orillas libres que contengan el mayor número de triángulos y serán considerados como bordes externos. Cualquier otro contorno encontrado será considerado como agujero.
- Si se selecciona la opción para crear una malla cerrada, el programa tratará de llenar todos los agujeros para generar un poliedro cerrado.

En la siguiente figura se puede observar la pantalla en la cual se puede acceder a las opciones para el manejo de los puntos. La opción de detección de agujeros permitirá establecer los límites en los cuales se desea trabajar para hacer la malla y separar los sólidos de los agujeros. Esta pantalla se accesa mediante el menú Mesh, 3D Mesh Creation.

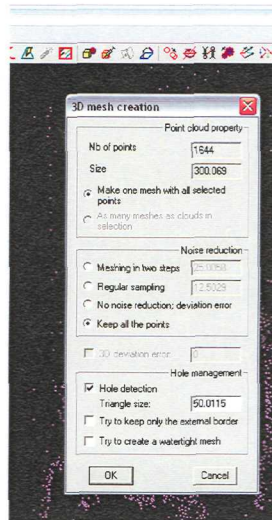


Figura 30. Pantalla para manejo de puntos.

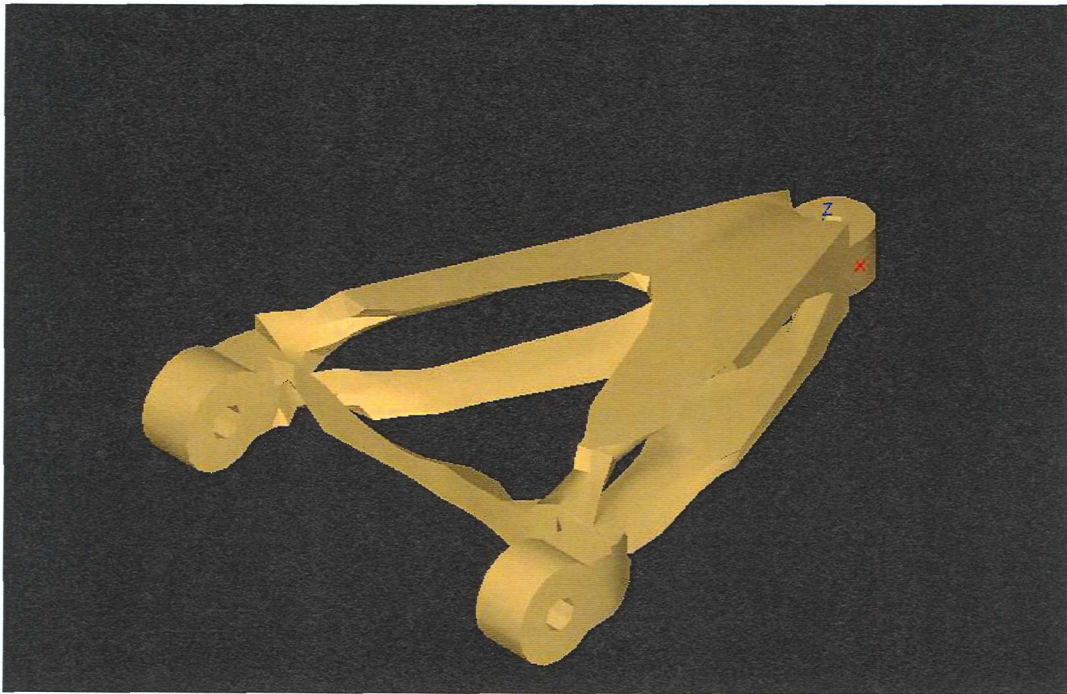


Figura 31. Modelo final.

Este modelo se exportó como *.stp para poder ser utilizado en otros programas CAD. En primer lugar el modelo se importó en Solid Edge. Esto se puede ver en las figuras 32 y 33.

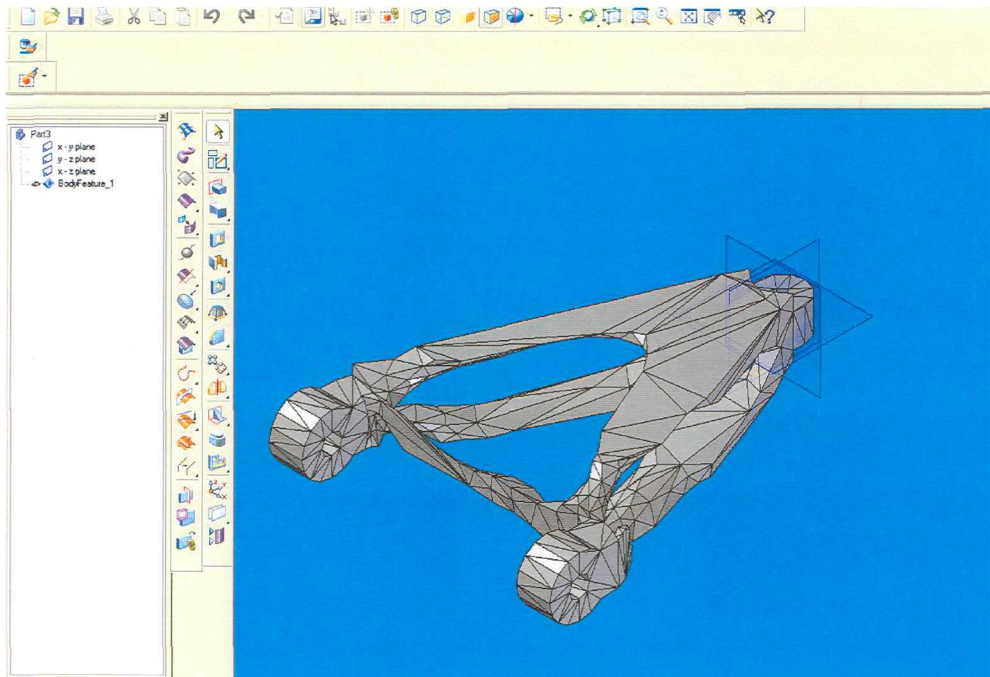


Figura 32. Modelo en Solid Edge.

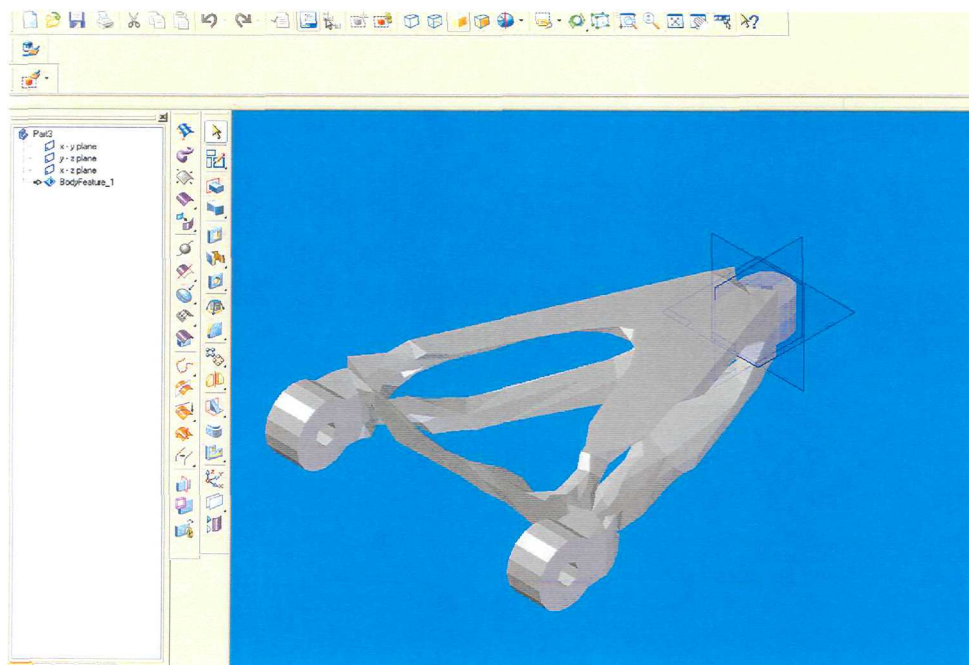


Figura 33. Otra vista del modelo en Solid Edge.

Finalmente, el modelo se importó en Adams, donde puede ser susceptible de diferentes tipos de análisis (fuerzas, velocidades, aceleraciones) acoplándolo a una estructura. En Adams se obtuvieron tres vistas que se pueden apreciar en las figuras 34, 35 y 36.

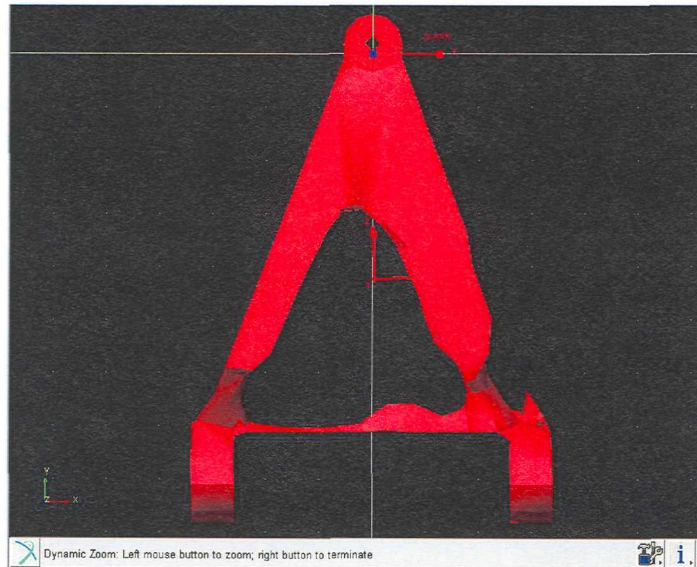


Figura 34. Primera vista en Adams.

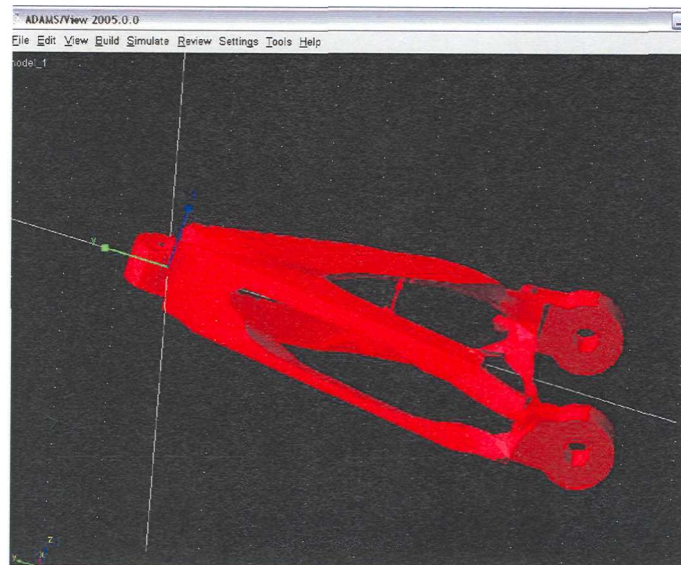


Figura 35. Segunda vista en Adams.

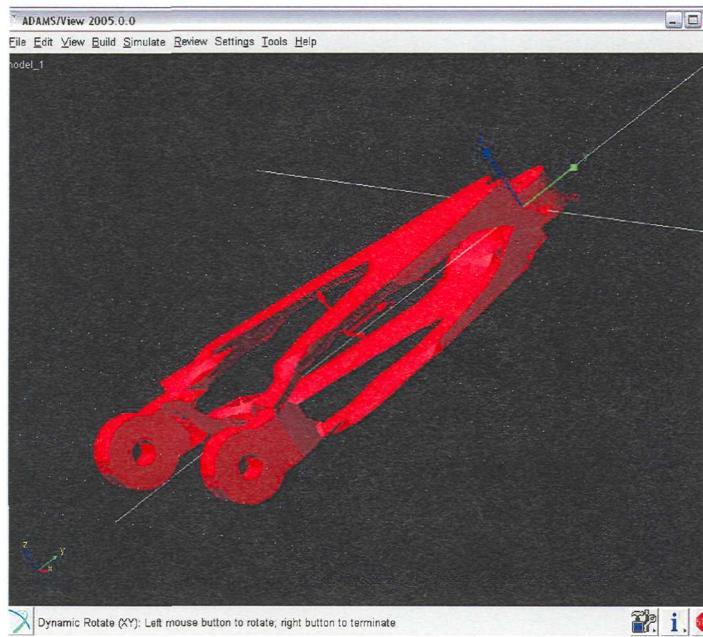


Figura 36. Tercera vista en Adams.

Una vez que se tiene la pieza en Adams, esta puede ser analizada como se muestra en las figuras 37 y 38.

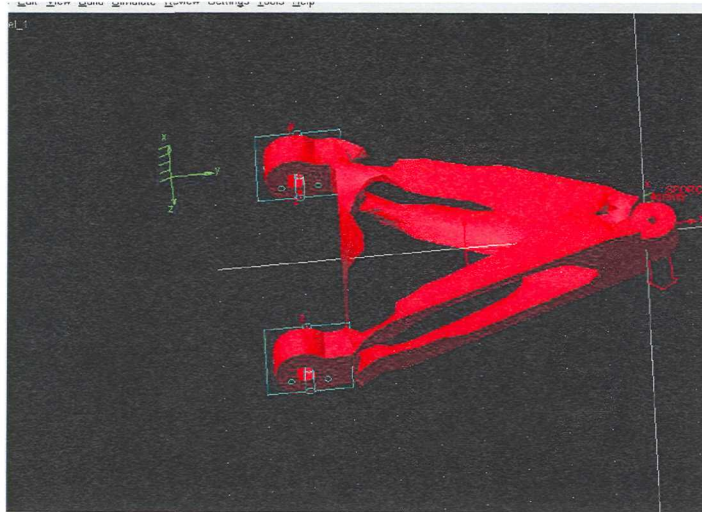


Figura 37. Restricciones de la pieza en Adams.

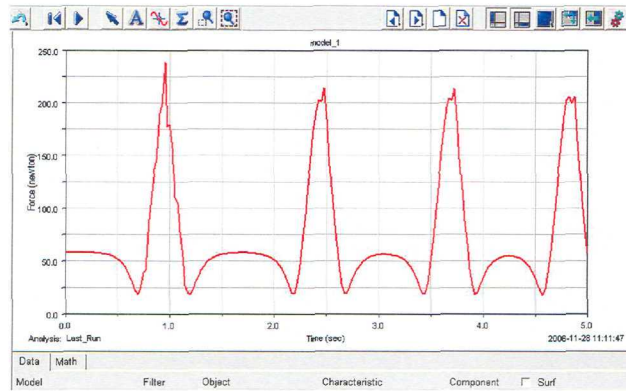


Figura 38. Resultados del análisis en Adams.

Asimismo, la pieza puede volver a ser analizada en Hypermesh bajo las mismas condiciones iniciales obteniendo los siguientes resultados para esfuerzos y desplazamientos. La gráfica de los desplazamientos muestra el contorno de la pieza. Debido a las características de los gráficos de la computadora, no es posible obtener la imagen de la pieza. Sin embargo, esta imagen da la idea del comportamiento que se tiene. Se puede observar que los valores de los desplazamientos son menores que los de la pieza original. La gráfica de esfuerzos se observa más claramente, sin embargo, también tiene una pequeña deficiencia en un soporte.

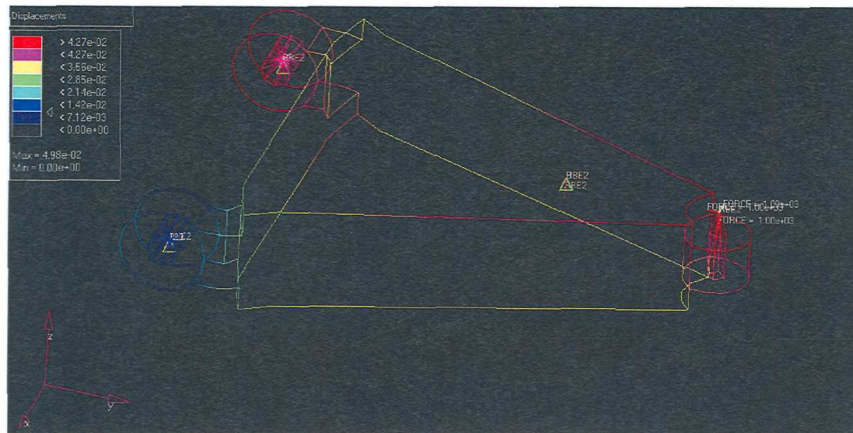


Figura 39. Desplazamientos en la pieza final.

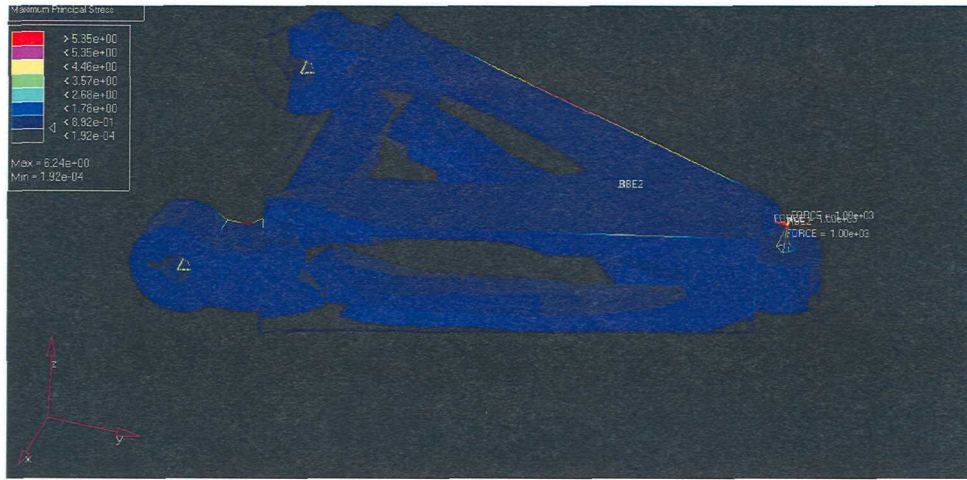


Figura 40. Esfuerzos en la pieza final.

La pieza final que se obtuvo lleva a considerar que el resultado se acepta. Se puede observar un cambio considerable entre la pieza inicial y el resultado que se presenta al final. Esta pieza puede ser utilizada en los sistemas de suspensión. El resultado obtenido muestra que el proceso que se siguió puede ser aceptado como válido para poder aplicarse en casos posteriores. Algunos detalles que se pueden ver en la pieza reflejan el trabajo que se hizo para poder obtener el resultado.

Capítulo 7. Resultados

El trabajo hecho muestra la posibilidad de utilizar una nube de puntos como herramienta para llevar un modelo optimizado hacia un sistema CAD en donde puedan hacerse análisis, y en caso de ser necesarias, modificaciones menores a las piezas. Los resultados que se observan en los análisis que se hicieron sirven para mostrar lo anterior, y comprobar que estas piezas si pueden ser incluidas en sistemas y que pueden ser funcionales para los objetivos que se plantearon.

La primera pieza representó un acercamiento con las herramientas que se utilizarían. El resultado en ese primer caso tal vez no muestre mucho sobre lo que se puede hacer. Esta pieza sirvió para conocer las posibilidades que se tenían con un modelo sencillo para después trabajar con un diseño más complejo conociendo las partes en la que se tenía que prestar mayor atención para evitar complicaciones mayores. En la primera pieza no se tenía una gran cantidad de material que se pudiera eliminar en la optimización topológica. Sin embargo, se pudo observar que si es posible reducir la masa de las piezas, aunque sea en un porcentaje no muy alto. La primera nube de puntos con la que se trabajó sirvió para conocer el tipo de archivos y ver las posibilidades que se tenían con ellos. La suavización de la superficie en este caso no resultaba tan compleja.

En la segunda pieza se trabajó con un diseño más complejo. La pieza original tenía más material que podía ser removido. Las cargas que se aplicaron no fueron tan significativas, pero sirven para mostrar que se puede llevar cabo la remoción de material. En este segundo caso si se quitó una cantidad considerable de material. La pieza con la que se trabajó tenía más complejidades que se reflejaban en la nube de puntos. Reconocer los agujeros y suavizar la superficie resultó en un proceso más complejo. Los resultados que se obtuvieron son aceptables y se pudieron analizar tanto en Adams como en Hypermesh.

Los resultados obtenidos son alentadores para considerar esta opción de nube de puntos como una posibilidad dentro del proceso de diseño y poder obtener modelos finales que sean útiles. El trabajo hecho puede abrir una posibilidad para seguir explorando las opciones que puede dar el proceso con nube de puntos.

Aunado al resultado obtenido, es importante agregar que el tiempo invertido en los procesos se redujo considerablemente. Asimismo, en comparación con el tiempo que se hubiera invertido en rediseñar el resultado del modelo optimizado fue menor. El primer modelo, a pesar de su menor complejidad, tomó más de cuatro veces más tiempo llevarlo a cabo que el segundo. Pero el conocer las herramientas permitió que un segundo ejemplo de aplicación pudiera llevarse a cabo de una manera más sencilla.

Las piezas obtenidas son modelos que pueden ser utilizados y que pueden sustituir partes de los sistemas de suspensión sobre los que se trabajó.

Capítulo 8. Conclusiones

En este trabajo se buscó la forma de obtener diseños optimizados utilizando una nube de puntos. A lo largo del proceso se observó que existen diversas formas de hacerlo, sin embargo no todas las opciones representaban alternativas correctas. Se logró llegar al objetivo y se pudo observar que las piezas obtenidas se pueden analizar y pueden ser utilizadas para sustituir las originales y cumplir con una función dentro de un sistema.

El trabajo que se hizo muestra una alternativa viable para poder obtener diseños optimizados. La optimización topológica se usó para llevar a cabo los análisis requeridos y cambiar la forma de las piezas originales. En ocasiones no se conocen los parámetros que pueden ser más influyentes en un diseño. En estos casos la optimización topológica ayuda a obtener un buen resultado y poder tener piezas útiles. Las piezas que arroja una optimización de este tipo no siempre pueden ser útiles. En ocasiones puede no ser alentador el descubrir que hay que hacer mucho trabajo después de obtener la pieza ya que ésta no presenta ciertas características requeridas. Las modificaciones posteriores o la necesidad de volver a hacer un modelo tratando de imitar el resultado puede representar mucho tiempo para poder tener un diseño final.

Es importante considerar que si no se tiene claro lo que se busca con el diseño o el objetivo que se piensa alcanzar, será difícil tener un resultado aceptable. Desde un principio se debe conocer la característica que se busca optimizar y las restricciones que se quieren para poder tener un resultado correcto.

Las facilidades que pueden ofrecer las herramientas, ayudarán en gran medida a dar mejores resultados. Conforme aparezcan nuevas herramientas las posibilidades crecerán y se podrán llevar a cabo análisis más completos y en menor tiempo. Asimismo se deben desarrollar herramientas que permitan lograr diseños más acertados tomando en cuenta las geometrías y las posibilidades de modificar diseños que los hagan más fuertes en algunas partes respetando las restricciones requeridas.

La aplicación que se hizo debería tratar de hacerse en elementos planos. Este tipo de estudios podrían ser muy benéficos para poder obtener otro tipo de piezas que se utilizan no sólo en la industria automotriz. Este tipo de elementos podría representar

una mayor complicación, pero podría buscarse la manera de lograr un resultado similar al que se obtuvo.

Referencias

- [1] Fujita, Kikuo, 2000. *Design Optimization of Multi Link Suspension System for Total Vehicle Handling and Stability*. Mechanical Dynamics, Japan.
- [2] Pelagge Pacifico, Marcello. *Product Innovation Program in the Field of Flexible Components for Automotive Suspension Systems*, L´aquila, Italia.
- [3] *Heavy Vehicle Systems Optimization*, 2004 Annual Progress Report, US Department of Energy.
- [4] Annicchiarico, William, 2001. *Un Esquema General para la Optimización Estructural de Formas Mediante Algoritmos Genéticos y Elementos de Diseño Geométrico*, Caracas, Venezuela.
- [5] Motoyama, Keiichi. *A Study of Automobile Design Using Optimization Technique*, Japón.
- [6] Naudé, 2003. *Optimisation of Road Vehicle Passive Suspension Systems*, Pretoria, Sudáfrica.
- [7] Sun, Lu, 2002. *Optimum Design of "Road Friendly" Vehicle Suspension Systems Subjected to Rough Pavement Surfaces*, Austin, Texas.
- [8] Els, 2002. *Investigation of the Applicability of the Dynamic Q Optimisation Algorithm to Vehicle Suspension Design*, Pretoria, Sudáfrica.
- [9] Wronski, Jacob, 2004. *Multi-Disciplinary System Design Optimization of the F-350 Rear Suspension*. Massachussets.
- [10] Dvorak, Paul, 2001. *FEA and Optimization Leads to a More Efficient Design Process*, Cleveland.
- [11] Mei, 2002. *Use of Multiobjective Genetic Algorithms to Optimize Intervehicle Active Suspensions*, Londres.

- [12] Bourmistrova A, *Multiobjective Optimization of Active and Semi-Active Suspension Systems with Application of Evolutionary Algorithm*.
- [13] *An Engineering System for Automated Design and Optimization of Fuel Cell-Powered Vehicles*, American Society of Mechanical Engineers First Annual Conference on Fuel Cell Science, Rochester, 2003.
- [14] Sheng, Weihua. *Automated CAD Guided Automobile Part Dimensional Inspection*, Michigan.
- [15] Reed, Michael. *Automated Model Acquisition from Range Images with View Planning*, Columbia University, New York.
- [16] Dori, Dov, 1999. *Automated CAD Conversion with the Machine Drawing Understanding System: Concepts, Algorithms and Performance*.
- [17] Afonso, 2005. *Structural Optimization Strategies for Simple and Integrally Stiffened Plates and Shells*, Brazil, Engineering Computations.
- [18] Chang, 2005, *Shape Optimization on Double-Chamber Mufflers Using a Genetic Algorithm*, Taipei, Taiwan, Institution of Mechanical Engineers.
- [19] Mohammadi, Bijan, 2004, *Optimization of Aerodynamic and Acoustic Performances of Supersonic Civil Transports*, Montpellier, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow.
- [20] Lamberti, 2002, *Design Optimization of Large Scale Structures with Sequential Linear Programming*, Bari, Institution of Mechanical Engineers.
- [21] Dvorak, Paul, 2001, *FEA and Optimization Leads to a More-Efficient Design Process*, Machine Design.
- [22] Salam-Abdel, 2001, *The Best Shape in the Least Time*, Mechanical Engineering.
- [23] Brussino, 1996, *Re-engineering CAE*, Mechanical Engineering.

[24] Brooks, 1993, *Optimization Shortens the Design Cycle*, Computer-Aided Engineering.

[25] J.J. Maisonneuve, *Sirehna's Background in Optimal Design*, Sirehna, Nantes.

[26] ESTECO, modeFrontier software, www.esteco.it

[27] J.J. Maisonneuve, 2002, *Towards ship performance improvement using modeFRONTIER*, Pornichet, NUTTS03.

[28] iSight, www.engineous.com.

[29] PN Koch, JP Evans, 2002, *Interdigitation for effective design space exploration using iSight*, Structural and Multidisciplinary Optimization.

[30] SL Padula, *Multidisciplinary Optimization Branch Experience Using iSight Software*, NASA.

[31] UP Hong, JB Staubach, 2004, *A comparative Study of software systems from the optimization viewpoint*, Structural and Multidisciplinary Optimization.

[32] Barcelos, 1998, *Integrated Tools Enable Up-front Analysis, Design New*, Magazine Division of Reed Publishing.

[33] Jordan, 1998, *Simulation Capabilities with a Windows Interface*, Modern Machine Shop.

[34] Wallander, 1999, *Topological Optimization, The Conceptual Design Tool*, Ansys Inc.

[35] Parametric Technology Corporation, www.ptc.com

[36] Altair Engineering Inc., Optistruct, www.optistruct.com

[37] Brigham Young University, Optdes X Engineering Optimization Software.

[38] Thomas D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 1994.

[39] John C. Dixon, *Tires, Suspension and Handling*, SAE, Cambridge University Press.

[40] Tarje Rolvag, 2004, *Design and Optimization of Suspension Systems and Components*, Norwegian University of Science and Technology.

[41] Parkinson, 1992, *Optdes X A Windows based optimal design software system*, Brigham Young University.

[42] Mencl, 2001, *Reconstrucción of Surfaces from Unorganized 3D point Clouds*, Dortmund University.

[43] Remondino, 2003, *3D Reconstruction of Static Human Body*, Videometrics VII.

[44] Wahl, 1984, *A Coded Light Approach for 3 Dimensional Vision*, IBM Research Report.

[45] Horn, 1989, *Shape from Shading*, MIT Cambridge.

3d. Ultimate 3D Links. www.3Dlinks.com

[46] Mencl. *Interpolation and approximation of Surfaces*. Eurographics Conference, Lisboa.

[47] Hoppe, 1998, *Surface Reconstruction*, ACM

[48] Terzopoulos, 1998, *The Computation of Visible Surface Representation*. IEEE

[49] Amenta, 1998, *Voronoi Based Surface Reconstruction Algorithm*, ACM

[50] Edelsbrunner, 1994, *Three Dimensional Alpha Shapes*.

[51] Muraki, 1991, *Volumetric Shape Description of Range Data*, ACM

[52] Hastie, 1989, *Principal Curves*, JASA

- [53] Merriam, 1992, *Experience with the cyberware*, Proceedings NCGA
- [54] Schreiber, 1993, *Clustering for Data Reduction and Approximation*, Int. Conference on Computer Graphics and Visualization.
- [55] Borghese, 2000, *A portable modular system of automatic acquisition 3D objects*. IEEE.
- [56] Edelsbrunner, 2001, *Geometry and Topology for mesh generation*, Cambridge.
- [57] Curless, 1996, *A volumetric method for building complex models from range images*. ACM
- [58] Richards, 1995, *Zeroth-order shape optimization utilizing a learning classifier system*.
- [59] Sandgren, 1990, *Topological Design of structural components using genetic optimization methods*, ASME.
- [60] Mitra, Estimating Surface Normals in Noisy Point Cloud Data, Stanford University.**

Apéndice A. Suspensiones

Suspensiones McPherson

La suspensión frontal del tipo MacPherson fue inventada en los años 40 por Earl S. MacPherson, quien trabajaba para Ford Motor Company. Se empezó a utilizar en los vehículos Ford en los 50 y desde entonces ha sido uno de los diseños de suspensión que predominan en los automóviles del mundo.

Este sistema simple utiliza la barra del pistón en el sistema de absorción de impactos para hacer la función de eje o pivote central. Comúnmente, un resorte se coloca en el ensamble del vástago del pistón, con lo que se previene un mal balance de las cargas en las vueltas. El brazo inferior puede ser llamado brazo A, por su forma. Una barra de enlace (a veces llamada barra de tracción) se coloca en la parte final en dirección transversal y una barra de enlace se coloca en la parte longitudinal del ensamble. Pero la barra anti-vuelco puede hacer la función de la barra longitudinal de enlace y así eliminarla en el diseño.

El diseño McPherson se hizo muy popular debido a que ocupa muy poco espacio en la estructura del automóvil. Una suspensión frontal de tipo McPherson es una combinación de barras y un absorbedor (amortiguador) que se colocan dentro de un resorte. La barra McPherson reemplaza al brazo superior de control para utilizarla en la mayor parte de los vehículos con tracción delantera. En algunos vehículos, el diseño McPherson también se utiliza para la suspensión trasera.

La unión con la dirección puede ser conectada directamente a la parte inferior del absorbedor o mediante un brazo auxiliar. Cuando se hace un giro, se tuerce la barra y el absorbedor (por consecuencia el resorte se tuerce) para hacer girar las ruedas. El resorte se coloca en una placa plana especial en la parte superior del ensamble para permitir que se pueda torcer.



Figura 42. Ensamble de suspensión con resorte.

Existen variaciones en los diseños de este sistema. Uno de ellos es conocido como suspensión de “doble brazo A” o “double wishbone”. Este nombre se da porque las ruedas están soportadas por dos brazos que tienen forma de A. En este diseño, el brazo inferior recibe la mayor parte de la carga. Este diseño permite que las irregularidades sean absorbidas y que el eje se mueva hacia arriba y hacia abajo cuando reciben una carga. El movimiento lateral es muy pequeño, pero inevitable, y en ocasiones puede llegar a ser un poco molesto, si no se tienen los ajustes necesarios para limitar el rango del mismo. En este diseño se cuida el ángulo “toe”, el cual indica el grado de inclinación de las ruedas con respecto a un eje vertical en el centro de ellas.

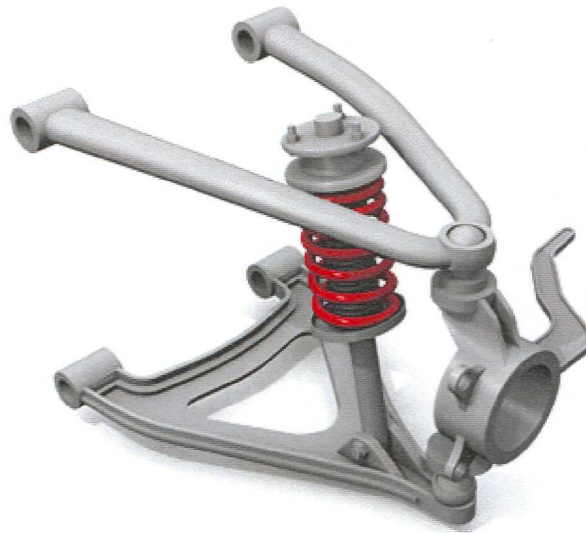


Figura 43. Suspensión de doble brazo A.

Otra variante presenta una forma parecida a la suspensión de dos brazos A. En este caso el brazo superior sigue teniendo la misma forma, mientras que el brazo inferior se sustituye por una barra sólida. La diferencia real es que el sistema de absorción es colocado en el brazo superior, y no entre los brazos. Este cambio transfiere casi toda la carga al brazo superior. El brazo inferior se convierte en un brazo de control.



Figura 44. Suspensión con solo un brazo A.

La última variación hecha a estos sistemas da la forma de A mediante el uso de varios enlaces. En este caso cada brazo se forma por varias barras que se unen para dar la forma haciendo a los brazos elementos independientes. Cuando se lleva cabo un giro, el diseño de la suspensión se puede alterar totalmente al torcer y desplazar cada uno de los brazos. Para poder lograrlo se utilizan sistemas de uniones complejos. Este sistema es actualmente utilizado por Audi en sus modelos A4 y A8.



Figura 45. Suspensión multi-brazo.

Diseños de Suspensiones Consideradas de las Mejores

Suspensión Trasera con Eje Weissach

A mediados de los 70's, Porsche diseñó esta suspensión para su afamado y premiado 928. Básicamente es una variante de una suspensión con un brazo de semi-arrastre.

En un sistema de suspensión, los pivotes deben ser insertados con bujes de plástico para absorber ruido y vibraciones. Para un sistema de suspensión de arrastre convencional, cuando se hace un frenado, el momento del cuerpo del vehículo trata de alejarlo del sistema de suspensión trasera. Debido a la elasticidad del buje, la rueda trasera girará hacia fuera. Como resultado, el auto tendrá un sobreviraje.

El eje Weissach fue diseñado para eliminar este sobreviraje. Al separar un enlace de arrastre en dos piezas, con un pivote entre ellas, el sobreviraje por el frenado se reduce, e incluso puede inducir un ligero subviraje. Esto ayuda a estabilizar el auto en los giros. Normalmente se conoce como “sistema pasivo de eje trasero”.

Sistema de Suspensión Lotus ULSAS

ULSAS es el acrónimo para UltraLight Steel Auto Suspensión. Es el resultado de un estudio de varios consorcios que incluyen 34 compañías productoras de acero de 15 países. El Departamento de Ingeniería de Lotus observó la necesidad de reducir el peso de los sistemas de suspensiones en los autos, que posteriormente se convirtió en un proyecto más grande que incluyó la reducción del peso en todo el cuerpo del auto.

El reto fue quitar masa del sistema de suspensión de algunos componentes sin comprometer su fuerza o su desempeño. En el caso de un sistema de suspensión normal con ejes torsionales, ULSAS fue capaz de reducir la masa en 32% y se alcanzó una reducción de 17% en un sistema de doble estructura (wishbones).

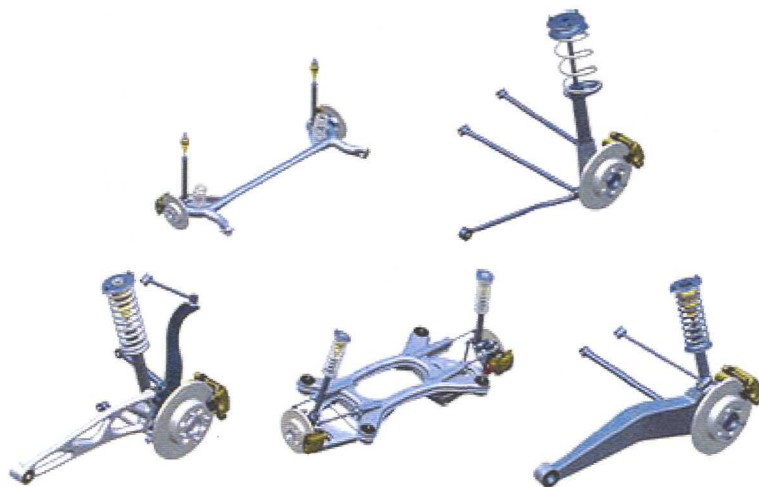


Figura 46. Sistema de suspensión ULSAS.

Sistema de Suspensión Activa de Lotus

En 1987, Lotus agregó al auto Formula 1 de Ayrton Senna un sistema de suspensión que sería conocido como el sistema de suspensión perfecto. Ese auto F1 fue muy superior en manejo y desempeño respecto de los demás autos de la categoría. Pero este sistema aumentaba la velocidad y reducía la necesidad de un piloto hábil para manejar el auto. Este sistema fue prohibido después.

El sistema activo más moderno que ha hecho Lotus es controlado por computadora. Este sistema es hidráulico y mantiene la estabilidad del vehículo y el confort de los pasajeros sin cambios acorde con las imperfecciones del terreno o giros. Los resortes y amortiguadores son reemplazados por actuadores electro-hidráulicos controlados digitalmente, dando un control preciso del vehículo. Este sistema podrá ser utilizado potencialmente en vehículos de la marca a partir de 2008.

El amortiguamiento optimizado ofrece una conducción estable que minimiza los disturbios al conductor y reduce la fatiga. La estabilidad direccional del vehículo varía constantemente de acuerdo a la conducta del vehículo y a los requerimientos del conductor, para mejorar el control del vehículo. El sistema es capaz de sintetizar infinitamente un rango de amortiguaciones variables. Las reacciones de inercia por giros y frenados se reducen al mínimo, dando una sensación de manejo muy confortable.

El sistema es controlado por un procesador digital de alta velocidad con un rango de iteración de 1ms. Típicamente se utilizan 16 sensores, medidores de cargas y fuerzas, aceleraciones y posiciones. Un sistema complejo como este procesa las señales de entrada y arroja una señal a un servo-actuador. El sistema por si mismo realiza chequeos para modificar las rutinas de operación y disminuir las posibilidades de un falla.

Sistema Activo de Mercedes (ABC)

Al viajar en un Mercedes con Control Activo del Cuerpo se tiene la sensación de estar en dos autos al mismo tiempo: un auto deportivo y un auto lujoso. Mediante el uso de una suspensión de acero controlada electro-hidráulicamente, este sistema evita o

inhibe las imperfecciones del camino. Los efectos de viraje son eliminados casi totalmente por este sistema de suspensión. Al mismo tiempo, un botón permite elegir el tipo de suspensión que se prefiere, deportiva o la de mayor confort.

Utilizando señales sensoriales y cilindros especiales en los ejes, el sistema ABC prácticamente elimina y contrarresta los efectos que se dan por las frenadas, giros y aceleraciones del automóvil. En una fracción de segundo, el sistema ABC se ajusta a cualquier situación.

El diseño de las suspensiones tiene gran interés para las compañías automotrices. En parte, representa el confort de manejo que el usuario va a tener en el auto. El desarrollo de cada uno de los diseños presentados fue un proceso que llevo mucho tiempo. Existen soluciones para cada caso que se requiera en cuanto a condiciones de funcionamiento y características que se piden. Dependiendo de lo que se quiera se puede seleccionar o modificar alguno de los diseños. Los diseños presentados han sido los más utilizados en los últimos años, o de alguna manera han representado un cambio o un impacto en cuanto a las suspensiones.

La suspensión de tipo McPherson es en la actualidad la más utilizada en la industria automotriz. Esto hace que sea un diseño que continuamente se encuentra en estudio para obtener mejoras en el mismo. Algunos de los sistemas presentados tienen grandes innovaciones que han traído consigo cambios en las suspensiones aplicadas a los vehículos. Sin embargo, este tipo de suspensiones se utilizan para aplicaciones muy específicas o en autos con precios muy elevados, lo que no los convierte en sistemas muy comunes. Por esta razón se decidió trabajar con un sistema McPherson que permitiera hacerle cambios aplicables a vehículos comunes.

Referencias

Thomas D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 1994.

John C. Dixon, *Tires, Suspension and Handling*, SAE, Cambridge University Press.

Tarje Rolvag, 2004, *Design and Optimization of Suspension Systems and Components*, Norwegian University of Science and Technology.

Apéndice B. Suavización de Superficies.

La meta de la simplificación poligonal, cuando se usa para la generación de los niveles de detalle, es remover primitivas de una malla original para producir modelos más simples los cuales retienen la característica visual importante del objeto original. Idealmente, el resultado deberían de ser una serie completa de simplificaciones, la cual puede ser usada en varias condiciones.

Preservación de la forma

La simplificación debe de conducirse de tal forma que la forma general y las características que hacen que el objeto sea identificable fácilmente sean preservadas. Entonces, los algoritmos tienen que mirar por algunas formas distintas del objeto:

El área planar puede ser identificada inspeccionando las normales de los polígonos adyacentes. Estos polígonos pueden entonces ser combinados para formar unos mas grandes. Este es el tipo mas común de simplificación ya que es relativamente fácil de calcular (no obstante la relación de adyacencia debe ser conocida).

Los bordes pronunciados pueden aparecer y deben ser preservados. Ellos se pueden encontrar al comparar el ángulo entre las normales de las caras adyacentes. Ellos pueden entonces ser simplificados al combinar bordes conectados las cuales son casi colineales.

Los bordes apuntados (tales como la punta de una pirámide) deben ser preservados ya que tienen mucha oportunidad de aparecer en la silueta del objeto. Ellos pueden ser detectados midiendo la curvatura local alrededor de un vértice. Ellos pueden ser simplificados empujando los vértices próximos hacia la punta del pico.

Pero cuando se prueba, por ejemplo por caras coplanares, los algoritmos tienen un valor de umbral para el ángulo entre las normales, arriba del cual las caras no son consideradas planares. Mientras más alto sea este valor, más caras serán consideradas coplanares y será simplificado.

Aproximación del error

Para controlar la simplificación, el error de aproximación debería de ser medido localmente (en cada primitiva). Pero para que el usuario sea capaz de especificar la simplificación, una cota global debería ser puesta para el error. Algunos algoritmos usan una cota para el error local o una distancia a la malla original. Otros usan una construcción geométrica para asegurar que la simplificación no exceda un cierto límite.

Un uso para la medida del error es determinar si una simplificación puede ser usada ya que sus diferencias con el modelo original pueden no ser notables.

La mayoría de los algoritmos permite al usuario especificar el límite superior para la aproximación del error local. Esto no es muy intuitivo y requiere alguna práctica. Alternativamente, algunos algoritmos permiten al usuario especificar cuantos polígonos deberían de ser dejados en la simplificación.

Preservación de la topología

Durante el curso de la simplificación, una opción que el algoritmo puede tener es simplificar la topología. Por ejemplo, Las simplificaciones pueden conducir a llenar un hoyo o partir un objeto dentro de varias partes no conectadas. Al permitir que la topología sea modificada deja más espacio para simplificación, el resultado es raramente útil ya que las diferencias con el objeto original son demasiado notables.

Simplificación controlable

Es algunas veces interesante permitir que la cantidad de simplificación varíe a través de la malla, para preservar algunas partes, no obstante simplificar otras más agresivamente. Esta clase de adaptatividad involucra principalmente consideraciones visuales semánticas que pueden ser hechas a priori y son controladas por el usuario. Unos pocos algoritmos soportan este tipo de simplificación adaptable. Otros problemas ocurren cuando el tamaño del objeto es grande con respecto a la escena. En tales condiciones, alguna parte del objeto estará constantemente en el frente y la mayoría del detalle será siempre usado. No hay manera universal de partir el objeto y la continuidad deberá ser mantenida entre dos piezas adyacentes así que no aparezcan errores cuando dos piezas son simplificadas independientemente. El algoritmo de simplificación deberá tomar cuidado de esto.

Simplificación poligonal

Simplificación de operadores

Unos pocos operadores simples pueden ser usado para remover primitivas de un modelo:

- Normalización: remoción de caras degeneradas o bordes y cualquier primitiva definida múltiples veces.
- Simplificación de Vértices: combinación de todos los puntos incluidos dentro de un volumen (cualquiera una esfera o una celda de rejilla). Entonces, los puntos y las caras cercanas son combinadas.

- Simplificación de Borde: remoción de todos los bordes más pequeños que algún umbral.
- Simplificación Basada en Angulo: remoción de bordes los cuales forman un ángulo cerrado. Inversamente, los bordes que están alineados son combinados.
- Simplificación del Tamaño de la Cara: remoción de todas las caras las cuales tienen un área más pequeña que algún umbral. Los hoyos pudieran tener que ser llenados.
- Simplificación de la Normal de la Cara: combinación de todas las caras adyacentes con normales casi paralelas.

Los algoritmos de simplificación poligonal caen en tres diferentes categorías.

Geometría de la Remoción

Los algoritmos en esta categoría producen una versión simplificada de un modelo mediante la selección de un número de primitivas las cuales deben ser removidas. La selección es hecha usando alguna clase de heurística. Por ejemplo, el algoritmo identifica vértices los cuales están cerca de regiones planares. Este criterio es disminuido en cada interacción hasta que ningún vértice adicional pueda ser removido. Este tipo de simplificación es la más popular entre los algoritmos recientes.

Subdivisión Adaptativa

Esta categoría construye una simplificación inicial la cual es la versión más simple del modelo original. Esta entonces añade más detalles en el modelo al subdividir este así que se obtiene una cercanía al modelo original. Este entonces es subdividido y la posición de cada nuevo vértice es cambiada para tener más cercanía a la superficie original. Este tipo de simplificación no es tan popular ya que construir la simplificación inicial no es simple en el caso general.

Muestreo

Finalmente, los algoritmos en esta categoría escogen un cierto número de primitivas que deberían de ser preservadas (como opuesto a la primera categoría, la cual escoge primitivas que deberán ser removidas). Una manera de seleccionar estas primitivas es haciendo una selección pseudoaleatoria, basada en alguna clase de heurística. Otro método más poderoso es muestrear el modelo y escoger un representativo único para cada grupo de la muestra. Por ejemplo, mientras que esté embebido el modelo en una

rejilla uniforme de 3D, un vértice puede ser escogido en cada celda para reemplazar todos los otros vértices en su celda.

Algoritmos

Se presentan aquí seis algoritmos. Se realzan sus principales características y sus opciones con respecto a las características presentadas.

Análisis de Mallas Arbitrarias de Multiresolución

Esto no es realmente un algoritmo de simplificación, sino un preprocesador para otro algoritmo el cual produce una representación de multiresolución de una malla el cual es un geomorfo compacto conteniendo una malla base simple y una serie de coeficientes "wavelet" que son usados para introducir detalles dentro de la malla. De esta representación, una nueva malla puede usar una subdivisión recursiva hasta que la cantidad deseada de detalle es alcanzada. Semejante malla es encodificada dentro de una representación de multiresolución.

Este algoritmo es uno de subdivisión adaptiva el cual preserva la topología, pero identifica cualquier forma característica en la malla. El error de aproximación es medido usando la distancia a la malla original. Los mapas armónicos son usados en varios pasos para parametrizar una malla 3D dentro de una triangulación planar. El algoritmo tiene cuatro pasos principales:

Particionamiento: Un diagrama parecido al de Voronoi es construido sobre la malla original usando un algoritmo de buscador de trayectoria multi-semilla en el gráfico dual de la malla (donde los nodos son las caras de la malla y los arcos representan adyacencias y son pesados usando la distancia entre los centros de caras adyacentes).

Parametrización: el resultado es una malla base que es parametrizada usando un mapa armónico. La parametrización es forzada a ser continua a través de las caras para que el número de coeficientes "wavelet" sea mínimo.

Remuestreo: la malla base es ahora remuestreada usando un operador de división hasta que la malla esté en una cierta distancia a la malla original. Cada paso es parametrizado como en el paso 3.

Análisis de Multiresolución: la sucesión resultante de mallas es pasada al algoritmo de análisis de multiresolución para ser encodificada usando "wavelets".

Mallas Progresivas

Este algoritmo de remoción geométrico también produce geomorfos y es derivado de un algoritmo más antiguo. Este busca áreas planares y bordes característicos. La

simplificación es hecha aplicando un operador colapso de borde, donde un colapso de borde produce un nuevo vértice removiendo las dos caras y un vértice. El resultado es una malla de base simplificada y series de particiones de vértice las cuales son un inverso de los colapsos de borde y son usadas para introducir detalles dentro de la base de la malla. Esto es llamada Malla Progresiva y un amplio número de simplificaciones pueden ser extraídas de este.

La característica más importante de este algoritmo es que toma en cuenta información tal como color, textura, y discontinuidades normales sobre la superficie de cada malla. Las formas importantes del modelo las cuales son representadas por esta clase de información (y no por simple geometría) son también preservadas.

La minimización de una función de energía es usada para guiar la simplificación. Esta función tiene cuatro términos. El primero asegura que la malla simplificada permanece cercana a la original. La segunda favorece triángulos con mejores proporciones. El tercer término desalienta la simplificación de discontinuidades de color y textura. Finalmente, el último término desalienta la simplificación de las discontinuidades topológicas y normales.

Los pasos básicos del algoritmo son estos:

1. Ordenar los bordes usando el mínimo costo de simplificación. Este costo es medido usando una variación de la función de energía.
2. Aplicar el operador de colapso de bordes para el borde en la cabeza de la lista y registrar la correspondiente partición del vértice en la estructura de malla progresiva (incluyendo color, textura e información normal)
3. La posición del nuevo vértice es seleccionado entre los dos vértices iniciales y el centro del borde, dependiendo sobre el cual uno es el más cercano a la malla original.
4. Recalcular el costo para los bordes que han sido afectados por el operador y reordenar la lista.
5. Si la lista está vacía o el costo de la siguiente simplificación excede un cierto límite, el algoritmo termina y regresa la malla final progresiva. De otra manera, regresa al paso 2.

Este algoritmo es relativamente rápido y toma en cuenta el color y la textura, los resultados son usualmente muy buenos.

Aproximación de Rango Completo de Poliedros Triangulados

Este algoritmo de remoción geométrica preserva áreas planares pero no la topología. Este usa un operador de región de combinación, el cual es burdamente equivalente a

un colapso de borde. Uno de los vértices iniciales es usado como un resultado del operador. El error de aproximación es medido usando la distancia a la malla original. Semejante al algoritmo previo, este usa una función de energía la cual tiene dos términos. El primero, el error local de teselación asegura que la orientación de las normales es preservada y que las nuevas caras no se traslapan. El segundo término, el error local geométrico, preserva a la malla de moverse demasiado lejos de la original. Los pasos básicos del algoritmo son como sigue:

1. Ordenar todos los bordes respecto a su aumento de costo.
2. Aplicar el operador de combinación de la región al primer borde en la lista.
3. Modificar la posición del vértice resultante para obtener este más cercano a la malla original.
4. Recalcular el costo para los bordes modificados y ordenar la lista. El costo es acumulado en cada iteración así que la simplificación es más parejamente distribuida a través de la malla.
5. Si la lista está vacía o si el costo del siguiente borde es más alto que un umbral, el algoritmo termina. De lo contrario regresa al paso 2.

Simplificación por Sobres

Este preserva áreas planares y bordes agudos, tan bien como la topología. La principal meta de este algoritmo es no usar la medida del error sino solamente la construcción geométrica para controlar la simplificación. La Simplificación por Sobres son dos superficies construidas una de cada lado de la superficie original usando un distancia (offset) especificada por el usuario y asegurando que estas superficies no se autointersectan. El espacio entre las dos superficies es entonces usado para construir una nueva superficie, la única restricción entonces es que los nuevos polígonos no deberían de intersectar con cualquier superficie. Esta reconstrucción puede ser hecha en varias maneras, de las cuales aquí se presentará solamente una.

La cantidad de simplificación es controlada por la distancia (offset) usada para construir las superficies. El caso donde las superficies del sobre son más probables a intersectarse es a lo largo de los bordes agudos de la malla original, donde no habrá mucho espacio para construir una de las superficies. Las superficies que se auto intersectan deben entonces ser movidas mas cercanas a la malla original hasta que la condición es corregida. Entonces, cerca de los bordes agudos los espacios entre las dos superficies serán mas pequeños y más pocas simplificaciones serán permitidas. Inversamente, en las áreas planares, la distancia será máxima y así será la simplificación.

El algoritmo inicia construyendo los sobres:

1. Distanciar (offset) la superficie externa a lo largo de las normales a los vértices por una fracción de la distancia (offset) final deseada.
2. Si, para cualquier vértice, la superficie se autointersecta, cancelar el movimiento para ese vértice.
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que incremento ningún adicional pueda ser alcanzado sin intersección, o la distancia (offset) haya alcanzado el valor deseado.
4. Repetir los pasos del 1 al 3 para la superficie interna.
5. Repetir los pasos del 1 al 3 para los tubos de los bordes. Estos son construidos a lo largo de los bordes de objetos no cercanos para permitir la simplificación ahí también.

Esta manera interactiva de construir las superficies distancia (offset) produce resultados no óptimos, es decir los sobres son algunas veces más cercanos a la malla original que lo que ellos deberían de ser

El algoritmo entonces actúa generando la malla simplificada. Para cada vértice de la malla inicial:

Remueve el vértice y las caras adyacentes.

Si es posible, iterativamente llenar el hoyo por triangulación usando las caras más grandes posibles y asegurando que ellas no se intersectan con las superficies distancias (offset). Si no es posible, cancelar la remoción y tratar el siguiente vértice.

Este algoritmo es atractivo ya que no usa cualquier medida del error. Los sobres son el único control sobre la simplificación. Es computacionalmente caro no obstante, especialmente durante la fase de construcción del sobre.

Simplificación de Superficie Dentro de un Volumen de Tolerancia

Este remueve bordes como en, pero el control es hecho usando la Tolerancia de Volumen. La cantidad de simplificación es controlada por el grosor de ese volumen.

El volumen de tolerancia es calculado como una esfera alrededor de cada vértice y representa la acumulación del error introducido por simplificación el cual conduce a la creación del vértice (por la aplicación del operador de colapso de borde). Este es entonces interpolado a través de los bordes y caras. Una de las propiedades del algoritmo es asegurar que el volumen del objeto no es cambiado por la simplificación (dentro de una tolerancia dada). Esto es muy útil para algunos dominios de aplicación tales como la visualización de datos médicos.

Los pasos básicos del algoritmo son los siguientes.

1. La simplificación inicial es simplemente una copia de la malla original. Los volúmenes de error se ponen en valor nulo. Para cada borde por orden de aumento de longitud:
2. Aplicar el operador de colapso de borde. La posición del nuevo vértice es calculado al resolver las ecuaciones que aseguran que permanece cercano a la malla inicial y que el volumen es preservado.
3. Checar que las normales de las caras modificadas no han sido invertidas. Si ellas lo están, cancelar el colapso del borde e ir al siguiente borde.
4. Checar que las nuevas caras tengan buenas proporciones. Esto es evaluado usando una función de la superficie y la longitud de los bordes y checando que esta función no cambie demasiado después que el operador es aplicado. Si ha cambiado, cancele el colapso del borde e ir al siguiente borde.
5. Actualizar la lista de bordes para tomar en cuenta la modificación introducida por la simplificación.
6. Calcular la nueva tolerancia de volumen para que contenga el volumen previo.
7. Si el diámetro del volumen de tolerancia para el nuevo vértice es más grande que un umbral dado (es decir, que la malla original no es incluida dentro del volumen de tolerancia), entonces los bordes que comparten este vértice, son removidos de la lista y ninguna simplificación adicional tomará lugar en esa área.

Simplificación de Malla

Este algoritmo de remoción geométrica es original en que no mide el error de aproximación, excepto que usa un proceso de agrupamiento para asegurar que la simplificación es restringida en ciertas áreas. Este agrupamiento es hecho mediante la búsqueda de bordes característicos y áreas planares. Los bordes característicos son aquellos que están compartidos por caras las cuales forman un ángulo más grande que un umbral dado. Típicamente, hay muchos bordes característicos en áreas donde hay pocas caras coplanares.

El algoritmo hace las siguientes operaciones:

1. Buscar por bordes característicos y etiquetar los vértices usando un número de bordes característicos que lo comparten. Un vértice "0" no tiene bordes característicos dejando a este.
2. Construir agrupamientos de polígonos coplanares. Buscar bordes entre dos vértices "0" y usar ellos para construir pares de caras coplanares donde los bordes entre dos vértices "0" no son conectados.

3. Dentro de cada agrupación, aplicar un operador de colapso de borde hasta que ninguna simplificación adicional pueda ser hecha.
4. Buscar bordes de característica colineal dejando vértices "2", tales como los vértices sobre los bordes de un cubo. Esto no puede ser simplificado por un operador de colapso de borde ya que las dos caras adyacentes no son coplanares. Estos bordes son combinados y el vértice resultante es empujado hacia el otro vértice. El resultado es mover los vértices sobre un borde característico hacia sus extremidades.
5. Buscar vértices "0" en rodeados por solamente vértices no "0", como el del centro de un lado de un cubo. Tales vértices no pueden ser removidos por el método previo ya que no hay otros vértices "0" adyacentes para construir un agrupamiento. Así que semejantes vértices son removidos, y el hoyo es triangulado.

Este algoritmo es atractivo por su simplicidad, pero la simplificación no es siempre óptima. Mejores resultados pueden ser obtenidos gradualmente incrementando los umbrales de planaridad y colinealidad mientras el algoritmo procede.

Referencias

Algorri, M.-E. and Schmitt, 1996, *Mesh simplification. Proceedings of EuroGraphics.*

Astheimer, P. and Pöche, 1994, *Level-of-detail generation and its applications in virtual reality*, Virtual Reality Software and Technology.

Bourdot, P, *Gestion de Scènes Complexes en Amont des Algorithmes de Rendu*, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III.

Chazelle, B., Dobkin, D. P., Shouraboura, *Strategies for polyhedral surface decomposition: An experimental study*, Symposium on Computational Geometry, Vancouver, British Columbia.

Clark, J. H. 1976. *Hierarchical geometric models for visible surface algorithms*, Communications of the ACM.

Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F., and Wright, W. 1996, *Simplification Envelopes*, Computer Graphics.

DeHaemer Jr., M. and Zyda, M. 1991, *Simplification of objects rendered by Polygonal Approximations*. Computers & Graphics.

DeRose, T. D., Lounsbery, M., and Warren, J. 1993, *Multiresolution analysis for surface of arbitrary topological type*, Department of Computer Science, University of Washington, Seattle. .

Maciel, P. W. C. and Shirley, P. 1995, *Visual navigation of large environments using textured clusters*.

Reddy, M. 1995, *A survey of level of detail support in current virtual reality solutions*. Virtual Reality: Research, Development and Applications.

Reddy, M. 1996, *SCROOGE: Perceptually-Driven Polygon Reduction*, Computer Graphics Forum.