

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Proyecto de Aplicación

Estructura de Sujeción para Core Cowl

Que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta

Martín de Jesús Morales Córdoba

Director de proyecto: Dr. Juan Manuel Terrazas Gaynor

Co-director de proyecto: Ing. Erick Daniel Higashi Garcia

Mexicali, Baja California. Marzo de 2018

Agradecimiento y dedicatorias

Este espacio está dedicado a mi familia, quienes han sido uno de los principales propulsores que me han llevado hasta aquí, que sin su apoyo y constante motivación el culminar un Posgrado hubiera sido más difícil, y que es gracias a ellos que he podido dedicar tiempo de calidad al estudio y me han enseñado el valor de esta inversión.

A mi novia, quien ha sido una razón importante para seguir mejorando y buscar estar preparado para los nuevos retos y oportunidades que se han presentado en mi carrera. Y con ello buscar tener una mejor calidad de vida.

A mis amigos y compañeros quienes han estado en las situaciones donde la ayuda ha sido escasa o el reto muy grande, que sin ellos y sin el trabajo en equipo el camino hubiera sido más difícil.

Y a mis maestros, a todos y cada uno de ellos, que han invertido más allá del tiempo en clase para asegurarse de que mi aprendizaje haya sido de valor, que haya mejorado algo en mí y con esto yo busque la forma de utilizar sus enseñanzas y aplicarlas en los proyectos y situaciones que durante mi carrera se han presentado y sobretodo que esté preparado para aquellos que están por venir.

Gracias a todas estas personas por creer en mí!

Carta Institucional

Aerostructures

UTC Aerospace Systems
Venustiano Carranza 238
Desarrollo Industrial Colorado
Mexicali, B.C., México C.P. 21307
+52-686-9047900 Fax: +52-686-9047935
marin.morales@utas.utc.com
www.utc-aerospace.com



Marzo 9 del 2018

Por medio de la presente se hace constar que nuestro empleado y actual estudiante de CETYS Universidad Campus Mexicali, el C. Martín de Jesús Morales Córdoba con Matricula 32647, cursa la maestría de Diseño y Procesos de Manufactura, a lo cual dentro de la empresa UTC Aerospace Systems realizó un proyecto de nombre "Herramienta de Sujeción de Core Ccw", el cual fue implementado de manera exitosa.

Sin más por el momento quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Neydi Tellez".

Neydi Tellez

787 Program Manager



Mario Berrelleza

M.E. Team Leader

ITC Approve
Gabor B.
3/8/18

Índice

Agradecimiento y dedicatorias	2
Carta Institucional.....	3
Índice de figuras.....	5
Lista de abreviaturas	6
Resumen	7
Capítulo 1: Introducción	8
Antecedentes	8
Justificación.....	9
Planteamiento del Problema.....	10
Preguntas de investigación.....	12
Objetivos.....	13
Hipótesis	14
Capítulo 2: Fundamentación teórica	15
Diseño de herramientas	15
Objetivos de Diseño.....	15
Diseño de <i>Fixture</i> y <i>Jig</i>	17
Fuerzas de sujeción.....	18
Mecánica de materiales	19
Características mecánicas de los materiales	20
Análisis de elemento finito (FEA)	21
Pre-Proceso para FEA	22
Mayado para Análisis de Elemento Finito	23
Ergonomía.....	24
Análisis BRIEF y BEST	25
Capítulo 3: Bosquejo Metodológico	27
Declaración y análisis del problema.....	27
Análisis de los requerimientos	27
Desarrollo de ideas iniciales	27
Desarrollo de posibles alternativas de diseño.....	28
Finalización de ideas de diseño	29
Capítulo 4: Resultados.....	31

Diseño Final	31
Fabricación de Prototipo	37
Pruebas	38
Mejoras en Ergonomía	39
Mejoras en Tiempo	40
Capítulo 5: Discusión, Conclusiones y Recomendaciones.....	41
Discusión	41
Conclusiones.....	41
Recomendaciones	42
Anexo A, Recursos Requeridos	44
Referencias	46

Índice de figuras

Figura 1 Core Cowl 787 (Modelo CATIA)	10
Figura 2 Core Cowl 787 sobre plataforma de altura ajustable (Fotografía)	10
Figura 3 Principio de un workholder	17
Figura 4 Método mecánico de transmisión y multiplicación de fuerza.....	18
Figura 5 Entradas necesarias para análisis de elemento finito	21
Figura 6 Proceso de Diseño impulsado por FEA	22
Figura 7 Ejemplo de una pobre (izq.) y una buena (der.) malla de elemento finito	23
Figura 8 Formato de Encuesta BRIEF	25
Figura 9 Formato BEST.....	26
Figura 10 Alternativa de Diseño 1	28
Figura 11 Alternativa de Diseño 2	28
Figura 12 Diseño Final (Visto desde lado inboard).....	29
Figura 13 Vista de soportes y prensas	30
Figura 14 Vista desde el lado outboard	30
Figura 15F Vista desde el lado interno (inboard)	31
Figura 16 Vista de soportes y prensas	32
Figura 17 Vista desde el lado externo (outboard).....	32
Figura 18 Mallado del modelo	34
Figura 19 Desplazamientos.....	35
Figura 20 Esfuerzos.....	36
Figura 21 Prototipo de Estructura de Sujeción para Core Cowl.....	37
Figura 22 Estructura de Sujeción para Core Cowl con Pieza montada.....	38

Lista de abreviaturas

- Workholder: Dispositivo de sujeción.
- Fixture: Es un dispositivo de sujeción o soporte de trabajo utilizado en la industria manufacturera.
- Jig: Dispositivo de sujeción diseñado para sostener, posicionar y dar soporte a la pieza de trabajo guiando la herramienta de corte a través de su ciclo de corte.
- Counterboring: Es el alargamiento a una profundidad requerida en forma cilíndrica de un hoyo formado previamente.
- Poka-Yoke: A prueba de errores
- Clamps: Prensas

Resumen

El presente trabajo tiene como intención resolver una problemática presente en el área de ensamble del Core Cowl 787 en la planta de UTC Aerospace Systems Mexicali. Trabajo que abarca desde la planeación del proyecto; definir el problema a resolver, estimar los tiempos de las tareas requeridas, estimar los recursos necesarios, la búsqueda de las aprobaciones para poder destinar capital a este proyecto. La parte de Diseño Mecánico; definición del tipo de estructura a utilizar, los materiales, las partes, el análisis pertinente. E incluso el tema de la ergonomía. Todo esto con la finalidad de mejorar las condiciones laborales en el área mencionada, mejorar el tiempo de manufactura y sujeción de la parte durante su manufactura con la finalidad de reducir variaciones en el proceso para no afectar la calidad del producto, además de reducir la intervención de un segundo operador para manipular la pieza. Todo esto aplicando los nuevos conocimientos adquiridos durante el Posgrado, sumados a aquellos por experiencia laboral.

Capítulo 1: Introducción

Antecedentes

UTC Aerospace Systems es uno de los proveedores más grandes del mundo en cuestión de avanzada tecnología aeroespacial y productos de defensa. Diseña, manufactura, da servicio a sistemas y componentes, provee soluciones integradas para aeronaves comerciales, regionales, de negocios y militares, helicópteros y otras plataformas. Es además el mayor proveedor para los programas espaciales internacionales.

En 2012, UTC Aerospace Systems fue formado por la combinación de dos líderes de la industria, Hamilton Sundstrand y Goodrich, creando una organización con posiciones clave en una amplia gama de aeronaves en vuelo hoy y contenido sustancial en varios UAV (*unmanned aerial vehicle*- vehículo aéreo no tripulado), satélites y vehículos terrestres y navales.

Sus clientes incluyen al equipo de manufactura original que construye aeronaves y helicópteros, manufactura motores, y aerolíneas, así como agencias de defensa y contratistas. Su compromiso es ayudar a desarrollar y mantener seguros, ligeros y más confiables y más eficientes las aeronaves y otras plataformas.

UTC Aerospace Systems emplea aproximadamente 42,000 personas alrededor del mundo con ventas anuales de aproximadamente \$14 billones.

Justificación

Hoy en día la aplicación de las herramientas de Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing) junto con una cultura de Mejora Continua, nos han llevado a buscar oportunidades dentro de los procesos de manufactura que diariamente se llevan a cabo en UTC Aerospace Systems. Siendo la reducción de tiempos de espera, de movimientos innecesarios y de defectos unos de los principales factores a mejorar, pero aún más importante la seguridad del empleado. Una forma de apoyar estas iniciativas es proporcionar mejores herramientas de trabajo, que se adapten a las necesidades particulares de cada celda de ensamble así como a los operadores que las utilizan. Y es gracias al Diseño Mecánico que esto puede llevarse a cabo de una manera más eficiente, teniendo como objetivo la entrega de un producto cuyas características hayan sido verificadas y satisfagan las necesidades detectadas. Y que mejor que lograrlo mediante la eficiente utilización de los recursos de la empresa; software y equipos de cómputo moderno para el diseño y análisis, capital para la adquisición de los materiales, maquinaria y equipo así como la experiencia y talento del personal del departamento de Tool Shop para la fabricación y ensamble de la herramienta. La disponibilidad de este conjunto de recursos nos permite tener ventajas como ahorros en tiempo y capital, en comparación con proyectos en los cuales se tiene que recurrir a Empresas externas, lo cual la mayoría de las veces eleva la complejidad del proyecto al dejar en manos de otros dar respuesta a las necesidades particulares del área en donde este se aplicará, y en caso de requerir ajustes estos se demoran más y pueden afectar la implementación a tiempo del proyecto e incluso elevar el costo de este.

Planteamiento del Problema

En el sitio de UTC Mexicali, uno de los sub-ensambles que se manufacturan para el 787 Thrust Reverser es el Core Cowl, el cual es una estructura metálica que se compone principalmente de dos pieles (*skins*), la primera de ellas de geometría tipo cono, la segunda una sección casi plana, y de una estructura de carga (load share frame) a lo largo de la parte media de ambos *skins*,

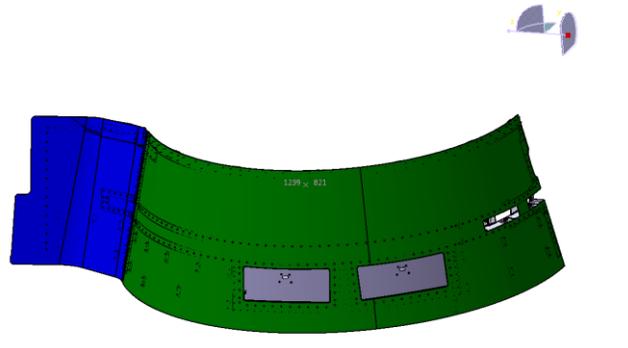


Figura 1 Core Cowl 787 (Modelo CATIA)

cuyo proceso de ensamble se divide en dos estaciones de trabajo, siendo la primera parte llevada a cabo sobre una plantilla de ensamble y la segunda sobre una plataforma de altura ajustable que tiene adaptada una mesa de trabajo.



Figura 2 Core Cowl 787 sobre plataforma de altura ajustable (Fotografía)

La oportunidad se detecta al momento de colocar el sub-ensamble en la segunda estación, la cual carece de soportes/apoyos suficientes que permitan sostener el sub-ensamble de una manera segura así como poderlo manipular para realizar las operaciones restantes de forma que no se vea afectada la ergonomía del operador y que la intervención de un segundo operador sea la mínima necesaria.

Preguntas de investigación

- ¿Será posible diseñar, analizar y fabricar una estructura que permita al operador trabajar la pieza de manera que esto no represente un riesgo ergonómico?
- ¿Podrá esta herramienta sujetar la pieza de manera firme, manteniendo la geometría de ésta y eliminando la necesidad de rotarla?
- ¿El diseño de esta herramienta permitirá que se fabrique con las máquinas y herramientas existentes en el taller de la empresa?
- ¿Los materiales requeridos por el diseño serán aquellos disponibles localmente o de fácil adquisición en el mercado?

Objetivos

Diseñar, analizar y fabricar una herramienta que:

- Mejore la ergonomía del operador durante las operaciones de ensamble.
- Elimine la necesidad de rotar la pieza.
- Ofrezca una vida útil larga y de bajo mantenimiento. Y cuyo método de sujeción sea seguro para el operador y para el proceso, es decir que este no se libere debido a vibraciones o algún movimiento involuntario del operador.
- Cuyo método de sujeción se adapte a la geometría de la pieza y así esta mantenga sus características de diseño.
- Se pueda adaptar sobre la plataforma elevador de 2000lbs ya existente y así aprovechar las características de ese equipo.
- Su fabricación pueda ser llevada a cabo en el Taller de la empresa con materiales sencillos fáciles de obtener en la región.
- Las partes susceptibles a desgaste sean estándar, para poderlas remplazar de manera sencilla.

Hipótesis

Es posible diseñar una herramienta para mejorar las condiciones ergonómicas del operador, reducir la necesidad del 2do operador durante las operaciones de ensamble y a la vez evitar defectos sobre las piezas trabajadas ocasionados por una incorrecta sujeción de la pieza.

Capítulo 2: Fundamentación teórica

Diseño de herramientas

El diseño de herramientas es un área especializada del ingeniero en manufactura que comprende el análisis, planeación, diseño, construcción, y aplicación de herramientas, métodos, y procedimientos necesarios para incrementar la productividad de manufactura. Para llevar estas responsabilidades, el diseñador de herramientas debe tener un conocimiento de trabajo de las prácticas de taller de máquinas, procedimientos de fabricación de herramientas, diseño de herramientas de máquinas y procedimientos y métodos de manufactura, así como las disciplinas más convencionales de la ingeniería de planeación, diseño, ingeniería gráfica y dibujo, y análisis de costos.

Objetivos de Diseño

Los objetivos principales del diseño de herramientas es incrementar la producción mientras se mantiene la calidad y los costos bajos. Para este fin, el diseñador de herramientas debe:

- Reducir el costo total de manufacturar un producto haciendo partes aceptables al costo más bajo.
- Incrementar el ritmo de producción mediante el diseño de herramientas para producir partes tan rápido como sea posible.
- Mantener la calidad mediante el diseño de herramientas para producir consistentemente partes con la precisión requerida.
- Reducir el costo de herramientas especiales haciendo cada diseño tan rentable y eficiente como sea posible.
- Diseñar herramientas que sean seguras y fáciles de operar.

Las siguientes preguntas deben ser utilizadas como verificación para determinar si un diseño de herramienta en particular cumple con los siguientes objetivos:

- ¿El diseño requiere que el operador trabaje cerca de herramientas giratorias?
- ¿La herramienta tiene un medio para asegurarla a la tabla de maquinado?
- ¿Las llaves del accesorio caben en la tabla de la maquina prevista?

- ¿La herramienta se desempeñara con un alto grado de repetitividad?
- ¿Ha sido estudiado cada posible detalle para proteger al operador de lesiones?
- ¿Se removieron todos los filos y rebabas?
- ¿Hay alguna posibilidad de que las abrazaderas se aflojen o que la pieza sea jalada de la herramienta?
- ¿Han sido considerados la ergonomía del operador en el diseño?
- ¿Los refrigerantes y fluidos de corte drenaran libremente por la herramienta?
- ¿Es fácil de limpiar la herramienta?
- ¿Son dirigidos lejos del operador los fluidos refrigerantes y virutas?
- ¿Están las partes sueltas adjuntas con un cable o seguramente aseguradas?
- ¿Es la herramienta fácil para el operador cargarla y descargarla?
- ¿Puede la herramienta ser cargada y descargada rápidamente y de forma segura?
- ¿Hay suficiente espacio para las herramientas manuales?

El proceso de diseño consiste en cinco pasos básicos:

1. Declaración y análisis del problema.
2. Análisis de los requerimientos.
3. Desarrollo de ideas iniciales.
4. Desarrollo de posibles alternativas de diseño.
5. Finalización de ideas de diseño.

(Nee, 2010)

Diseño de Fixture y Jig

El termino *workholder* incluye todos los dispositivos que sujetan, agarran o sostienen una pieza de trabajo para realizar una operación de maquinado u otra operación de manufactura como, pero no limitada a, ensamble, soldadura, e inspección. La fuerza de sujeción puede ser aplicada mecánicamente, eléctricamente, hidráulicamente, o neumáticamente. Un *workholder* debe posicionar o ubicar una pieza de trabajo en una relación definida a la herramienta de corte, y esta debe soportar las fuerzas de sujeción y de corte mientras mantiene una ubicación precisa. Un buen *workholder* maximiza el número de operaciones realizadas.

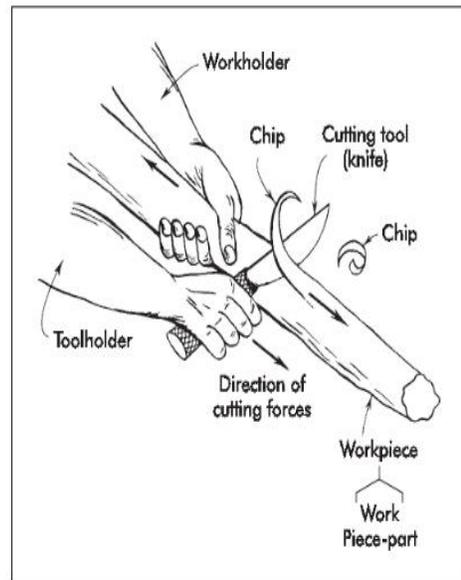


Figura 3 Principio de un workholder

Los *workholders* son clasificados comúnmente como *fixtures* o *jigs*. Los *fixtures* son *workholders* diseñados para sujetar, ubicar y dar soporte a la pieza de trabajo durante un ciclo de maquinado, unión, u operación de ensamble. Un *fixture* no guía la herramienta de corte, pero más bien provee una referencia y alinea la herramienta de corte a la pieza de trabajo. Los *jigs*, como los *fixtures*, sujetan, ubican y dan soporte a la pieza de trabajo, pero también guían la herramienta de corte a través del ciclo de corte. Los *jigs* de barrenado son los de tipo más común. Son usados para barrenar, pinchar, rimar, cónicos, *counterboring*, achaflanado y perforado de caras.

El diseño o selección del *workholder* es gobernado por varios factores, el primero siendo la característica física de la pieza de trabajo. El *workholder* debe ser suficientemente fuerte para soportar la pieza de trabajo sin deflexión. Fuerzas de corte y vibración impuestas por las operaciones de maquinado variando en magnitud y dirección, pudieran impartir un torque así como fuerzas lineales en la pieza de trabajo.

El *workholder* debe soportar la pieza de trabajo de manera opuesta a las fuerzas de corte. El grado de precisión requerido por el *workholder* usualmente puede exceder el requerido por la pieza de trabajo, típicamente por un factor de 2 a 5 veces, pero en ocasiones por un factor de 10.

Un *workholder* debe ser diseñado para recibir la pieza de trabajo en una sola posición. Si un *workholder* con algunas geometrías simétricas puede ser sujetado en más de una posición, es probable que un porcentaje de las piezas de trabajo estén sujetas y maquinadas incorrectamente. Para prevenir una locación y sujeción incorrecta, técnicas poka-yoke (a prueba de error) son usadas para diseñar *workholders*.

Es recomendable utilizar componentes *workholders* estándar y componentes comercialmente disponibles cuando sea posible. Estos artículos pueden ser comprados por menos del costo de fabricarlos, por su velocidad de implementación, generalmente tienen fuerza suficiente y son precisos, además pueden ser reutilizados. (Philip D Rufe, 2013)

Fuerzas de sujeción

Los sujetadores mantienen la pieza de trabajo contra un localizador. Por ejemplo, la aplicación más común es el tornillo de banco, donde una mandíbula móvil ejerce presión sobre una pieza de trabajo, manteniéndola así en un lugar preciso determinado por una mandíbula fija. El tornillo de banco utiliza un tornillo para convertir la fuerza de accionamiento en fuerza para sostener. La figura anexa muestra un número de métodos mecánicos usados para transmitir una fuerza multiplicada.

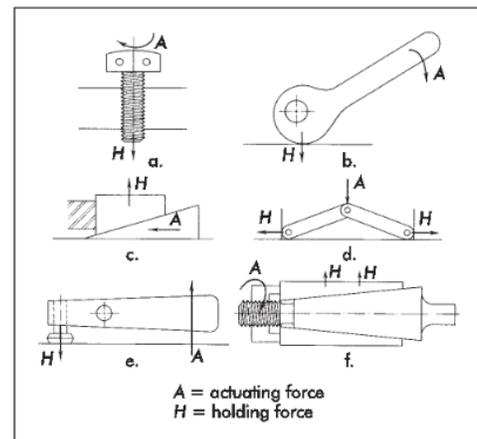


Figura 4 Método mecánico de transmisión y multiplicación de fuerza. (a) tornillo (b) leva (c) cuña (d) enlace de conmutación (e) palanca (f) combinación de tornillo y cuña.

Las fuerzas de sujeción aplicadas contra la pieza de trabajo deben actuar en contra de las fuerzas de la herramienta (o del trabajo). La presión de sujeción debe sostener, pero no dañar, deformar o imponer demasiada carga en la pieza de trabajo.

La dirección y magnitud de la fuerza de sujeción debe ser consistente con el propósito de la operación. Además, la presión de sujeción nunca debe ser tan grande que cambie cualquier dimensión de la pieza de trabajo. (Philip D Rufe, 2013)

Mecánica de materiales

La mecánica de materiales trata los efectos internos en un cuerpo sólido deformable o una estructura debido a cargas externas (fuerzas, momentos, y torques) que actúan sobre este. Los efectos internos particularmente de ayuda son los esfuerzos y las deformaciones en varios lugares críticos en el cuerpo. Esfuerzo es la “intensidad” de una fuerza local que actúa en un área (un plano o una sección) en cierto lugar. Deformación unitaria es la deformación normalizada (cambio de longitud o cambio de ángulo en una esquina en un elemento de geometría unitario) en un lugar. El esfuerzo es una consideración crucial cuando se diseña un sistema mecánico como lo es una estructura o maquinaria, porque las deformaciones permanentes de un componente ocurren cuando su esfuerzo excede algún valor límite (esfuerzo de cedencia) y la falla (fractura) ocurre cuando su esfuerzo excede otro valor límite (esfuerzo de ruptura).

Los esfuerzos que un objeto puede soportar determinarán la resistencia del objeto. En particular, la resistencia de ruptura (esfuerzo de ruptura) es el esfuerzo al cual el material falla (fracturas o rupturas); la resistencia a la cedencia (esfuerzo de cedencia) es el esfuerzo al cual el material sufre deformación permanente (de la cual no se puede recuperar completamente), y esfuerzo permisible es el nivel de esfuerzo para el cual un objeto o un componente es diseñado de forma que bajo condiciones de normal (buena) operación, este nivel de esfuerzo no será excedido (Nota: Un *factor de seguridad es aplicado* incluso al esfuerzo último o al esfuerzo de cedencia con el fin de llegar a los valores de esfuerzo permisibles.)

En particular, las metodologías asociadas pueden ser usadas para diseñar estructuras, maquinaria, y otros objetos mecánicos para un “buen” desempeño, y además para predecir fallas y para determinar las condiciones de falla y la naturaleza de la falla de estos objetos.

La mecánica de materiales es de ayuda en una gran variedad de áreas de la ingeniería. En la ingeniería de manufactura, fallas en componentes de maquinaria, desgaste de herramienta, y fractura pueden conducir a la reducción de la productividad y reducción de la calidad del producto, incrementando los costos de operación y mantenimiento. El apropiado diseño de herramientas de maquinaria y componentes es esencial para mitigar estos problemas. (De Silva, 2014)

Características mecánicas de los materiales

A continuación se presentan las características mecánicas más importantes de los principales materiales a ser utilizados en la elaboración de este proyecto.

Acero A36, ASTM

Densidad	.2834	lb/in ³
Coefficiente de Poisson	.26	
Módulo de corte	11,498.5004	ksi
Módulo de elasticidad	29,000	ksi
Resistencia a Ruptura	58-79.75	ksi
Resistencia a Cedencia	36.25	ksi

(Marrs, 2012)

Comúnmente llamado “acero suave” es un acero estructural de acabado en caliente muy común con buena soldabilidad. ((AWS), 2010)

Delrin® Acetal (POM) Plastic

Densidad	.051	lb/in ³
Coefficiente de Poisson	.35	
Resistencia a Cedencia	9	ksi

El Delrin es un termoplástico utilizado en aplicaciones de ingeniería gracias a su resistencia a grandes cargas mecánicas, así también combina baja fricción y alta resistencia al desgaste, con la rigidez y fuerza suficiente necesaria para partes

diseñadas para reemplazar metal. Además de proveer una excelente estabilidad dimensional. (Company, 2018)

Análisis de elemento finito (FEA)

Análisis de elemento finito, comúnmente referido como FEA, es una herramienta de análisis de diseño. El análisis de diseño es un proceso de investigación de ciertas propiedades de las partes, ensambles, o estructuras. El análisis de diseño puede ser conducido en objetos reales o sobre modelos que representan cierto aspecto de un objeto real. Si son usados modelos en vez de objetos reales, el análisis puede ser conducido antes en el proceso de diseño, antes del producto final o incluso de los prototipos que son construidos.

El desarrollo del método de análisis de elemento finito y las computadoras ha evolucionado en el campo de diseño de componentes y análisis. La razón es porque el método de elemento finito permite análisis directo de complejas geometrías con relativamente poco esfuerzo, problemas que incluso no han sido solucionados usando técnicas de análisis de forma cerrada. Las herramientas de elemento finito han alcanzado alto nivel de madurez y son ampliamente utilizadas en campos académicos e industriales. El fácil acceso a los códigos de elemento finito ha creado posibilidades de resolver problemas avanzados, y en cierta medida reducir las costosas pruebas experimentales.

Para realizar una simulación de elemento finito, o cualquier cálculo de análisis de esfuerzo, hay tres diferentes tipos de entradas que se necesitan especificar. Notar que estas entradas son además necesarias en el método de solución de forma cerrada.

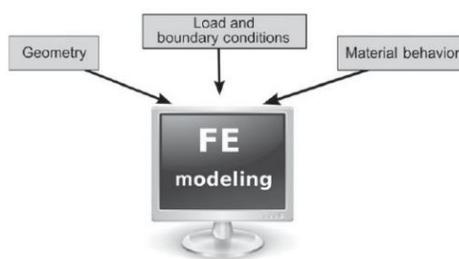


Figura 5 Entradas necesarias para análisis de elemento finito

El objetivo final de usar FEA como diseñador de herramienta es para cambiar el proceso de diseño de iteraciones de ciclos de “diseño, prototipo, prueba” a un proceso simplificado donde los prototipos son usados solamente para verificación del diseño final. (Kurowski, 2004)

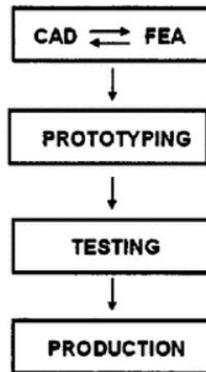


Figura 6 Proceso de Diseño impulsado por FEA

Pre-Proceso para FEA

En FEA el pre-procesamiento involucra todos los pasos que son requeridos para convertir un problema físico en un problema de Elemento Finito equivalente. Esto involucra los siguientes pasos:

1. Aplicar la propiedad de material estructural a la parte.
2. Mallas la parte utilizando elementos y nodos.
3. Aplicar las propiedades físicas a la malla.
4. Aplicar restricciones a la malla.
5. Aplicar cargas a la malla.
6. Revisar el modelo para validar que todos los pasos previos estén hechos.

(Altair University, 2012)

Mayado para Análisis de Elemento Finito

La precisión de un modelo de elemento finito depende del tipo de elementos finitos que se usen pero también de la calidad de la malla de elemento finito. En general, a más alto número de elementos en la misma malla, es mejor la precisión de la solución pero con el costo potencial de un tiempo de ejecución computacional más largo. Por lo tanto, generalmente se sigue un compromiso entre precisión y la viabilidad del análisis numérico.

Un buen parámetro para revisar la calidad de una malla de elemento finito es analizando la distribución de los esfuerzos en la frontera entre dos elementos adyacentes. En una malla de buena calidad, las diferencias entre valores deben ser mínimas. Áreas donde la diferencia no es satisfactoria deben ser refinadas o la malla debe ser cambiada para tener la misma dirección que los gradientes de esfuerzo. (Beale, 2017)

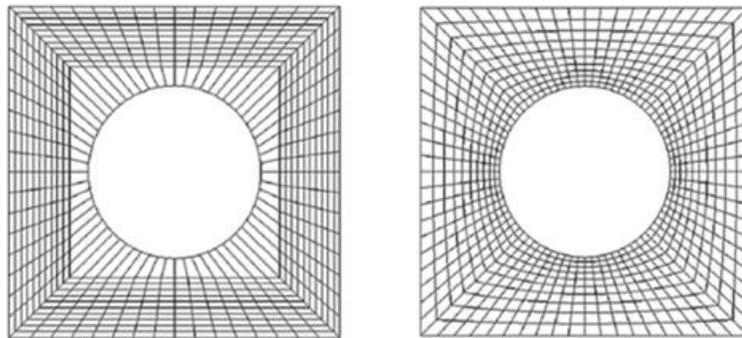


Figura 7 Ejemplo de una pobre (izq.) y una buena (der.) malla de elemento finito

Ergonomía

No hay aspecto más fundamental de la ergonomía ocupacional que el diseño estaciones de trabajo locales donde los trabajadores dedican considerable cantidad de tiempo y esfuerzo realizando su trabajo. La ergonomía y las leyes del trabajo, por ciencia y costumbre, se han enfocado primeramente en los aspectos físicos del trabajo como requisitos de fuerza y energía.

Ingeniería para humanos examina la interfaz total entre los trabajadores y su trabajo.

Los dos principales trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo son el síndrome del túnel carpiano y la lesión de la espalda. En comparación con otras lesiones, el síndrome del túnel carpiano resulta, en promedio, en más días fuera del trabajo (alrededor de 25 días). Los problemas relacionados con el trabajo de la espalda ocurren principalmente debido a la manipulación manual del material.

Para comprender correctamente la importancia del diseño de la estación de trabajo, un sistema debe estar definido no solo por su hardware, sino también por el operador y la interfaz entre los dos.

(Black, 2003)

Análisis BRIEF y BEST

La técnica de puntaje de exposición Brief™ o evaluación Best, se basa en la encuesta BRIEF™ para determinar un puntaje de riesgo del trabajo. Este se ajusta para diferentes tiempos de exposición a riesgo ergonómico, y toma en cuenta cualquier estrés físico presente mientras se realiza el trabajo. Tareas de levantar/bajar, tareas de empujar/jalar, tareas de cargar, Dimensiones críticas de la estación de trabajo, causas directas, y mejoras sugeridas son señaladas.

El BEST genera un puntaje de 0 a 125, con el puntaje más alto representando un nivel de prioridad más alto. Un puntaje de riesgo es generado en base: Puntaje de encuesta BRIEF, factores estresantes físicos (vibración, bajas temperaturas, compresión de los tejidos blandos, estrés por impacto y problemas con los guantes) y tiempos de exposición de la tarea. Los puntajes BEST son clasificados como de prioridad Baja, Media, Alta y Muy Alta para mejora ergonómica o invención ergonómica. (Atlantic Environmental Incorporated)

BRIEF™ Survey – BASELINE RISK IDENTIFICATION OF ERGONOMIC FACTORS Version 3.0

Step 1
Complete Job Information

Job Name: Rotado de Pieza Site: 787 TR Station: C0re Cowl
Date: 11/10/17 Dept: ENG MFG Shift: 1 Product: C0re cowl

Step 2
Identify Risks

2a. Mark Posture and Force boxes when risk factors are observed.
2b. For body parts with Posture or Force marked, mark Duration and/or Frequency boxes (es) when limits are exceeded.

	Hands and Wrists		Elbows		Shoulders		Neck	Back		Legs
	Left	Right	Left	Right	Left	Right		Twisted	Unsupported	Unsupported
2a. Posture	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>								
Force	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2b. Duration	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frequency	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Score	3	3	2	2	2	2	4	3	3	0
Risk Rating	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L	H M L

Step 3
Determine Risk Rating

In the Score box, write the number of risk factor categories (0-4) checked for each body part. Using the table at right, circle the corresponding Risk Rating for each body part.

Score	Risk Rating
3 or 4	High (H)
2	Medium (M)
0 or 1	Low (L)

Step 4
Identify Physical Stressors

Mark physical stressors observed:

- Vibration (V)
- Low Temperatures (L)
- Soft Tissue Compression (S)
- Impact Stress (I)
- Glove Issues (G)

Use the corresponding letters to show location of stressors.



© 2002 by Hamastech, Inc. www.hamastech.com • Tel. 734.663.6707 Fax 734.663.7747

Figura 8 Formato de Encuesta BRIEF

BEST™ – BRIEF™ EXPOSURE SCORING TECHNIQUE Version 1.0

Step 1
Complete Job Information
 Job Name: Rotado de pieza Site: 787 tr Station: core cowl
 Date: 11/10/17 Dept: ENG MFG Shift: 1 Product: Core Cowl

Step 2
Transfer BRIEF Scores
 Transfer scores (0-4) from a completed BRIEF Survey.

Hands and Wrists		Elbows		Shoulders		Neck	Back	Legs
Left	Right	Left	Right	Left	Right			
3	3	2	2	2	2	3	3	0

Step 3
Determine Conversion Factors

5	5	3	3	3	3	5	5	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Step 4
Add Conversion Factors
 32

Step 5
Summarize Physical Stressors
 Place a 2 in the box for each physical stressor marked on the BRIEF, and a 0 for each physical stressor not marked.

Vibration	Low Temperatures	Soft Tissue Compression	Impact Stress	Glove Issues
0	0	2	0	0

Step 6
Add Physical Stressor Scores
 2

Step 7
Calculate Job Risk Factor Score
 (Conversion Factors + Physical Stressor Scores)
 34

Step 8
Determine Time Exposure Multiplier
 Use the table at left to determine the appropriate multiplier.

Time on Task Per Week	Multiplier
> 40 hours	1.25
20 - 40 hours	1.0
4 - 19 hours	0.8
< 4 hours	0.4

0.4

Step 9
Calculate Job Hazard Score
 (Job Risk Factor Score x Time Exposure Multiplier)
 13.60

Find each BRIEF Score in the table at right and determine the conversion factor for each body part.

BRIEF Score	Conv. Factor
4	10
3	5
2	3
1	1
0	0

Comments:

Job Hazard Score Priority

Job Hazard Score	Priority
0 - 9	Low
10 - 29	Medium
30 - 49	High
50+	Very High

© 2002 by Humantech, Inc. This uncompiled form, blank document or file contains no EAR technology or ITAR technical data. Document or file requires export classification and appropriate EAR or ITAR export control markings when any technical information is added. (Class Identifier: CL501197839)

www.humantech.com • Tel. 734.663.6707 Fax 734.663.7747

Figura 9 Formato BEST

Capítulo 3: Bosquejo Metodológico

Declaración y análisis del problema

La falta de una herramienta adecuada para las operaciones de ensamble requeridas para el Core Cowl, lleva al operador a realizar tareas que ponen en riesgo tanto su ergonomía como la calidad del producto e incluso a invertir más tiempo en llevar estas a cabo. Al tener una herramienta diseñada específicamente para la pieza y las operaciones que en esta se deben realizar, las oportunidades pueden ser mitigadas. Mejorando; la seguridad para el operador, la facilidad con la que las operaciones de ensamble se realizan y los tiempos requeridos para estas.

Análisis de los requerimientos

Una herramienta adecuada para la operación en la estación de Core Cowl debe permitir al operador trabajar cerca de la pieza, siendo esta tan pequeña como sea posible y que no interfiera con las herramientas requeridas por el proceso de barrenado e instalación de sujetadores, además de permitir cargar y descargar la pieza fácilmente. La herramienta deberá sujetar firmemente la pieza sin modificar las características geométricas de esta, además este método de sujeción deberá ser lo suficientemente seguro para que no se auto-libere debido a vibraciones o algún contacto involuntario con este. Así también deberá de preservar la calidad del producto, es decir no generar problemas de calidad debido al contacto de la pieza con la herramienta. Siendo los materiales requeridos para la fabricación de esta herramienta, fáciles de conseguir y de trabajar, buscando que el costo sea tan bajo como sea posible.

Desarrollo de ideas iniciales

- Estructura de sujeción que utilice un reductor de velocidad como mecanismo de rotación.
- Estructura que permita inclinar la pieza para tener acceso a las zonas bajas de esta.
- Estructura que eleve la pieza sobre esta para permitir el trabajar las zonas bajas de esta. Y se pueda adaptar al elevador ya existente.
- Estructura tipo brazo que permita sujetar la pieza de zonas que no requieran trabajo por parte del operador, con capacidad de ajuste en altura mediante actuadores.

Desarrollo de posibles alternativas de diseño

-Estructura de sujeción que asegure la pieza de sus partes más fuertes (*Load Share Frame* y *Pivot Fitting*, se señalan en la siguiente imagen) en los extremos de esta, con adaptación de un sistema de reducción de velocidad con el fin de poder rotar la pieza sobre el eje horizontal.

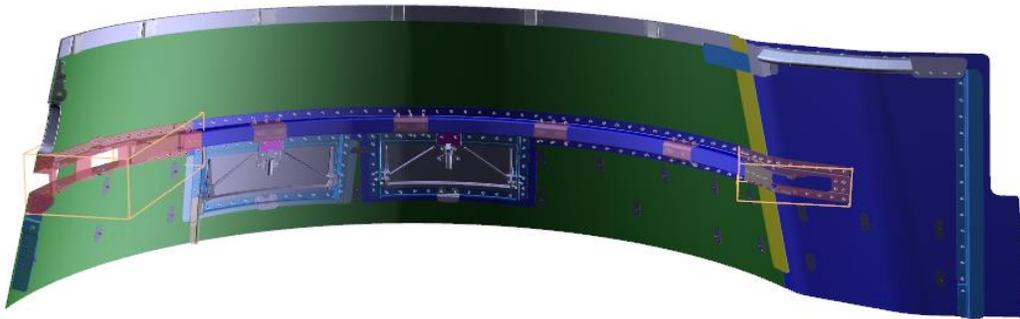


Figura 10 Alternativa de Diseño 1

-Estructura de sujeción que asegure la pieza de su extremo FWD así como esta se instala en el siguiente ensamble, lo cual le daría a la pieza rigidez. Los elementos de sujeción se elevarían aproximadamente 12" sobre el nivel de la estructura permitiendo que el operador pueda utilizar las herramientas de trabajo en las zonas más bajas de la pieza, eliminando así la necesidad de rotar esta.

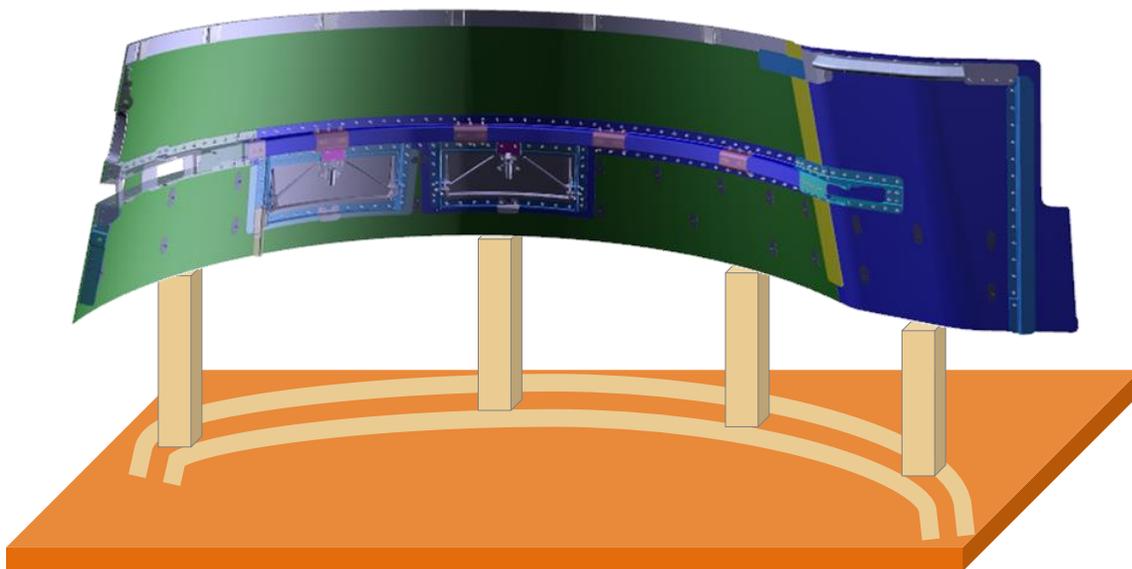


Figura 11 Alternativa de Diseño 2

Finalización de ideas de diseño

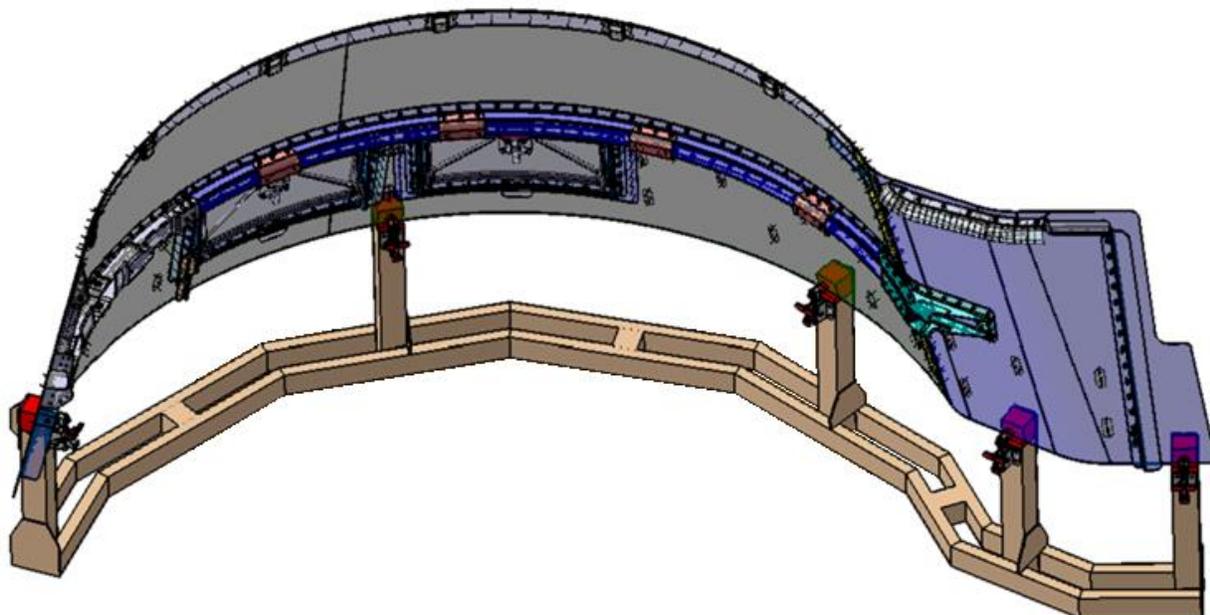


Figura 12 Diseño Final (Visto desde lado inboard)

Utilizando el Software CATIA V5 haciendo uso del módulo *Mechanical Design* en modo *Assembly Design* y con prácticas de diseño *Top-Down*, se diseñó esta estructura a base de tubular acero A36 1/8" de espesor y placas de refuerzo en acero A36 de 1/8" y 3/16" de espesor. Secciones metálicas unidas por soldadura. Soportes de sujeción en material Delrin con superficie maquinada para coincidir con la superficie externa de la pieza.

Cuenta con 5 prensas de sujeción de 350lbs de capacidad con candado de seguridad, fáciles y rápidas de operar. Los elementos de sujeción se elevan 12" sobre el nivel de la estructura base para permitir al operador trabajar en las zonas bajas de la pieza (lado FWD). La forma de la estructura sigue la geometría de la pieza, por lo que el operador trabaja más cerca de la pieza, mejorando las posiciones que este adopta durante las operaciones de ensamble.

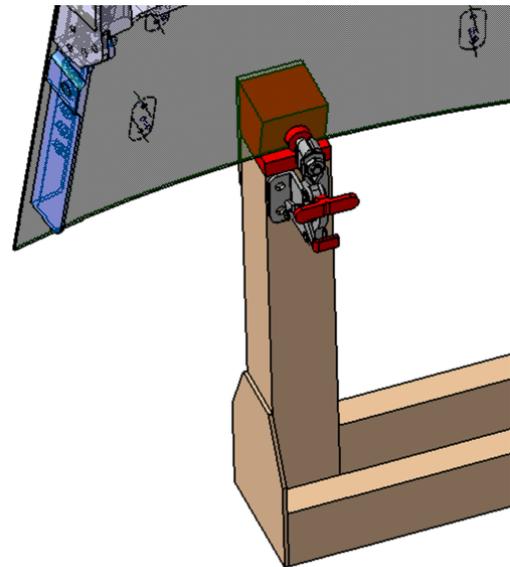


Figura 13 Vista de soportes y prensas

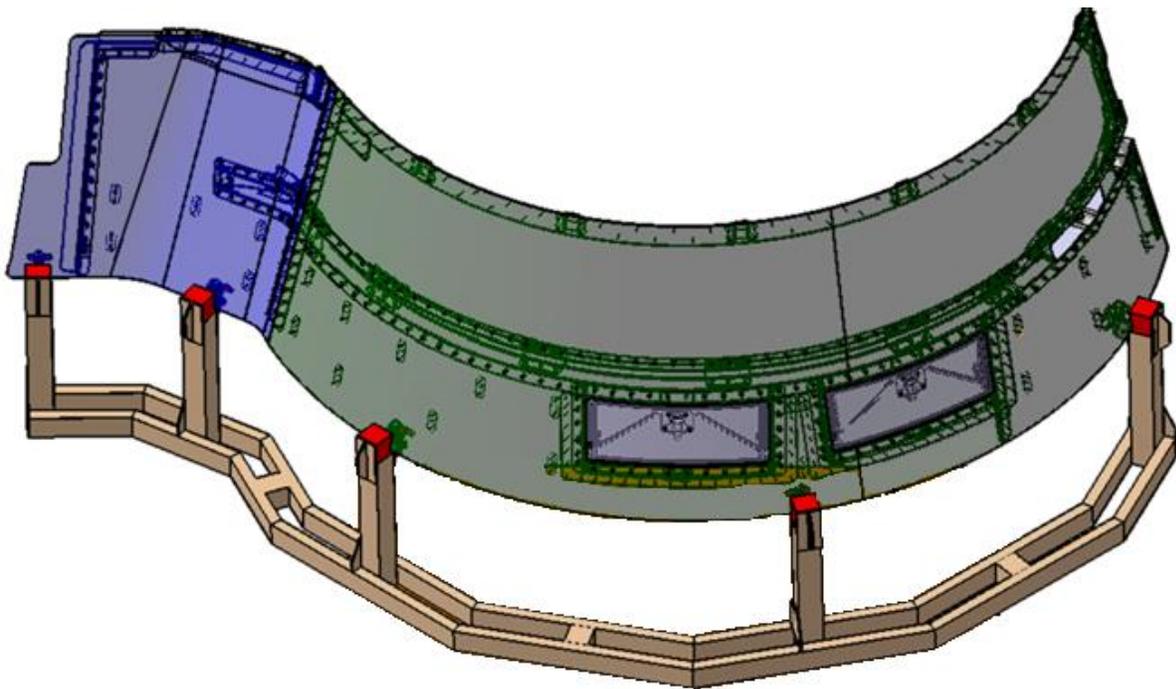


Figura 14 Vista desde el lado outboard

En rojo se muestran los 5 bloques de Delrin maquinados al contorno de la pieza, así como los refuerzos de Placa Acero A36 3/16" de espesor.

Capítulo 4: Resultados

En los capítulos anteriores se exponen desde la problemática hasta la metodología utilizada para dar respuesta a las necesidades detectadas, a continuación se muestran los resultados del proyecto en cada uno de los aspectos que este impacta, los cuales fueron definidos al principio de este, haciendo énfasis en las mejoras obtenidas.

Diseño Final

Dando respuesta a las necesidades detectadas y cumpliendo con requerimientos ya establecidos en diferentes áreas, se concluyó con el diseño de una estructura en Acero A36, con tubular de 1/8" de espesor y placas de refuerzo de 1/8" y 3/16" de espesor, cuyos elementos de unión utilizados son soldadura y tornillería.

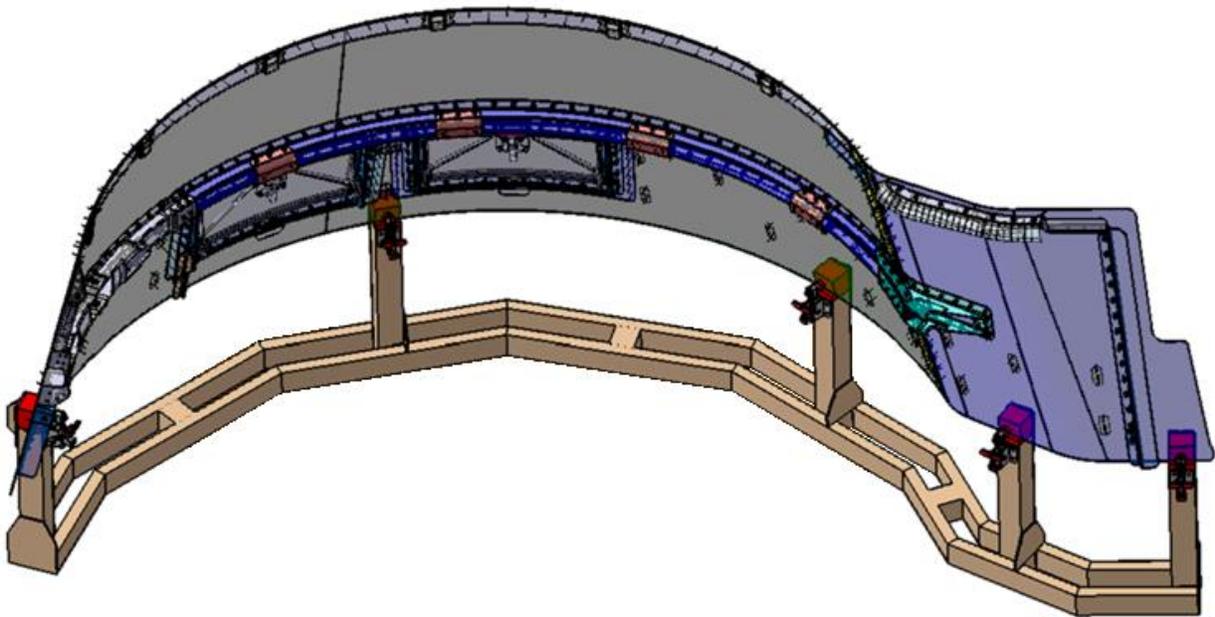


Figura 15F Vista desde el lado interno (inboard)

Utilizando (5) bloques de material Delrin como mecanismo de apoyo así como prensas con candado de seguridad para la sujeción de la pieza a la estructura con capacidad de 350 lb cada una. La cual se eleva 12" sobre el nivel de una plataforma elevadora para dar espacio a la utilización de herramientas de poder por debajo del lado delantero (FWD) de la pieza.

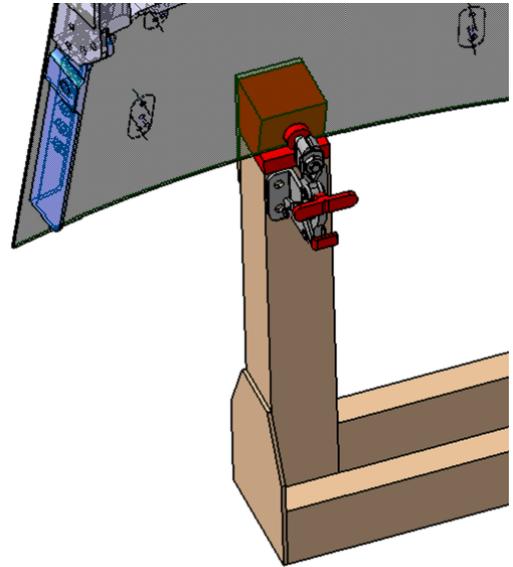


Figura 16 Vista de soportes y prensas

La estructura sigue la geometría de la pieza, de manera que el operador trabaja más cerca de la pieza, mejorando las posiciones que este adopta durante las operaciones de ensamble.

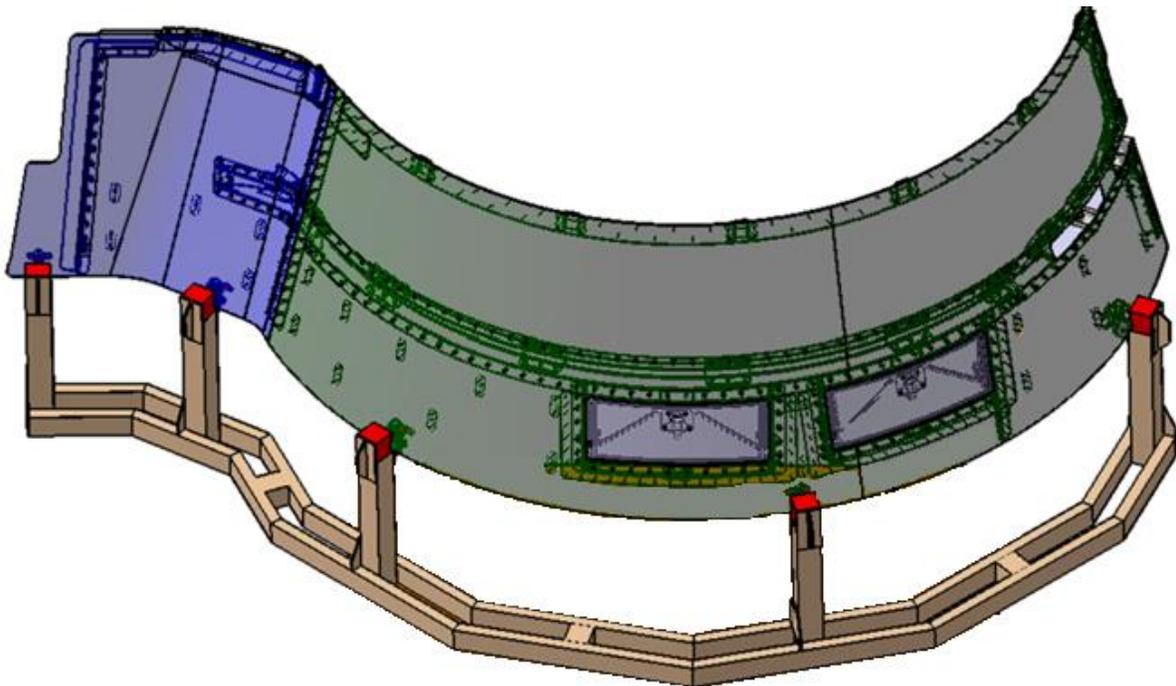


Figura 17 Vista desde el lado externo (outboard)

Análisis Estructural

Se utilizó el Software CATIA V5 haciendo uso del módulo *Analysis & Simulation* en modo *Generative Strutral Analysis* para llevar a cabo el análisis de la estructura. Siguiendo la metodología para Análisis de Elemento Finito computarizado, se le aplicó el material Acero A36 con sus respectivas propiedades a la estructura, se generó el mallado de la pieza, seleccionando elementos lineales de forma OCTREE Tetraedro, se indicaron las restricciones para simular la forma en que la estructura estará sujeta a la plataforma elevadora, se definieron las cargas que en este caso fueron 1) Carga de Abuso de 150 libras la cual se distribuyó entre dos de las torres simulando el peor escenario y 2) Carga debido al peso de la pieza a trabajar 58.2 libras mismas que se distribuyeron entre las 5 torres.

Ejecutando la primera corrida se obtiene la idea aproximada de los resultados usando un modelado de Elemento Finito simple que requiere un cálculo mínimo (bajo tiempo computacional) y posteriormente aplicando un refinamiento de malla, el cual se basa en disminuir gradualmente el tamaño de la malla y disminuir el máximo espacio entre la malla y la geometría (*sag*) para así lograr una mejor precisión (menor error) en los resultados, se logra obtener un error de 16% cuyos resultados se exponen con ayuda de las siguientes figuras.

En la Figura se observa como el mallado no es uniforme, esto debido a como cada elemento de malla resulto modificado en busca de la mejor solución. Obteniendo con esto un total de 461509 nodos y 1860240 elementos.

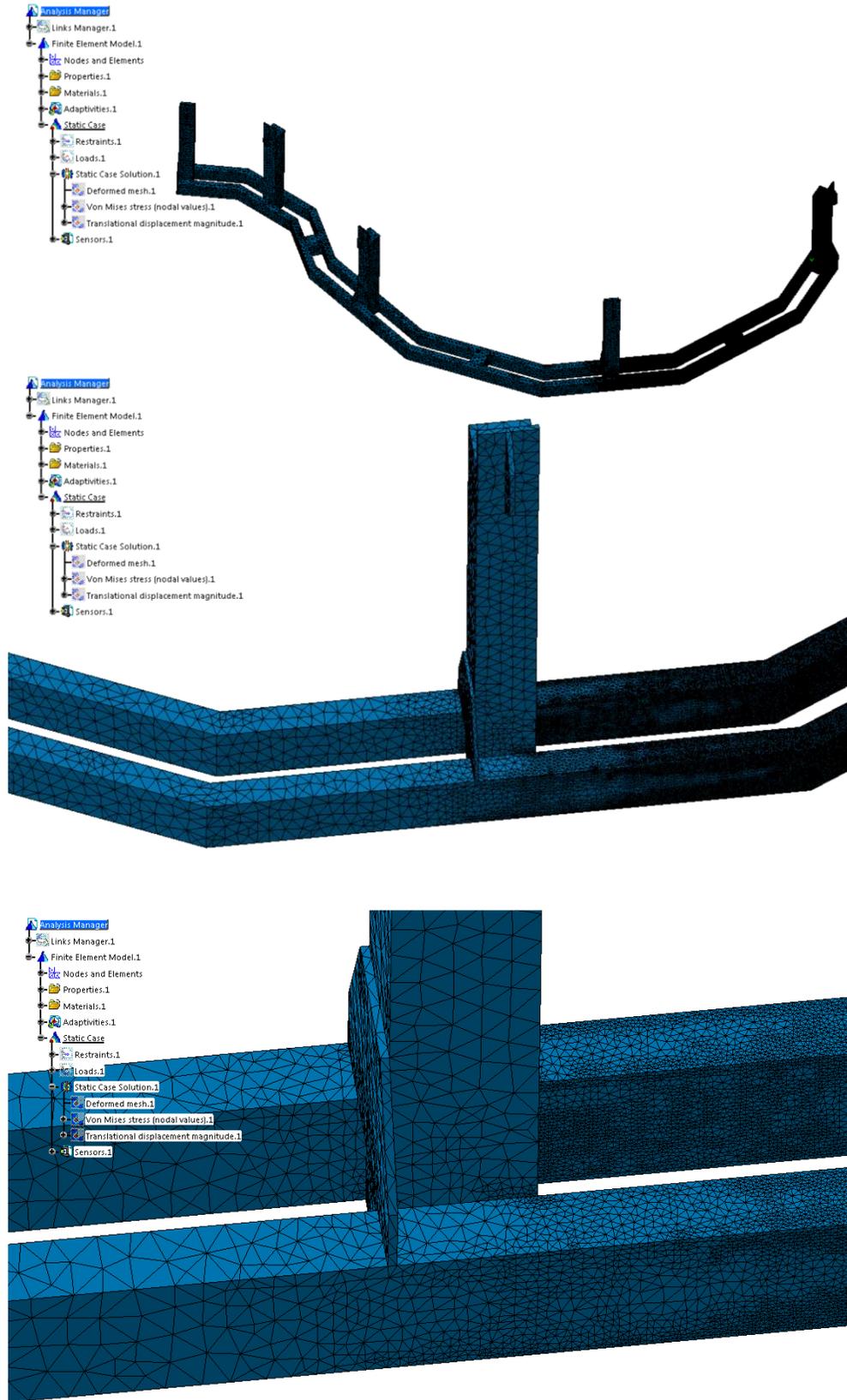


Figura 18 Mallado del modelo

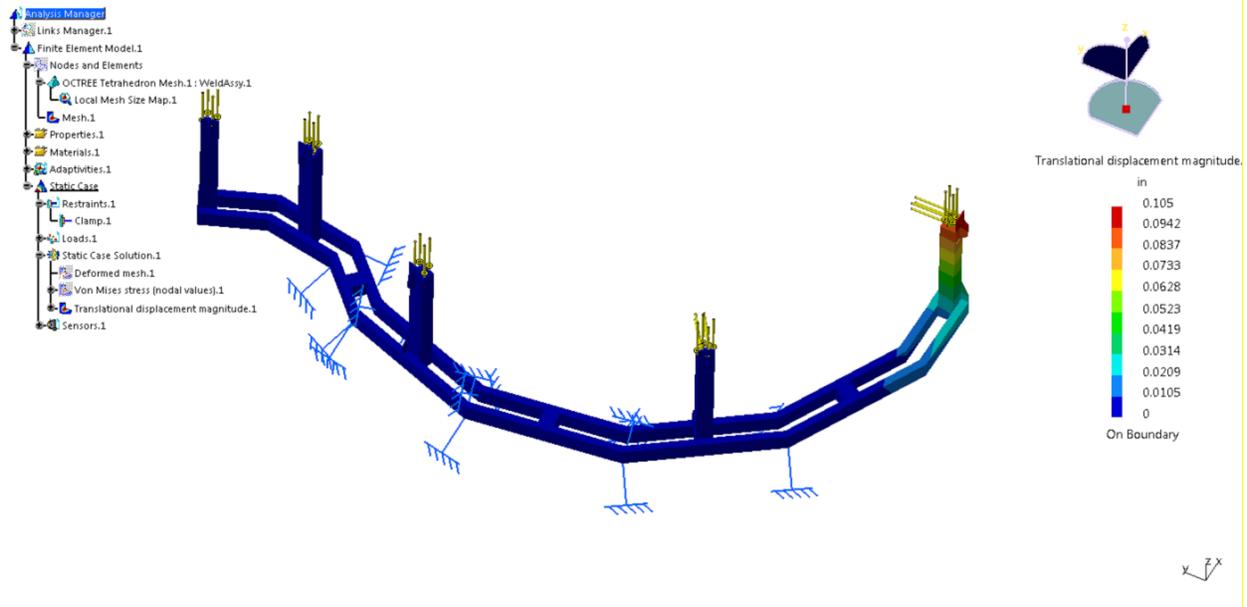


Figura 19 Desplazamientos

Respecto a los desplazamientos bajo las condiciones simuladas, el análisis indica que el máximo sería $.105''$, lo cual se interpreta como un buen resultado, debido a que aun siendo un valor pequeño éste disminuiría aún más debido a la rigidez adicional que la parte aporta una vez montada a la estructura.

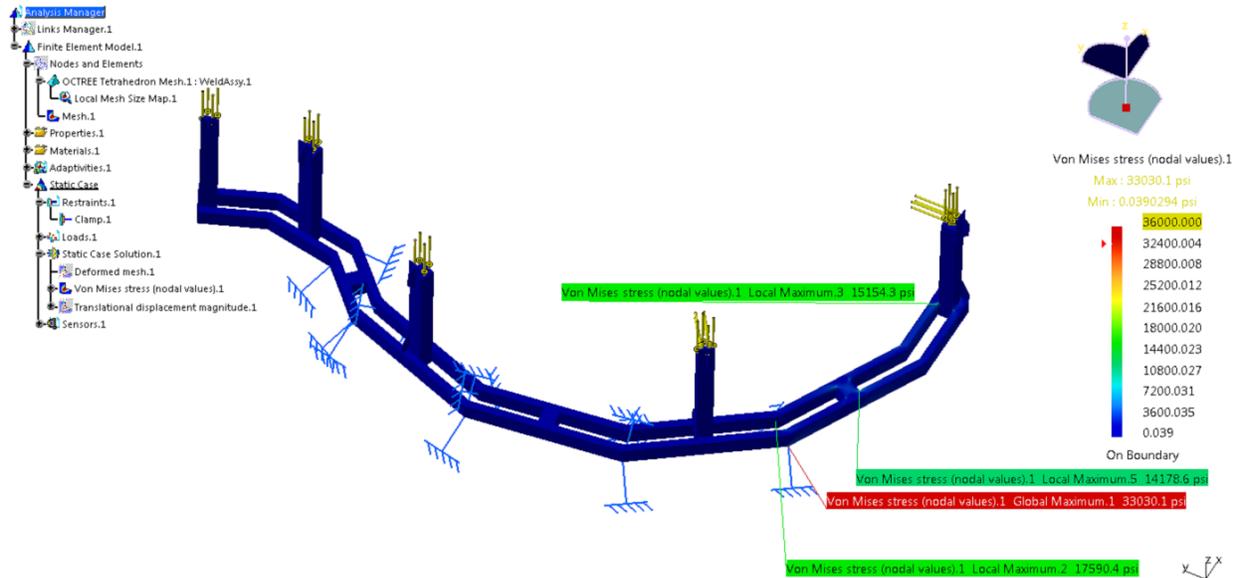


Figura 20 Esfuerzos

El análisis de Von Mises señala un punto con un esfuerzo de 33030.1 psi el cual es el más alto identificado en la pieza, aun cuando este valor está cerca del límite elástico del material en este caso 36000 psi, tomando en cuenta la zona donde este dato se presenta, lo cual se debe a la geometría de la pieza y la forma en que esta se encuentra anclada, se puede concluir que el diseño de la estructura es aceptable, ya que la simulación fue hecha con carga de abuso (el peor caso que esta pudiera experimentar) y además . Al igual que los siguientes puntos de valor menor que se localizan de manera similar en las uniones de los segmentos de la estructura.

Fabricación de Prototipo

Se llevó a cabo la fabricación de una estructura prototipo para verificar que las características de esta atacaran las distintas necesidades detectadas, así como que esta permitiera llevar a cabo las operaciones de ensamble necesarias. Verificando también que se contara con las máquinas y herramientas necesarias en el taller para poder dar lugar a la fabricación de esta. Así como detectando las habilidades de los empleados del taller que serían necesarias para cada una de las fases de la fabricación (medición, corte, soldadura, ensamble, ajuste, pintura, instalación).



Figura 21 Prototipo de Estructura de Sujeción para Core Cowl

Pruebas

Una vez listo el prototipo, se procedió a montar la pieza para la cual esta estructura fue diseñada, con esto se validó que la estructura tuviera las características adecuadas para sostener la parte de manera firme pero sin modificar la geometría de la parte. Así como validar que fuera sencillo el montar y desmontar la pieza de esta.



Figura 22 Estructura de Sujeción para Core Cowl con Pieza montada.

Ya montada la pieza, se validó que las operaciones de ensamble pudieran ser llevadas a cabo por el mecánico, es decir que las características de la herramienta le permitieran realizar todas las operaciones asignadas sin que esta afectara el proceso.

Mejoras en Ergonomía

Una vez terminada la fabricación de la estructura y antes de liberarla para producción estándar, se volvió a llevar a cabo la Identificación de Riesgos en Factores Ergonómicos (*BRIEF Survey*), con la cual se pudo evidenciar la eliminación de posturas y fuerzas aplicadas perjudiciales durante las operaciones de ensamble. Posteriormente se repitió la Técnica de Puntuación de Exposición en base a la BRIEF (BEST) la cual arrojó mejoras significativas en varios procesos evaluados (remachado, ensamble, instalación de sujetadores), la más importante siendo obtenida al eliminar la necesidad de rotar la pieza, lo cual significa eliminar un trabajo cuyo puntaje de riesgo era 13.60 (prioridad media).

Mejoras en Tiempo

Durante la semana del 29 de enero al 2 de febrero se realizó una validación del respectivo documento SWCS (Standard Work Combo Sheet), el cual indica la serie de pasos necesarios para llevar a cabo las operaciones de ensamble así como sus respectivos tiempos. Dicha actividad arrojó una mejora de 15% en tiempo de ciclo debido a la implementación de esta nueva herramienta en comparación al tiempo requerido con las condiciones pasadas. Esto representa un ahorro de 4 horas hombre a la semana. Tiempo que puede ser destinado a otras tareas. Permitiendo también una ligera reducción en los tiempos de ciclo de los otros mecánicos que antes de la implementación de esta herramienta debían desatender sus actividades para venir a apoyar con la rotación de la pieza.

Capítulo 5: Discusión, Conclusiones y Recomendaciones

Discusión

El desarrollo de este proyecto nos permitió tomar decisiones para la correcta implementación de la herramienta en el área de trabajo:

-Los materiales seleccionados fueron adecuados para el trabajo que estos desempeñarían, siendo estos fáciles de obtener y de trabajar.

-La geometría de la herramienta es apropiada según el espacio disponible y el acercamiento que esta permite tener del operador a la pieza.

- Los *clamps* con los que se sujeta la pieza a la herramienta cumplieron con su intención durante las pruebas, asegurando firmemente la pieza.

-Este nuevo diseño permite realizar las operaciones de ensamble en la pieza sin necesidad de rotarla, cabe mencionar que una operación tuvo que ser cambiada de secuencia para que esta pudiera completarse correctamente en la estación de trabajo anterior.

- En las primeras pruebas al cargar la pieza nos percatamos que al momento de montar ésta, la herramienta no la guiaba a una posición en específico de manera radial, la pieza podía tomar posiciones en las cuales la sujeción no resultaba óptima, por lo cual fue necesario añadir un nuevo componente que restringiera la pieza a solo tomar una posición identificando este como una mejora *Poka-Yoke*.

Conclusiones

- Es posible diseñar herramientas que además de estar enfocadas en asistir las operaciones de ensamble del producto, también toquen el tema de la ergonomía del operador, cuidando de este así como de las partes a trabajar tanto como sea posible sin entorpecer la operación. Es decir que la implementación de estas nuevas herramientas no incrementa el tiempo de ciclo del producto, dando como resultado que los cambios implementados vengán a beneficiar a la empresa en todos los sentidos y aliente a seguir llevando a cabo este tipo de proyectos.

- Durante la etapa de diseño, además de buscar satisfacer las necesidades detectadas no se debe perder de vista que los elementos modelados deberán poderse fabricar a partir de máquinas y herramientas simples, es decir no se busca generar partes complejas, sino a partir de piezas simples, fáciles de fabricar y ensamblar poder dar solución a la problemática evitando con esto elevar la complejidad del proyecto.
- Al momento de seleccionar los materiales para fabricación de una herramienta, es importante tomar en cuenta el tipo de trabajo que se realizará en esta y el tipo de material que se trabajará. Ya que estas serán las principales características que nos ayudaran a elegir el material ideal, tomando en cuenta la resistencia que este debe tener para el caso de la estructura pero también las condiciones que esto representa para los elementos de sujeción a elegir los cuales no deben dañar la pieza a trabajar pero deben ser lo suficientemente resistentes para que tengan una larga vida útil.

Recomendaciones

- Incluir en el proceso de Introducción de Nuevos Productos el diseño de la estación de trabajo, más allá de solo las herramientas de precisión que se necesitaran, para tomar en cuenta donde y como se realizaran el resto de las operaciones que el producto requiera.
- Además de realizar observaciones de tiempo y análisis de costos de producción, también llevar a cabo el análisis ergonómico necesario para identificar oportunidades en las condiciones en las que el operador labora y así poder definir acciones preventivas durante las primeras corridas del producto o incluso desde la etapa de diseño del área y con esto poder evitar acciones correctivas a situaciones no deseadas como problemas de salud.
- Al momento de seleccionar los materiales para la fabricación, seleccionar aquellos que requieran menos mano de obra o procesos para poderlos utilizar, las dimensiones de los materiales lo más apegadas a las dimensiones finales de los componentes, el acabado de material que no requiera algún tipo de preparación más allá de una limpieza simple, evitar materiales que de no utilizarse rápidamente den inicio a corrosión o deterioro.

- Realizar el análisis estructural de forma simplificada, analizando solo aquellos componentes críticos o de difícil mantenimiento/reemplazo, haciendo con esto que el análisis resulte solo tan complejo como el caso de estudio lo requiera. Tomando en cuenta obtener factores de seguridad mayores al mínimo permitido ya que durante la fabricación algunas dimensiones o características serán difíciles de replicar al nivel que fueron analizadas.

Anexo A, Recursos Requeridos

Material para estructura:

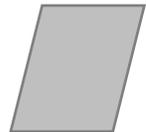
76", Tubular 2x2x1/8, Acero A36



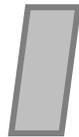
240", Tubular 2x1x1/8, Acero A36



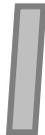
19", Placa 4x1/8, Acero A36



20", Placa 2x3/16, Acero A36



20", Placa 1x3/16, Acero A36



Material para soportes:

(1) Hoja 6x6x2, Delrin® Acetal Resin



(5) Horizontal Hold-Down Toggle Locking Clamp, DESTACO 307-UR



Ferretería:

(20) Tornillos de cabeza redondeada 1/4"-20 x 2-3/4" longitud, Acero inoxidable 18-8



(20) Tuercas de casquillo 1/4"-20, Acero Alta Resistencia



(20) Rondanas de seguridad .260" ID, Acero inoxidable 18-8



(20) Rondanas planas .281" ID, Acero inoxidable 18-8

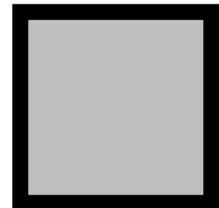


Otros:

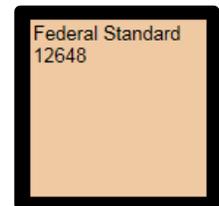
Soldadura, 1/8 Electrodo E6013



Pintura Base, Gris



Pintura, Color 12648



Referencias

- (AWS), A. W. (2010). *Recommended Practices for Laser Beam Welding, Cutting, and Allied Processes (2nd Edition)* - AWS C7.2M:2010. American Welding Society (AWS).
- Altair University. (2012). Recuperado el 18 de Febrero de 2018, de https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2012/03/Student_Guide_23-27.pdf
- Atlantic Environmental Incorporated. (s.f.). *Ergonomics Assessment Survey and Report*. Recuperado el Febrero de 2018, de <https://www.atlenv.com/ergonomics-assessment-survey-and-report/>
- Beale, R. A. (2017). *Design Solutions and Innovations in Temporary Structures*. IGI Global.
- Bergström, J. (2015). *Mechanics of Solid Polymers*. Elsevier.
- Black, J. H. (2003). *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*. Society of Manufacturing Engineers (SME).
- Company, E. I. (2018). *DuPont*. Obtenido de Delrin Acetal Resin: <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/brands/delrin-acetal-resin.html>
- De Silva, C. W. (2014). *Mechanics of Materials*. Taylor & Francis.
- Kurowski, P. M. (2004). *Finite Element Analysis for Design Engineers*. SAE International.
- Marrs, J. (2012). *Machine Designers Reference*. Industrial Press.
- Nee, J. (2010). *Fundamentals of Tool Design (6th Edition)*. Society of Manufacturing Engineers (SME).
- Philip D Rufe, C. (2013). *Fundamentals of Manufacturing (3rd Edition)*. SME.
- Systems, D. (2013). CATIA Documentation.