

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis / Proyecto de Ingeniería e Innovación

Proyecto de Aplicación

Rediseño para el *plenum* del Gulfstream V

**Análisis por Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales
para el nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V.**

para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería e Innovación

LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura

Área de énfasis: Diseño Aeroespacial

Presenta

Benjamín Hernández Cota

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Juan Ignacio Rodríguez del Prado

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis / Proyecto de Ingeniería e Innovación

Proyecto de Aplicación

Rediseño para el *plenum* del Gulfstream V

**Análisis por Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales
para el nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V.**

para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería e Innovación

LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura

Área de énfasis: Diseño Aeroespacial

Presenta

Benjamín Hernández Cota

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Juan Ignacio Rodríguez del Prado

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis / Proyecto de Ingeniería e Innovación

Rediseño para el plenum del Gulfstream V

**Análisis por computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales
para el nuevo diseño del Plenum del Gulfstream V.**

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Benjamín Hernández Cota

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Juan Ignacio Rodríguez del Prado

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Comité evaluador:

Dr. Alan Humberto
Escamilla Rodríguez

Dr. Juan Ignacio
Rodríguez del Prado

Dr. Miguel A. Ponce
Camacho

Mexicali, Baja California. Marzo 2019

Agradecimiento y dedicatorias

Agradezco principalmente a mi familia, mi madre María del Carmen Cota de Anda, mi padre Sergio Arturo Hernández Plata y a mi hermano Fernando Arturo Hernández Cota, que, a pesar de estar lejos en otras ciudades, su apoyo siempre se sintió presente y cerca de mí. Son y siempre serán mi mayor inspiración y motivo de superación, tanto personal como profesional.

De igual manera, me gustaría agradecer a la empresa en la que laboro, Honeywell MRTC, la cual me ha apoyado y brindado la oportunidad de desarrollar mis estudios universitarios y ahora también, mis estudios a nivel maestría. Agradezco a mis jefes Miguel Panduro y Mark Fewell, por estar al pendiente y facilitar la obtención de recursos para completar todos mis proyectos. Le agradezco a Ahuizotl Arellano el haber identificado el proyecto y confiarnos la realización de este, gracias también por siempre apoyar mi interés y darme ánimos para desarrollar nuevas habilidades de análisis y simulaciones por computadora. Gracias también a mis compañeros de trabajo por su apoyo y ánimos para seguir adelante y dar lo mejor de mí.

También me gustaría agradecer a mis amigos y personas cercanas a mí, que me acompañaron en este trayecto de dos años, por compartir momentos especiales y por recordarme que hay veces que está bien relajarse y tomar tiempos libres para disfrutar de la vida.

Finalmente, quiero agradecer a CETYS y a los maestros que brindaron sus conocimientos y enseñanzas durante este posgrado. Agradezco a la Dra. Dania Licea por estar al pendiente del desarrollo de este proyecto y siempre exigir resultados de buena calidad, a mis compañeros de equipo en el desarrollo de este proyecto, Victoria Romero, Paola Martinez, Cesar Davila y Hector Lizarraga, y a mis asesores Nicolás Diaz y Sayuri Kiyota, por estar al pendiente del proyecto y siempre tener una actitud proactiva a la hora de consultarles algo.

Carta Institucional

Honeywell Ingeniería y Tecnología Aeroespacial de México
S. de R.L. de C.V.
Calzada del Oro #1755
Colonia Dos División 2
Mexicali, BC. C.P. 21399
México



Mexicali, 20 de marzo de 2019

Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Estimados miembros del Colegio de Ingeniería, Dirección de Posgrado y Campus Mexicali:

Por medio del presente, hago constar que el proyecto:

**“Análisis por Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales
para el nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V”**

El cual fue desarrollado por el colaborador:

Benjamín Hernández Cota
Matrícula: 27605

Que cursa la maestría de Ingeniería e Innovación, fue desarrollado de manera satisfactoria en Honeywell Aeroespacial ISC – Departamento de Fibra de Vidrio creando propiedad intelectual de valor aplicable.

ATENTAMENTE



Dr. Nicolás Díaz
Principal Engineer

INDICE

Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	9
1.3 Justificación General.....	12
1.4 Planteamiento del Problema.....	13
1.5 Descripción del Proyecto Global	17
1.6 Preguntas de Investigación.....	20
1.7 Justificación Especifica.....	21
1.8 Objetivo General de Investigación.....	21
1.9 Planteamiento de Hipótesis.	23
Capítulo 2. Marco Teórico.	24
2.1 Conceptos.....	24
2.1.1 Diseño y Selección de Materiales.	24
2.1.2 Propiedades Físicas de los materiales.	24
2.1.3 Propiedades Mecánicas de los materiales.....	26
2.1.4 Esfuerzo de Deformación (Yield Strength).....	27
2.1.5 Resistencia a la Tensión (Tensile Strength).	27
2.1.6 Dimensiones y Tolerancias.....	28
2.1.7 Corrosión Galvánica.	28
2.1.8 Metales Ferrosos.....	29
2.1.9 Aceros.....	29
2.1.10 Metales No Ferrosos.	29
2.1.11 El Aluminio y sus Aleaciones.	30
2.1.12 Fundamentos de la Fundición de Metales.	31
2.1.13 Fundición Centrifuga.	33
2.1.14 Fundición por Revestimiento (Investment Casting).....	33
2.1.15 Fundición en arena.....	35
2.1.16 Porosidad Gaseosa.	36
2.1.17 Cierre en fríos (Cold Shuts).....	36
2.2 Teoremas y Leyes.....	36
2.2.1 Teorema de Bernoulli.	36
2.2.2 Ley de Continuidad.....	37
2.2.3 Ecuaciones de Navier-Stoke.	38
2.3 Casos de Estudio.....	39
2.3.1 Simulación de Fundición: 100NB Flange.	39

2.3.2 Simulación de Fundición: 32 NB Swivel Flange.....	42
2.3.3 Simulación de Fundición: 32 Pistol Body	44
2.3.4 Selección de Material: “Long-Term Energy Storage”	46
2.3.5 Selección de Material: “Low Temperature PCM – Building Application”	48
Capítulo 3. Metodología.....	50
3.1 Metodología General.	50
3.2 Procedimiento.	50
3.3 Planeación:	55
3.3.1 Entregables	55
3.3.2 Cronograma	59
3.3.3 Recursos.....	60
Capítulo 4. Resultados.....	61
Bloque 1: Resultados selección de materiales.....	61
Bloque 2: Resultados determinación de proceso de fundición.....	77
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	92
5.1 Conclusiones.....	92
5.2 Recomendaciones.....	95
5.3 Líneas de Investigación Futuras.....	95
5.4 Conclusión del Proyecto Global.....	96
Referencias	99
ANEXOS.....	102

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de las diferentes divisiones dentro de Honeywell.	1
Figura 2. Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell.	3
Figura 3. Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.	4
Figura 4. Diagrama del proceso de manufactura del plenum para el Gulfstream V.	5
Figura 5. Modelo 3D actual del plenum del Gulsftream V.	6
Figura 6. Fase 7, configuraciones de capas en distintas zonas del plenum.	7
Figura 7. a) Configuración de corte de prepreg anterior. b) Configuración de corte de prepreg actual.	9
Figura 8. Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.	10
Figura 9. Izquierda. Proceso sin utilizar caul plates. Derecha. Plenum utilizando caul plates.....	10
Figura10. Configuraciones de paneles.	11
Figura 11. Rediseño de plenum de aluminio.	11
Figura 12. Defectos en Diseño actual Plenum GV.	12
Figura 13. Diagrama para la metodología del Proyecto Global.	13
Figura 14: Clasificación de los procesos de solidificación.	31
Figura 15: Fundición centrífuga con molde horizontal.	33
Figura 16: Proceso de fundición por revestimiento.	34
Figura 17: Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena.	35
Figura 18: Modelo 3-D del modelo de “100NB flange” con gate plano.	40
Figura 19: Defectos de casting simulados para gate conico de tamaño 15 x 15 x 300.	40
Figura 20: Defectos de casting simulados para gate plano de tamaño 20 x 20 x 300.	41
Figura 21: Condición de llenado a diferentes rangos.	42
Figura 22: Porosidad en Swivel.	43

Figura 23: Vista superior representando porosidad.	43
Figura 24: Simulación de fundición para árbol con 8 piezas, temperatura de vaciado 1550 °C.	44
Figura 25: Simulación de fundición para árbol con 8 piezas, temperatura de vaciado 1600 °C.	45
Figura 26: Simulación de fundición para árbol con 4 piezas, temperatura de vaciado 1600 °C.	45
Figura 27. Diagrama de Fases para el Bloque 1.	51
Figura 28. Diagrama de Fases para el Bloque 2.	54
Figura 29. Diagrama de fuerzas y momentos en Plenum.	62
Figura 30. Definición de Volumen a) Diseño 1 b) Diseño2.	65
Figura 31. Posicionamiento del <i>gate</i> por donde empezará a vaciarse el metal fundido.	78
Figura 32. Características de los modelos de armadura de plenum que fueron removidas. Arriba: antes de ser removidas, Abajo: Después de ser removidas.	79
Figura 33. Modelos 3D para realizar análisis de fundición por computadora. a) Diseño 1. b) Diseño 2.	80
Figura 34. Modelo de armadura de plenum para correr simulación de fundición.	83
Figura 35. Temperatura del metal fundido mientras es vertido en el molde.	84
Figura 36. Temperatura de enfriamiento del metal fundido a diferentes tiempos para el Diseño 1 a) 0.5 seg b) 3 seg c) 7.5 seg d) 13.7 seg.	85
Figura 37. Temperatura de enfriamiento del metal fundido a diferentes tiempos para el Diseño 2 a) 0.5 seg b) 3 seg c) 7.5 seg d) 13.7 seg.	86
Figura 38. Resultados de Porosidad en ambos diseños. a) Diseño 1 b) Diseño 2.	87
Figura 39. Posicionamiento del Riser para la optimización de la simulación del proceso de Fundición para el Diseño 1.	88
Figura 40. Resultados de Porosidad en Diseño 1 en simulación optimizada.	89

Índice de Tablas.

Tabla 1. Costos de manufactura del plenum actual y costos estimados de manufactura por fundición.	16
Tabla 2. Propiedades volumétricas para materiales seleccionados de la ingeniería.	25
Tabla 3. Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.	31
Tabla 4. Cronograma de actividades del proyecto.	59
Tabla 5. Resultados de esfuerzos y factores de seguridad para la estructura metálica del Diseño 1.	62
Tabla 6. Resultados de esfuerzos y factores de seguridad para la estructura metálica del Diseño 2.	63
Tabla 7. Componentes y sus pesos para ambos diseños de plenum.	66
Tabla 8. Propiedades Físicas de ambos diseños de armadura para plenum.	67
Tabla 9. Propiedades y características necesarias para el nuevo material.	68
Tabla 10. Comparación del material actual con los materiales seleccionados.	76
Tabla 11. Ahorros en peso para ambos materiales seleccionados.	76
Tabla 12. Comparación de los diferentes tipos de fundición.	82
Tabla 13. Resumen de resultados para la tercera fase del Bloque 2.	89
Tabla 14. Criterios de ponderación de resultados de áreas de investigación para Diseño 1 y Diseño 2.	96
Tabla 15. Ponderación de cada diseño designados por área de investigación.	97
Tabla 16. Ponderación Total de Diseño 1 y 2.	97
Tabla 17. Comparación de Resultados para Diseño original y Diseño 2.	98

Índice de Gráficas.

Gráfica 1. Horas trabajadas en plenum en el periodo de enero a octubre 2018.	14
Gráfica 2. Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de plenum en el 2018.	15
Gráfica 3: Gráfica normal del esfuerzo-deformación de ingeniería de un metal.	27
Gráfica 4: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor.	46
Gráfica 5: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor, maximizando.	47
Gráfica 6: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor, minimizando.	47
Gráfica 7: Materiales a ser utilizados como sensibles a almacenamiento de calor para maximizar el.	48
Gráfica 8: Materiales a ser utilizados como PCM para mejorar el confort térmico en edificios cerrados.	49
Gráfica 9: Materiales a ser utilizados como PCM para agua caliente doméstica en edificios.	49
Gráfica 10. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles.	52
Grafica 11. Grafica de Temperaturas dentro del plenum para los diferentes casos de pruebas realizadas al sistema de control ambiental.	64
Gráfica 12. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles.	69
Gráfica 13. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado el filtro de densidad.	70
Gráfica 14. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado los filtros mencionados en la Tabla 9.	70
Gráfica 15. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado los filtros mencionados en la Tabla 9.	72
Gráfica 16. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles aplicando el primer filtro de precio.	73

Gráfica 17. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles después de aplicar filtro de punto de fusión y Yield Strength.	74
Gráfica 18. Gráfica comparativa de los 9 materiales posibles a seleccionar.	75
Gráfica 19. Representación gráfica de estimados de costos durante diferentes etapas.	91

Resumen

En este trabajo se presenta el proyecto realizado con el fin de obtener el grado de maestro en Ingeniería e Innovación con línea de generación y área de conocimiento (LGAC) en Diseño y Sistemas de manufactura con área de énfasis en Diseño Aeroespacial.

El desarrollo de este proyecto involucra la selección de materiales para el nuevo diseño del plenum del Gulfstream V, la cual fue lograda después de definir todas las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y las condiciones de operación para el nuevo material. También se desarrolló una metodología de selección utilizando un Software de Selección de Materiales, donde se eligieron a los mejores materiales dentro de casi 4 mil opciones.

También en este proyecto se desarrolló la simulación del proceso de fundición para la fabricación de la nueva armadura del plenum. Una vez definidas las variables necesarias, se corrió la simulación. Después los resultados fueron analizados y estudiados, de tal manera que se pudiera decidir qué áreas habría que optimizar. Finalmente, al optimizar la simulación, los resultados se volvieron a analizar para así poder definir si el proceso de fundición fue viable y eficiente.

Capítulo 1

1.1 Introducción

Honeywell es una empresa internacional con operaciones en 970 sitios distribuidos en 70 países. Tiene presencia global en África, Asia, Europa, Latinoamérica, el Medio Este y Norte América. Dentro de Latinoamérica, México es uno de los principales países con más edificios de esta compañía, cuenta con sedes en los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León, Campeche, Jalisco, Querétaro, San Luis Potosí y Ciudad de México.

En la Figura 1 se muestran y se describen de manera general las 4 divisiones principales de esta compañía.



Figura 1. Diagrama de las diferentes divisiones dentro de Honeywell.
Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018).

Sector de Tecnología para Edificios

Este sector genera 5.3 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose al negocio de productos, soluciones y manejo de sistemas para edificios. Tiene su principal sede en Atlanta, Georgia. Los productos, el software y las tecnologías de *Honeywell* están en más de 10 millones de edificios a nivel mundial, ayudando a que las instalaciones de los clientes estén seguras, con eficiencia energética, sean sustentables y productivos.

Sector de Materiales

Su sede principal está localizada en Morris Plains, Nueva Jersey. Este sector genera 10.3 billones de dólares en ventas al año, haciendo negocios en materiales y tecnologías avanzadas como lo son los materiales compuestos, fibras, químicos y materiales electrónicos, refrigerantes potenciales con bajo efecto al calentamiento global, aditivos y filminas especiales. Este sector es un líder mundial en diseño y creación de productos químicos y materiales de alta pureza y calidad, así como también, crea sistemas basados en software para operar instalaciones industriales complejas de manera segura y eficiente.

Sector de Seguridad y Soluciones de Productividad

Con la principal sede en Fort Mill, Carolina del Sur, este sector genera 5.6 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose a negocios de seguridad industrial. Provee productos, software y soluciones conectadas que mejoran la productividad, seguridad de trabajo y el rendimiento de activos para clientes en todo el mundo. Cuenta con un amplio rango de productos como detectores de gas, botas de trabajo, escáneres de códigos de barras, auriculares de seguridad y arneses.

Sector Aeroespacial

Con la principal sede en Phoenix, Arizona, el sector aeroespacial genera 11.6 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose al negocio de soluciones electrónicas, motores, sistemas de potencia, componentes mecánicos, sistemas mecánicos y conectividad. Los productos aeroespaciales *Honeywell* son usados prácticamente en todas las plataformas de aviones comerciales y militares a nivel mundial. Sus tecnologías abarcan desde llantas de avión y sistemas de frenado, hasta tecnologías para aplicaciones en satélites. *Honeywell* aeroespacial innova e integra miles de productos, softwares y servicios para avanzar y ofrecer más fácilmente experiencias de transporte seguras, eficientes, productivas y cómodas en todo el mundo.

El problema que aborda este proyecto está ubicado en esta última división, el sector aeroespacial. En este sector se encuentra la planta "*Integrated Supply Chain*" (ISC), la cual está ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California. Esta planta apoya al sector de Jets privados, el cual se encuentra dentro de las divisiones de grupos del sector aeroespacial (Figura 2), con la producción de intercambiadores de calor,

turbocompresores, **plenums** y convertidores de ozono; los cuales son los componentes principales dentro de un ECS (“*Environmental Control System*”).

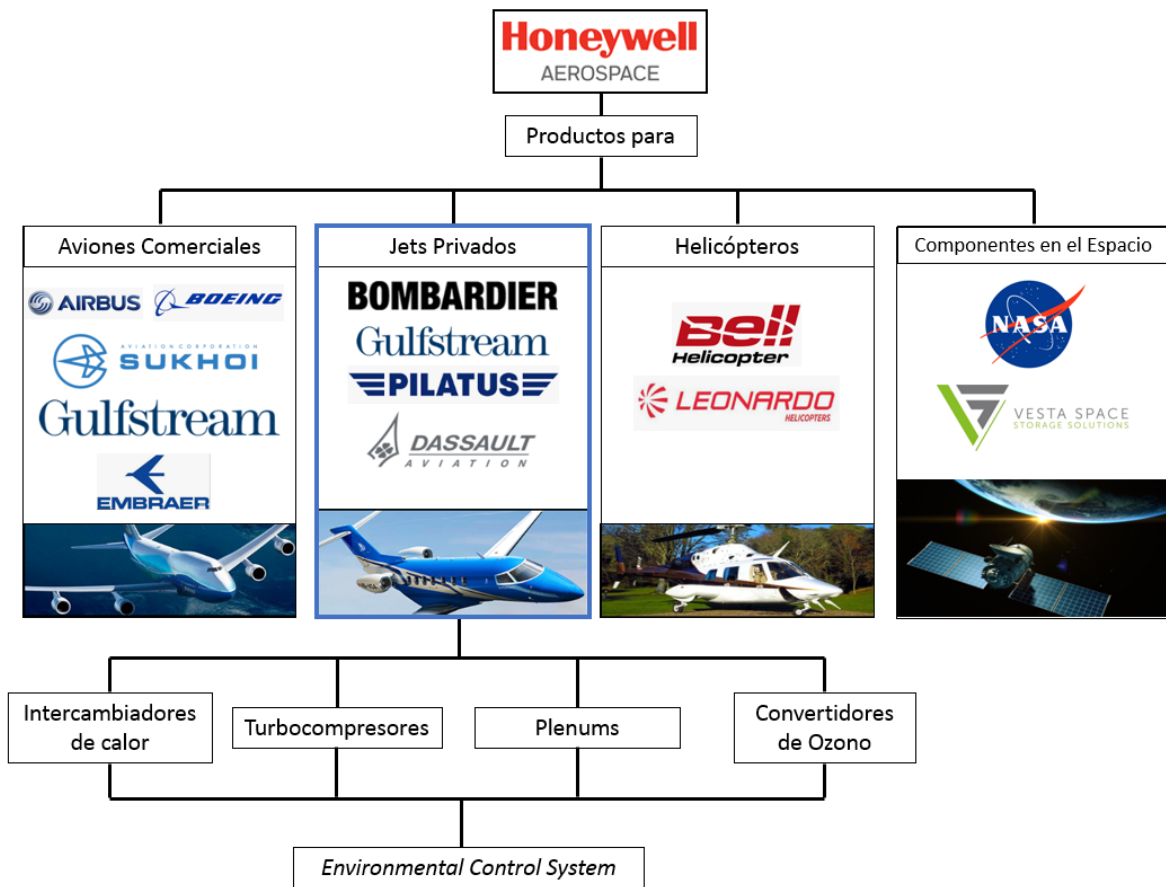


Figura 2. Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell.

Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018).

El ECS es el sistema encargado de monitorear y controlar la temperatura, humedad, ventilación, presión y flujo de aire dentro del avión, tanto para los pasajeros como para los sistemas eléctricos. También maneja el aire de sangrado del motor proporcionando protección contra el hielo en las superficies de control de las alas. El sistema ECS y sus principales componentes son mostrados en la Figura 3.

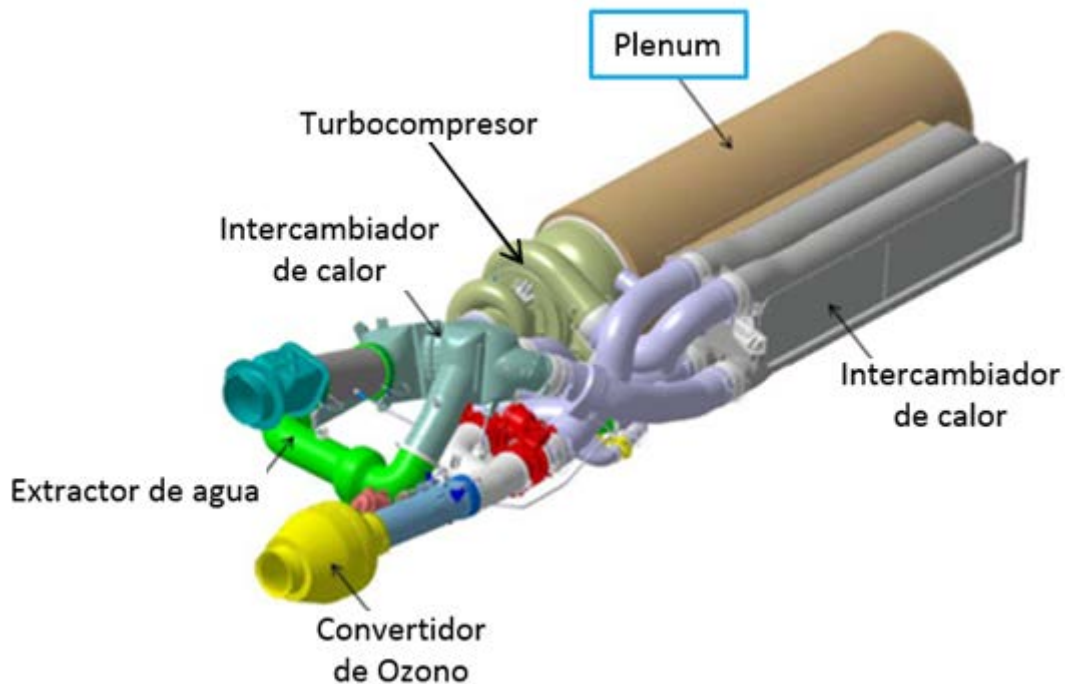


Figura 3. Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.
Fuente: Honeywell Aerospace (2016).

El desarrollo de este proyecto está enfocado en el desarrollo del componente del plenum para el sistema de control ambiental del Jet Privado Gulfstream V.

Los **plenums** son un conducto que envuelve al difusor en los motores de turbina de gas. El **plenum** se encarga de desacelerar el aire e incrementar la presión, posteriormente, se manda el aire a una cámara de combustión (Kadambi y Prasad, 2015). Este componente, es parte del sistema del ECS (“Environmental Control System”), el cual se define como un sistema donde se mantienen los componentes de aviones a condiciones de temperatura y humedad controladas, de manera que se pueda disipar calor a través de los componentes sin dañarlos (Gundlach, 2012). Entre los principales clientes de este tipo de sistemas, se encuentran Boeing, Gulfstream y Airbus.

La fabricación del **plenum** para el Gulfstream V, es uno de los procesos más complicados, es por ello el enfoque de este proyecto.

En la Figura 4, se muestra el diagrama del proceso de manufactura actual para el producto **plenum**, el cual consta de 19 Fases que se explican a continuación.

Fase 1: Recibo de *prepreg*. Esta es la fase inicial del proceso e inicia con la llegada de la materia prima, llamada *prepreg*. Este es un material compuesto de poliamida, el cual se recibe en rollos y empaquetado con una bolsa plástica.

Fase 2: Congelación de *prepreg*. En esta fase se prepara el material *prepreg* para su almacenamiento temporal, introduciéndolo al congelador a una temperatura de -15 °F.

Fase 3. Descongelación de *prepreg*. Una vez que el *prepreg* se va a utilizar, se saca del congelador. Posteriormente, se coloca en un estante para descongelarlo por un periodo de 8 a 12 horas, o bien hasta que termine el proceso de condensación dentro de la bolsa. Esta fase concluye cuando el *prepreg* está completamente descongelado y listo para la siguiente fase.

Fase 4: Corte de material. Se remueve el material de la bolsa en la que está envuelto. Se extiende el rollo de *prepreg* sobre una mesa, la cual está cubierta por una hoja de plástico duro especial con la que puede estar en contacto la poliamida. En esta mesa, el rollo va pasando por una máquina que realiza los cortes derivados de un patrón previamente cargados en la computadora.

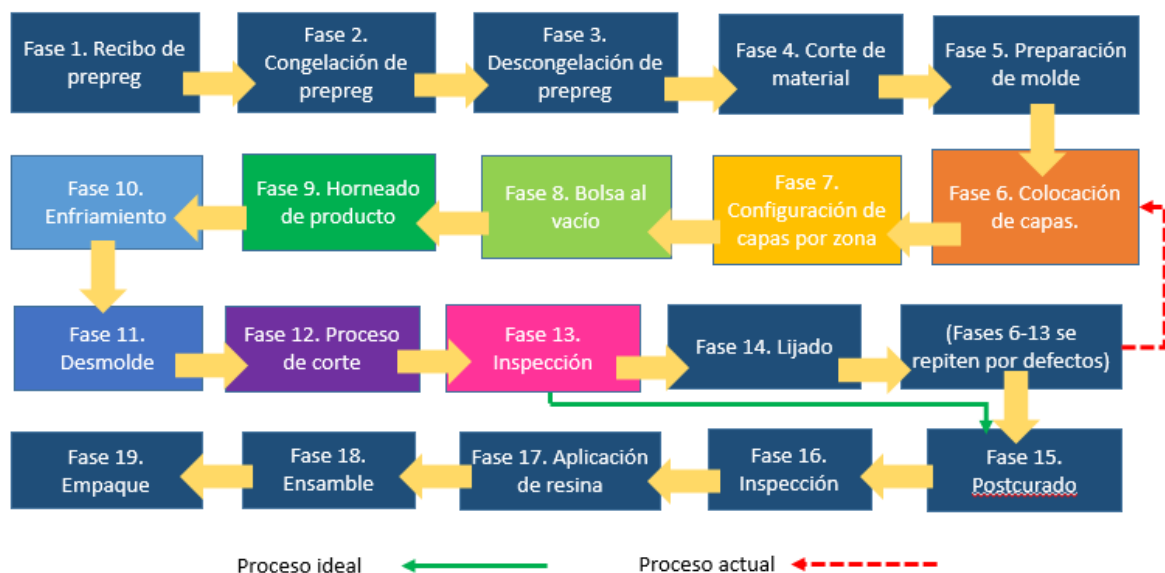


Figura 4. Diagrama del proceso de manufactura del plenum para el Gulfstream V. Fuente: Elaboración propia.

Fase 5: Preparación del molde. En esta fase acondiciona el molde a ser utilizado. Para ello se cuenta con dos tipos de molde de aluminio que tiene la forma del producto: uno hueco y otro sólido. Un ejemplo se muestra en la Figura 5. Para su preparación, el molde hueco se cubre con una cinta especial llamada *release film*, la cual se coloca en las uniones del metal. La intención es que la resina que suelta el *prepreg* no se filtre por estas uniones. Por otro lado, se coloca más cinta para ambos moldes en los cambios abruptos de geometría. De esta manera, el material no quede pegado al molde y es más fácil desmoldarlo.

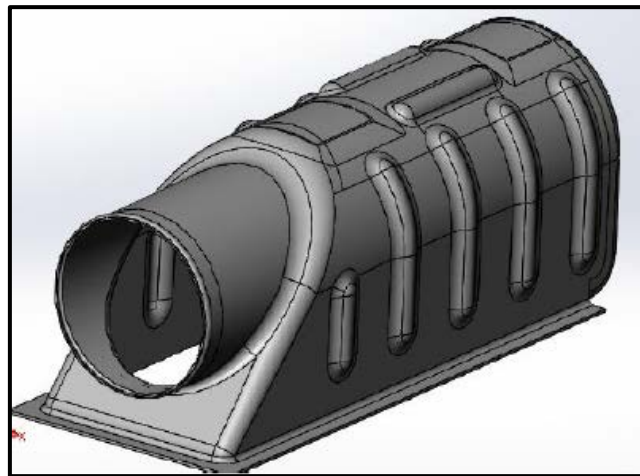


Figura 5. Modelo 3D actual del plenum del Gulsftream V.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Fase 6: Colocación de capas. En esta fase del proceso se cubre el molde con un plástico *Release Ease 234 TFNP*. Posteriormente, se van colocando las capas ya cortadas del *prepreg* sobre este plástico, y manualmente se les da forma alrededor del molde. En total son 18 capas de poliamida para el cuerpo, y 20 capas para la parte superior donde se instalan los soportes. Cada capa se coloca una sobre otra ya que el material tiene una resina pegajosa que hace que las capas vayan quedando unidas. La colocación de capas es crucial para el producto, porque es aquí donde cada capa debe colocarse cuidando que no se formen arrugas o que haya exceso de resina.

Fase 7: Configuración de capas por zona. Existen dos tipos de configuración en capas, las cuales se muestran en la Figura 6. Es importante resaltar que este proceso puede tardar hasta 4 turnos.

- Mostrados de color azul en la imagen (Configuración 1), se coloca un *Release film* perforado conocido como *Whrightlon 5200B*. Después dos capas de fibra

de vidrio, otra capa más de *Release Film* perforado y finalmente dos capas de una tela blanca “respirador” o *Airwave N10*.

- En la zona de la superficie café en la imagen (Configuración 2), se coloca otra capa de *Release Ease 234 TFNP*, una capa de *Bleeder Lease* o “capa de sangrado” y finalmente dos capas de “respirador” o *Airwave N10*.

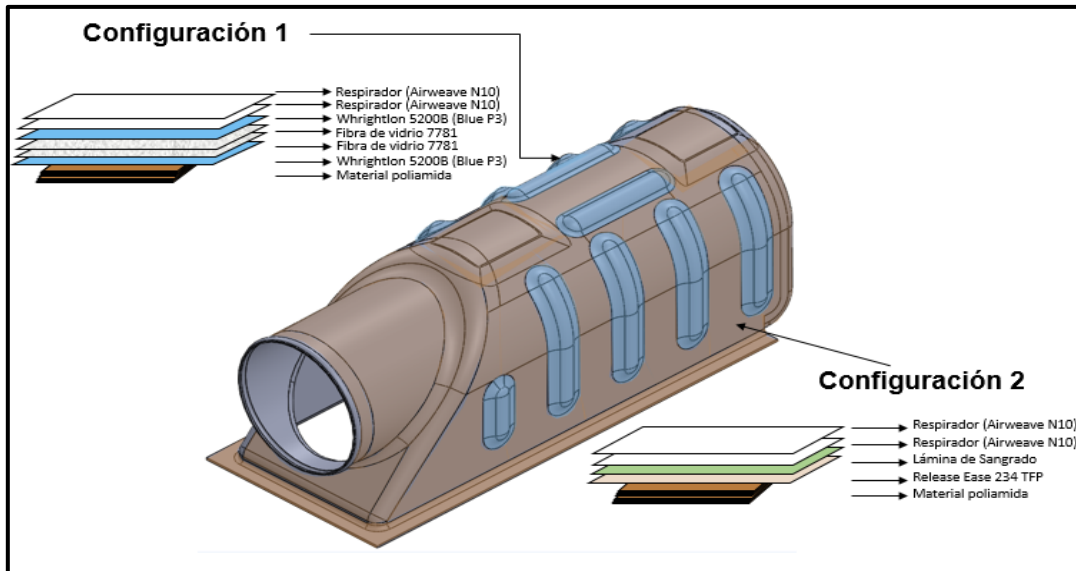


Figura 6. Fase 7, configuraciones de capas en distintas zonas del plenum.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Finalmente, se le agregan unos *caul plates* o placas delgadas en la entrada, salida y en zonas críticas del **plenum** para ejercer presión entre las capas.

Fase 8: Bolsa al vacío. En esta fase, el producto es envuelto en una bolsa al vacío para sellarlo.

Fase 9: Horneado de producto. El producto es colocado dentro del horno a una temperatura de 350 °F por un periodo de 10 horas si el molde es hueco. Si el molde es sólido, se extiende hasta 16 horas.

Fase 10: Enfriamiento. En esta parte del proceso, el producto se saca del horno y se coloca en un estante para que pierda calor. Dependiendo de la producción, se coloca un abanico para ayudar a acelerar el proceso, o bien se deja al aire libre. Esta fase termina cuando el producto no está caliente al tacto.

Fase 11: Desmolde. Esta fase consiste en el desmolde del **plenum**, esto se realiza mediante golpes suaves, hasta que se logra separar la pieza del molde. Una vez desmontado, pasa a la siguiente fase.

Fase 12: Proceso de corte. En esta fase se remueven todos los filos encontrados en los bordes de la pieza.

Fase 13: Inspección. Se revisa el producto y se identifican las imperfecciones. Para ello, se realiza una prueba acústica, la cual consiste en dar golpeteos al **plenum** con una moneda. En las zonas donde suena hueco, se necesita retrabajar, pues significa que no hay una unión correcta de las capas. A este fenómeno se le conoce como puente entre fibras, y ocurre en las secciones del molde con radios abruptos. La presión que se aplica en las esquinas no es efectiva, lo cual provoca baja presión en esa zona y llenándose con resina (Baran et. Al, 2017). Además, se realiza una inspección visual donde se identifican las arrugas, las cuales se forman porque los pliegues de compuesto no se adhieren bien entre sí (Hassan et. Al, 2017). Estas arrugas deben tener una altura menor a .05” para ser aceptadas.

Fase 14: Lijado. En esta fase se traslada el producto al departamento de lijado, y se remueven las zonas marcadas por inspección. Dependiendo de la zona donde se haya identificado el defecto, regresa al proceso inicial de capas o Fase 6.

Fase 15: Postcurado. Cuando el producto es finalmente aceptado, inicia el proceso de postcurado en el horno a 700 °F. Esta fase termina cuando el **plenum** se enfría.

Fase 16: Inspección. El producto se inspecciona una vez más, ya que después del postcurado se pueden encontrar más defectos.

Fase 17: Aplicación de resina. En esta fase, se le aplica una resina al **plenum** para un mejor acabado y se deja secar por un periodo de 8 horas.

Fase 18: Ensamble. Se instalan dos soportes en la parte superior del **plenum**, una placa de identificación y se ensambla el difusor.

Fase 19: Empaque. El producto se empaca y se transporta a la planta de Torrance donde será ensamblado con otros componentes.

El proceso ideal de elaboración del **plenum** para el Gulfstream V debería pasar directamente de la Fase 13 a la Fase 15. Sin embargo, las fases de reproceso son parte del mismo proceso, ya que las piezas siempre muestran defectos.

1.2 Antecedentes

Como ya se mencionó, el producto **plenum** tiene un problema de reproceso, el cual se debe principalmente a los defectos de arrugas y delaminación en el producto. Además, esto provoca bajo rendimiento del departamento, lo cual ha sido abordado desde el 2015 con varios cambios en el proceso.

- Mejora de patrón de corte del material *prepreg*: Anteriormente, no todos los patrones de *prepreg* se cortaban en máquina, pues no cabían en la sección de material designada para ello. De tal manera, se cortaban los patrones faltantes manualmente, repercutiendo en el producto por uniformidad en los cortes. Se hizo una nueva distribución de los cortes y se lograron acomodar todos en la sección designada, como se muestra en la Figura 7. Con esto se logró eliminar el corte manual del proceso.

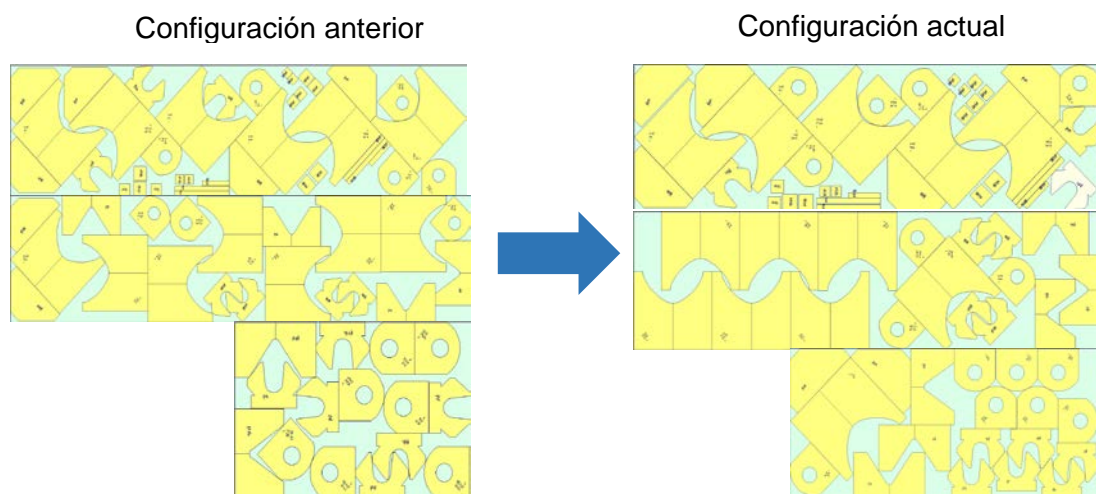


Figura 7. a) Configuración de corte de prepreg anterior. b) Configuración de corte de prepreg actual.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

- Implementación de *caul plates* o soportes: Se colocaron estos soportes en la entrada, salida y zonas críticas del **plenum** (Figura 8), con la finalidad de ejercer presión en las uniones de capas. Esto fue de ayuda para disminuir la generación de arrugas y delaminación, como se observa en la Figura 9.

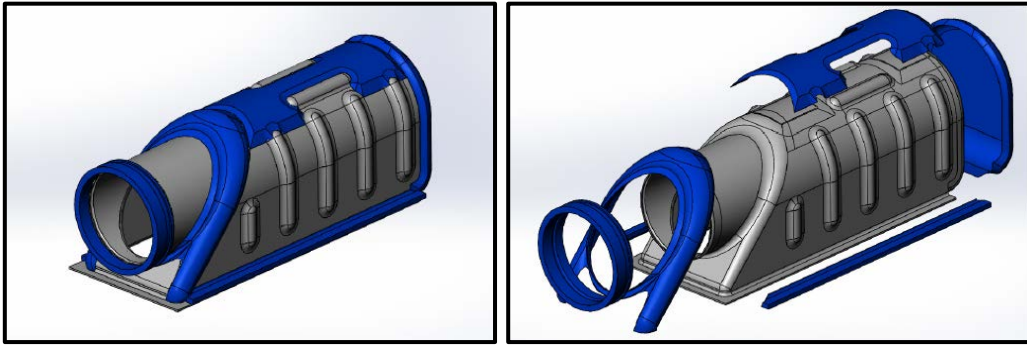
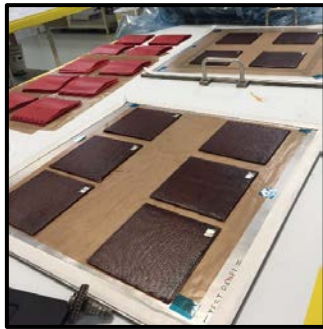


Figura 8. Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

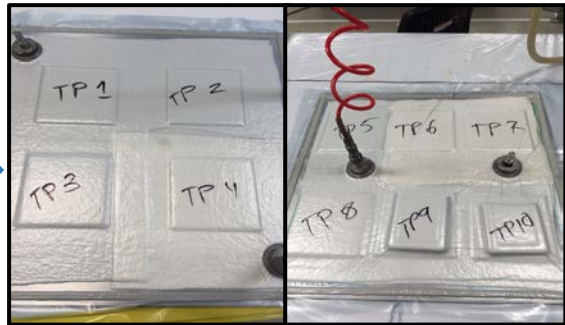


Figura 9. Izquierda. Proceso sin utilizar caul plates. Derecha. Plenum utilizando caul plates.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

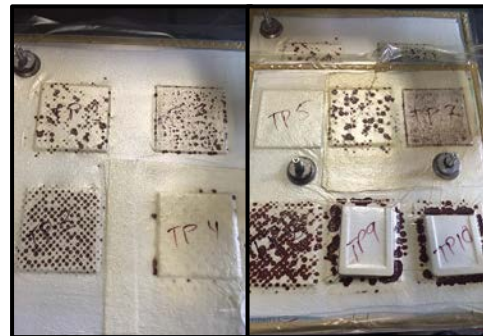
- Estudios de mejor distribución de capas: En total se realizaron 10 configuraciones de paneles de capas distintos (Figura10), para conocer cuál arreglo evita la extracción de resina del *preg* y cómo mejorar la calidad de las capas. Con este estudio se pudieron determinar las configuraciones necesarias para la zona del **plenum**, como se indicó en la Figura .



Se crearon 10 paneles con diferentes configuraciones de capas y mismo proceso de curado



Paneles antes del Proceso de curado.



Paneles después del proceso de curado

Figura10. Configuraciones de paneles.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

- Posible rediseño del **plenum** con casting de aluminio: Actualmente, se cuenta con una posible solución de diseño hecha de casting y paneles de placa metálica de aluminio (Figura 11). Sin embargo, esta opción fue rechazada debido a que el **plenum** de aluminio tiene un peso mayor al del ensamble de compuesto.

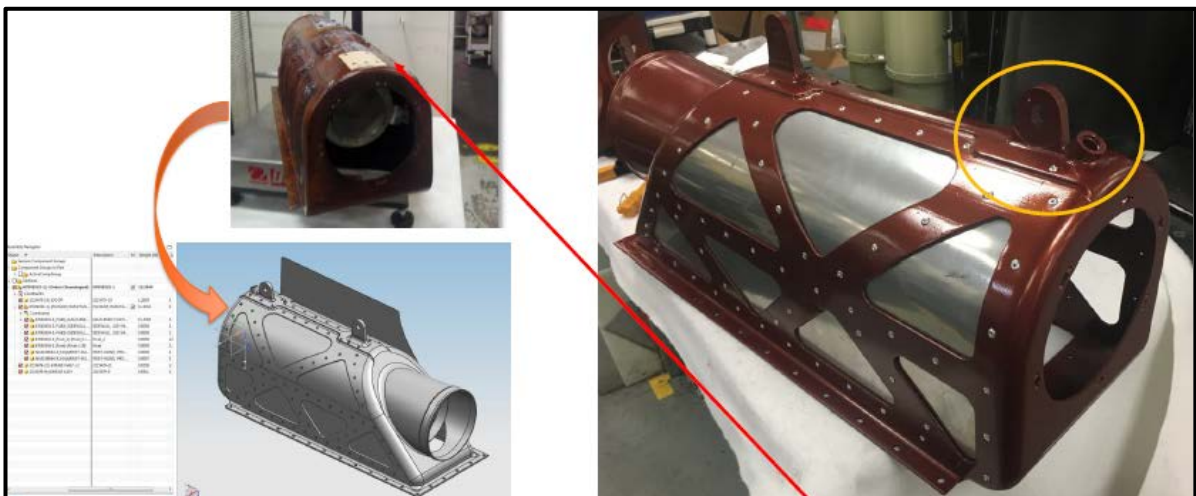


Figura 11. Rediseño de plenum de aluminio.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Con base a estos cambios de proceso, se puede observar que se han realizado varias acciones en el departamento de Fibra de vidrio para aumentar el rendimiento y disminuir los defectos. Sin embargo, no se ha podido eliminar el tiempo de los reprocesos que se realizan al **plenum** del Gulfstream V, puesto que todavía presentan defectos.

Con respecto a la propuesta de diseño de aluminio, se planea partir de este diseño y mejorar la cuestión de peso y distribución de esfuerzos. Sin embargo, también se realizan otras propuestas nuevas de diseño que cumplan con los requerimientos.

1.3 Justificación General

La innovación es la clave para que una empresa siga siendo competitiva, hoy en día *Honeywell* busca reducir los gastos operativos en el lanzamiento de nuevos productos y poder presentar nuevas soluciones en tiempo y forma enfatizando así la filosofía del ahorro y la eficiencia.

Este proyecto plantea desarrollar una propuesta de diseño para el **plenum** del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación.

Al presentar un diseño funcional que permita eliminar las arrugas y delaminación en el producto (Figura 12), facilita la mejora del rendimiento en el departamento de Fibra de Vidrio ubicado en la planta “*Integrated Supply Chain*” (ISC), el cual se encarga de fabricar este producto.



*Figura 12. Defectos en Diseño actual Plenum GV.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.*

Con los resultados obtenidos de este proyecto, la compañía pretende disminuir el número de reprocesos en el producto, así como el tiempo y los costos que éstos

generan. Además, al cambiar el diseño, el material y el método de manufactura, se abre la posibilidad de explorar nuevos procesos para diferentes productos que presentan el mismo tipo de defectos.

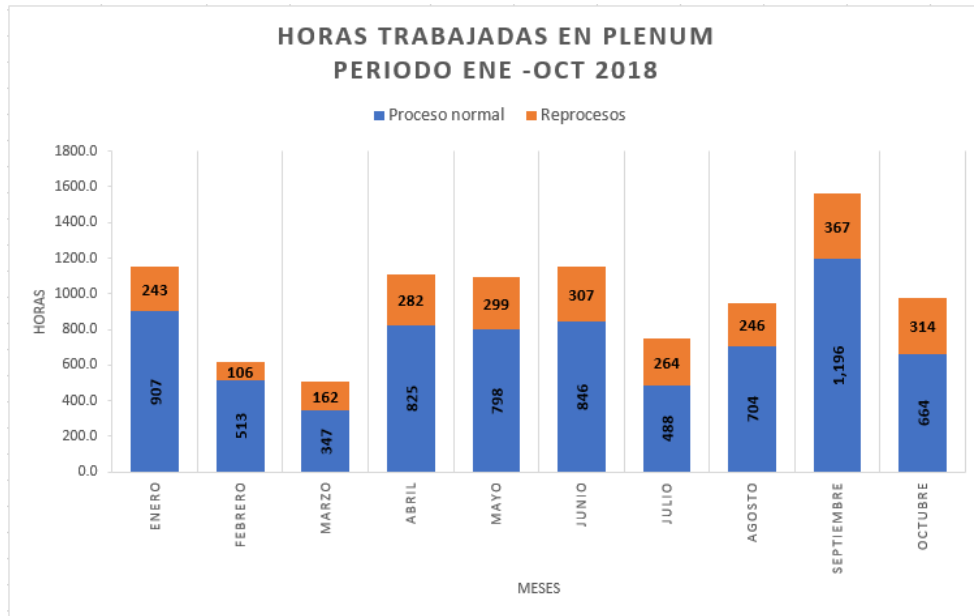
Por otro lado, al poder identificar el material y diseño adecuado para este tipo de **plenum** con una configuración diferente a la que existe en el mercado aeroespacial, es posible aplicar para una patente. Lo cual es un beneficio para Honeywell y para la comunidad aeroespacial.

1.4 Planteamiento del Problema

En la ciudad de Mexicali, Baja California, se encuentra la división de Honeywell Aeroespacial “Integrated Supply Chain” (ISC). En esta planta se fabrican diversos componentes aeroespaciales, como intercambiadores de calor, actuadores, convertidores de ozono, entre otros.

El diseño y la fabricación de algunos componentes aeroespaciales forman parte de la producción desde hace años. Por lo cual, es común que, con el paso del tiempo, se necesiten mejoras en el diseño, material, procesos o incluso el ensamblaje de los componentes.

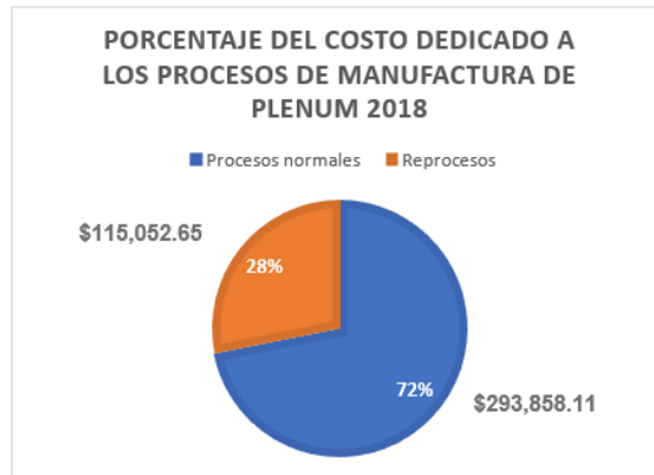
El departamento de “Product Support Engineering” (PSE) empezó a trabajar en el 2015 en el rediseño del **plenum** para el Gulfstream V, el cual es un jet ejecutivo para pocos pasajeros. El proceso actual de manufactura del **plenum**, se realiza en la celda de Fibra de Vidrio, y consiste en una serie de pasos de preparación de molde, curado en el horno, maquinado, inspección, así como aplicación de varias capas de material. Debido a este proceso, se ha observado que, al aplicar cada capa de compuesto, se forman “arrugas” y delaminación del material, para lo cual es requerido realizar en cada **plenum** de 4 iteraciones de reproceso. En la Gráfica 1, se muestran las horas dedicadas a reprocesos al mes, las cuales representan el 26% de las horas totales de enero a octubre del total de plenum fabricados.



Gráfica 1. Horas trabajadas en plenum en el periodo de enero a octubre 2018.

Para la división aeroespacial de Honeywell el rendimiento o “*yield*” de cada departamento es de gran interés. El “*yield*” corresponde a el porcentaje de horas efectivas trabajadas por empleado y por departamento en programas que le generan ingresos a la compañía. Por lo que cada reproceso en la fabricación de un componente provoca un decremento en dicho rendimiento. Como el reproceso se ha vuelto parte de la producción diaria, se decidió agregarlo como parte de la secuencia de pasos en el proceso de la fabricación de los **plenums**, como una solución temporal para mejorar el rendimiento. Sin embargo, se espera reducir estos reprocesos para obtener un rendimiento real y positivo.

Por otro lado, la demanda del 2018 fue de 212 *plenums*, de acuerdo al tiempo estándar, cada plenum necesita 21 horas de reprocesos en promedio, lo cual equivale a \$115,052.65 dólares, que es el equivalente al 28% de los costos totales de los procesos, como se puede observar en la **Error! Reference source not found.**



Gráfica 2. Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de plenum en el 2018.
Fuente: obtenido de documentación de Honeywell.

Hasta el momento, se han realizado esfuerzos que han consistido en implementar presión en las regiones del **plenum** donde se han observados las arrugas y la delaminación, como es el caso de los radios abruptos. No obstante, el producto aún sigue presentando defectos.

Aunque se han realizado varias mejoras al proceso de fabricación de **plenum**, éstas no han sido el impacto esperado por la compañía. Por lo tanto, Honeywell ha buscado la alternativa de lanzar un proyecto mayor que tiene como finalidad “Desarrollar una propuesta de diseño para el **plenum** del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación”.

Como se mencionó en la sección de Antecedentes, este proyecto inició en el 2015 por otro equipo de Honeywell. Se obtuvieron algunos avances, como un diseño preliminar y una cotización de fundición. Por lo cual, se pudo realizar una estimación del ahorro del proyecto de resultar exitoso, la cual se muestra en la Tabla 1 **Error! Reference source not found.**

Tabla 1. Costos de manufactura del plenum actual y costos estimados de manufactura por fundición.

Proceso actual (compuesto)	Costo (dólares)
Plenum	3,331.94
Ensamble	1,744.97
Total	5,076.91
Proceso fundición (estimado)	Costo (dólares)
Plenum	1,650.00
Maquinado y Ensamble	1,744.97
Total	3,394.97
Ahorro por plenum	1,681.94

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Es importante resaltar que el esfuerzo que se hizo hasta el momento previo a este proyecto no fue suficiente para llevar a cabo la transición de un proceso a otro. Las propuestas de diseño y análisis no fueron completadas, y no se logró reducir o igualar el peso al plenum de compuesto.

En el 2019, se tiene una demanda proyectada de 322 plenum, si el ahorro aproximado por cada plenum es de \$1681.94 dólares, significa un ahorro total en el 2019 de \$541,584.68 dólares. Sin embargo, de acuerdo al proveedor, es necesario realizar una inversión inicial por el molde para fundición de \$100,000.00 dólares. Por lo cual, el ahorro sería de \$441,584.68 dólares aproximadamente. Por esta razón fue necesario retomar el proyecto, buscando alternativas que puedan ser implementadas.

Esta nueva iniciativa en búsqueda de nuevas alternativas se dividió en 6 áreas de investigación que incluyen: dos nuevas propuestas de diseño, análisis de elemento finito, análisis de fluidos y su viabilidad de manufactura. Además, es necesario realizar dibujos con el fin de obtener cotizaciones de proveedores, y poder calcular costos. Finalmente, la mejor propuesta de diseño será impresa en 3D como un primer prototipo conceptual.

1.5 Descripción del Proyecto Global

Pregunta Global de Investigación

De acuerdo con el problema descrito anteriormente, la compañía lanza un proyecto global, a partir del cual, se plantea la siguiente pregunta de investigación.

- ¿Cómo desarrollar un nuevo diseño para el plenum del Gulfstream V asegurando que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad impartidos por Gulfstream y permita mejorar el proceso de fabricación actual?

Objetivo Global.

A partir de la pregunta planteada, se presenta el objetivo general del proyecto global, el cual será abordado por un equipo dividiéndolo en 7 áreas de investigación, donde cada una de ellas contará con uno o más objetivos generales.

El objetivo general del proyecto global es el siguiente:

- Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación.

Estrategia General de Solución

Para el desarrollo de este proyecto y lograr dar respuesta a la pregunta global de investigación planteada, así como, lograr el objetivo del proyecto global, se estableció una estrategia, la cual consistió en dividir el proyecto en 7 áreas de investigación basadas en las áreas y procesos sustantivos para el logro del mismo. La forma de estructurar el problema es mostrada en la Figura 13. Donde se presentan cada una de las áreas de investigación y las colaboraciones entre ellas.

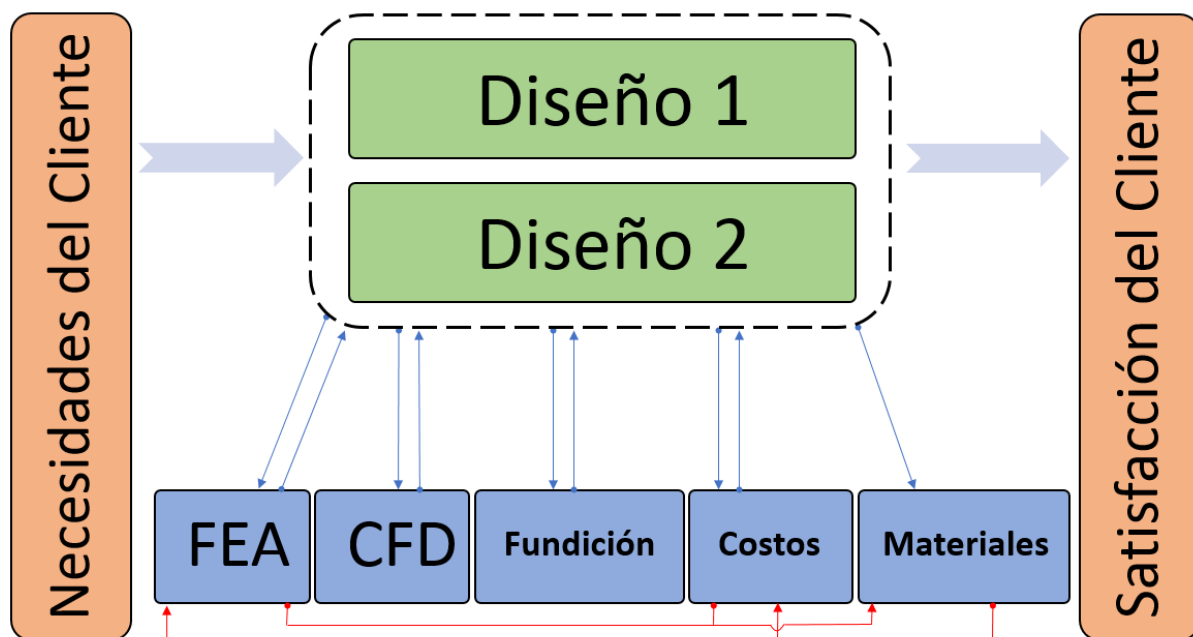


Figura 13. Diagrama para la metodología del Proyecto Global.
Fuente: Elaboración propia.

Una breve descripción de los procesos sustantivos dentro de la metodología del Proyecto Global se presenta a continuación.

Diseño 1: Este proceso sustantivo consiste en integrar los requisitos del sistema de control ambiental junto con las especificaciones del proceso de manufactura propuesto, también involucra retroalimentaciones de los procesos de análisis de elemento finito, inspire cast, Análisis de materiales, Análisis CFD y costos tomando en cuenta el cumplimiento de los requerimientos de cada uno de estos procesos para obtener un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

Diseño 2: Este proceso sustantivo consiste en integrar metodologías de DFMA para su fácil fabricación y ensamblaje, y que reduzca el peso actual, además de mantener la funcionalidad para la que ha sido desarrollada. Se realizará una validación de los procesos de análisis de elemento finito, simulación de proceso de manufactura, análisis de materiales, Análisis de CFD y costos para asegurar que cumpla con los requerimientos de desempeño requeridos por el sistema de control ambiental.

Análisis de Elemento Finito [FEA]: En esta parte del proceso, se realizan cálculos con las cargas que reaccionan en el plenum. Posteriormente, se analizan las propuestas de diseño en 3D del Gulfstream V, mediante un software de análisis. En él, se introducen parámetros de presión y temperatura que experimenta el plenum durante operación. Finalmente, con los resultados de los análisis, se brindan recomendaciones a los diseñadores para reforzar el plenum, o bien, para disminuir su peso. Con los nuevos diseños, se realizan iteraciones de análisis hasta encontrar la propuesta que mantenga un balance entre peso y factor de seguridad.

Selección de Materiales [Materiales]: En este proceso sustantivo, se planea encontrar los mejores materiales para la fabricación del nuevo diseño del plenum del Gulfstream V mediante el uso de herramientas computacionales que facilitan la comparación entre grandes grupos de materiales realizando filtros en base a diferentes propiedades y características, tanto físicas como mecánicas de los materiales.

Análisis de Fundición [Fundición]: En este proceso, se planea definir la viabilidad y optimizar el proceso de fundición para manufacturar la armadura del plenum del Gulfstream V. Se realizará una simulación de fundición por computadora utilizando un software especializado para este tipo de análisis.

Análisis de Fluidos [CFD]: Se refiere a las actividades de análisis de fluidos en el componente, que son analizar 2 casos por cada diseño, partiendo del diseño actual y posteriormente las dos propuestas de diseño. Finalmente se compararán los datos obtenidos de presión, temperatura y flujo másico, así como el régimen general del fluido a lo largo del Plenum para validar por comparación la funcionalidad de los nuevos diseños. Inputs: Diseño 3D. Outputs: Modificaciones para diseño, validación del diseño.

Cotización de Costos [Costos]: Engloba las actividades de cotización de los nuevos diseños para el Plenum del Gulfstream V y comparación de costos de fabricación con respecto al diseño y proceso actuales. Inputs: Diseños Validados, Características del moldeo, Material seleccionado. Outputs: Uno o varios proveedores en la región con precios competitivos y la capacidad de fabricar los nuevos diseños para el Plenum del Gulfstream V y un análisis comparativo de costos.

1.6 Preguntas de Investigación.

Respecto a este proyecto global, esta investigación está dirigida a responder las siguientes preguntas con énfasis a la aportación en dos áreas de investigación: la selección de materiales y la validación del proceso de fundición como posible método de manufactura.

La pregunta de investigación relacionada a la selección de materiales es la siguiente:

- ¿Cuáles son los materiales más adecuados para la fabricación de la armadura del plenum, que cuenten con las propiedades físicas y mecánicas necesarias para cumplir con los requerimientos y condiciones de frontera establecidas por Gulfstream?

Problemática

- ¿Cuáles son las propiedades mecánicas, propiedades físicas de los materiales y las condiciones de frontera necesarias para cumplir con los requerimientos establecidos por Gulfstream?
- ¿Qué materiales cumplen con las propiedades físicas, propiedades mecánicas y con las condiciones de frontera establecidas por Gulfstream?
- ¿Cómo comparar y seleccionar entre todos los materiales que cumplen con las características requeridas por Gulfstream y Honeywell?
- ¿Cuáles son los beneficios y mejoras que aportan los nuevos materiales seleccionados en comparación con los que se utilizan actualmente para la fabricación del plenum del Gulfstream V?

La pregunta de investigación relacionada a la validación del proceso de fundición como posible método de manufactura es la siguiente:

- ¿Cómo asegurar que el proceso de manufactura por medio de fundición para la propuesta del modelo 3D de la armadura del plenum del Gulfstream V es viable y eficiente?

Problemática

- ¿Qué información se requiere para poder realizar una simulación de fundición por computadora para el modelo 3D propuesto de la armadura del plenum del Gulfstream V?

- ¿Cuál es el proceso de fundición más conveniente para el diseño propuesto del plenum del Gulfstream V?
- ¿Cómo asegurar que la simulación de fundición para las propuestas de armaduras de plenums sea viable y eficiente?
- ¿Cuáles son los beneficios y mejoras que aporta la simulación por computadora en el nuevo proceso de manufactura para el plenum del Gulfstream V?

1.7 Justificación Específica

Este proyecto propone seleccionar los materiales más aptos para la fabricación del nuevo diseño del plenum además de analizar la viabilidad del proceso de fundición mediante el uso de simulación computacional.

El utilizar los materiales más adecuados permitirá a la empresa tener un diseño eficiente en cuanto a peso, costo y funcionalidad.

Este proyecto busca también mejorar el proceso de manufactura del plenum y reducir sus costos de fabricación mediante la simulación computacional del proceso de fundición.

A nivel personal, la realización de este proyecto ampliará las habilidades que tengo como ingeniero, ya que involucra el desarrollar conocimientos relacionados a la selección de materiales y a la simulación por computadora del proceso de fundición mediante softwares que no había utilizado antes. Como beneficio a la comunidad dentro de Honeywell Mexicali esta que este tipo de análisis se pudieran realizar en un futuro para diferentes proyectos y programas dentro de la empresa.

Finalmente, este proyecto representa la culminación del programa de maestría, además de ser un logro personal, obtener el título de maestro me abrirá más oportunidades en el ámbito laboral.

1.8 Objetivo General de Investigación.

Considerando el objetivo global del proyecto, la investigación que aquí se presenta tiene como propósito contribuir al proyecto global planteando los siguientes **objetivos generales** asociados a dos aspectos: la selección de materiales y la validación del proceso de fundición como método de manufactura.

Para la selección de material se plantea el siguiente objetivo general:

■ Seleccionar los materiales más adecuados para la fabricación del plenum, que tengan las propiedades físicas y mecánicas necesarias para cumplir con los requerimientos y condiciones de frontera establecidas por Gulfstream.

Este objetivo general tiene como objetivos específicos las siguientes acciones:

- Definir las propiedades mecánicas, propiedades físicas de los materiales y las condiciones de frontera necesarias para cumplir con los requerimientos establecidos por Gulfstream.
- Determinar los materiales que cumplen con las propiedades físicas, propiedades mecánicas y con las condiciones de frontera establecidas por Gulfstream.
- Seleccionar los materiales más óptimos que cumplen con las características requeridas por Gulfstream y Honeywell.
- Determinar los beneficios y mejoras que aportan los nuevos materiales seleccionados en comparación con los que se utilizan actualmente para la fabricación del plenum del Gulfstream V.

Con respecto a la validación del proceso de fundición se plantea el siguiente objetivo general:

■ Determinar un proceso de manufactura viable y eficiente por medio de fundición para la propuesta del modelo 3D de la armadura del plenum del Gulfstream V.

Los objetivos específicos derivados de este son:

- Establecer la información necesaria para realizar una simulación de fundición por computadora para los modelos 3D propuestos del plenum del Gulfstream V.
- Definir el proceso de fundición más conveniente para el diseño propuesto del plenum del Gulfstream V.
- Asegurar que el proceso de fundición para las propuestas de armaduras del plenum es viable y eficiente.
- Determinar los beneficios y mejoras que aporta la simulación por computadora en el nuevo proceso de manufactura para el plenum del Gulfstream V.

1.9 Planteamiento de Hipótesis.

Como nueva opción de material para la fabricación de los modelos 3D propuestos del plenum para el Gulfstream V, las diferentes aleaciones de aluminio son la mejor opción ya que cumplen con las condiciones de esfuerzos, resistencias a altas temperaturas y condiciones de funcionamiento requeridas. Además, son materiales con baja densidad y bajo costo.

El proceso de fundición por medio de *High Pressure Die Casting* es el más viable y además se puede lograr un proceso que no genere porosidad ni aire atrapado dentro de la pieza.

Capítulo 2. Marco Teórico.

En este capítulo se definirán los conceptos, teorías y casos de estudios que fueron necesarios analizar para lograr el desarrollo de este proyecto.

2.1 Conceptos.

2.1.1 Diseño y Selección de Materiales.

Cuando se diseña un material para una aplicación dada, deben considerarse un número de factores. El material debe poseer las propiedades físicas y mecánicas deseadas. Debe ser capaz de ser procesado o fabricado en la forma deseada y debe proveer una solución económica al problema de diseño (Askeland, 2010). Al cumplir con estos requerimientos de diseño, el ingeniero debe tener que hacer una variedad de compensaciones para poder generar un producto útil, pero comercial.

En algunos casos, particularmente en aplicaciones aeroespaciales, el peso es un tema crítico, dado que el peso adicional del vehículo aumenta el consumo de combustible y reduce su alcance. Con el uso de materiales que sean ligeros pero resistentes, pueden diseñarse vehículos automotrices o aeroespaciales para mejorar el rendimiento del combustible.

2.1.2 Propiedades Físicas de los materiales.

Las propiedades físicas incluyen las propiedades volumétricas, térmicas, eléctricas y electroquímicas. Los componentes de un producto deben hacer más que tan solo soportar los esfuerzos mecánicos. Deben conducir la electricidad (o impedir su conducción), permitir la transferencia de calor (o su escape), transmitir la luz (o bloquear su transmisión), y satisfacer muchas otras funciones.

Las propiedades físicas son importantes en la manufactura porque es frecuente que influyan en el rendimiento del proceso. Por ejemplo, las propiedades térmicas del material de trabajo en el maquinado determinan la temperatura de corte, lo que afecta el tiempo que puede usarse la herramienta antes de que falle.

Estas propiedades se relacionan con el volumen de los sólidos y la manera en que las afecta la temperatura. Incluyen la densidad, expansión térmica y punto de fusión. Se explican a continuación y en la Tabla 2 se da una lista de valores típicos para materiales seleccionados de la ingeniería

Tabla 2. Propiedades volumétricas para materiales seleccionados de la ingeniería.

Material	Densidad, ρ ,		Coeficiente de expansión térmica, α		Punto de fusión, T_m	
	g/cm^3	lb/in^3	$^{\circ}C^{-1} \times 10^{-6}$	$^{\circ}F^{-1} \times 10^{-6}$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$
Metales						
Aluminio	2.70	0.098	24	13.3	660	1 220
Cobre	8.97	0.324	17	9.4	1 083	1 981
Fierro	7.87	0.284	12.1	6.7	1 539	2 802
Plomo	11.35	0.410	29	16.1	327	621
Magnesio	1.74	0.063	26	14.4	650	1 202
Níquel	8.92	0.322	13.3	7.4	1 455	1 651
Acero	7.87	0.284	12	6.7	a	a
Estaño	7.31	0.264	23	12.7	232	449
Tungsteno	19.30	0.697	4.0	2.2	3 410	6 170
Zinc	7.15	0.258	40	22.2	420	787
Cerámicos						
Vidrio	2.5	0.090	1.8–9.0	1.0–5.0	b	b
Alúmina	3.8	0.137	9.0	5.0	ND	ND
Sílice	2.66	0.096	ND	ND	b	b
Polímeros						
Resinas fenólicas	1.3	0.047	60	33	c	c
Nailo	1.16	0.042	100	55	b	b
Teflón	2.2	0.079	100	55	b	b
Caucho natural	1.2	0.043	80	45	b	b
Poliétileno:						
Baja densidad	0.92	0.033	180	100	b	b
Alta densidad	0.96	0.035	120	66	b	b
Poliestireno	1.05	0.038	60	33	b	b

Fuente: Elaborado en base a (Groover, 2007).

Densidad.

En la ingeniería, la densidad de un material es su peso por unidad de volumen. Su símbolo es ρ , y las unidades comunes son gr/cm^3 (lb/in^3). La densidad es una consideración importante en la selección de un material para una aplicación dada, pero generalmente no es la única propiedad de interés. La resistencia también es importante, y con frecuencia las dos propiedades se relacionan con una razón de resistencia a peso, que es la resistencia a la tensión del material dividida entre su densidad. La razón es útil para comparar materiales para aplicaciones estructurales en los aviones, automóviles y otros productos en los que el peso y la energía importan.

Punto de fusión.

Para un elemento puro, el punto de fusión es la temperatura a la que el material pasa del estado sólido al líquido. La transformación inversa, de líquido a sólido, ocurre a la misma temperatura y se denomina punto de enfriamiento.

Es obvia la importancia que tiene la fusión en la manufactura (Groover, 2017). En la fundición de metal, el metal se funde y luego se vierte en la cavidad de un molde. Los metales con puntos de fusión bajos por lo general son más fáciles de fundir, pero si la temperatura de fusión es demasiado baja, el metal pierde su aplicabilidad como material de ingeniería.

2.1.3 Propiedades Mecánicas de los materiales.

Las propiedades mecánicas de un material determinan su comportamiento cuando se le sujeta a esfuerzos mecánicos. Estas propiedades incluyen el modulo de elasticidad, ductilidad, dureza y distintas medidas de la resistencia. Las propiedades mecánicas son importantes en el diseño porque el funcionamiento y rendimiento de un producto dependen de su capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos a que se le somete durante su uso. En el diseño, el objetivo usual del producto y sus componentes consiste en resistir dichos esfuerzos sin que su geometría cambie en forma significativa. Esta capacidad depende de propiedades tales como el modulo de elasticidad y la resistencia a la deformación.

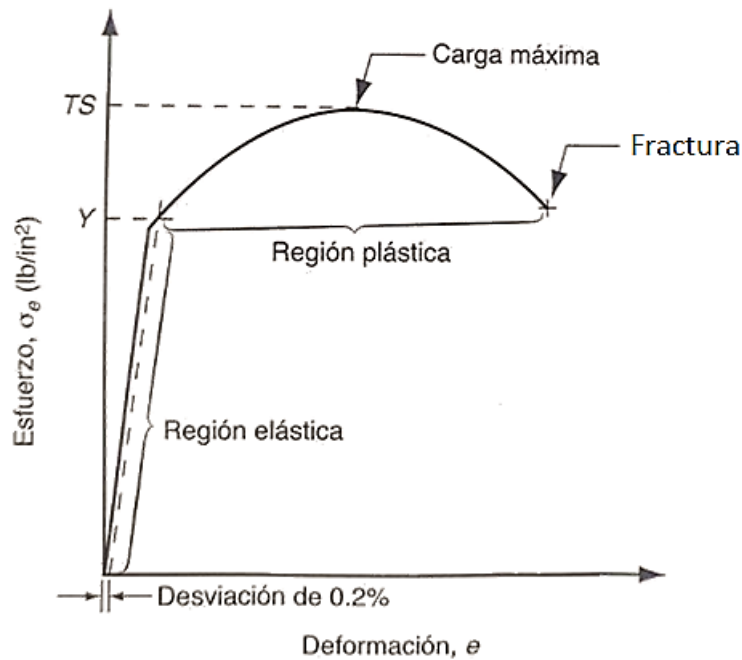
Esfuerzo-deformación en ingeniería.

El esfuerzo deformación en ingeniería se define en una prueba de tensión que se define en relación con el área y longitud originales del espécimen de prueba. Los valores obtenidos en esta prueba son de interés en el diseño debido a que el diseñador espera que las tensiones-deformaciones experimentales por cualquier componente del producto no cambien su forma de manera significativa. Los componentes están diseñados para soportar los esfuerzos que se prevé encontraran durante su uso.

En la Gráfica 3 se ilustra una curva común del esfuerzo-deformación de ingeniería de una prueba de tensión de un espécimen metálico. El esfuerzo de ingeniería en cualquier punto de la curva se define como la fuerza dividida entre el área original:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad [1]$$

Donde $E =$ **módulo de elasticidad, MPA (lb/in²)**. E es una medida de la rigidez inherente del material. Es una constante de proporcionalidad cuyo valor es diferente para materiales distintos.



Gráfica 3: Gráfica normal del esfuerzo-deformación de ingeniería de un metal.
Fuente: Elaborado en base a (Groover, 2007).

2.1.4 Esfuerzo de Deformación (*Yield Strength*).

Conforme el esfuerzo aumenta, se alcanza un punto final en la relación lineal en el que el material comienza a ceder. Ese **punto de deformación**, “Y”, del material se identifica en la Gráfica 3 por el cambio de la pendiente al final de la región lineal. Debido a que el comienzo de la deformación por lo general es difícil de ver en una gráfica de datos de prueba, es común definir a “Y” como el esfuerzo con el que ocurre un avance de la deformación del 0.2% a partir de la línea recta. El punto de deformación es una característica de la resistencia del material, y por ello es frecuente hacer referencia a él como el límite de deformación (otros nombres que recibe son esfuerzo de deformación, límite elástico o *Yield Strength*, por su término en inglés).

El punto de deformación marca la transición hacia la región plástica y el comienzo de la deformación plástica del material.

2.1.5 Resistencia a la Tensión (*Tensile Strength*).

El valor registrado cuando la carga aplicada en un ensayo de tensión alcanza un valor máximo, se denomina resistencia a la tensión, resistencia final a la tensión o Tensile Strength (por su nombre en inglés). Se denota como TS, donde $TS = F_{m\acute{a}x}/A$.

A la derecha de la resistencia a la tensión (Gráfica 3), la carga comienza a declinar y es común que el espécimen de prueba comience un proceso de elongación localizada que se conoce como estrangulamiento. En lugar de continuar la deformación uniforme a todo lo largo de su longitud, comienza a concentrarse la deformación en una sección pequeña del espécimen. El área de sección se angosta (se estrangula) de manera significativa hasta que sobreviene la falla. El esfuerzo calculado inmediatamente antes de la falla se conoce como esfuerzo de fractura. (Groover, 2007)

2.1.6 Dimensiones y Tolerancias.

Las dimensiones son los tamaños lineales o angulares de un componente, especificadas en el plano de la pieza. Las dimensiones son importantes porque determinan lo bien que se ajustan los componentes de un producto durante su ensamble (Groover, 2007). Al fabricar un componente dado, es casi imposible y muy costoso dar al elemento la dimensión nominal que se establece en el plano. En vez de ello, se permite una variación limitada de la dimensión, y la que es permisible se denomina tolerancia.

Dimensión, según (ANSI, 1982) es el valor numérico expresado en las unidades apropiadas de medida, que se indica en un plano y otros documentos junto con líneas, símbolos y notas para definir el tamaño o característica geométrica, o ambas, de una pieza o característica de una pieza. De igual manera, (ANSI, 1982), define tolerancia como la cantidad total que está permitido que una dimensión específica varíe. La tolerancia es la diferencia entre los límites máximo y mínimo.

2.1.7 Corrosión Galvánica.

Es bien sabido que la corrosión galvánica causa fallas en el material (Pedferri, 2018). Resulta cuando 2 metales disimilares están en contacto eléctrico en presencia de un electrolito como el agua de mar. El metal con el menor potencial (llamado ánodo o metal noble) se corroe mientras que el material con alto potencial (llamado cátodo o metal mas noble) se protege de la corrosión. La diferencia en potencial galvánico entre dos materiales determina si ocurrirá o no corrosión.

2.1.8 Metales Ferrosos.

Los metales ferrosos se basan en el hierro, uno de los metales más antiguamente conocidos por el hombre. Los metales ferrosos de importancia en la ingeniería son aleaciones de hierro y carbono. Se dividen en dos grupos principales: acero y hierro fundido. Juntos constituyen aproximadamente el 85% de las toneladas de metal en Estados Unidos (Flinn, 1995).

El hierro, como producto comercial, se encuentra disponible con varios niveles de pureza. El hierro electrolítico es el más puro, con cerca de 99.99%, se usa en investigación y otros propósitos en los que se requiere al metal puro. El hierro de lingote contiene alrededor de 0.1% de impurezas (inclusive cerca de 0.01% de carbono), y se usa en aplicaciones en las que se necesitan ductilidad o resistencia a la corrosión elevadas. El hierro forjado contiene un 3% de escoria pero muy poco carbono, y se le da forma con facilidad en operaciones de formado en caliente como la forja.

2.1.9 Aceros.

El acero es una aleación de hierro que tiene un contenido de carbono que varía entre 0.02% y 2.11%. Es frecuente que también incluya otros ingredientes de aleación: manganeso, cromo, níquel y molibdeno; pero es el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Existen cientos de composiciones de acero disponibles en el comercio. Los principales según (Groove, 2007) son: 1) aceros al carbón simples, 2) aceros bajos de aleación, 3) aceros inoxidable y 4) aceros para herramientas.

2.1.10 Metales No Ferrosos.

Los metales no ferrosos incluyen elementos y aleaciones metálicas que no se basan en el hierro. Los metales más importantes de la ingeniería en el grupo de los no ferrosos son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio y el zinc, así como sus aleaciones.

Aunque los metales no ferrosos como grupo no igualan la resistencia de los aceros, ciertas aleaciones no ferrosas tienen resistencia a la corrosión o relaciones resistencia/peso que las hacen competitivas ante los aceros para aplicaciones con esfuerzos moderados a altos. Además, muchos de los metales no ferrosos tienen

propiedades adicionales a las mecánicas que los hacen ideales para aplicaciones en las que el acero sería inapropiado. Por ejemplo, el cobre tiene una de las resistividades más bajas entre los metales, y se usa ampliamente para fabricar conductores eléctricos. El aluminio es un conductor térmico excelente, y sus aplicaciones incluyen intercambiadores de calor y trastos de cocina. También es uno de los metales a los que se le da forma con mayor facilidad y por esa razón se le valora mucho. Los metales no ferrosos comunes tienen su propia combinación de propiedades que los hacen atractivos para una variedad de aplicaciones.

2.1.11 El Aluminio y sus Aleaciones.

El aluminio y el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se les especifique en aplicaciones de ingeniería. El aluminio es el tercer elemento más abundante en la Tierra (después del oxígeno y del silicio), pero hasta finales del siglo XIX, era costoso y difícil de producir (Askeland, 2010)

El aluminio tiene mucha conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un metal muy dúctil y es notable la capacidad que tiene para adquirir la forma deseada. El aluminio puro tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alea y tratar térmicamente para competir con ciertos aceros en especial cuando el peso es una consideración importante.

El sistema de nomenclatura para el aluminio es un código numérico de cuatro dígitos. El sistema tiene dos partes, una para el aluminio forjado y otra para los aluminios fundidos. La diferencia es que para estos últimos se emplea un punto decimal después del tercer dígito. En la Tabla 3 se presentan las designaciones.

Tabla 3. Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99.0% o mayor	1XXX	1XX.X
Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es)		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

Fuente: Elaborado en base a (Groover, 2007).

2.1.12 Fundamentos de la Fundición de Metales.

Los procesos de fundición y moldeo dominan la categoría de procesos de manufactura en los que el material de inicio se encuentra en forma líquida o en condición muy plástica, y se crea un objeto a través de su solidificación. En la Figura 14 se muestran los diferentes procesos de solidificación.

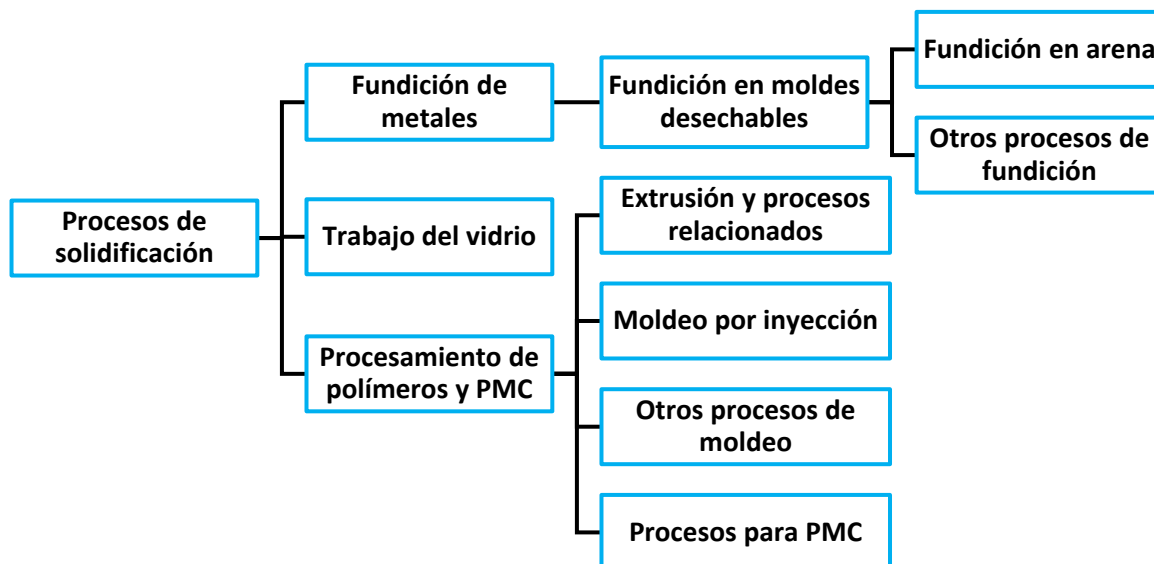


Figura 14: Clasificación de los procesos de solidificación.
Fuente: Elaborado en base a (Groover, 2007).

La fundición es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término

fundición también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. El principio de la fundición parece sencillo: se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa.

La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. El término **lingote** por lo general se asocia con las industrias primarias de metales; describe un fundido grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como rolado o forjado. Una **fundición de forma** involucra la producción de formas más complejas que están mucho más cerca de la forma final que se desea que tenga la pieza o producto.

El método de fundición es uno de los procesos de manufactura más versátiles (Groover, 2007). Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de forma neta. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de forma casi neta, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.

Asociadas con la fundición también hay algunas desventajas, distintas para métodos diferentes. Entre estas se incluyen limitaciones de las propiedades mecánicas; porosidad, exactitud dimensional y acabado de la superficie defectuosa para ciertos procesos de fundición; peligros para la seguridad de los seres humanos cuando procesan metales fundidos y problemas ambientales.

2.1.13 Fundición Centrifuga.

La fundición centrifuga se refiere a varios métodos de fundición en los que el molde gira a gran velocidad de modo que la fuerza centrífuga distribuye el metal derretido a las regiones externas de la cavidad del troquel (Hasegawa, 2004).

En la fundición centrifuga, se vierte metal fundido a un molde rotatorio para producir una pieza tubular. Algunos ejemplos de las piezas que se fabrican con este proceso incluyen tuberías, tubos, boquillas y anillos.

La orientación del eje de rotación del molde es horizontal o vertical, y el más común es el primero. En la Figura 15 se puede apreciar el proceso de fundición centrifuga con eje de rotación horizontal.

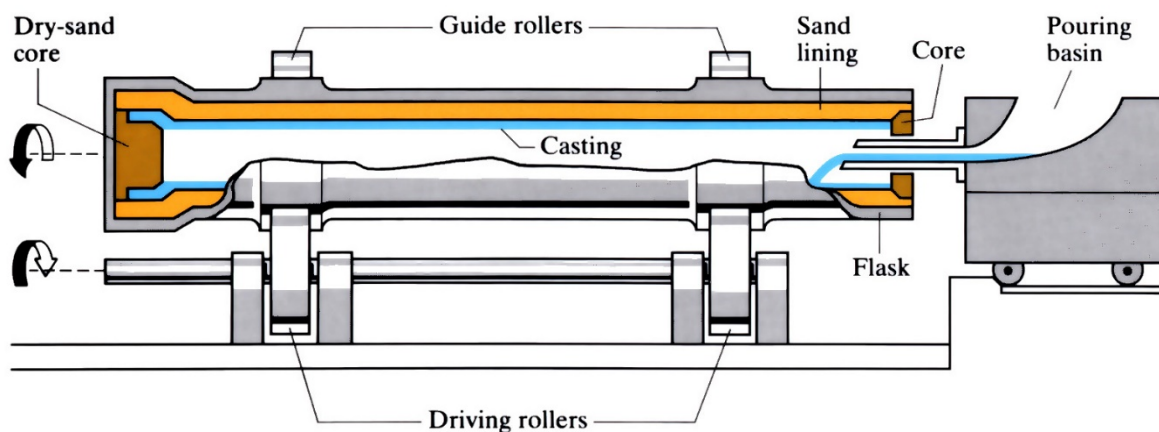


Figura 15: Fundición Centrifuga con molde horizontal.
Fuente: Obtenido de <https://www.open.edu>.

2.1.14 Fundición por Revestimiento (*Investment Casting*).

En la fundición por revestimiento, se elabora un modelo de cera y se recubre con un material refractario para formar el molde, después de lo cual se derrite la cera antes de verter el metal fundido (Banerjee, 2019). El término revestimiento proviene de una de las definiciones menos familiares de la palabra revestir, que es “cubrir por completo”, lo que se refiere al recubrimiento del material refractario alrededor del modelo de cera. Es un proceso de precisión para fundir, debido a que es capaz de generar fundidos de gran exactitud y detalles intrincados. Los pasos para realizar el proceso de fundición por revestimiento se muestran en la Figura 16.

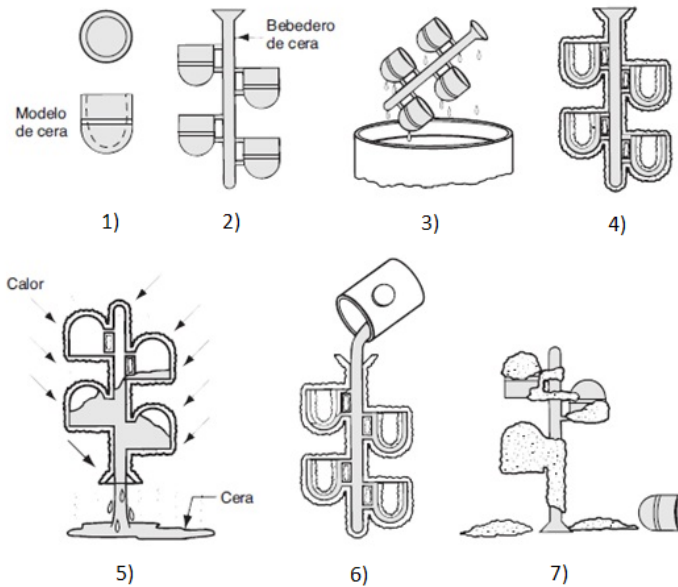


Figura 16: Proceso de fundición por revestimiento.
Fuente: Obtenido de (Groover, 2007).

De la figura anterior, los pasos son:

1. Se producen los modelos de cera.
2. Se unen varios modelos a un bebedero para formar un árbol con ellos.
3. El árbol de modelos se recubre con una capa delgada de material refractario.
4. Se forma el molde con el árbol recubierto con material refractario suficiente para volverlo rígido.
5. Se mantiene el molde en posición invertida y se calienta para fundir la cera y permitir que salga la cavidad.
6. El molde se precalienta a temperatura elevada, lo que garantiza que todos los contaminantes del molde se eliminen; se vierte el metal fundido y se solidifica.
7. Se rompe el molde del fundido terminado y se separan las partes del bebedero

Las ventajas de la fundición por revestimiento incluyen las siguientes:

- Es posible fundir piezas de gran complejidad y detalle.
- Se puede tener mucho control dimensional, tolerancias de ± 0.075 mm (± 0.003)
- Se tiene un acabado bueno de la superficie.
- Por lo general se puede recuperar la cera para volver a emplearla
- Normalmente no se requiere maquinado adicional; éste es un proceso de forma neta.

Debido a que en esta operación de fundido están involucradas muchas etapas, es un proceso relativamente caro. Lo normal es que las piezas elaboradas por medio de fundición por revestimiento sean pequeñas, aunque se ha llegado a fundir con éxito piezas con formas complejas que pesan hasta 75 libras. Todos los tipos de metales, incluidos aceros, aceros inoxidables y otras aleaciones de temperatura alta, son susceptibles de usarse en la fundición por revestimiento.

2.1.15 Fundición en arena.

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, niquel y titanio. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande y en cantidades de producción que van desde uno a millones (Groover, 2007).

La fundición en arena, también conocida como fundición en molde de arena, consiste en verter metal derretido en un molde de arena y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar el fundido. El fundido debe limpiarse e inspeccionarse, y a veces se requiere darle tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas. La cavidad del molde de arena se forma por la compresión de arena alrededor de un modelo, y luego se retira el modelo separando el molde en dos mitades. De esta descripción breve, se considera que la fundición con arena no sólo es la operación de fundido en sí, sino también la fabricación del modelo y molde. La secuencia de producción se presenta en la Figura 17.

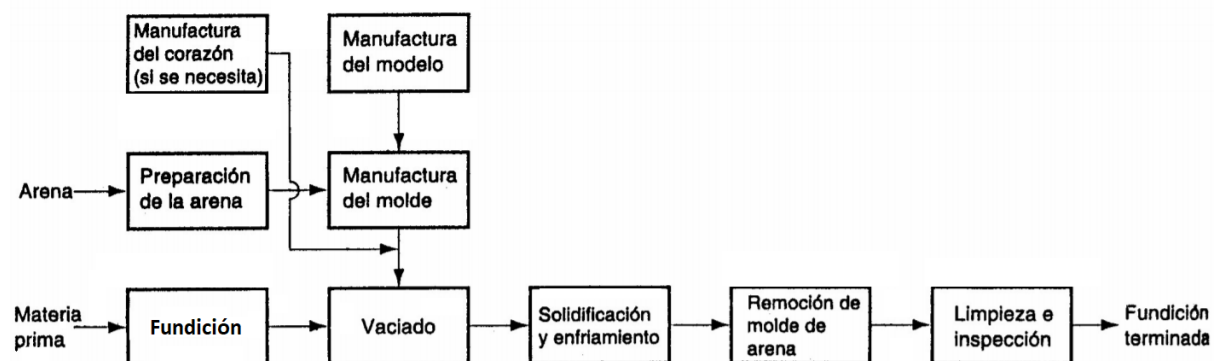


Figura 17: Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena.
Fuente: Obtenido de (Groover, 2007).

2.1.16 Porosidad Gaseosa.

Muchos metales disuelven una gran cantidad de gas cuando se funden. Por ejemplo, el aluminio disuelve hidrogeno. Sin embargo, cuando el aluminio se solidifica sólo se retiene una pequeña fracción del hidrogeno, dado que la solubilidad es notablemente menor. El exceso de hidrogeno que no puede incorporarse en la estructura cristalina del metal o aleación solida forma burbujas que pueden quedar atrapadas en el metal sólido, produciendo porosidad gaseosa (Askeland, 2010).

Se puede minimizar la porosidad gaseosa en las piezas coladas manteniendo baja la temperatura del líquido, añadiendo materiales al líquido para que se combinen con el gas y formen un sólido o asegurándose que la presión parcial del gas permanece baja.

2.1.17 Cierre en fríos (Cold Shuts).

Ocurren cuando dos porciones del metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura. Sus causas son similares a las de los vacíos (Askeland, 2010)

2.2 Teoremas y Leyes.

2.2.1 Teorema de Bernoulli.

Hay varias relaciones que gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de paso y dentro del molde. Una importante es el teorema de Bernoulli, que establece que la suma de las energías (piezométrica, presión, cinética y fricción) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye son iguales. Esto se escribe de la forma siguiente:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad [2]$$

Donde:

h= altura piezométrica.

p= presión del líquido.

ρ = densidad.

v= velocidad de flujo.

g= constante de aceleración de la gravedad.

F= pérdidas piezométricas debidas a la fricción.

La ecuación de Bernoulli se simplifica de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción y se supone que entre tanto el sistema permanece a presión atmosférica, entonces la ecuación se reduce a:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad [3]$$

Esto se utiliza para determinar la velocidad del metal derretido en la base del bebedero. Se define como punto 1 la parte superior de la mazarota, y punto 2 la base. Si el punto 2 se usa como el plano de referencia, entonces la altura piezométrica en él es igual a cero ($h_2 = 0$) y h_1 es la altura (longitud) de la entrada. Cuando el metal se vierte en el embudo y fluye por el bebedero, su velocidad inicial en la parte superior es de cero ($v_1 = 0$). Así, la Ecuación 3 se simplifica aún mas y queda:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad [4]$$

Que se resuelve para la velocidad del flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \quad [5]$$

2.2.2 Ley de Continuidad.

Otra relación importante durante el vertido es la ley de continuidad, que establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través del líquido. El gasto volumétrico es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del líquido que fluye (Groover, 2007). La ley de la continuidad se expresa como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad [6]$$

Donde Q= gasto volumétrico; v= velocidad; A=área de la sección transversal del líquido; y los subíndices se refieren a dos puntos cualesquiera del sistema de flujo. Así, un incremento del área da lugar a una disminución de la velocidad y viceversa.

Si se supone que el vaciadero que va de la base del bebedero a la cavidad del molde es horizontal (y por lo tanto la altura piezométrica h es la misma que en la base del bebedero), entonces el gasto volumétrico a través del paso hacia la cavidad del molde permanece igual a $v \cdot A$. En consecuencia, es posible estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de volumen V, así:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad [7]$$

Donde T_{MF} = tiempo de llenado del molde; V = volumen de la cavidad del molde; y Q = gasto volumétrico. El tiempo de llenado del molde calculado por medio de la Ecuación 7 debe considerarse un tiempo mínimo. Esto se debe a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible obstrucción del flujo en el sistema de paso.

2.2.3 Ecuaciones de Navier-Stoke.

Las ecuaciones de Navier-Stoke, describen como la velocidad, presión, temperatura y densidad de un fluido en movimiento están relacionadas. Estas ecuaciones fueron derivadas independientemente por G.G Stokes en Inglaterra, y por M. Navier en Francia a principios de los años 1800. Las ecuaciones son una extensión de las ecuaciones de Euler e incluyen los efectos de la viscosidad en el fluido (NASA, 2015)

Las ecuaciones de Navier-Stokes son el resultado de aplicar la conservación del momento lineal a un volumen de control diferencial a través de cada dirección del sistema de coordenadas elegido.

Ademas de las fuerzas en la superficie que actúan en la superficie en un elemento de flujo, hay fuerzas en el cuerpo que actúan directamente en la masa del elemento, por ejemplo, fuerza de gravedad, centrífuga y electromagnética (Brij, 2018). Para un elemento de flujo estacionario, la suma de estas fuerzas se añade a la razón de cambio del momento del flujo a travez del elemento, el cual es representado por la parte izquierda de la Ecuación 8 mostrada a continuación:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{q}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x \\
 \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{q}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y \\
 \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{q}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z
 \end{aligned} \tag{8}$$

Los esfuerzos viscosos están relacionados con los rangos de deformación utilizando las leyes de deformación de Stokes, las cuales consisten en tres postulaciones:

El esfuerzo es lineal a la razón de deformación.

El fluido no presenta una dirección preferencial de deformación.

Cuando la razón de deformación se reduce a cero (flujo estacionario) el esfuerzo normal debe convertirse igual y opuesto a la presión estática del fluido local.

$$\begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{q} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{q} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{q} \end{bmatrix} \quad [9]$$

Recientemente, computadoras de alta velocidad han resuelto aproximaciones a las ecuaciones usando una variedad de técnicas como diferencial finito, volumen finito, elemento finito y métodos de espectros. A esta área de estudio se le llama dinámica de fluidos computacional o CFD (por sus siglas en inglés)

2.3 Casos de Estudio

2.3.1 Simulación de Fundición: 100NB Flange.

En este caso de estudio, se produce un flange 100NB (Nominal Bore) con peso de 6.85 kgs de acero inoxidable austenítico por medio del proceso de investment casting (Banerjee, 2019). El objetivo es estudiar los efectos que generan el cambiar el tamaño y forma del *gate*.

El modelo que se muestra en la Figura 18 fue creado utilizando un software CAD, después, se ingresó este modelo al software de simulación AutoCAST-XI. En este software se definió la temperatura de vaciado como de 1520°C y un tiempo de vaciado de 22 segundos. El metal fundido se vacía en la cavidad a una velocidad de flujo de 40-100 m/s.

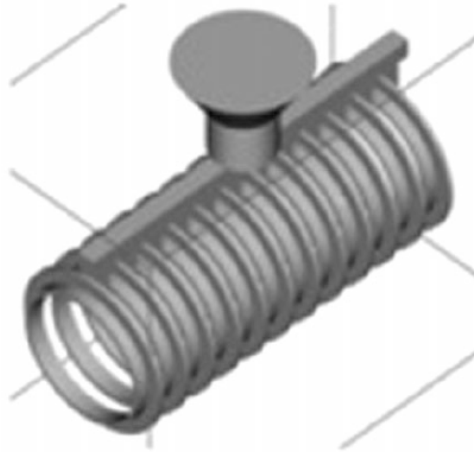


Figura 18: Modelo 3-D del modelo de “100NB flange” con *gate* plano.
Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

Para la primera iteración, se toma a consideración un tamaño de *gate* de 15 x 15 x 300. El resultado de la primera iteración se muestra en la Figura 19.

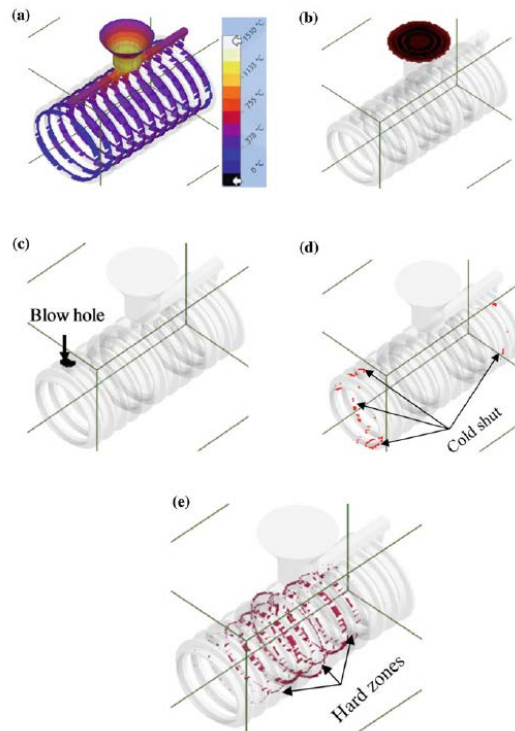


Figura 19: Defectos de casting simulados para *gate* conico de tamaño 15 x 15 x 300.
Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

Esta figura muestra que no hay una probable porosidad de contracción, existe agujeros en el pasador Figura 20b, pero la posibilidad de cierres en frio (Figura 20d) y zonas endurecidas (Figura 20e) es mayor. La Figura 19a muestra la condición post-solidificación de la simulación donde los colores violeta y azul indican zonas de congelamiento más rápidas, mientras que los colores blancos y amarillentos significan

zonas de enfriamiento más lentas. Las zonas blanquecinas resultaran en encogimientos. La Figura 19e muestra que también hay zonas duras presentes en el casting. Las zonas duras son generalmente causadas por impurezas en el material o aglomeración de elementos de aleación que se agregan en pequeño porcentaje.

Después de esta primera simulación, Banerjee, S. (2019), corre una segunda simulación, pero ahora utilizando un tamaño de *gate* de 20 x 20 x 300. Los resultados se muestran en la Figura 20.

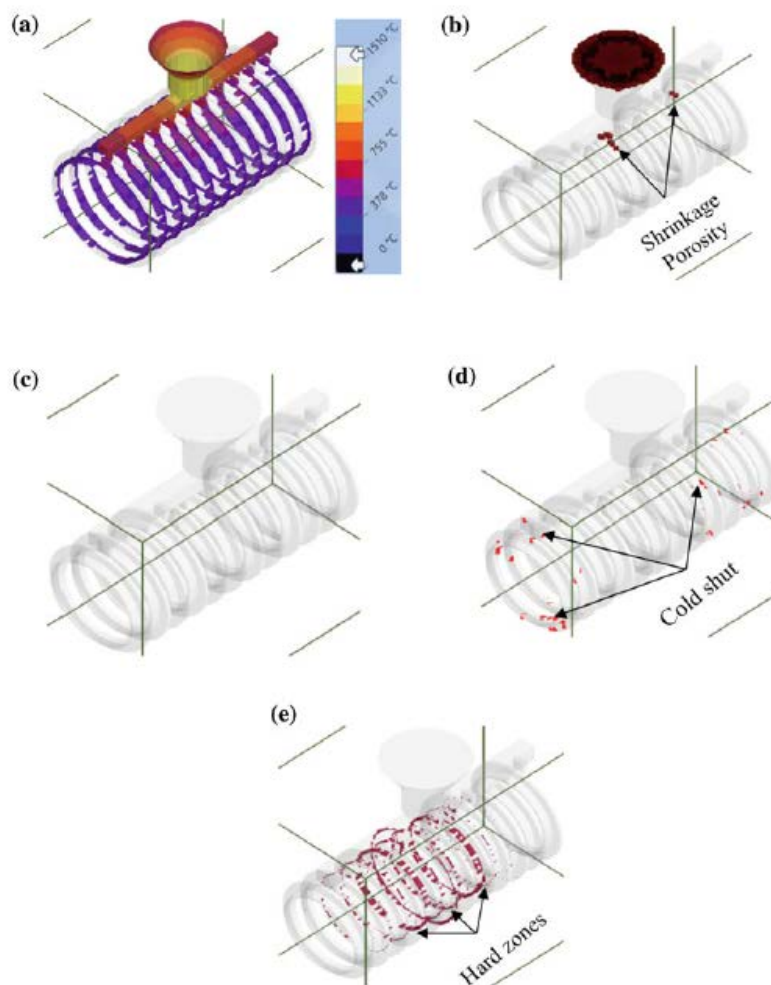


Figura 20: Defectos de casting simulados para gate plano de tamaño 20 x 20 x 300.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

La Figura 21a muestra encogimiento de material cerca del *riser*, lo que indica que el diseño de este no cumple correctamente los requerimientos de alimentar el material.

Gracias a estos estudios se pudieron identificar posibles defectos en la pieza de fundición deseada al utilizar diferentes tamaños y formas del *gate*.

2.3.2 Simulación de Fundición: 32 NB Swivel Flange

En este caso de estudio, Banerjee, S. (2019), realiza la simulación de fundición para un swivel flange de acero inoxidable A304 seleccionando el proceso de investment casting. El objetivo fue analizar los efectos de la temperatura de vaciado y el método de diseño para porosidad.

La Figura 21, muestra la condición de llenado a diferentes rangos (10, 50 y 100%). La Figura 21a muestra que el metal está entrando al árbol de fundición a través del gate. Es importante conocer cómo se llena el molde ya que la temperatura de fundición empezara a disminuir cuando entre en contacto con otra superficie más fría. En la Figura 21b se puede apreciar que en un rango de 50%, los componentes ubicados en la parte de abajo se empiezan a solidificar, lo que implica que la temperatura ha bajado drásticamente. Por lo que las partes más delgadas del componente tendrán menos porosidad comparadas con las secciones más gruesas de la parte.

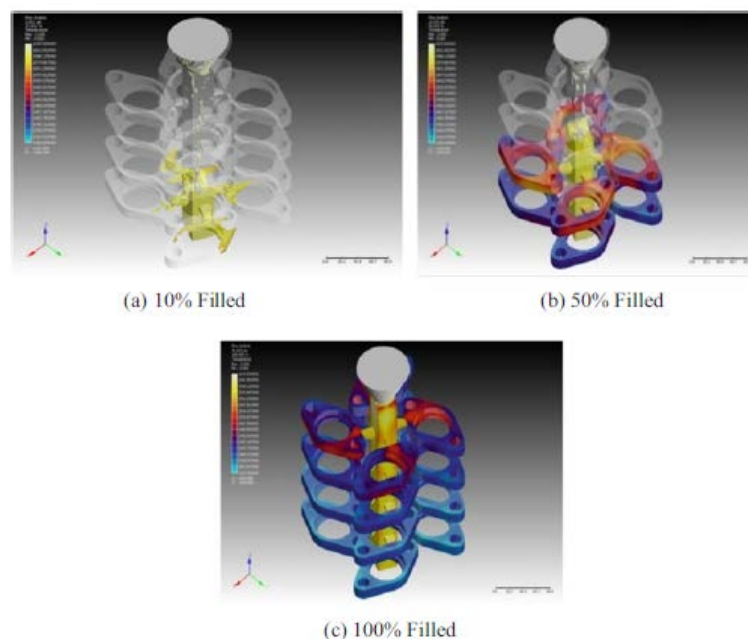


Figura 21: Condición de llenado a diferentes rangos.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 22. Estos resultados muestran que la porosidad está presente en cada uno de los componentes y que el volumen de porosidad en la parte de abajo es mayor comparado al de arriba.

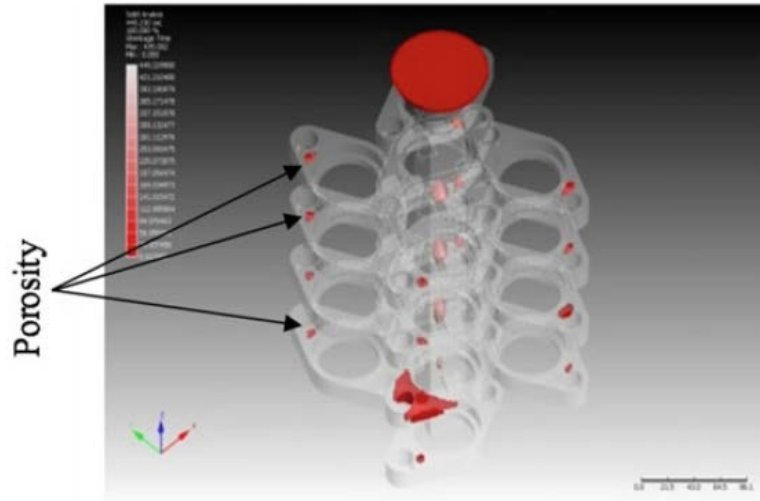


Figura 22: Porosidad en Swivel.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

Para reducir la porosidad, Banerjee, S. (2019) creó una segunda iteración de simulación, donde lo que hizo fue reducir la temperatura del metal vaciado, ya que menciona que entre mayor temperatura tenga el material, más genera gases y por lo tanto genera también más porosidad.

Al reducir la temperatura de vaciado de 1615 °C a 1550 °C se logró reducir la porosidad, tal y como se muestra en la Figura 23.

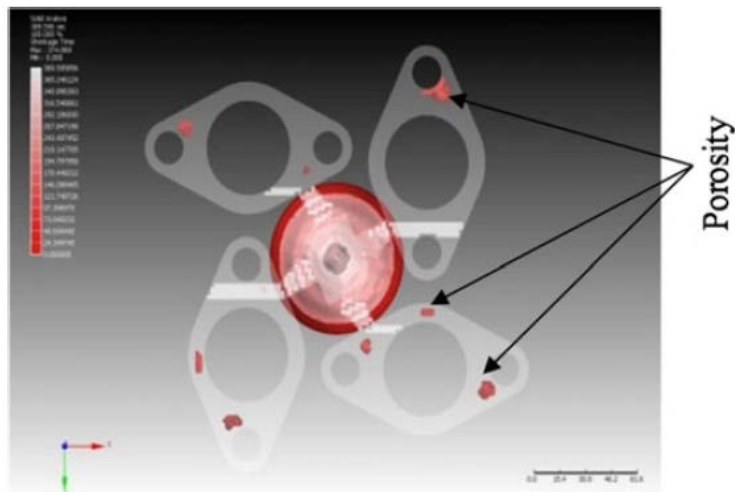


Figura 23: Vista superior representando porosidad.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

2.3.3 Simulación de Fundición: 32 Pistol Body

En este caso de estudio, Banerjee, S. (2019), estudió el efecto de la temperatura de vaciado y el método de diseño para desarrollar una fundición libre de defectos.

En la primera iteración, se colocaron 8 piezas de “*Pistol Body*” en el árbol de fundición, la temperatura de vaciado seleccionada fue de 1550 °C y un tiempo de vaciado de 22 s. Los resultados se muestran en la Figura 24.

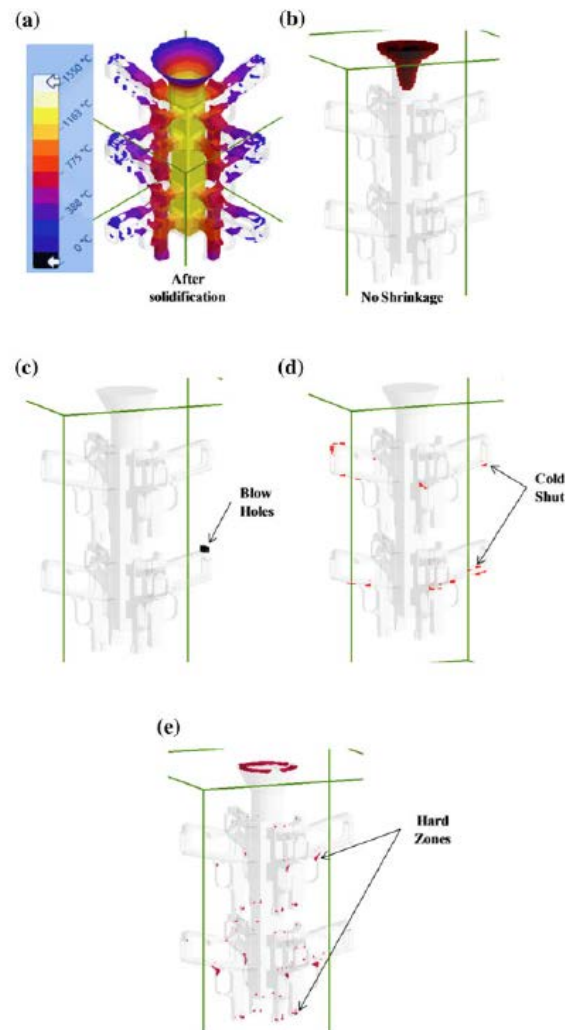


Figura 24: Simulación de fundición para árbol con 8 piezas, temperatura de vaciado 1550 °C.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

Estos resultados muestran que el arreglo de fundición no genera porosidad (Figura 24b), sin embargo, si hay defectos de *blow holes* (Figura 24c), *cold shuts* (Figura 24d) y *hard zones* (Figura 24e). Por lo que el autor decide realizar otra iteración en la cual cambia la temperatura de vaciado a 1600 °C. Los resultados de esta iteración se muestran en la Figura 25.

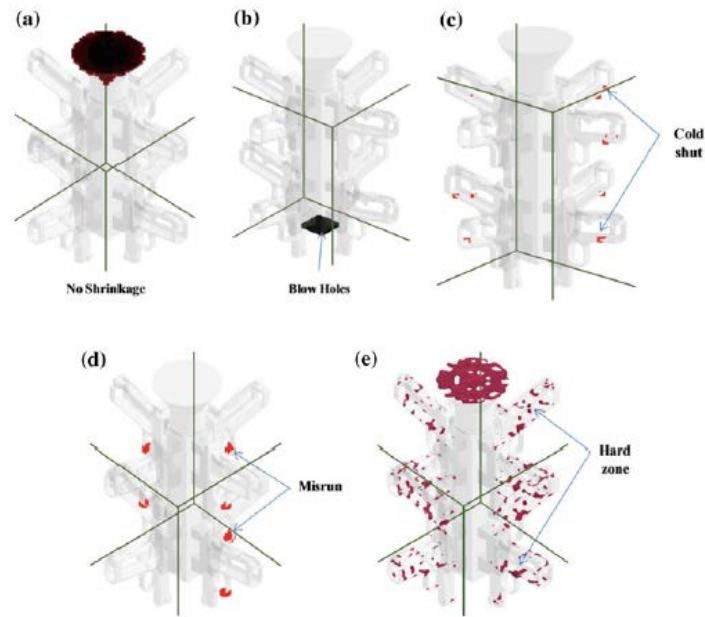


Figura 25: Simulación de fundición para árbol con 8 piezas, temperatura de vaciado 1600 °C.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019)

Aquí se puede apreciar como no hay defectos de porosidad (Figura 25a), pero si hay *blowhole* en el *gae*. También se observa que hay *cold shut* (Figura 25c), *misrun* (Figura 25d) y *hard zones* en los componentes de fundición. Debido a esto se corrió una tercera simulación con solo 4 piezas a fundir en vez de 8 y manteniendo la misma temperatura de vaciado de 1600 °C. Los resultados se muestran en la Figura 26.

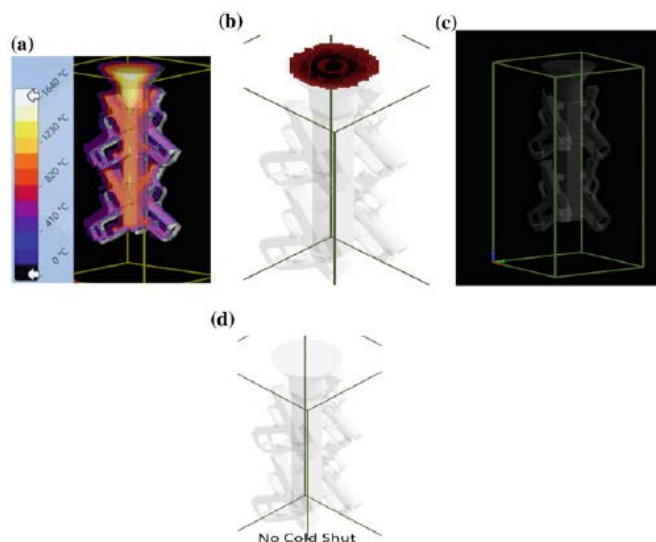


Figura 26: Simulación de fundición para árbol con 4 piezas, temperatura de vaciado 1600 °C.

Fuente: Obtenido de (Banerjee, 2019).

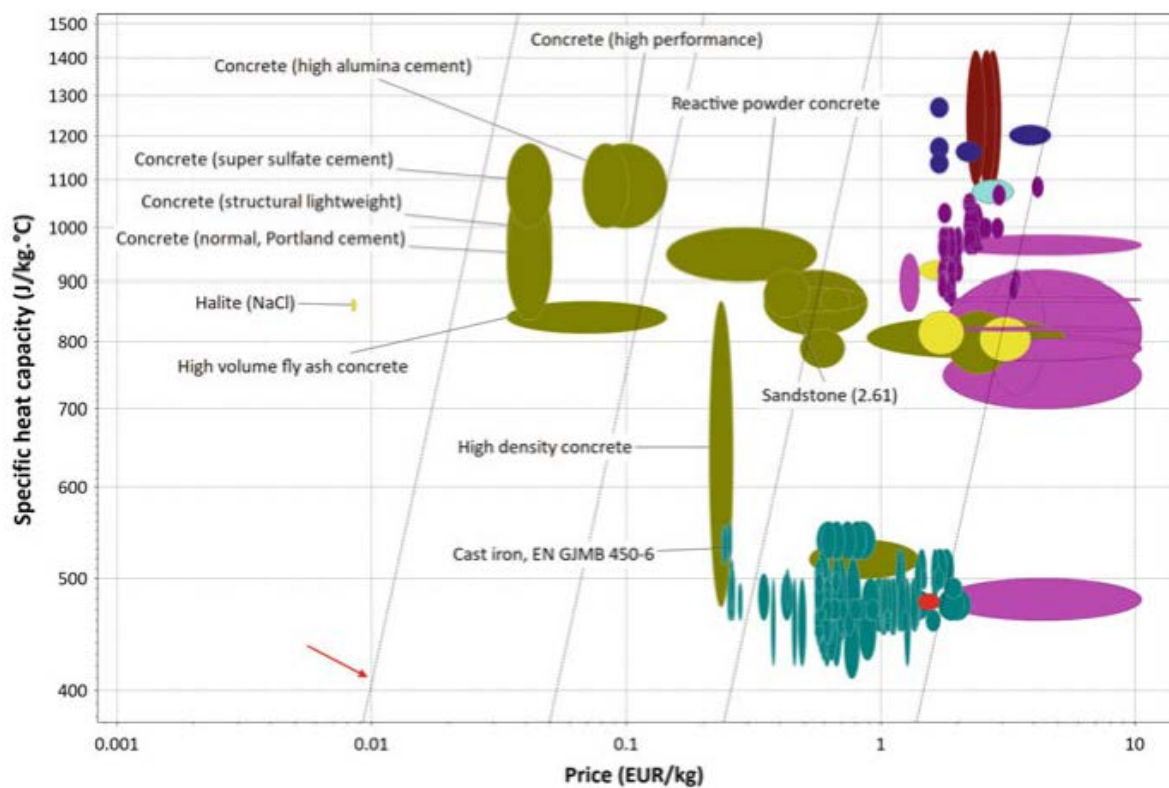
En estos resultados se puede apreciar que, con los últimos cambios realizados, ya no aparecen defectos de algún tipo.

2.3.4 Selección de Material: “Long-Term Energy Storage”

En este caso de estudio, Segarra, Barreneche, Calderán y Fernandez (2019) seleccionaron materiales los cuales pudieran almacenar energía.

Definieron que los materiales deberían tener alta densidad de energía, alta conductividad térmica, que debían soportar temperaturas mayores a 150-200 °C sin sufrir algún cambio químico o físico y sobre todo, debían de tener un bajo costo.

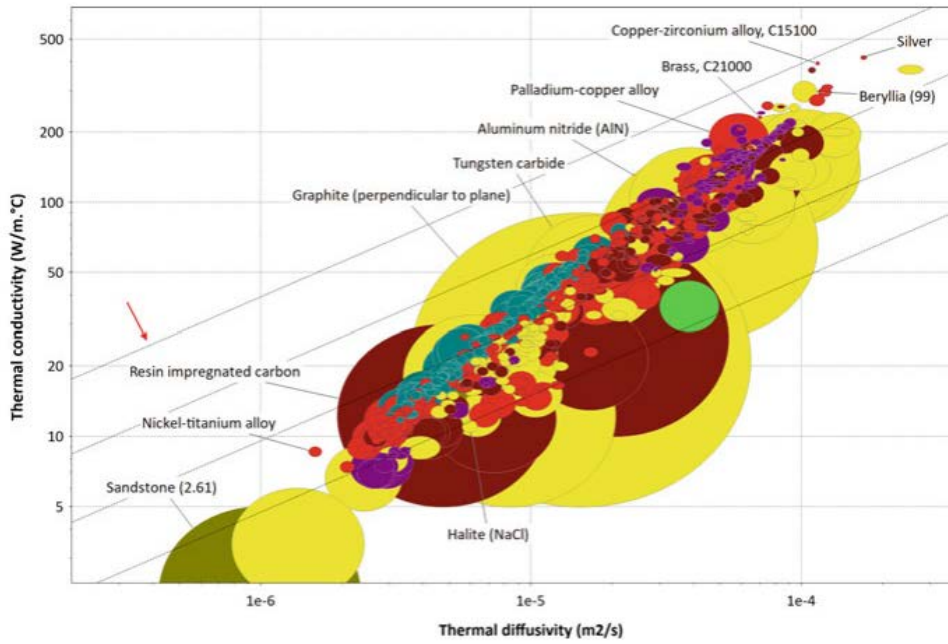
Con estos datos fueron capaces de crear la siguiente gráfica (Gráfica 4) utilizando el software CES (*Cambridge Engineer Selector*).



Gráfica 4: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

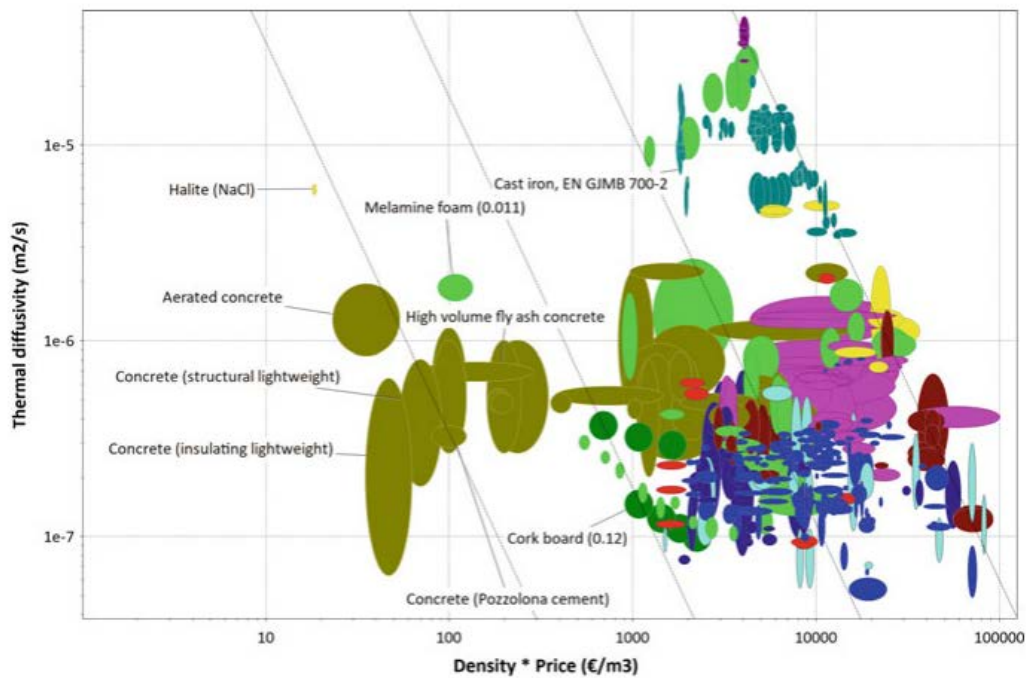
Después, definieron las propiedades para que el material tuviera alta difusividad térmica y así poder almacenar calor y liberarlo fácilmente, también crearon curvas dentro de las gráficas las cuales representan a la conductividad térmica del material dividida entre la difusividad térmica y obtuvieron la Gráfica 5.



Gráfica 5: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor, maximizando almacenamiento de calor.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

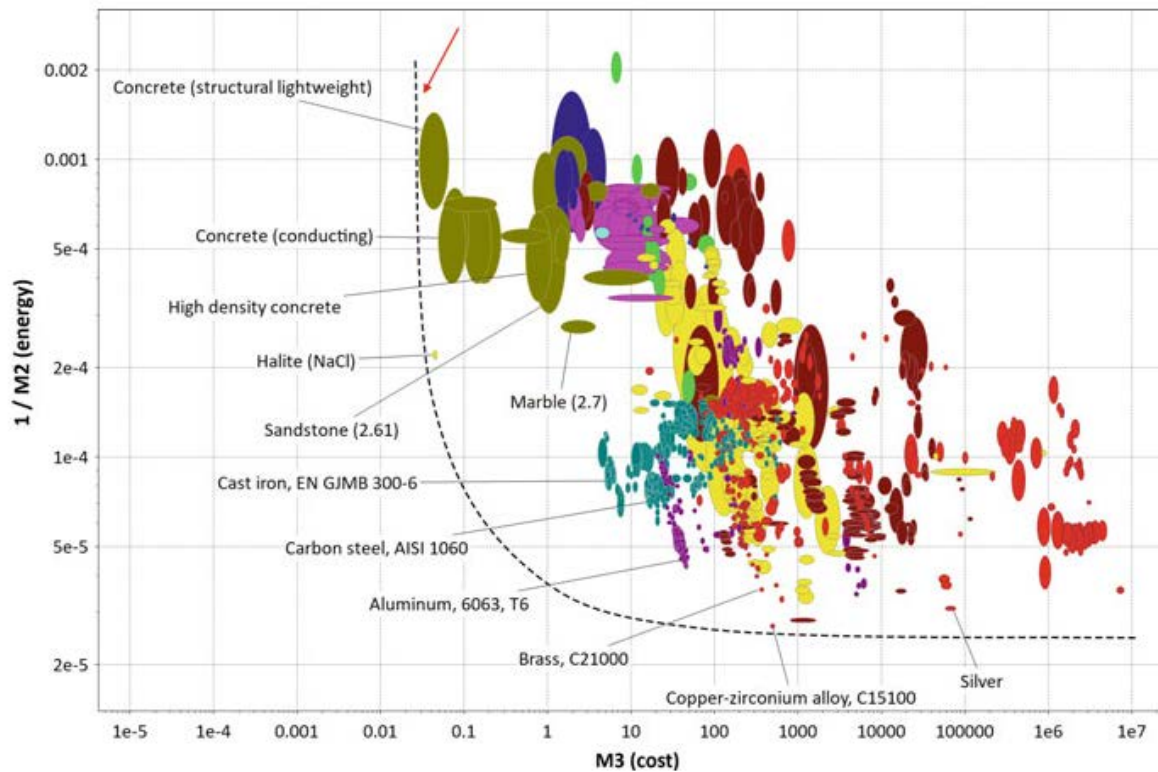
Después crearon una segunda curva utilizando costos, masa, densidad y difusividad térmica obteniendo la siguiente gráfica (Gráfica 6):



Gráfica 6: Materiales a ser utilizados como materiales sensibles a almacenar calor, minimizando costo.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

Al combinar ambas curvas en una sola gráfica, se puede obtener una curva la cual represente la relación de materiales con mejor capacidad de almacenamiento y liberación de energía con los materiales más baratos. La gráfica resultante (Gráfica 7) con esta curva se muestra a continuación:



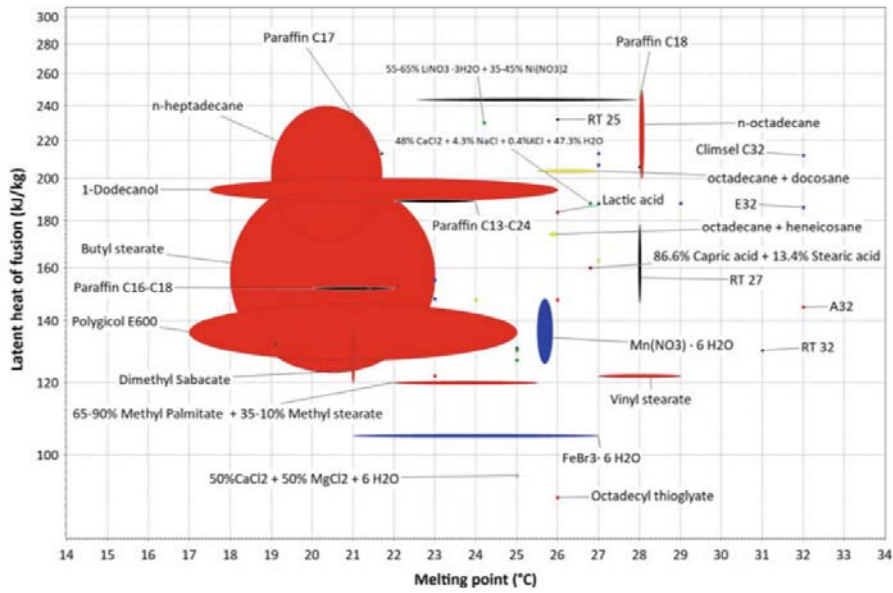
Gráfica 7: Materiales a ser utilizados como sensibles a almacenamiento de calor para maximizar el almacenamiento de calor y minimizar costo.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

Concluyendo en que los mejores materiales a seleccionar se encontrarían cerca de esta última curva que relaciona costo con funcionamiento, obteniendo materiales como aluminio 6061, concreto, plata, cobre, entre otros.

2.3.5 Selección de Material: “*Low Temperature PCM – Building Application*”

En este caso de estudio, Segarra et al. (2019) seleccionaron el mejor material en base a cuál presentaba el valor más grande para un cambio de fase de entalpia. Para esto crearon la Gráfica 8, donde se muestra el calor latente de fusión contra la temperatura de fundición para todos los materiales con cambio de fase disponibles. El rango de temperatura de trabajo definido para esta aplicación fue entre 18 y 32 °C.

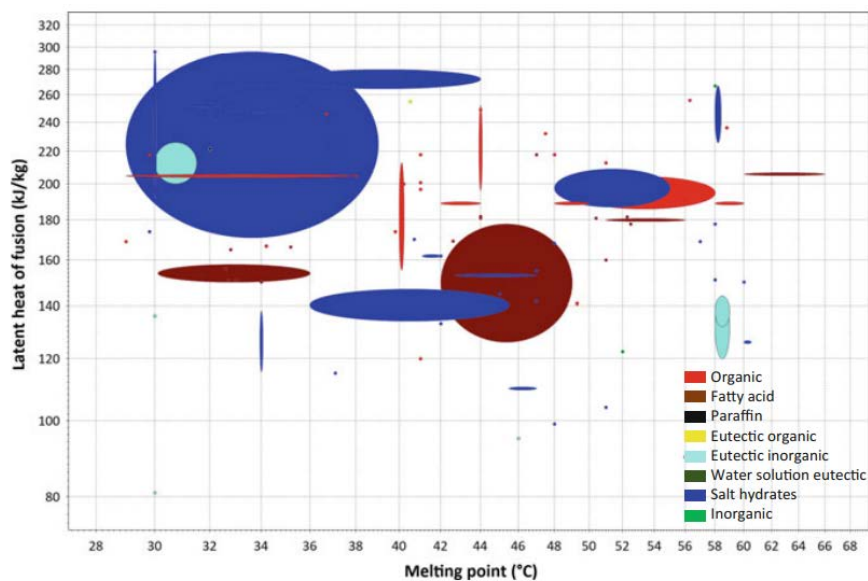


Gráfica 8: Materiales a ser utilizados como PCM para mejorar el confort térmico en edificios cerrados.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

Concluyeron que los mejores materiales para este sistema se pueden encontrar en la parte superior de la gráfica, los cuales son *organic paraffin wax*, *fatty acids* y algunas sales de hidratos.

Por otra parte, en sistemas de agua caliente, la temperatura de servicio está entre 45 y 65 °C. Los materiales dentro de este rango se muestran en la Gráfica 9. Donde concluyen que los mejores son los de la parte de arriba, los cuales son los hidratos de sales.



Gráfica 9: Materiales a ser utilizados como PCM para agua caliente doméstica en edificios.

Fuente: Obtenido de (Segarra, 2019).

Capítulo 3. Metodología.

3.1 Metodología General.

La metodología para la elaboración de este proyecto de investigación es de tipo mixto, ya que contempla en su desarrollo elementos cualitativos y de medición. De manera general, esta investigación está dirigida a lograr los objetivos generales de la investigación dividiéndose en dos bloques:

1. La selección de los materiales más adecuados para la fabricación del plenum, que cumplan con las propiedades físicas y mecánicas necesarias para satisfacer los requerimientos y condiciones de frontera establecidos por Gulfstream.
2. La determinación de un proceso de manufactura por fundición para la propuesta del modelo 3D del plenum del Gulfstream V que sea viable y eficiente.

3.2 Procedimiento.

Esta investigación se llevará a cabo dividiendo el procedimiento en dos bloques generales, donde cada bloque estará enfocado en desarrollar cada uno de los objetivos generales del proyecto. Dentro de estos bloques se definirán las fases necesarias para su realización, además, cada fase estará integrada por diferentes actividades a realizar para cumplir con el objetivo específico de cada fase.

En la Figura 27, se muestra el procedimiento definido para el **primer bloque** relacionado con la selección de un nuevo material.



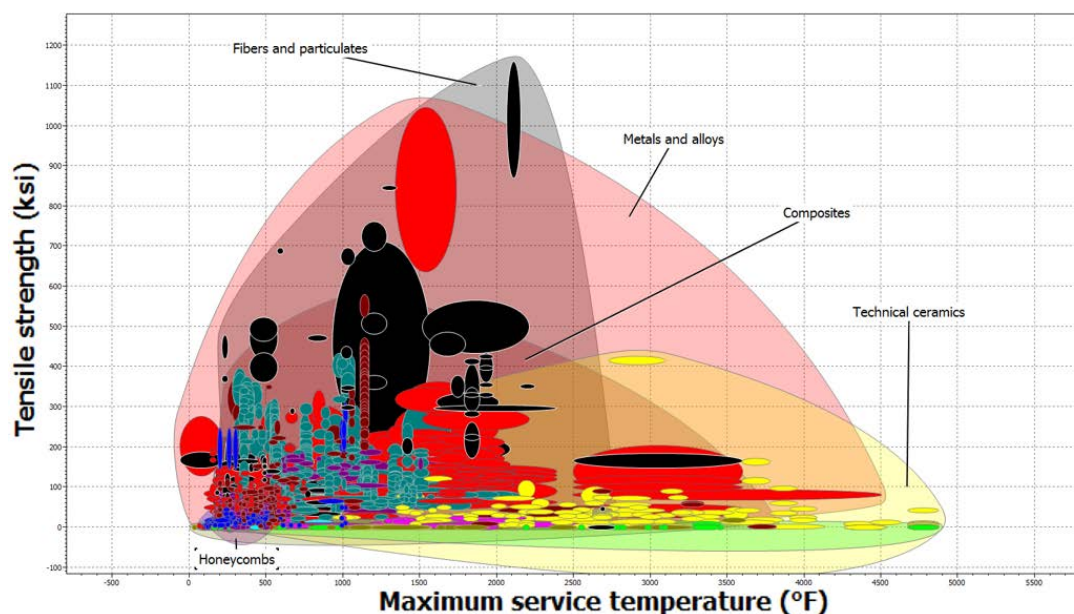
Figura 27. Diagrama de Fases para el Bloque 1.
Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo de este **Bloque 1**, se están considerando 4 fases:

1. Definición de propiedades necesarias: en esta actividad se busca definir las propiedades mecánicas, térmicas y físicas necesarias, además de las condiciones de temperatura, humedad y exposición a fluidos a las que se encuentra expuesto el *plenum*. Las propiedades mecánicas de los materiales serán adquiridas al identificar los esfuerzos máximos obtenidos del estudio de análisis estructural, en el cual se consideraron todas las fuerzas y momentos que generan esfuerzos en el *plenum*. Las propiedades térmicas de los materiales, se identificarán al estudiar la hoja de datos que fue creada al momento de probar físicamente el sistema de control ambiental, la cual cuenta con resultados obtenidos de diferentes pruebas, donde se registraron los valores de velocidad del fluido, temperatura, presión y humedad para cada uno de los componentes del sistema. Las propiedades físicas de los materiales, serán obtenidas mediante el análisis de geometría de los modelos 3D generados, utilizando el software de diseño NX para medir el volumen de material necesario para el diseño del *plenum*. Las condiciones de operación

del plenum, serán obtenidas de las pruebas de calificación para el ensamble de control ambiental y también de igual manera que las propiedades térmicas, se utilizará la hoja de datos de las pruebas realizadas al ECS.

2. Determinación de posibles materiales: en esta actividad se busca encontrar todos los materiales que cumplan con las propiedades físicas, mecánicas y térmicas necesarias, además de que puedan soportar las condiciones de funcionamiento mencionadas anteriormente, para esto se hará uso de un software de selección de materiales, "CES Selector", el cual cuenta con una amplia base de datos de materiales, aproximadamente cuatro mil materiales diferentes dentro de las diferentes familias, las cuales son: metales, fibras, materiales compuestos, materiales naturales y polímeros. Dentro de este software se pretenden aplicar límites de valores en las diferentes propiedades físicas, mecánicas, térmicas y en otras características de los materiales, para poder así descartar a aquellos que no cumplan con las características y propiedades estipuladas. El uso de graficas de comparación como la que se observa en la Gráfica 10, donde se aprecien los diferentes materiales en relación a diferentes parámetros, en este caso Temperatura máxima de servicio (eje x) contra el esfuerzo ultimo (eje y) serán utilizadas para facilitar la selección y comparación de materiales.



Gráfica 10. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles.
Fuente: Elaboración propia.

3. Selección de materiales óptimos: en esta actividad se elegirán los materiales más óptimos dentro de todos los posibles encontrados en la fase anterior, debido a que es muy probable que miles de materiales cumplan con los primeros requisitos, será necesario aplicar más filtros de búsqueda en el software CES. Estos nuevos filtros estarán basados en necesidades específicas tanto de Honeywell como de Gulfstream, como pueden ser precio, disponibilidad del material o métodos de manufactura. Al aplicarse estos filtros, se realizarán nuevas graficas de comparación entre los materiales resultantes, de esta manera se podrá obtener un grupo pequeño de posibles materiales a elegir.

4. Definición de beneficios y mejoras: el objetivo de esta actividad es definir qué beneficios trae consigo la elección del nuevo material y resaltar en que aspectos es mejor al anterior. Para lograr este objetivo, se compararán todas las propiedades y características más relevantes de el o los materiales elegidos, contra las propiedades y características del material que se utiliza actualmente para la fabricación del *plenum*. Se hará uso de la base de datos de materiales que Honeywell tiene, además de la base de datos del software CES, para obtener todas las características posibles de los materiales elegidos.

En la Figura 28, se muestra el procedimiento definido para el **segundo bloque** cuyo objetivo está relacionado con la determinación de un proceso de manufactura por fundición.



Figura 28. Diagrama de Fases para el Bloque 2.
Fuente: Elaboración propia.

Para ello están considerándose 4 fases:

1. Definición de información necesaria: En esta actividad se busca identificar y después definir la información necesaria para poder correr una simulación por computadora del proceso de fundición. Esta información será identificada utilizando los tutoriales e información provista por la compañía Altaír, compañía encargada de la creación del software “Inspire Cast”, el cual se decidió utilizar para la realización de las simulaciones. Una vez identificadas las variables necesarias, estas se definirán mediante investigación relevante a el proceso de fundición que se va a realizar y a las características del diseño que se pretende manufacturar mediante la fundición.
2. Determinación de proceso de fundición: En esta actividad se busca encontrar el proceso de fundición más adecuado para las características de los nuevos diseños de plenum adquiridos de las áreas de investigación de diseño, además de encontrar cual es el proceso más adecuado para la compañía Honeywell. Para lograr este objetivo, se investigará en diferentes bibliografías,

libros, artículos científicos, cotizaciones de Honeywell con diferentes proveedores, la información relevante a los diferentes tipos de procesos de manufactura por medio de fundición, así como identificar también las prioridades que Honeywell tiene respecto a este proyecto y sus métodos de manufactura.

3. Simulación de proceso de fundición: En esta actividad se busca realizar una simulación por computadora del proceso de fundición para cada diseño obtenido del área de investigación de diseño. También se analizarán los resultados y en caso de detectar áreas de mejora, se optimizará el proceso y se realizará una segunda simulación. Para realizar estas actividades, se hará uso del software “Inspire Cast”, software de Altair, capaz de simular los diferentes procesos de manufactura por fundición, asignando las características principales del proceso, como son: material a fundir, velocidad de vaciado, material del *core* y tipo de proceso de fundición a analizar.
4. Definición de beneficios y mejoras: el objetivo de esta actividad es definir qué beneficios trae consigo la elección del nuevo proceso de manufactura y resaltar en que aspectos es mejor al anterior. Para lograr este objetivo, se compararán las características más relevantes de ambos procesos. Se hará uso de los datos recolectados en Honeywell sobre el proceso actual, además de información que se investigará con proveedores y en bibliografías sobre el proceso propuesto de fundición.

3.3 Planeación:

3.3.1 Entregables

A continuación, se mencionarán las actividades específicas realizadas dentro de cada una de las fases del **Bloque 1** y los entregables esperados para cada una de ellas.

Primera fase: Definición de propiedades necesarias.

Definición de propiedades mecánicas de los materiales: esta actividad tiene como entregable los valores mínimos para las propiedades mecánicas de *Yield Strength* y *Tensile Strength* del nuevo material.

Definición de propiedades térmicas de los materiales: esta actividad tiene como entregable el valor mínimo para la temperatura máxima de servicio requerida para el nuevo material.

Definición de propiedades físicas de los materiales: esta actividad tiene como entregable el rango de valores límites para la densidad requerida del nuevo material.

Definición de condiciones de operación del plenum: esta actividad tiene como entregable definir las condiciones de humedad a las que estará sometido el plenum, definirá también si es necesario contar con resistencia a la corrosión, al agua o a otras sustancias.

En resumen, el entregable para la fase 1 del primer bloque, será una tabla con las propiedades y características necesarias para el nuevo material, y sus valores límites correspondientes.

Segunda fase: Determinación de posibles materiales.

Descarte de materiales que no cumplen con los requisitos: esta actividad tiene como entregable una lista de materiales que cumplan con las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y con las condiciones de operación obtenidas de la primera fase.

Descarte de materiales no factibles: esta actividad tiene como entregable una lista de materiales que además de cumplir con los parámetros y requerimientos, sean factibles de encontrar, producir o de utilizar en el ámbito aeroespacial.

Tercera fase: Selección de materiales óptimos.

Creación de Graficas que faciliten la selección: esta actividad tiene como entregable graficas de comparación que incluyan todos los materiales encontrados factibles hasta el momento. Se graficarán los materiales en base a los diferentes parámetros requeridos, densidad contra precio y temperatura máxima de servicio contra esfuerzo de cedencia.

Selección detallada de los materiales: esta actividad tiene como entregable una lista de máximo 6 posibles materiales aptos para la fabricación del nuevo diseño del plenum.

Cuarta fase: Definición de beneficios y mejoras.

Comparación de material actual con el seleccionado: esta actividad tiene como entregable una tabla comparativa entre los diferentes materiales elegidos y el material actual. Donde se compararán las propiedades más relevantes de estos. También se hará un pequeño resumen de porque el material elegido es mejor y más redituable para la compañía.

A continuación, se mencionarán las actividades específicas realizadas dentro de cada una de las fases del **Bloque 2** y los entregables esperados para cada una de ellas.

Primera fase: Definición de información necesaria.

Definición de variables a ingresar para realizar una simulación: Esta actividad tiene como entregable todas las variables definidas necesarias para realizar una simulación por computadora del proceso de fundición utilizando el software Inspire Cast.

Preparación de los modelos 3D a analizar: El entregable de esta actividad serán los modelos de las armaduras de los *plenums*, sin características de maquinado.

Segunda fase: Determinación del proceso de fundición.

Determinación de las características de los métodos de fundición: El entregable de esta actividad son las variables definidas y sus respectivos valores, que se deben de ingresar en el software de simulación de fundición por computadora para poder realizar el análisis correctamente.

Determinación del proceso de fundición más viable para Honeywell y el proyecto: Esta actividad tiene como entregable la definición de un método de fundición, el cual será utilizado para realizar las simulaciones de fundición por computadora en ambos diseños de *plenums*.

Tercera fase: Simulación de proceso de fundición.

Creación de simulación de fundición para ambos diseños: El entregable de esta actividad es la simulación de fundición por computadora de ambos diseños, habiéndose completado sin errores y que visualmente se vea aceptable.

Análisis de resultados de la simulación: Esta actividad tiene como entregable un resumen con el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas de la actividad anterior.

Optimización de análisis de simulación: Esta actividad tiene como entregable la realización de nuevas simulaciones en caso de ser requerido, es decir, si se detectaron áreas de oportunidad al realizar la actividad anterior.

Cuarta fase: Definición de beneficios y mejoras.

Comparación de proceso actual con el seleccionado: El entregable de esta actividad es un resumen de los beneficios que trae consigo el nuevo proceso de manufactura seleccionado para la fabricación del *plenum*, también se mencionarán las ventajas de este proceso contra el que se utiliza actualmente.

3.3.2 Cronograma

En esta sección se presenta la planeación del proyecto, mostrando un cronograma con la relación de cada bloque, sus fases y sus actividades, con los tiempos estipulados para su realización y la fecha de entrega de cada una de ellas.

Tabla 4. Cronograma de actividades del proyecto.

Actividad	Duración (Horas)	Fecha de Entrega
BLOQUE 1		
Primera Fase		
Definición de propiedades mecánicas de los materiales.	4	16/02/2019
Definición de propiedades térmicas de los materiales.	6	20/01/2019
Definición de propiedades físicas de los materiales.	8	14/02/2019
Definición de condiciones de operación del plenum.	6	28/01/2019
Segunda Fase		
Descarte de materiales que no cumplen con los requisitos	14	16/02/2019
Descarte de materiales no factibles.	4	18/02/2019
Tercera Fase		
Creación de gráficas que faciliten la selección detallada de los materiales.	22	24/02/2019
Selección de materiales óptimos.	6	27/02/2019
Cuarta Fase		
Comparación de material actual con el seleccionado.	6	2/03/2019
BLOQUE 2		
Primera Fase		
Definición de variables a ingresar para realizar una simulación.	12	11/02/2019
Preparación de los modelos 3D a analizar	4	12/02/2019
Segunda Fase		
Determinación de las características de los diferentes métodos de fundición.	7	14/02/2019
Determinación del método de fundición más viable para Honeywell y el proyecto.	4	16/02/2019
Tercera Fase		
Creación de análisis de simulación de fundición para ambos diseños.	14	22/02/2019
Análisis de resultados de la simulación.	6	25/02/2019
Optimización de análisis de simulación.	10	01/03/2019
Cuarta Fase		
Comparación de proceso actual con el seleccionado	6	04/03/2019

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Recursos

El desarrollo de este proyecto fue logrado gracias a los recursos adquiridos, los cuales se enlistan a continuación.

- Software de diseño asistido por computadora (NX 10.0).
- Software de selección de materiales (CES Selector 2016) y sus tutoriales.
- Software de simulación de fundición por computadora (*Inspire Cast*) y sus tutoriales.
- 2 laptops con los softwares requeridos.
- Acceso a la base de datos de materiales dentro de Honeywell en colaboración con la empresa Granta.
- Acceso a los modelos y planos actuales del plenum del Gulfstream V, así como la información de las condiciones a las que debe de funcionar.
- Acceso a el área de fabricación de *plenums* dentro de las instalaciones del ISC (Integrated Supply Chain).
- Información relevante a la producción y costos de los *plenums* actuales y manufacturados hasta el momento.
- Acceso al área y a la instrumentación del laboratorio de materiales dentro de *Honeywell MRTC*.

Capítulo 4. Resultados.

Los resultados son presentados de acuerdo a la metodología descrita en el Capítulo 3, la cual consiste en dos bloques principales, uno en relación a la selección de materiales y otro a la validación del proceso de fundición como método de manufactura.

Bloque 1: Resultados selección de materiales

El primer bloque tuvo por objetivo la selección de los materiales más adecuados para la fabricación del plenum, que cumplan con las propiedades físicas y mecánicas necesarias para satisfacer los requerimientos y condiciones de frontera establecidos por Gulfstream. Este primer bloque se dividió en 4 fases para su realización.

Primera fase: Definición de propiedades necesarias.

Tuvo como objetivo específico definir las propiedades mecánicas, propiedades físicas de los materiales y las condiciones de frontera necesarias para cumplir con los requerimientos establecidos por Gulfstream. Para lo cual se llevaron a cabo 4 actividades principales.

En la **primera actividad** se buscaba encontrar los rangos o valores límites para las propiedades mecánicas de esfuerzo ultimo y esfuerzo a la cedencia que debía tener el material para el diseño del plenum. Esta información fue solicitada al área de investigación de análisis estructural (FEA) proceso de análisis estructural, el cual analizó los esfuerzos resultantes en el plenum debido a las fuerzas, cargas y momentos aplicados a este. En la Figura 29 se pueden apreciar la magnitud y la posición de las cargas y momentos aplicados en el análisis estructural de la propuesta de diseño número 2.

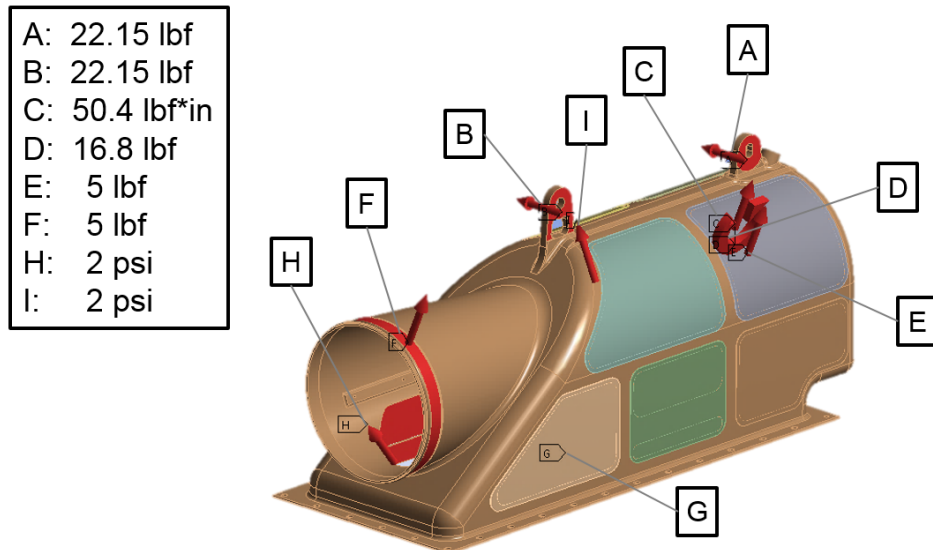


Figura 29. Diagrama de fuerzas y momentos en Plenum.
Fuente: Elaboración a partir de (Martinez, 2019).

Las Tablas 5 y 6 corresponden a los resultados de los análisis estructurales realizados a ambos modelos obtenidos del área de investigación de FEA, donde se pueden apreciar los esfuerzos a los que está sometido el plenum. Los esfuerzos máximos resultantes en la primera y segunda propuesta de diseño fueron de 8.5 ksi y 6.5 ksi respectivamente (Martinez, 2019).

Tabla 5. Resultados de esfuerzos y factores de seguridad para la estructura metálica del Diseño 1.

Caso	Análisis A (Presión 2 psi)		Análisis B (Presión -1 psi)	
	Esfuerzo (psi)	FS $S_u \geq 2.25$	Esfuerzo (psi)	FS $S_y \geq 2.00$
1	18215	1.10	9281.1	1.40
2	13639	1.47	7010.6	1.85
3	15624	1.28	7590.8	1.71
4	19921	1.00	9353.2	1.39
5	17831	1.12	10959	1.19
6	11972	1.67	5854.4	2.22
7.1	15536	1.29	7853.5	1.66
8.1	13262	1.51	6855.1	1.90
7.2	13644	1.47	5003.2	2.60
8.2	11917	1.68	6866.1	1.89
9	8516.8	2.35	5784.5	2.25

Fuente: Proporcionado por el área de investigación FEA (Martinez, 2019).

Tabla 6. Resultados de esfuerzos y factores de seguridad para la estructura metálica del Diseño 2

Caso	Análisis A (Presión 2 psi)		Análisis B (Presión -1 psi)	
	Esfuerzo (psi)	FS $S_u \geq 2.25$	Esfuerzo (psi)	FS $S_y \geq 2.00$
1	26552	0.60	12995	1.00
2	26818	0.60	16286	0.64
3	29689	0.54	14590	0.71
4	24608	0.81	12560	1.04
5	12408	1.61	6406.7	2.03
6	9244.3	2.16	5891.4	2.21
7	40247	0.40	20104	0.52
8	11243	1.78	6230.6	2.09
9	14995	1.07	5360.2	1.94
10	14229	1.41	5812.9	2.24
11	14464	1.38	8673.4	1.50
12	10667	1.87	5465.6	2.38
13	9931.6	2.01	5474.1	2.37
14	11660	1.72	6671.1	1.95
15	6557.3	3.05	3732.5	3.48

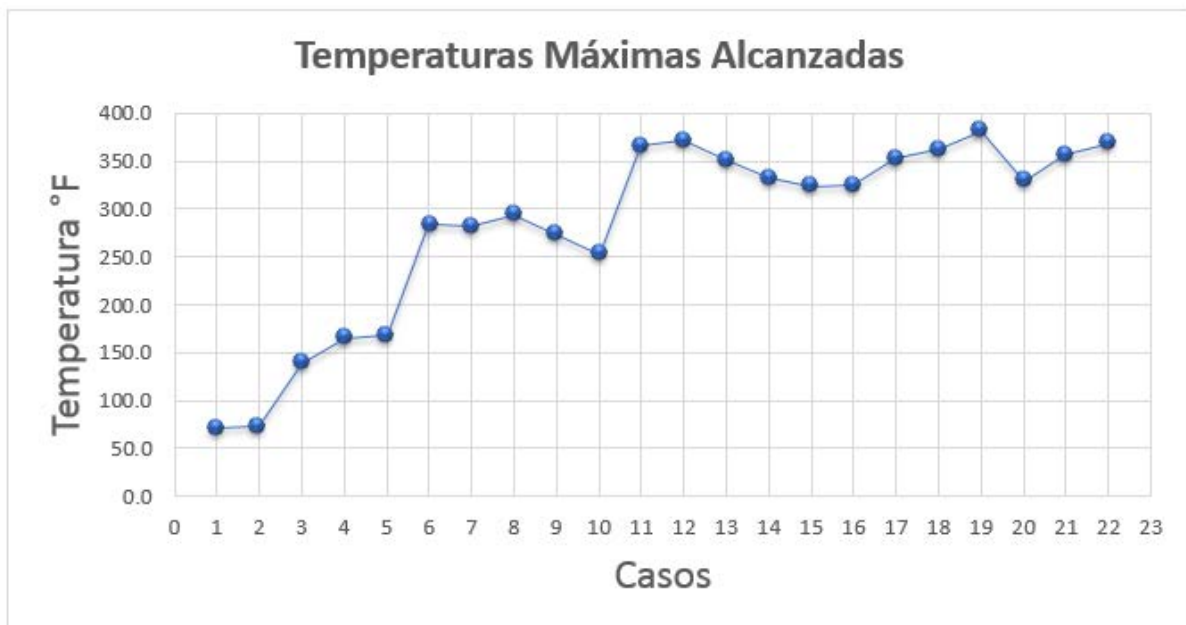
Fuente: Proporcionado por el área de investigación FEA (Martinez, 2019).

Estos dos valores corresponden a los valores máximos dentro del Análisis A, el cual simula las condiciones más extremas a las que estará sometido el plenum (Martinez, 2019), el mayor valor de **8.51 ksi** se utilizará como el parámetro mínimo de *Tensile strength* ya que, al tratarse de las condiciones extremas, lo que se busca del diseño es que no presente rupturas. Para asignar el valor de *Yield Strength*, se utilizaron los valores de esfuerzos en el Análisis B, ya que estos representan los mayores esfuerzos obtenidos en condiciones normales de vuelo (Martinez, 2019), en estos casos, lo que se espera del diseño es que no sufra deformaciones plásticas, por lo que el *Yield Strength* no debe de ser menor al esfuerzo máximo documentado en estos análisis. Como se puede apreciar en la Tabla 2, el valor máximo dentro del Análisis B es de **5.78 ksi**. Como entregable de esta primera actividad se definió que los valores de *Yield Strength* y *Tensile Strength* deberán ser 5.78 ksi y 8.51 ksi respectivamente.

En la **segunda actividad** se buscaba encontrar los rangos o valores límites para la temperatura a la que estará sometido el plenum. Para completar esta actividad, se

estudiaron los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a el sistema de control ambiental donde se encuentra instalado el plenum. Estas pruebas fueron realizadas en Torrance, California, por el departamento de pruebas y fueron provistas por el *Principal Engineer* Keith Smith, ingeniero dentro de Honeywell que labora para la organización de “*Mechanical Systems and Components*” (MS&C). Las diferentes pruebas que se hicieron dependían de las condiciones de vuelo que se quisieran simular, e involucraban diferentes casos, donde variaban la temperatura ambiente y la altitud.

En la Gráfica 11 se muestran las temperaturas máximas alcanzadas en el plenum para cada uno de los diferentes casos de prueba.



Gráfica 11. Gráfica de Temperaturas dentro del plenum para los diferentes casos de pruebas realizadas al sistema de control ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la mayor temperatura registrada fue de 380 °F, que corresponde al caso 19. Las condiciones de prueba de este caso fueron:

- Temperatura del ambiente: 131 °F
- Presión: 14.7 psia
- Humedad: 10 grains/lb
- Altitud: 0 ft

De acuerdo al análisis de estos datos como resultado de esta segunda actividad, se determinó que se debe utilizar el valor de **380 °F** como el valor mínimo para definir la temperatura máxima de servicio que deberá soportar el nuevo material a elegir.

La **tercera actividad** buscaba definir el volumen de los modelos propuestos para así calcular el rango de valores para la densidad del nuevo material. Para lograr esto, se requirió al área de investigación de Diseño 1 y Diseño 2, los modelos detallados de los nuevos diseños para el plenum. Después, utilizando el software de diseño de NX se utilizó la herramienta de medición “*Measure Bodies*” para calcular el volumen de las piezas como se observa en la Figura 30, resultando para la propuesta de Diseño 1 en 86.53 in^3 , y para la propuesta de Diseño 2 en 94.5 in^3 .

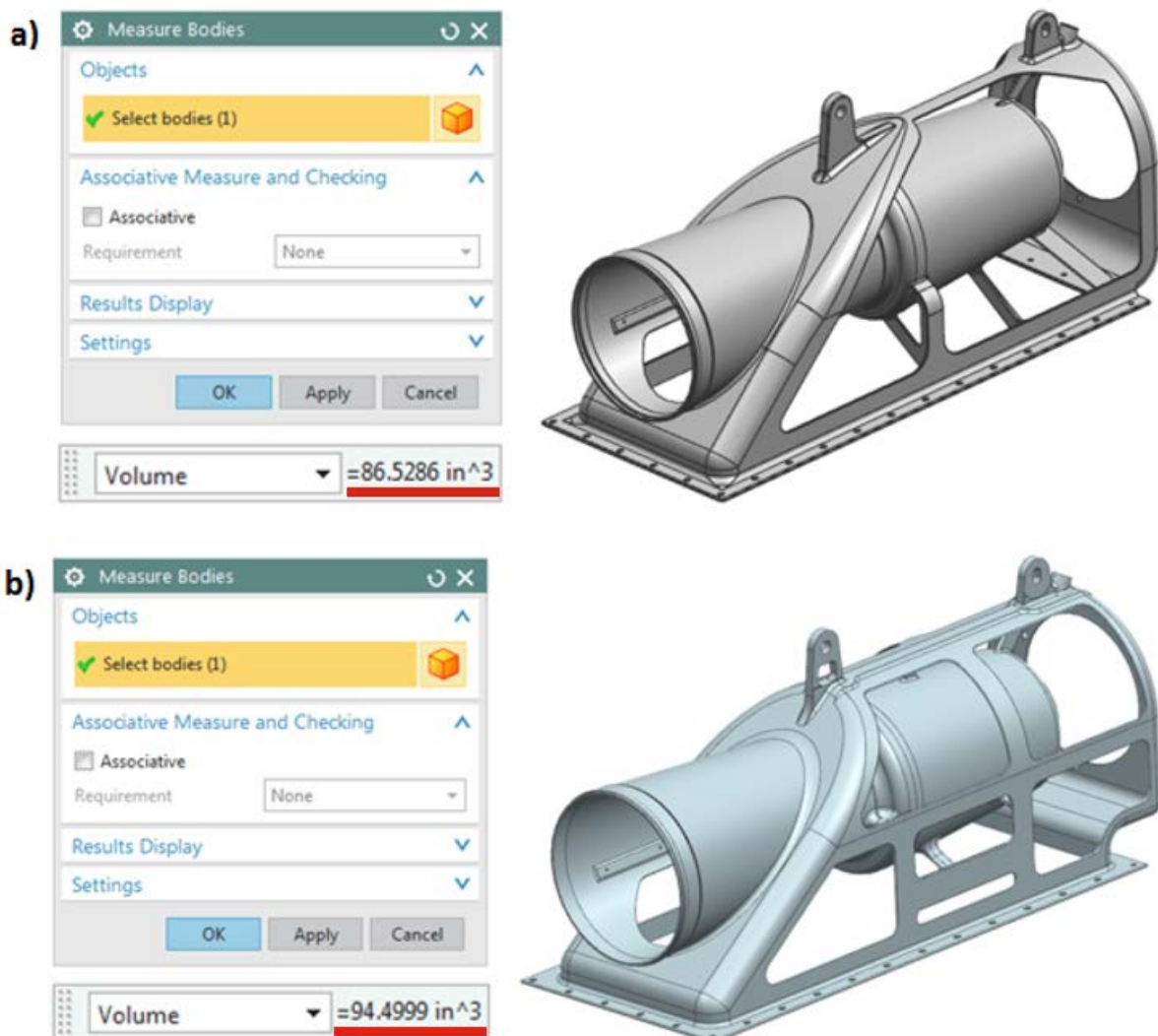


Figura 30. Definición de Volumen a) Diseño 1 b) Diseño2.
Fuente: Elaboración a partir de (Davila, 2019) y (Lizarraga, 2019).

Una vez obtenidos los valores de volumen para las armaduras de los *plenums*, fue necesario identificar los demás componentes que conformarían al ensamble final del plenum. Estos componentes y sus pesos fueron obtenidos del área de investigación de diseño (Davila, 2019) y (Lizarraga, 2019), y los datos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Componentes y sus pesos para ambos diseños de plenum.

Diseño 1		Diseño 2	
Componente	Peso (lbs)	Componente	Peso (lbs)
Puerta de Difusor	0.4453	Puerta de Difusor	0.4453
Bisagras	0.051	Bisagras	0.051
Difusor	0.333	Difusor	0.333
Sheet Metal	1.38	Sheet Metal	1.06
Rivets	0.026	Soldadura	0.025
TOTAL	2.2353	TOTAL	1.9143

Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar una comparativa y además poder conseguir el valor de las densidades ideales para cada uno de los diseños, fue necesario también definir el peso total del plenum actual, esto se logró yendo a pesar uno de los plenums casi terminados que se encontraba en el departamento de fibra de vidrio dentro de ISC, una fotografía del plenum y el peso obtenido se pueden apreciar en ANEXO B, al pesar el sub-ensamble del plenum, se obtuvo que su peso era de 12.75 lbs, valor que será utilizado como peso máximo para el nuevo diseño de plenum.

Lo que se realizó después, fue restar el valor del peso total de los componentes de cada diseño (Tabla 3) a el peso máximo permitido para todo el ensamble, este peso resultante sería el peso máximo que la armadura del plenum podría llegar a pesar. Después, utilizando la Ecuación 1, se calcula el valor de densidad máxima que debería de tener el material.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa (Peso)

v = Volumen

El peso máximo de la armadura y el valor de densidad de ambos diseños se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades Físicas de ambos diseños de armadura para plenum.

	Peso Ensamble Actual	Peso de componentes (Tabla 2)	Peso Máximo Armadura	Volumen de Armadura	Densidad Máxima
Diseño #1	12.75 lb	2.23 lb	10.52 lb	86.5 in ³	0.122 lb/in ³
Diseño #2		1.91 lb	10.84 lb	94.5 in ³	0.114 lb/in³

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con estos cálculos se determinó que el valor a utilizar en las siguientes fases para la densidad será de .114 lb/in³ asegurando así el requisito de peso estipulado por Gulfstream en ambos modelos.

La **cuarta actividad** buscaba definir las condiciones de operación del plenum, para esto se revisó el documento mencionado anteriormente en la segunda actividad, donde se obtuvo la temperatura máxima de servicio. Además, se revisó también el documento de las pruebas de calificación realizadas a el sistema de control ambiental (Honeywell, 1996). En este último documento se encontró un apartado que especifica que todos los materiales metálicos dentro de este sistema, deben ser resistentes a la corrosión, o por lo menos ser aptos para poder ser tratados para serlo. Cualquier corrosión que ocurra durante las pruebas que cause un mal funcionamiento del equipo, es causa de rechazar el sistema. También se menciona que cualquier material susceptible a la corrosión, debe estar también protegido para la penetración de agua.

Como entregable de la cuarta actividad, se definió que el material debe de ser resistente al agua y a la corrosión.

En resumen, como resultado de las actividades realizadas en esta fase 1, se muestra la Tabla 9, donde se resumen las características necesarias identificadas para cumplir con los requerimientos establecidos por Gulfstream.

Tabla 9. Propiedades y características necesarias para el nuevo material.

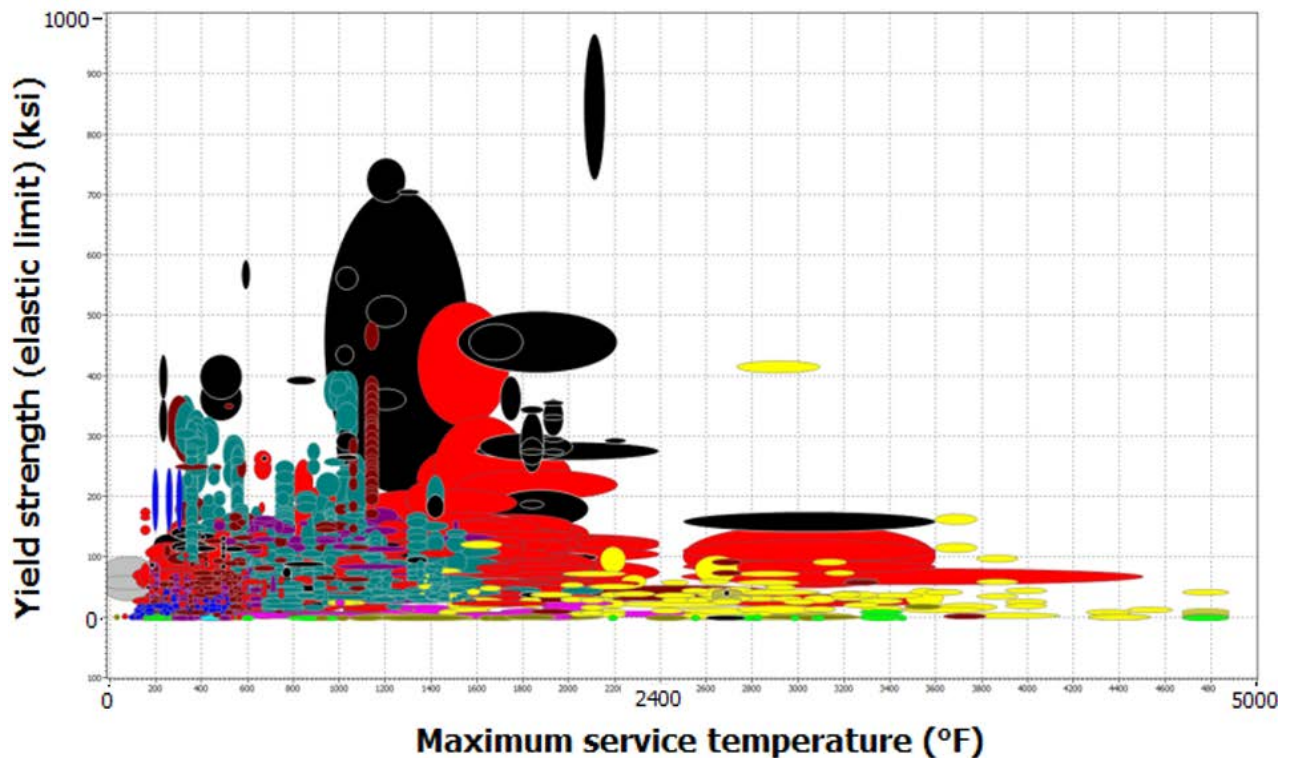
CARACTERÍSTICA	MIN	MAX
Densidad	-	0.106 lb/in ³
Temperatura máxima de servicio	380 °F	-
Yield Strength	8.4 ksi	-
Tensile Strength	12.6 ksi	-
Potencial Galvánico	-	0.15 V
Resistencia al Agua	Aceptable	
Resistencia a la Corrosión	Aceptable	

Fuente: Elaboración propia.

Segunda fase: Determinación de posibles materiales.

Tuvo como objetivo específico determinar los materiales que cumplen con las propiedades físicas, propiedades mecánicas y con las condiciones de frontera establecidas por Gulfstream.

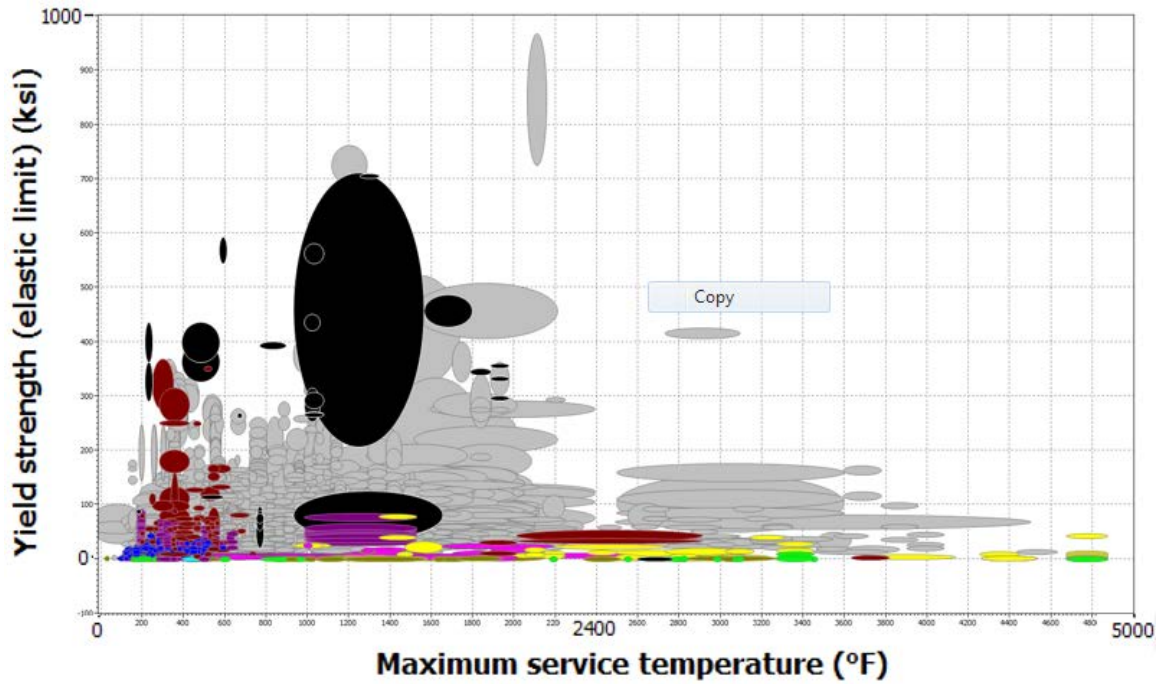
En la **primera actividad** se buscaba descartar/eliminar del proceso de selección a todos los materiales que no cumplieran con los requisitos y propiedades establecidas por Gulfstream. Para lograr esto, se utilizó el software de selección de materiales CES Selector, el cual cuenta con una amplia base de datos que incluye aproximadamente cuatro mil materiales diferentes dentro de las diferentes familias, las cuales son: metales, fibras, materiales compuestos, materiales naturales y polímeros. El primer paso fue graficar todos los materiales usando como parámetros de referencia la temperatura máxima de servicio (eje x) y el esfuerzo de cedencia (eje y), así como se muestra en la Gráfica 12.



Gráfica 12. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles.
Fuente: Elaboración propia.

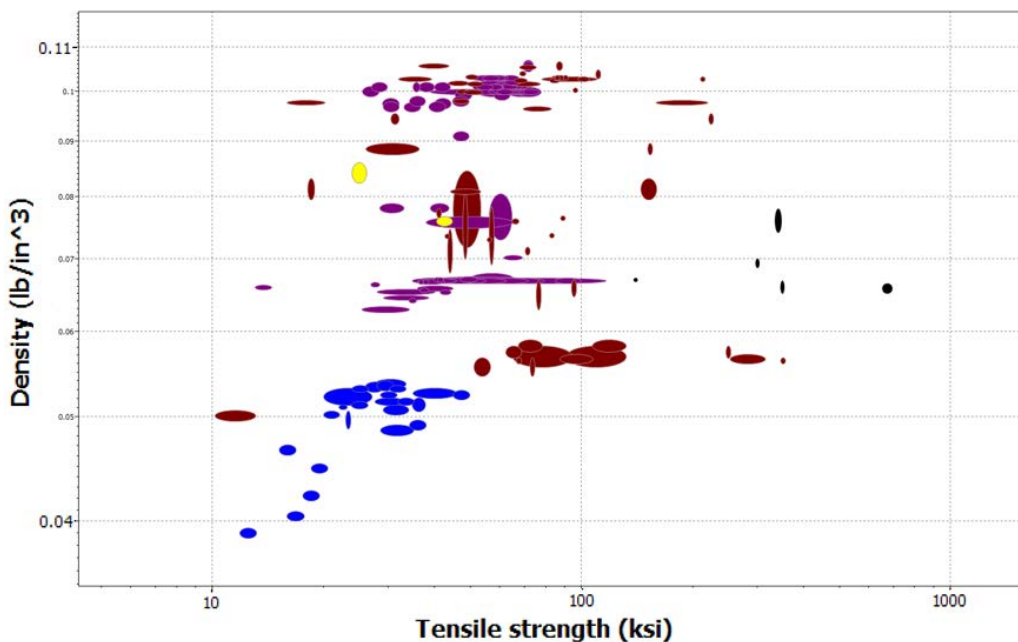
En esta grafica se muestran 3943 materiales, también se puede apreciar como existen materiales capaces de soportar temperaturas de más de 4800 °F y más de 900 ksi de esfuerzos, valores muy por encima de los requeridos.

El primer filtro que se aplicó fue el de densidad, agregando un valor máximo de 0.114 lb/in^3 se logró reducir el número de materiales posibles de 3943 a 2175, es decir, se redujo en un 44.84%. En la Gráfica 13 se muestra la misma Gráfica 12, simplemente que ahora todos los materiales que no cumplieron con el requisito de densidad se aprecian de color gris. Para mejor visualización, futuras graficas de resultados no incluirán los materiales que no aprueben los requerimientos.



Gráfica 13. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado el filtro de densidad.
 Fuente: Elaboración propia.

Para continuar con el análisis, se creó una nueva grafica (Gráfica 14) de comparación con los parámetros de Esfuerzo Ultimo (eje x) y Densidad (eje Y), también, se aplicaron los limites correspondientes a los parámetros mencionados en la Tabla 9, obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 14. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado los filtros mencionados en la Tabla 4.
 Fuente: Elaboración propia.

En la nueva gráfica obtenida se observan 168 materiales los cuales corresponden a un 4.26% de los materiales iniciales. El resultante de la lista de materiales que cumplieron con las características y propiedades requeridas por Gulfstream puede observarse en el ANEXO A de este documento.

En la **segunda actividad** se buscaba descartar materiales que estuvieran prohibidos por Gulfstream, Honeywell u otra entidad. Un ejemplo de esto sería el uso del asbesto, este material cuenta con buenas propiedades mecánicas y térmicas, sin embargo, está comprobado que el asbesto es un agente cancerígeno y produce muchos riesgos a la salud. Por esto, el uso de asbesto para la fabricación del plenum no sería una opción viable.

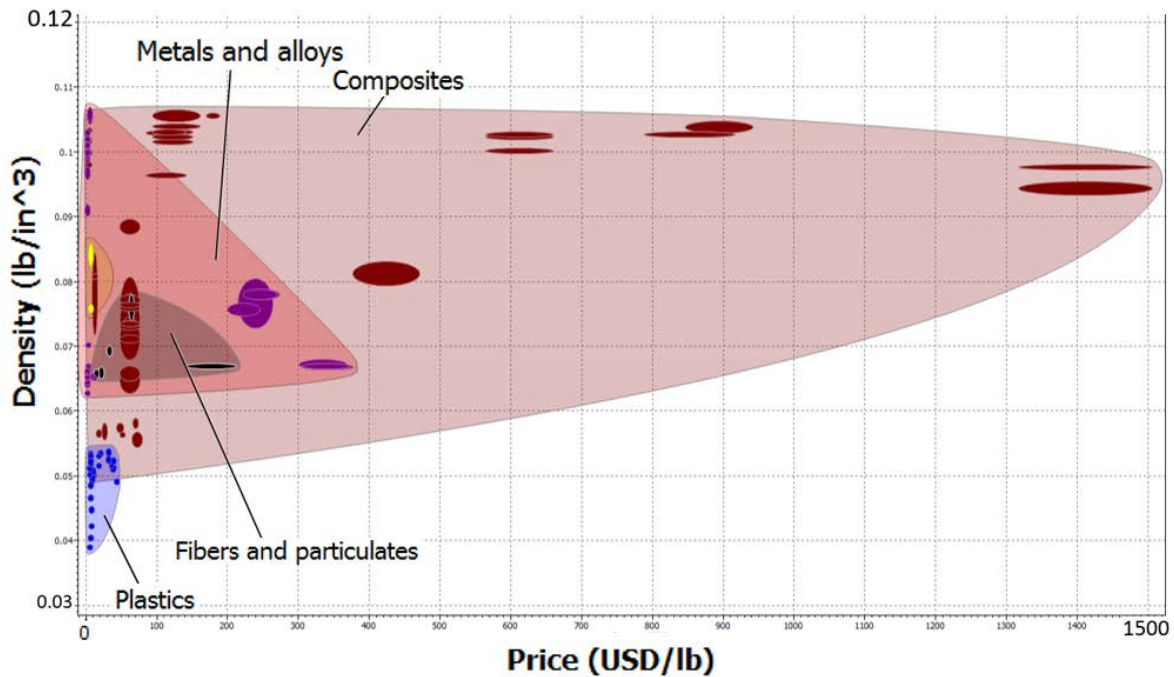
De los materiales resultantes de la primera actividad, no se encontró algún material que tuviera prohibido su uso, el único material que generó preocupación fue el Berilio, ya que puede causar grandes riesgos a la salud si penetra la piel, puede ser cancerígeno y también provocar daños irreparables a los pulmones. Sin embargo, su uso no está prohibido y tiene aplicaciones aeroespaciales como la construcción de estructuras y toberas de misiles. Debido a esta información encontrada, la lista de posibles materiales quedó igual a como se obtuvo a partir de la primera actividad.

En resumen, los resultados de la segunda fase para el proceso del Bloque 1, fueron los 168 materiales encontrados como posibles a utilizar.

Tercera fase: Selección de materiales óptimos.

Tuvo como objetivo específico seleccionar los materiales más óptimos que cumplen con las características requeridas por Gulfstream y Honeywell. Para lo cual se llevaron a cabo 2 actividades principales.

En la **primera actividad** se buscaba crear nuevas gráficas de comparación y además agregar nuevos parámetros que servirían de filtros para reducir la cantidad de 168 materiales obtenidos en la segunda fase de este bloque 1. El primer paso que se realizó fue la creación de la gráfica Densidad–Precio, la cual se aprecia en la Gráfica 15.



Gráfica 15. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles una vez aplicado los filtros mencionados en la Tabla 4.

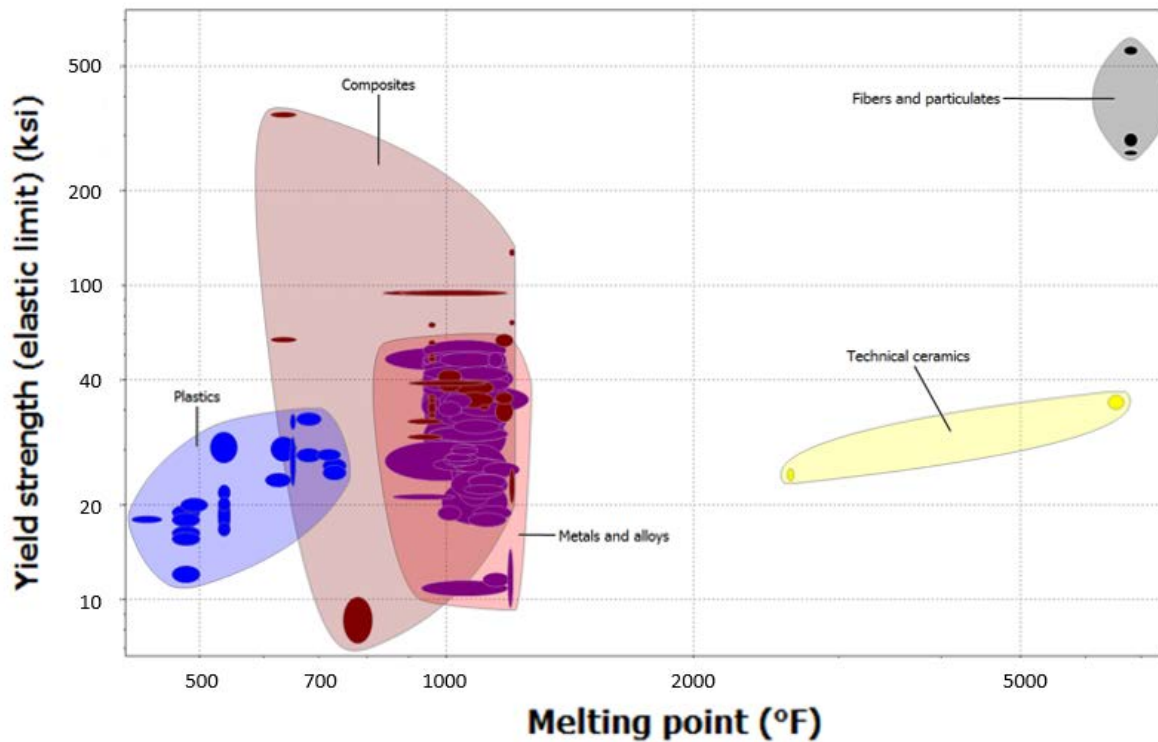
Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se puede observar como existe un amplio margen entre el precio/costo de alguno de los materiales, en general, los materiales dentro de la familia de materiales compuestos son los que presentan un mayor precio (USD/lb), por otro lado, los plásticos y algunos metales son los materiales más económicos. Referente a la densidad, algunos metales resultaron ser las opciones más pesadas, y los plásticos resultaron ser de las opciones más ligeras.

La acción que se decidió tomar después de analizar esta gráfica fue implementar un nuevo límite y filtrar la lista de materiales utilizando el parámetro de precio en los materiales. Para esto, primeramente, se determinó el precio (USD/lb) del material que se utiliza actualmente en el plenum (*Fiber Glass Polyimide*). Honeywell obtiene este material comprando rollos, los cuales le cuestan **\$117.80 USD** la yarda, el ancho de estos rollos es de 60 pulgadas. El precio se calculó tomando una muestra del material, la cual se midió y peso (ANEXO C), obteniendo como resultado un área de 1in² y un peso de .000831 lbs (0.3769 gr). Se sabe que el rollo que recibe Honeywell tiene un ancho de 60 in, por lo que una yarda de rollo cuenta con 2160 in² de material, entonces, si 1in² pesa .000831 lbs, una yarda de este rollo pesa 1.7948 lbs. Finalmente, si la yarda que cuesta \$117.80 USD pesa 1.7948 lbs, el precio por libra del material *Fiber Glass Polyimide* es de **65.63 USD/lb**

Una vez implementado este límite de precio, el número de posibles materiales a seleccionar se redujo de 182 a 108.

Como siguiente paso, se graficaron los materiales resultantes en base a las propiedades de punto de fundición (*Melting Point*) y esfuerzo a la cedencia (*Yield Strength*), como se muestra en la Gráfica 16.



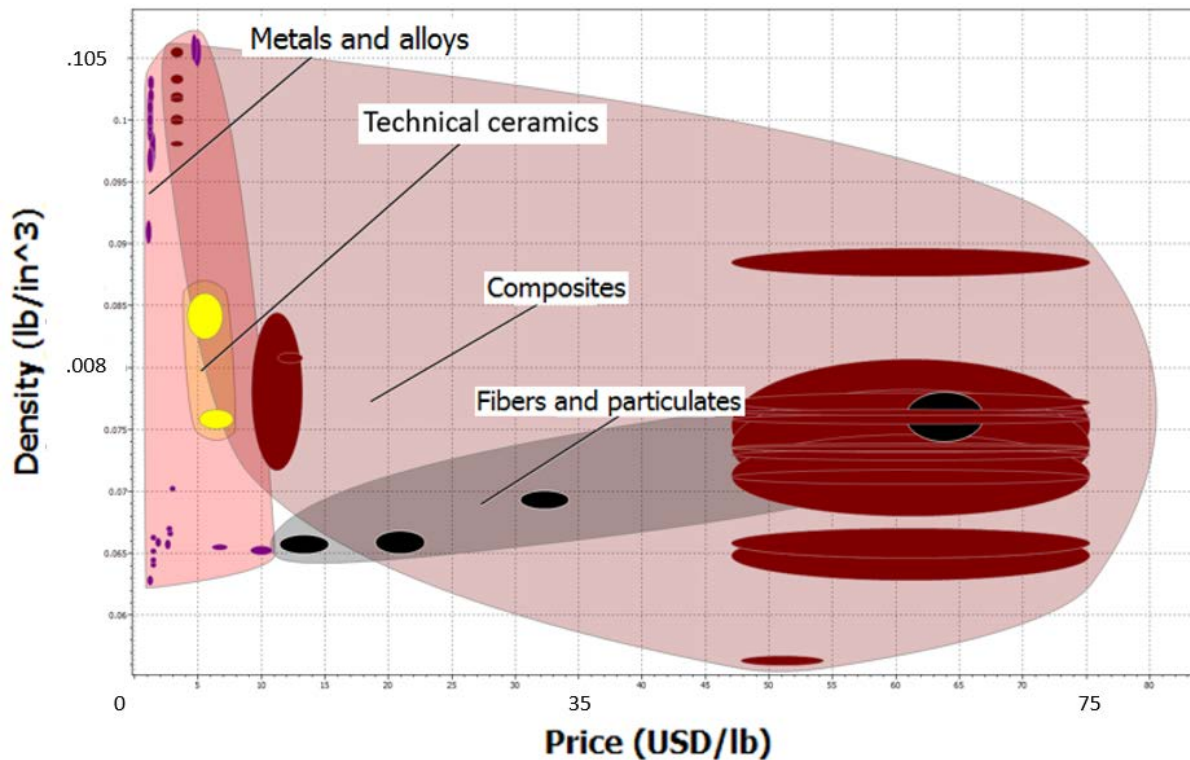
Gráfica 16. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles aplicando el primer filtro de precio.

Fuente: Elaboración propia

Analizando esta gráfica, se tomó la decisión de descartar todos los materiales que tuvieran un punto de fusión menor a 700°F y además tuvieran un Yield Strength menor a 40 ksi. La razón de tomar esta decisión fue que el Yield strength que maneja el software es un valor que corresponde a datos obtenidos a temperatura ambiente (68°F aproximadamente), sin embargo, al aplicarle más temperatura a un material, el valor de Yield Strength disminuye, además, entre más cercana este la temperatura de fusión del material a la temperatura máxima de servicio, el decremento en la propiedad de Yield Strength será mayor, es por esto que se determinó eliminar estos materiales obteniendo así una nueva lista de 102 materiales.

Regresando a la gráfica de Precio-Densidad, se pueden observar 2 grupos principales de materiales (Gráfica 17), donde uno de ellos se encuentra por encima de los 45

USD/lb. Para seleccionar un material con mayores probabilidades de ahorro en costos se reducirá el límite previamente estipulado de precio de 65.63 USD/lb a un valor de 35 USD/lb, resultando así una lista de 84 posibles materiales a seleccionar.



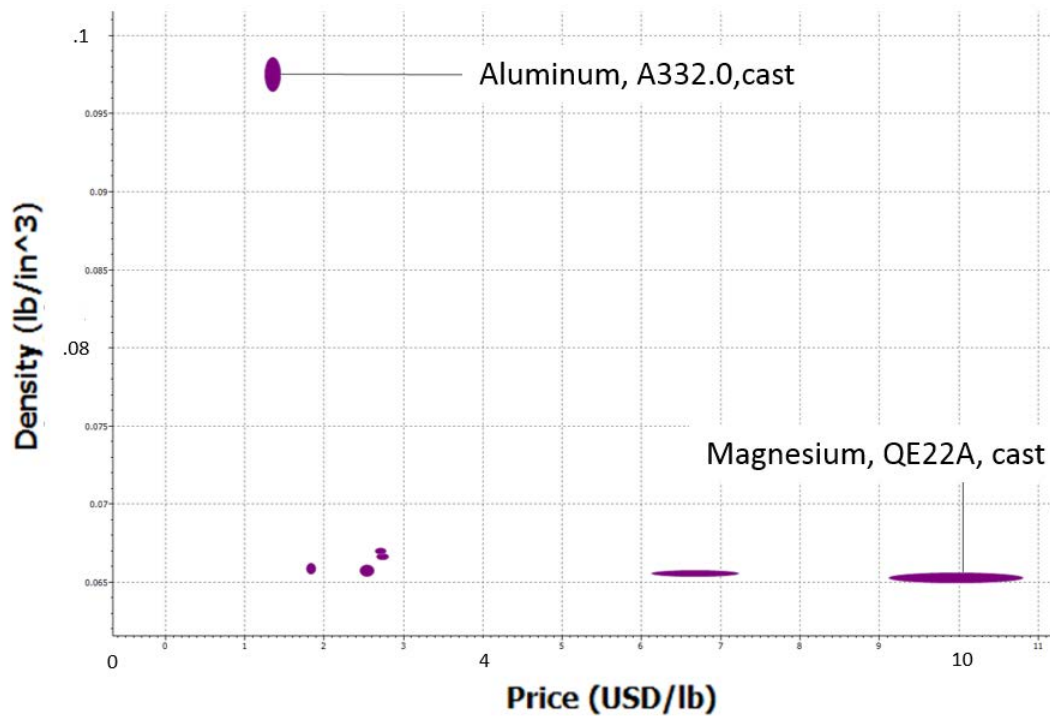
Gráfica 17. Gráfica comparativa de los diferentes materiales disponibles después de aplicar filtro de punto de fusión y Yield Strength
Fuente: Elaboración propia

De estos 84 materiales obtenidos, 70 resultaron ser de la familia de los metales, y 55 dentro de estos resultaron ser diferentes aleaciones de aluminio.

Finalmente, el último filtro que se aplicó fue el de propiedades de procesamiento. Debido a la geometría compleja de los diseños propuestos y la necesidad de reducir el número de componentes que conforman el ensamble del plenum, para así reducir costos y procesos de producción, se seleccionó como proceso de manufactura ideal la fundición de metales (Davila, 2019). Aplicando este último filtro, la lista final terminó en 9 materiales posibles a seleccionar, los cuales se enlistan a continuación:

- Aluminum, A332.0, cast, T5
- Aluminum, A332.0, cast, T6
- Magnesium, Elektron 21
- Magnesium, EQ21A, cast
- Magnesium, EZ33A, cast, T5
- Magnesium, QE22A, cast, T6
- Magnesium, WE43A, cast
- Magnesium, WE43B, cast, T6
- Magnesium, WE54A, cast

Como se puede apreciar, los materiales resultantes fueron Aluminio y Magnesio en diferentes aleaciones. Como entregable de esta tercera fase, los materiales que se elegirán serán el **Aluminio A332** debido a que es el más barato de los disponibles, con un costo de 1.35 USD/lb y el **Magnesio QE22A** ya que es el más ligero de los disponibles, con una densidad de 0.065 lb/in³, estos materiales se pueden apreciar en la Gráfica 18.



Gráfica 18. Gráfica comparativa de los 9 materiales posibles a seleccionar.
Fuente: Elaboración propia

Cuarta fase: Definición de beneficios y mejoras.

Tuvo como objetivo específico determinar los beneficios y mejoras que aportan los nuevos materiales seleccionados en comparación con los que se utilizan actualmente para la fabricación del plenum del Gulfstream V.

En la **primera actividad** se buscaba comparar los materiales seleccionados de la tercera fase con el material que se utiliza actualmente en la elaboración del plenum del Gulfstream V. Esto se logró creando la Tabla 10 que se muestra a continuación:

Tabla 10. Componentes y sus pesos para ambos diseños de plenum.

	Aluminum, A332.0, cast, T5	Aluminum, A332.0, cast, T6	Magnesium, QE22A, cast, T6	Fiber Glass Polyimide
^ Price				
Price (USD/lb)	1.26 - 1.45	1.26 - 1.45	9.12 - 10.8	65.63
^ Physical properties				
Density (lb/in ³)	0.0965 - 0.0986	0.0965 - 0.0986	0.065 - 0.0656	.048-.052
^ Mechanical properties				
Yield strength (elastic limit) (ksi)	17.9 - 19.8	38.6 - 42.6	20 - 28	42
Tensile strength (ksi)	28.9 - 32	40 - 44.2	28 - 40	52
^ Thermal properties				
Melting point (°F)	977 - 1040	977 - 1040	1030 - 1140	1050*
Maximum service temperature (°F)	338 - 392	338 - 392	540 - 601	600
^ Electrical properties				
Galvanic potential (V)	-0.72 - -0.64	-0.72 - -0.64	-1.58 - -1.5	
^ Processing properties				
Metal casting	Excellent	Excellent	Excellent	Unsuitable
^ Durability				
Water (fresh)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla, se pueden apreciar las propiedades del material utilizado actualmente encuadradas en color azul. Analizando los resultados, se determinó que la poliimida es 48 veces más cara que el aluminio A332 y 6 veces más cara que el magnesio. Donde presenta mejores resultados es en la densidad, siendo un 48% y un 23% más ligero que el aluminio A332 y el magnesio respectivamente. Sin embargo, al utilizar los nuevos diseños de plenum propuestos en las áreas de investigación de diseño y recordando los datos de la Tabla 4, el valor de densidad limite que se tenía estipulado para conseguir un peso neutro en relación con el diseño actual era de .114 lb/in³, esto quiere decir que con las densidades del aluminio A332 y el magnesio QE22A se pueden obtener ahorros en peso de hasta 4.9 lbs, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Componentes y sus pesos para ambos diseños de plenum.

	Peso Máximo Armadura (Tabla 3)	Volumen (in ³)	Densidad A332 (lb/in ³)	Peso con A332 (lbs)	Ahorro (lbs)	Densidad Magnesio (lb/in ³)	Peso con Magnesio (lbs)	Ahorro (lbs)
Diseño #1	10.52 lb	86.5	0.097	8.39	2.13	0.065	5.62	4.9
Diseño #2	10.84 lb	94.5	.097	9.17	1.67	0.065	6.14	4.7

Fuente: Elaboración propia.

Con esta tabla se puede apreciar con mayor claridad que cualquiera de las opciones representaría un ahorro en peso en comparación con el actual diseño. También como dato adicional, se puede observar que el material actual, no puede ser manufacturado mediante el proceso de fundición, motivo por el cual fue descartado a la hora de realizar el análisis de selección de material.

Como resultado de la cuarta fase del bloque 1, todas las opciones de materiales propuestas resultarían en un ahorro en costos en la compra de material y, además, al implementarse las innovaciones realizadas en las áreas de investigación de diseño, también se tendría un beneficio en ahorro del peso total del ensamble. Siendo estos ahorros en costo y peso, dos de los factores más importantes para la compañía Honeywell.

Bloque 2: Resultados determinación de proceso de fundición.

El **segundo bloque** tuvo por objetivo determinar un proceso de manufactura por medio de fundición, el cual sea viable y eficiente para la propuesta del modelo 3D de la armadura del plenum del Gulfstream V. Este segundo bloque se dividió en 4 fases para su realización.

Primera fase: Definición de información necesaria.

Tuvo como objetivo específico establecer la información necesaria para realizar una simulación de fundición por computadora para los modelos 3D propuestos del plenum del Gulfstream V. Para lo cual se llevaron a cabo 2 actividades principales.

En la **primera actividad** se buscaba definir las variables a ingresar para realizar una simulación dentro del software Inspire Cast. Esta información fue definida al realizar el tutorial de “High Pressure Die Casting” (Altair, 2019), donde se determinó, que las variables necesarias para correr un análisis son:

- Modelo 3D de la pieza a analizar/fundir.
- Material de la pieza a fundir.
- Temperatura a la que se vaciará el material.
- Posición, forma y dimensiones de los “*gates*”.
- Material del molde de fundición.
- Tipo de fundición.
- Velocidad de vaciado.
- Tamaño de elemento de malla.

Los modelos 3D de las piezas a analizar, fueron obtenidos de las áreas de investigación de Diseño, siendo estas piezas las armaduras de los modelos propuestos de plenum, el material de la pieza a fundir fue el aluminio A332, uno de los materiales obtenidos en el área de investigación de selección de materiales, descrita en el bloque 1 de este reporte. La temperatura a la que se vaciará el material será de 725°C, ya que para aleaciones de aluminio, la temperatura óptima de vaciado está en un rango de 700°C y 750°C. Este es el rango donde se produce una fundición de buena calidad con buenas propiedades mecánicas (Ndaliman, 2007). La posición del *gate* se muestra en la Figura 31.

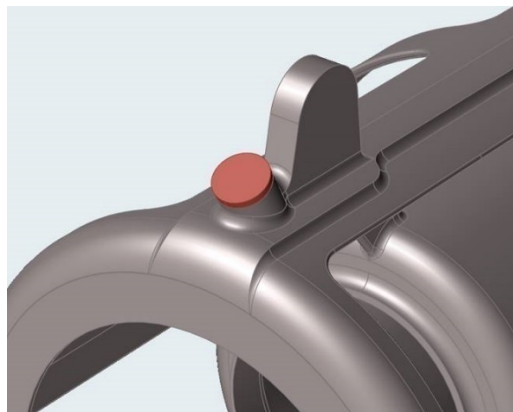


Figura 31. Posicionamiento del gate por donde empezará a vaciarse el metal fundido.
Fuente: Elaboración propia

El *gate* de .75in de diámetro y espesor de .1 in se encuentra posicionado en la parte trasera del plenum, en la zona donde se maquinará el puerto de drenado, se eligió esta posición debido a que es donde hay más volumen de material. El material del molde de fundición a utilizar será Acero, debido a que los moldes de acero se utilizan para hacer moldes permanentes de fundición, los cuales pueden ser reutilizados por varios miles de ciclos (Ashby et al, 2014). El tipo de fundición a elegir, será seleccionado en la segunda actividad de la Fase 2 de este bloque 2. Debido a que la velocidad de vaciado es dependiente del tipo de fundición, esta característica también será definida en la segunda actividad. Para el tamaño de elemento de la malla, se determinó a utilizar un tamaño de elemento de malla de 2mm, este valor fue asignado al analizar en el software de diseño NX los modelos 3D de las armaduras de plenum provistas por el área de investigación de diseño, donde el menor espesor de pared encontrado fue de 2.3mm en el Diseño 2, de esta forma, se está asegurando que cada zona de la armadura del plenum tiene por lo menos un elemento a la hora de realizar la simulación.

En la **segunda actividad** se buscaba obtener los modelos 3D de las armaduras de los *plenums* sin alguna característica de maquinado, para lograr este objetivo, fue necesario modificar los modelos obtenidos del área de investigación de diseño. Estas modificaciones fueron realizadas utilizando el software de diseño NX y el módulo de diseño de Inspire Cast. Como se puede apreciar en la Figura 32, los cambios de geometría corresponden a la remoción de las características de maquinado, las cuales son los barrenos en los *brackets*, barrenos donde se instalan los tornillos en la base del plenum y barrenos donde se instala la bisagra de la puerta.

Las características de maquinado son removidas debido a que son detalles pequeños que necesitan tener una alta precisión de posicionamiento, la cual se logra con los diferentes métodos de maquinado por medio de remoción de material.

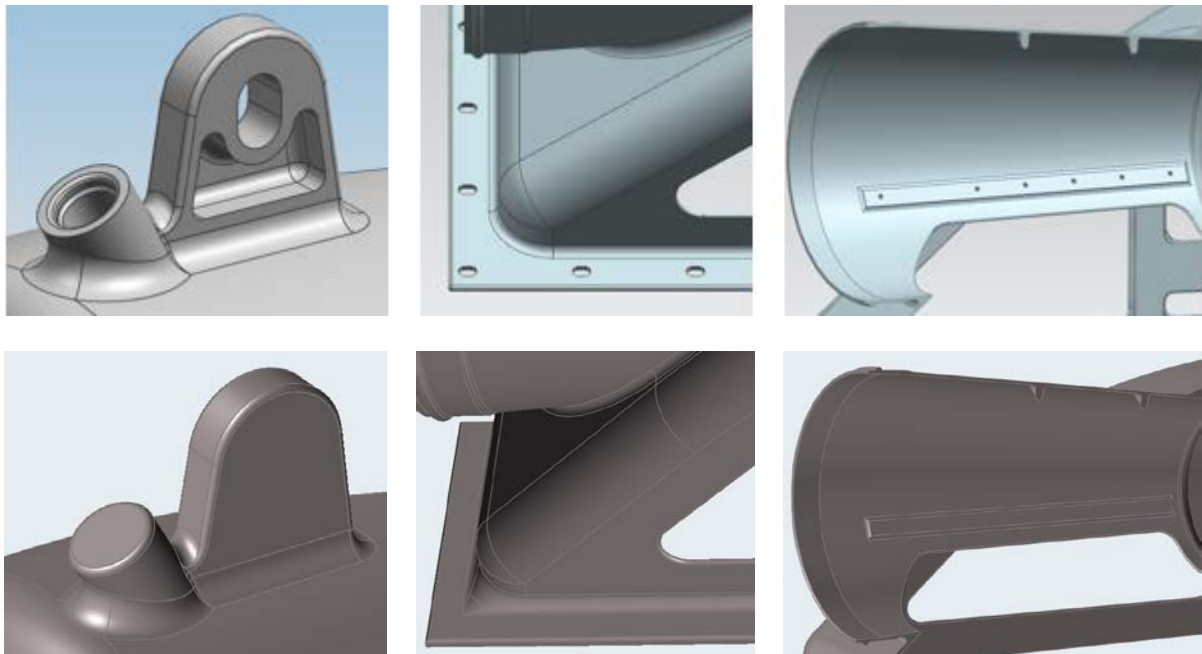


Figura 32. Características de los modelos de armadura de plenum que fueron removidas. Arriba: antes de ser removidas, Abajo: Después de ser removidas
Fuente: Elaboración propia

Los modelos resultantes para la simulación de fundición por computadora se muestran en la Figura 33.

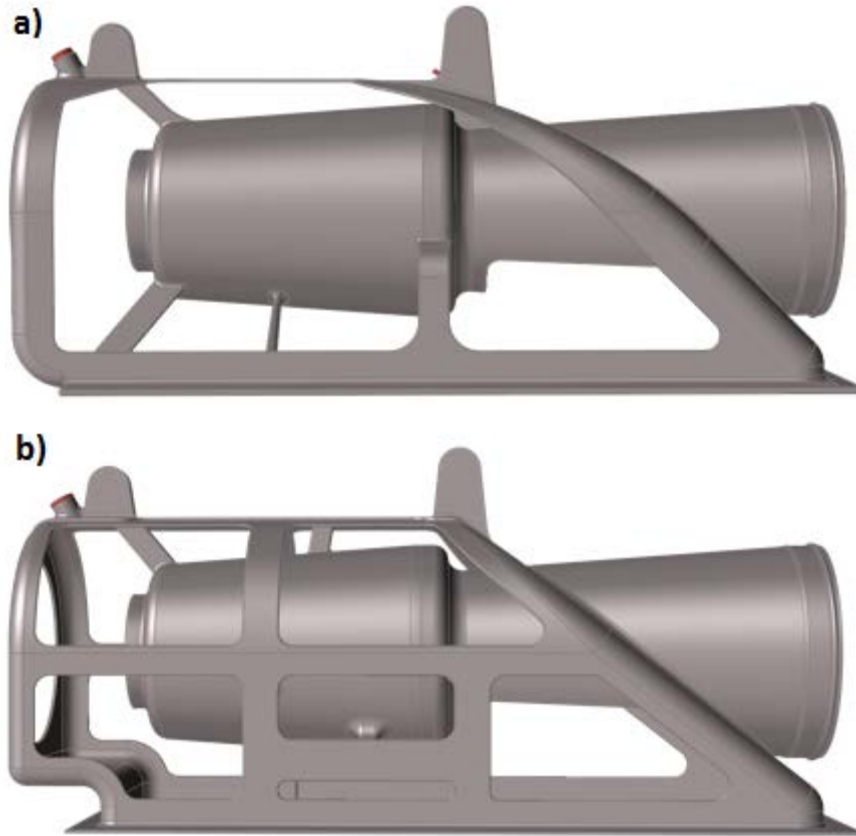


Figura 33. Modelos 3D para realizar análisis de fundición por computadora.
a) Diseño 1. b) Diseño 2
Fuente: Elaboración basada en (Davila, 2019) y (Lizarraga, 2019).

Estas geometrías, son el entregable de la segunda actividad y representan el resultado que se esperaba obtener una vez realizado el proceso de fundición.

Segunda fase: Determinación del proceso de fundición.

Tuvo como objetivo específico definir el proceso de fundición más conveniente para el diseño propuesto del plenum del Gulfstream V. Para lo cual se llevaron a cabo 2 actividades principales.

En la **primera actividad** se buscaba determinar las características más relevantes de los diferentes tipos de procesos de fundición disponibles. Para desarrollar esta actividad, se hizo uso del software CES Selector, ya que cuenta con una base de datos de los diferentes procesos para manufacturar materiales, siendo uno de estos la fundición de metales.

Primeramente, se encontró que existen 4 procesos principales de fundición; *Centrifugal Casting*, *Die Casting*, *Investment Casting* y *Sand/mold Casting*. Una descripción general de cada tipo de fundición se menciona a continuación:

Centrifugal Casting: Es utilizado principalmente para la fabricación de piezas cilíndricas con diámetros que van desde los 125 milímetros hasta los 3 metros con hasta un largo de 16 metros. El metal fundido es vaciado en un molde giratorio y la fuerza centrífuga mantiene al metal contra la pared del molde (Hasegawa, 2004).

Die Casting: Se caracteriza por forzar al material fundido dentro de una cavidad en un molde. Este molde está conformado por dos piezas, una vez solidificado el metal vaciado, se separa una de las piezas del molde y se remueve la parte creada.

Investment Casting: Este proceso requiere de un molde el cual genere un patrón de cera el cual tiene la geometría exacta de la pieza que se quiere fundir, después, este modelo de cera se le agrega un *coating* de un material cerámico. La pieza resultante se mete a un horno para derretir y remover la cera, creando así un molde hueco donde se vierte el metal fundido. Una vez enfriado, se rompe el molde cerámico y se obtiene la pieza deseada.

Sand Casting: Este proceso, al igual que el *Investment Casting*, también utiliza un modelo de madera, plástico o metal, el cual se introduce en un molde con arena, la cual se compacta alrededor de él. Una vez compactada, se retira el modelo y queda un espacio vacío dentro del molde con la forma requerida. Después, el metal fundido es vaciado dentro de esa cavidad y se forma la pieza deseada.

Después, al analizar los procesos y sus características dentro del software CES Selector, se determinó que las características más importantes, y las que más variación presentaban entre un proceso y otro son las siguientes:

- **Rango de espesor:** Característica que define el espesor mínimo que la pieza a fundir puede llegar a tener en cualquiera de sus secciones.
- **Tolerancia:** Valor de precisión con la que se puede llegar a fabricar la geometría deseada.
- **Costo relativo por pieza.**
- **Costo de instrumentación.**

Estos parámetros/características, corresponden al entregable de la primera actividad de la fase 2.

En la **segunda actividad** se buscaba seleccionar el proceso de fundición más viable para Honeywell y el desarrollo de este proyecto. Para desarrollar esta actividad, el

primer paso fue eliminar el tipo de fundición por “*Centrifugal Casting*”, esta decisión fue tomada debido a que este tipo de fundición es para geometrías sencillas, cilíndricas en su mayoría, y los diseños obtenidos para el nuevo plenum cuentan con geometrías más complejas a las que este tipo de fundición puede generar.

El segundo paso fue comparar los 3 procesos principales de fundición restantes, utilizando las características definidas en la primera actividad. Los diferentes procesos de fundición disponibles y las características relevantes de cada uno de ellos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Componentes y sus pesos para ambos diseños de plenum.

Tipo de Fundición	Espesor (in)	Tolerancia (in)	Costo por Pieza (USD)	Costo de Herramienta (USD)
<i>Gravity Die Casting</i>	.197 – 1.77	0.00984 - .0787	\$75	\$22,600
<i>High Pressure Die Casting</i>	.0394 - .315	.00591 - .0197	\$226	\$123,000
<i>Investment Casting</i>	.0295 - 0.394	.00492 - .0157	\$156	\$110,000
<i>Sand Casting</i>	.197 - 39.3	.0472 - .118	\$843	\$3770

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los datos obtenidos para la tabla de comparación, se determinó que los procesos de *Gravity Die Casting* y *Sand Casting* no son viables, debido a que superan el espesor mínimo requerido de 0.080” del **Diseño 1** (Davila, 2019). Como entregable de la segunda actividad de la fase 2, se definió que el proceso más conveniente para la producción de la armadura del plenum propuesto es el de ***Investment Casting***, debido a que resultó ser el de menor costo entre los dos posibles y además, el que puede fabricar armaduras con mayor precisión en dimensiones y tolerancias más cerradas.

Tercera fase: Simulación de proceso de fundición.

Esta fase tuvo como objetivo específico asegurar que el proceso de fundición para las propuestas de armaduras de plenums es viable y eficiente. Para lo cual se llevaron a cabo 3 actividades principales.

En la **primera actividad** se buscaba realizar una simulación por computadora del proceso de fundición para la creación de ambos diseños propuestos. Para lograr esto, se hizo uso del software de simulación de fundición “*Inspire Cast*”, de los parámetros obtenidos en la primera actividad de la primera fase del Bloque 2 y de los modelos modificados realizados en la segunda actividad de esta misma primera fase.

Para realizar la simulación, dentro del software *Inspire Cast*, se importó la geometría a analizar, se le asignó el material de casting A332, se definió el *gate* por donde ingresará el metal fundido (Figura 27), se definió un espacio volumétrico en representación del molde que abarcará todo el plenum, para el tipo de fundición se seleccionó *investment casting*, como resultado de la segunda actividad de la Fase 2 Bloque 2. La velocidad de vaciado utilizada fue de 35 m/s, ya que es la recomendada para este tipo de proceso (Altair, 2019) y finalmente, el tamaño de malla seleccionado fue de 2mm.

El *setup* de la simulación con todas estas características aplicadas se puede apreciar en la Figura 34.

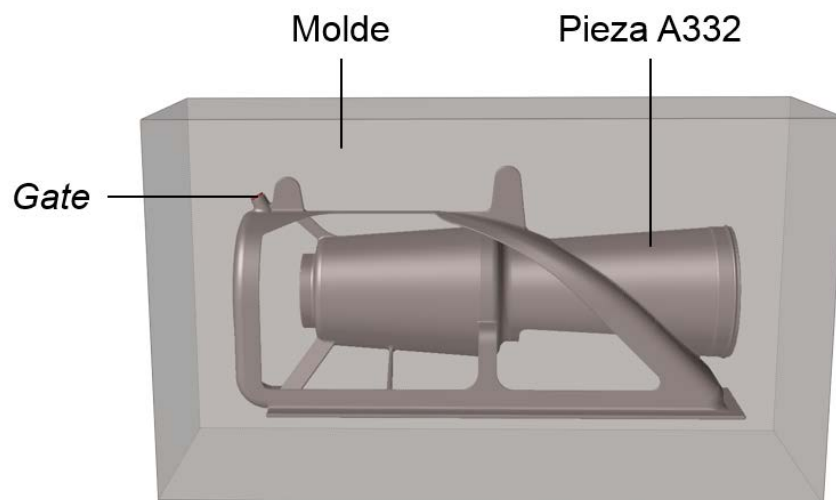


Figura 34. Modelo de armadura de plenum para correr simulación de fundición.

Fuente: Elaboración propia

El entregable de esta primera actividad consistió en la compilación de la simulación de “llenado” y una de solidificación para ambos modelos, la cual requirió de aproximadamente 13 horas para cada uno.

En la **segunda actividad** se buscaba analizar e interpretar los resultados obtenidos de la simulación realizada en la primera actividad de esta tercera fase.

El primer escenario de análisis que se interpretó fue el de “llenado”, este análisis simula como el metal fundido se distribuye y va llenando las cavidades dentro del molde para formar la pieza deseada. Uno de los factores que se pueden analizar dentro de la simulación de llenado es la temperatura del metal fundido conforme va fluyendo dentro del molde. En la Figura 35 se aprecian ambos diseños y las temperaturas del metal fundido una vez que se formó la pieza completa.

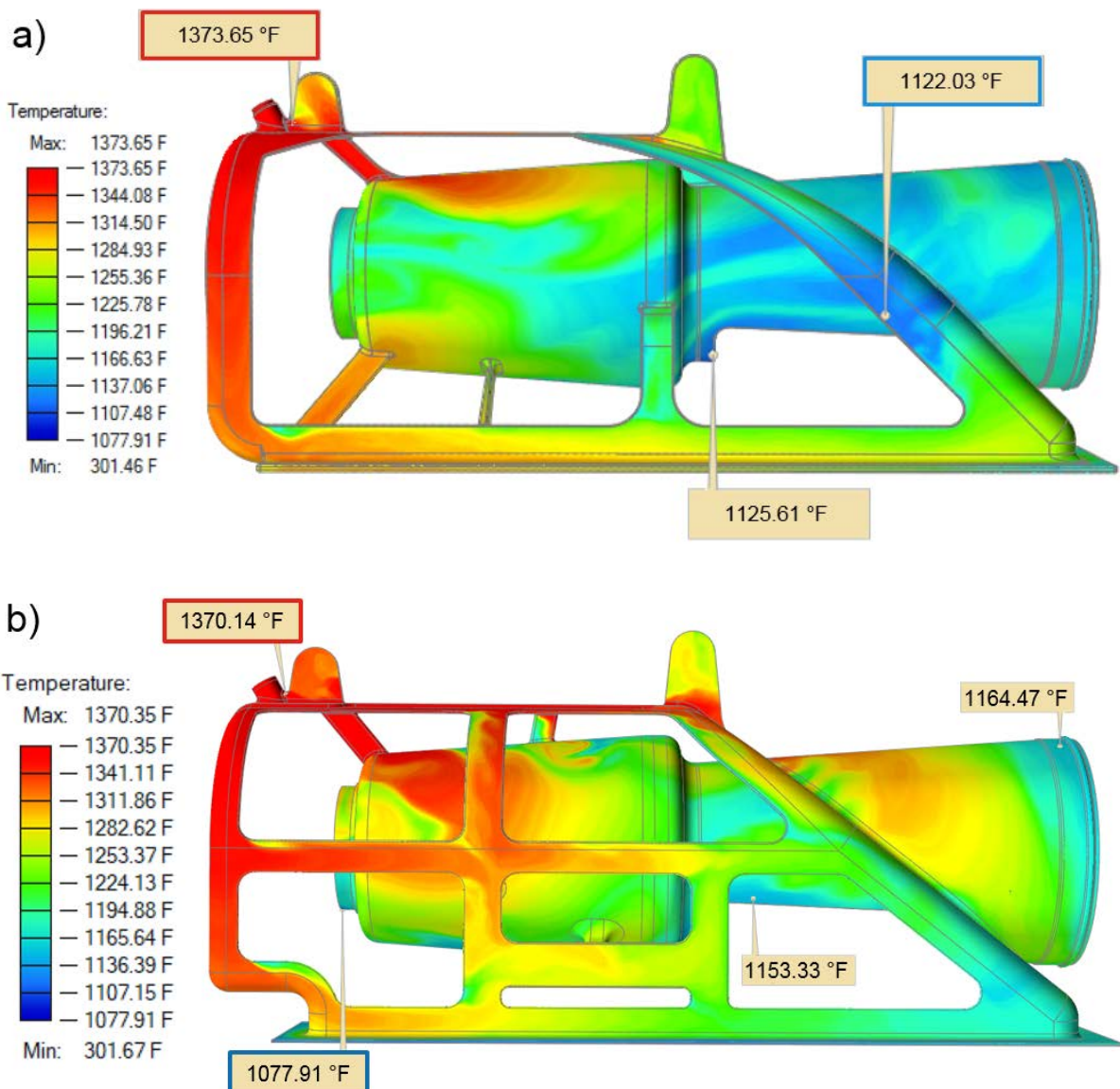


Figura 35. Temperatura del metal fundido mientras es vertido en el molde.

Fuente: Elaboración propia

La escala de colores representa la temperatura del metal fundido, los valores encuadrados en color rojo con valores de 1373.65°F y 1370.14°F, representan la temperatura máxima, a su vez, los valores de 1122.03°F y 1077.91°F, encuadrados en color azul, representan la temperatura mínima obtenida una vez vaciado todo el metal fundido necesario para llenar el molde. Analizando estos resultados, se determinó que las temperaturas mínimas alcanzadas, se encuentran por encima del punto de fusión del Aluminio A332. Es importante mantener una temperatura mayor a la del punto de fusión, la cual es de 977°F para el aluminio A332, propiedad definida en la segunda actividad de la primera fase del Bloque 1 realizado en este proyecto, ya que esto significa que el material no se empezará a solidificar antes de concluir el proceso de llenado, evitando así, la formación de defectos llamados *cold shuts*.

El segundo escenario de análisis que se interpretó fue el de solidificación, en este análisis, uno de los tipos de resultados que se puede apreciar, es el desarrollo del enfriamiento de la pieza una vez detenido el vaciado de metal fundido. En las Figuras 36 y 37 se pueden apreciar los resultados de enfriamiento en 4 valores de tiempo diferentes.

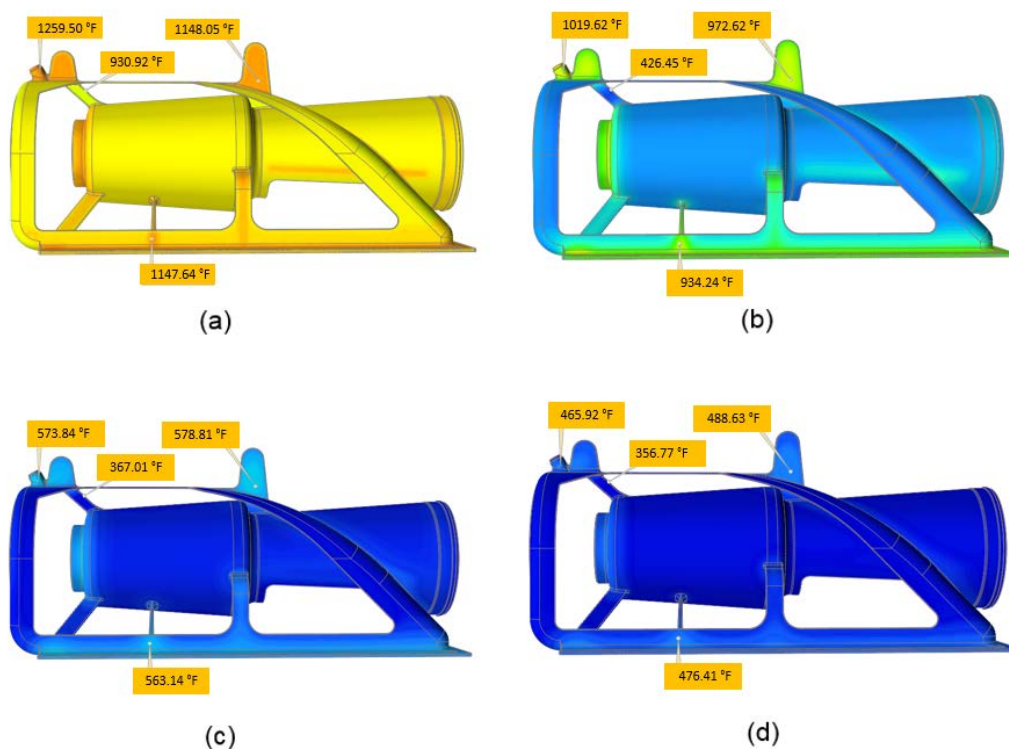


Figura 36. Temperatura de enfriamiento del metal fundido a diferentes tiempos para el Diseño 1. a) 0.5 seg b) 3 seg c) 7.5 seg d) 13.7 seg

Fuente: Elaboración propia

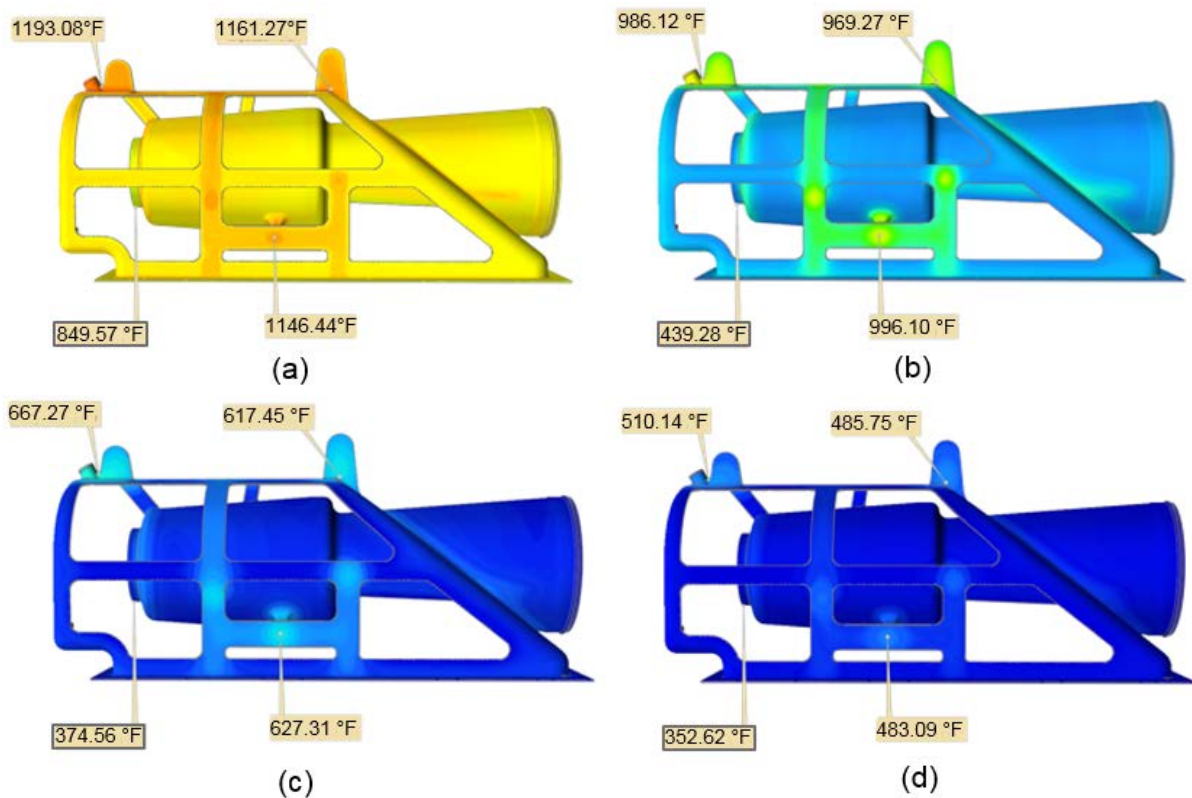


Figura 36. Temperatura de enfriamiento del metal fundido a diferentes tiempos para el Diseño 2. a) 0.5 seg b) 3 seg c) 7.5 seg d) 13.7 seg
Fuente: Elaboración propia

En estos resultados se puede apreciar que el enfriamiento de la pieza es casi uniforme en todas sus zonas, con excepción de la parte trasera del difusor (encuadrada), las demás zonas presentan temperaturas similares en cada uno de los intervalos de tiempo.

Otro de los tipos de resultados que se puede apreciar dentro del escenario de solidificación es la porosidad, la porosidad es uno de los defectos más comunes en los procesos de fundición y puede afectar directamente a las propiedades mecánicas del material (SHIN, 2009). En la Figura 38, se pueden apreciar los resultados de la simulación de porosidad para ambos diseños, con una amplificación de la zona con mayor porosidad en cada uno de estos.

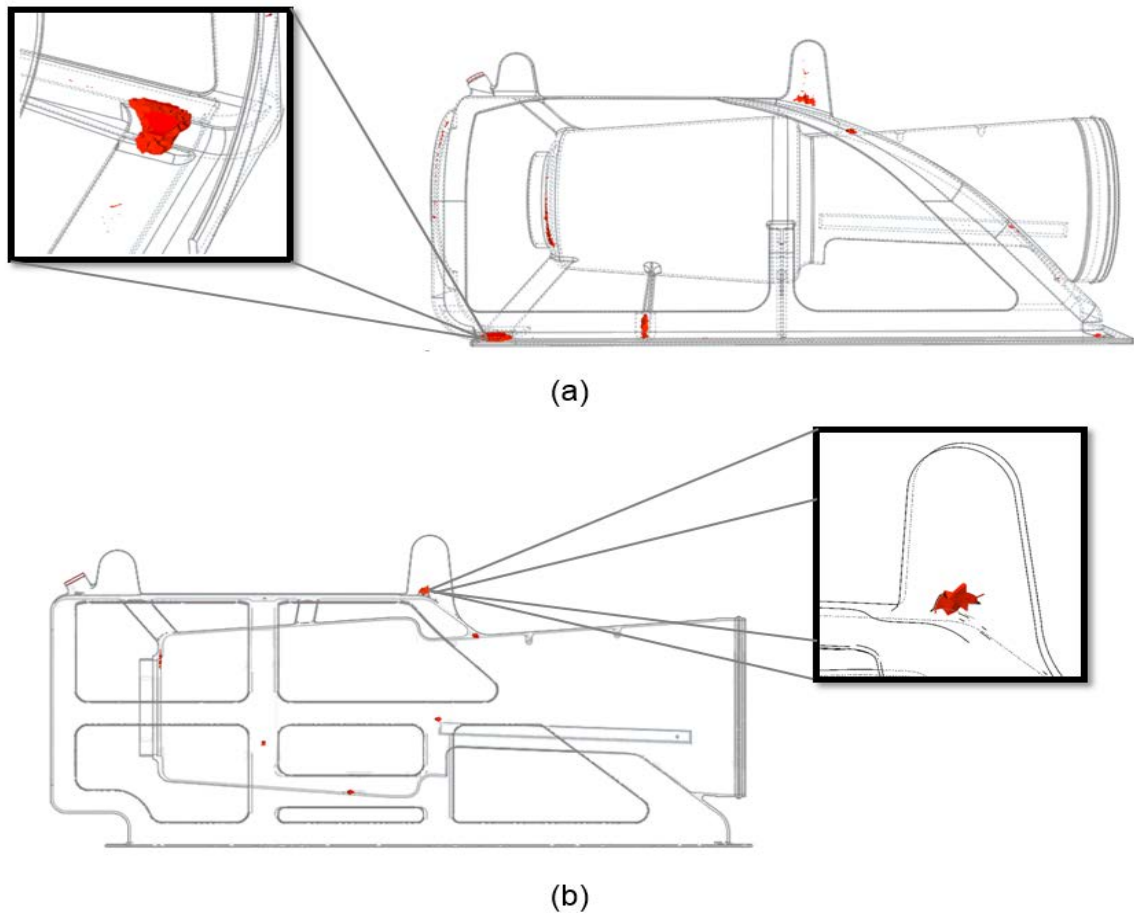


Figura 38. Resultados de Porosidad en ambos diseños. a) Diseño 1 b) Diseño 2
Fuente: Elaboración propia

Es normal obtener un poco de porosidad en las piezas creadas por fundición, sin embargo, cuando el defecto de porosidad ocurre en zonas donde se concentran esfuerzos, es muy probable que ahí se generen puntos de agrietamiento y fracturas (Kawahara, 2008). Al comparar las zonas con alta porosidad con las zonas de altas concentraciones de esfuerzos obtenidas del área de investigación de análisis estructural (Martinez, 2019), se determinó que solo en el Diseño 1, la porosidad se encuentra en una zona no deseada.

El entregable de esta segunda actividad fueron los análisis de resultados de los escenarios de llenado y solidificación, los cuales abarcaron la temperatura del metal al ser vaciado, temperaturas de proceso de enfriamiento y porosidad.

En la **tercera actividad** se buscaba la optimización de las simulaciones realizadas a ambos modelos, para esto se utilizó la información adquirida de la segunda actividad.

De los 3 escenarios/casos analizados para cada una de las armaduras, ambos diseños obtuvieron resultados positivos en cuanto a la temperatura del metal al ser vaciado y de las temperaturas del proceso de enfriamiento. Sin embargo, en el análisis de porosidad, el Diseño 1 presentó porosidad en una zona de altas concentraciones de esfuerzos, por lo que se decidió a optimizar esta simulación.

Una de las maneras más comunes de evitar la porosidad en el proceso de fundición, es el uso de *Risers*, los cuales consisten en agregar material extra a la pieza deseada, provocando que las ultimas zonas de enfriamiento sucedan en esta nueva área, provocando que la mayor generación de porosidad ocurra en esta zona. Entonces, para mejorar el proceso de fundición del diseño 1, se agregó un *Riser* en la zona donde se presentó mayor porosidad, así como se observa en la Figura 39.

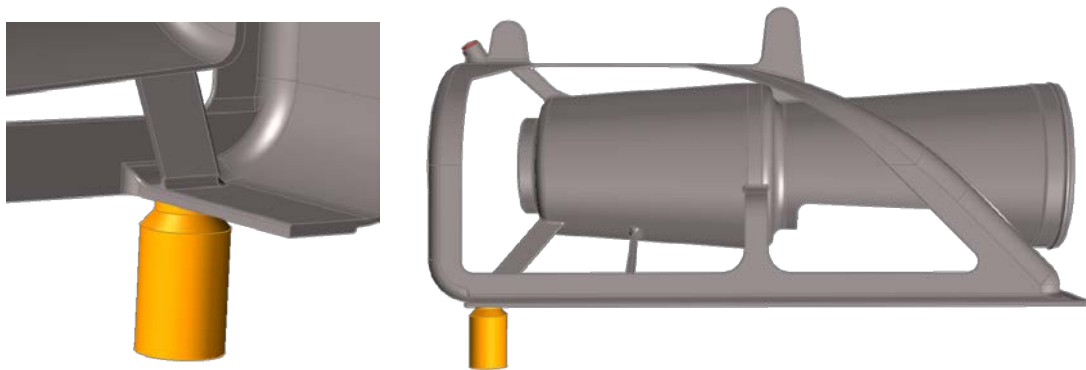


Figura 39. Posicionamiento del *Riser* para la optimización de la simulación del proceso de Fundición para el Diseño 1

Fuente: Elaboración propia

Una vez colocado esta nueva característica al proceso de fundición, se volvió a correr la simulación. Como se puede apreciar en la Figura 40, ahora la concentración de porosidad se encuentra en el *Riser*.

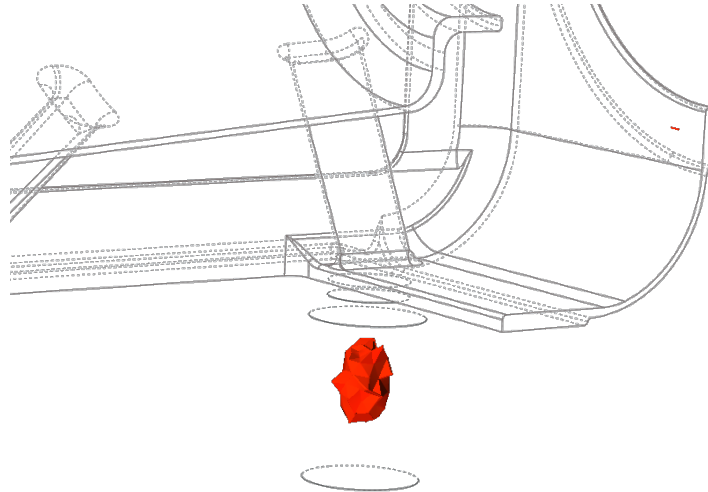


Figura 40. Resultados de Porosidad en Diseño 1 en simulación optimizada.

Fuente: Elaboración propia

El entregable de esta tercera actividad fue la optimización de la simulación del proceso de fundición para el Diseño 1, obteniendo así, simulaciones que predicen un proceso de manufactura por medio de fundición que es viable y eficiente para ambos diseños de armaduras. En la Tabla 13 se muestran los valores determinados gracias al desarrollo de esta tercera actividad.

Tabla 13. Resumen de resultados para la tercera fase del Bloque 2.

Simulación	Temp. Mínima del metal al ser vaciado	Punto de Fusión del material utilizado.	Porosidad en zonas críticas	Manufactura por Fundición
Diseño 1	1122 °F	977°F - 1040°F	Solucionada	Viable y Eficiente
Diseño 2	1077 °F		No presentó	Viable y Eficiente

Fuente: Elaboración Propia

Cuarta fase: Definición de beneficios y mejoras.

Tuvo como objetivo específico determinar los beneficios y mejoras que aporta la simulación por computadora en el nuevo proceso de manufactura para el plenum del Gulfstream V. Para lo cual se llevó a cabo una actividad principal.

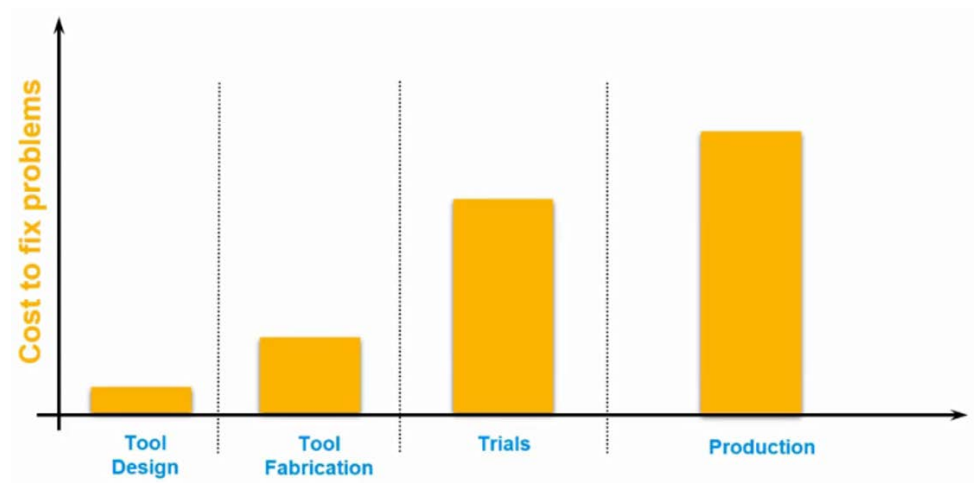
En la **primera actividad** se buscaba definir y enlistar los beneficios de realizar una simulación por computadora del proceso de fundición. Para esto fue necesario obtener información general del proceso y analizar cómo se abordaría la situación en caso de no haber realizado la simulación.

El proceso de fundición por *Investment Casting* ha tenido una gran importancia en la industria de fundición debido a su versatilidad, integridad y su alta precisión de dimensionamiento. Por lo tanto, este proceso es más adecuado para alabes de turbinas, la industria aeroespacial, fundiciones de joyería y muchos otros componentes científicos e industriales (Datta, 2014).

El uso de simulaciones por computadora del proceso de fundición puede contribuir a los esfuerzos de reducción de costos, dependiendo en la etapa del proceso de desarrollo de una nueva pieza en el que se utilice. Solo en las primeras etapas del diseño y desarrollo de una parte es posible considerar modificaciones de diseño para evitar problemas al final del proceso de manufactura (Flender, 2010).

Una de las principales características del proceso de Investment Casting es que el molde que se necesita para este proceso es muy caro. Como se mencionó en el planteamiento del problema de este proyecto, una cotización para este proceso ya fue antes realizada, obteniendo un estimado de costo de \$100,000.00 dólares para el molde. La realización de las simulaciones por computadora ayuda a identificar, primero, la viabilidad del proceso, si la pieza y su geometría son posibles de crear por medio de fundición, segundo, ayuda a identificar posibles defectos dentro del proceso, como lo es la porosidad. Al detectar estos defectos, se pueden tomar las decisiones de cambiar el proceso de fundición o de hasta cambiar la geometría de la pieza. Como aun no existe algo físico, los cambios se pueden realizar relativamente fácil, involucraría cuestión de tiempo y accesibilidad del diseñador. Por otro lado, si no se realizaran simulaciones, estos defectos se identificarían ya una vez creada la pieza, y para crear la pieza hay que crear el molde, es decir, si se requiere hacer un cambio significativo, habría que modificar el molde, o incluso hasta se tendría que hacer uno

nuevo, lo que involucraría una gran inversión de capital. En la Gráfica 19 se puede apreciar una gráfica la cual estima los diferentes costos que tiene el realizar un cambio o solucionar un problema en las diferentes etapas de su proceso.



Gráfica 19. Representación gráfica de estimados de costos durante diferentes etapas.

Fuente: Gráfica obtenida de (Altair, 2019)

En esta gráfica se puede observar como los costos se incrementan exponencialmente una vez llegada la etapa de pruebas o producción, esto se debe a que en estas etapas la mayoría de los equipos físicos ya están manufacturados, sin embargo, si se decide realizar un cambio en una etapa primeriza, como cuando apenas se está desarrollando el diseño de la herramienta, el costo es relativamente bajo, ya que esto involucraría solo cambios de los diseños virtuales de las piezas como los modelos 3D y cambios en los planos/dibujos de cada componente. Realizar un cambio en la etapa de producción, involucraría cambiar, los diseños, planos, herramientas de fabricación como los moldes, y podría retrasar los tiempos de entrega con el cliente.

Como entregable de esta primera actividad, se obtuvo la información de que los beneficios de realizar simulaciones del proceso de producción a la par de cuando se está creando el diseño de algún componente, beneficia al proyecto en ahorros de costos y en prevención de defectos.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 Conclusiones.

Como se mencionó en el Capítulo 3 de este trabajo, la metodología de este proyecto se llevó a cabo dividiendo el desarrollo de este en dos Bloques principales, los cuales requirieron de la realización de diferentes fases y actividades principales para lograr su objetivo.

En este capítulo, las conclusiones se presentarán siguiendo una estructura similar a la de la metodología.

Primero, se plantearán las conclusiones obtenidas del primer bloque de investigación referente a la selección de materiales. Este **Bloque 1** tuvo como propósito seleccionar los materiales más adecuados para la fabricación del plenum, que tuvieran las propiedades físicas y mecánicas necesarias para cumplir con los requerimientos y condiciones de frontera establecidas por Gulfstream.

En la primera fase, se definieron las propiedades mecánicas, propiedades físicas de los materiales y las condiciones de frontera requeridas, concluyendo en que las características primordiales con las que debe cumplir el material son las que se muestran en la **Tabla 9**, siendo algunas de estas la densidad, *Yield strength* y la temperatura máxima de servicio.

Con el desarrollo de la segunda fase, se logró determinar los materiales que cumplían con las propiedades físicas, propiedades mecánicas y con las condiciones de frontera establecidas por Gulfstream. El resultado fue una lista de **168 materiales** (Anexo A) del cual se concluyó que era necesario aplicar más criterios de selección para reducir el número de materiales posibles a elegir.

En la tercera fase, se seleccionaron los materiales más óptimos que cumplieron con las características requeridas por Gulfstream y por Honeywell. Aquí se definieron nuevas propiedades y los resultados del análisis fueron priorizados, dando como resultado solo 9 materiales posibles a elegir, a partir de los cuales se escogieron el Aluminio **A332** y el **Magnesio QE22A**, el criterio de evaluación y el desarrollo de selección puede ser observado en el capítulo 4, Bloque 1, de este proyecto. La conclusión de esta tercera fase, y la más relevante dentro del Bloque 1 enfocado a la selección del material para la fabricación de la armadura del nuevo diseño de plenum

fue utilizar el material Aluminio A332, *cast*, T5 como resultado final de la selección de materiales. La justificación de esta selección fue que Honeywell Torrance está más familiarizado con fundiciones de aluminio que de magnesio, además de que el magnesio es un material con alto riesgo de flamabilidad y su manufactura requiere de procesos adicionales a los del aluminio.

En resumen, de la cuarta fase se obtuvo que la selección de cualquiera de los 9 materiales disponibles del análisis de selección de materiales, además de cumplir con todos los requerimientos, resultará en una reducción de costo y peso en comparación con el diseño actual. El Aluminio A332 resultó tener un costo equivalente al 2% del costo del material utilizado actualmente y un ahorro de 2.13 lbs en peso, y el Magnesio QE22A resultó con un costo equivalente al 15% del material actual y un ahorro de 4.9 lbs.

En conclusión, para el Bloque 1, los materiales más adecuados para la fabricación de la armadura del plenum son el Aluminio A332, *cast*, T5 y el Magnesio QE22A.

En cuanto al segundo bloque de investigación, enfocado a la simulación del proceso de fundición, se plantean las conclusiones obtenidas. Este Bloque 2 tuvo como propósito determinar un proceso de manufactura viable y eficiente por medio de fundición para la propuesta de modelo 3D de la armadura del plenum del Gulfstream V.

En la primera fase, se establecieron las variables necesarias para realizar una simulación por computadora del proceso de fundición, además, se prepararon los modelos de las armaduras para que reflejaran el resultado de la pieza de casting que se deseaba obtener. Finalmente, de esta fase se concluyó que las variables necesarias para definir la simulación eran:

- Modelo 3D de la pieza a analizar/fundir.
- Material de la pieza a fundir.
- Temperatura a la que se vaciará el material.
- Posición, forma y dimensiones de los “*gates*”.
- Material del molde de fundición.
- Tipo de fundición.
- Velocidad de vaciado.
- Tamaño de elemento de malla.

En la segunda fase, se definió el proceso de fundición más conveniente para el diseño propuesto de la armadura del plenum del Gulfstream V. Para esto fue necesario investigar sobre los diferentes tipos de fundición disponibles para Honeywell, y comparar sus características principales. En conclusión, de los diferentes tipos de fundición analizados, ***Investment Casting*** resultó ser el más apropiado, siendo este el proceso con la mayor capacidad de crear piezas precisas y con espesores de pared más delgados que los demás.

La tercera fase resultó ser de las más retadoras, aquí se aseguró que el proceso de fundición para las propuestas de armaduras del plenum es viable y eficiente. Utilizando la información adquirida en las fases 1 y 2, se realizaron las simulaciones de fundición, obteniendo resultados para los escenarios de llenado y solidificación, donde se pudo apreciar la temperatura de vaciado del metal, la temperatura de enfriamiento del metal y la porosidad en la pieza fundida. Después de optimizar uno de los diseños que presentó áreas de mejora, se pudo concluir que ambos diseños son factibles para realizarse por medio del proceso de fundición *Investment Casting*.

En la cuarta fase se determinaron los beneficios y mejoras que aporta la simulación por computadora en el nuevo proceso de manufactura para el plenum del Gulfstream V. Concluyendo en que el hacer uso de las simulaciones por computadora, reduce los costos en el desarrollo de un nuevo componente si es implementada en las etapas primeras del diseño. También, resultó útil en la identificación y prevención de defectos de fundición. Como otro beneficio se podría incluir que, al utilizar fundición como método de manufactura, Honeywell podría contratar a un proveedor externo que le fabrique la pieza, garantizando así un proceso de fundición eficiente.

5.2 Recomendaciones.

Como parte de las recomendaciones basadas en el desarrollo de este proyecto, se recomienda ampliamente el uso de los 2 softwares principales utilizados para la realización de este.

El software de selección de materiales, CES Selector, puede ser una herramienta muy útil, puede ser desde una base de datos de consulta para alguna propiedad de algún material específico, hasta una herramienta para seleccionar el material más óptimo para crear un nuevo diseño, así como se demostró en este proyecto.

El uso del software de simulación por computadora del proceso de fundición se recomienda como herramienta para procesos que se encuentren en las primeras etapas de desarrollo. Solo en Honeywell Mexicali se diseñan y modifican piezas las cuales son fabricadas por medio de fundición, sin embargo, no existe algún departamento especializado en analizar dicho proceso. Otra recomendación sería involucrar la simulación de fundición como un análisis preliminar antes de liberar los planos de diseño, con el fin de detectar mejoras o hasta errores en el diseño.

5.3 Líneas de Investigación Futuras.

Dentro del bloque 1, enfocado a la selección de materiales, se identificó como futura línea de investigación, el investigar más las aplicaciones del material Magnesio QE22A dentro del ámbito aeroespacial y dentro de Honeywell. Es cierto que es un material con un alto riesgo de flamabilidad, y que necesita de condiciones especiales para ser maquinado, sin embargo, se encontró que dentro de Honeywell, en Phoenix, Arizona, se realizan piezas con este material, y más relevante aun, utilizando el proceso de manufactura de Investment Casting. El investigar que piezas se fabrican y con qué proveedores podría ser de gran beneficio para este proyecto y para futuras referencias dentro de la compañía.

5.4 Conclusión del Proyecto Global.

El proyecto Global de esta investigación tuvo como propósito “Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación”. Para lograrlo, fue necesario dividir el proyecto en áreas de investigación, en las cuales se incluyen Diseño 1, Diseño 2, FEA, Materiales, CFD, Fundición y Costos.

De acuerdo a las aportaciones basadas en los resultados de cada área de investigación, se pudo obtener la Tabla 3. En la primera parte se muestran los resultados de factor de seguridad de la estructura en resistencia última (Martínez, 2019), el peso total de Diseño 1 (Dávila, 2019) y Diseño 2 (Lizárraga, 2019), el Costo de cada diseño de acuerdo a los procesos de manufactura (Romero, 2019) y la funcionalidad del Análisis Computacional de Fluidos (Romero, 2019). Se le asignó una ponderación en porcentaje de acuerdo a las prioridades establecidas durante la junta con los clientes.

Tabla 14. Criterios de ponderación de resultados de áreas de investigación para Diseño 1 y 2.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño 1	2.35	10.6	\$3,093.18	Excede 4 de 4 parámetros
Diseño 2	3.05	11.08	\$3,061.94	Excede 3 de 4 parámetros

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener los resultados de la Tabla anterior, se realizó la Tabla 4 en la cual se le asignó el porcentaje correspondiente de acuerdo a los resultados obtenidos en cada Diseño. De esta manera, al Diseño 2 se le asignó el 35% de ponderación de Factor de seguridad debido a que es más seguro que el Diseño 1. En el caso del peso, el Diseño 1 tiene el 30% por tener un peso menor que el Diseño 2.

Para la cuestión de Costos, se incluyeron los precios de los procesos de manufactura, como el proceso de fundición, maquinado, soldadura, remachado, etc., y se obtuvo

un costo final. El Diseño 2 tiene un precio menor por lo que se asignó el 25%. De igual manera, en los resultados del Análisis Computacional de Fluidos se obtuvo que el Diseño 1 tiene un mejor comportamiento que el Diseño 2, por lo que se otorgó al Diseño 1 el 10%, mientras que al Diseño 2, 7.5%.

Tabla 15. Ponderación de cada diseño designados por área de investigación.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño 1	26.96%	30%	24.74%	10%
Diseño 2	35%	28.64%	25%	7.5%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 5 se obtuvieron los resultados totales de ponderación de cada área de investigación, y se eligió como mejor propuesta el **Diseño 2** (señalado en azul).

Tabla 16. Ponderación Total de Diseño 1 y 2.

Diseño	Total
Diseño 1	91.7%
Diseño 2	96.14%

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, se evaluaron las propiedades del Diseño 2 comparadas con el Diseño original, mostrando los resultados en la Tabla 6. En la columna de Factor de Seguridad, no se tiene el valor de factor de seguridad para el diseño original de compuestos, sin embargo, se sabe que es factible usarlo debido al reporte de calificación del ECS para Gulfstream V (Honeywell, 2002), en el que se evaluó el ensamble, más no por componente individual. Por otro lado, el factor de seguridad del Diseño 2 mostrado en la tabla, es de 3.05 (Martínez, 2019)

Asimismo, el peso del Diseño original es de 12.75 lb y fue obtenido en base en esta investigación (Materiales), mientras que el peso del Diseño 2 es de 11.08 lb (Lizárraga, 2019), lo cual significa un ahorro en peso de 1.67 lb.

Además, el costo del diseño original es de \$5,076.91 dólares, mientras que el costo del Diseño 2 es de \$3,061.94 dólares. Esto se traduce en un ahorro de \$2,014.97 dólares por plenum. Si se considera la demanda de 322 plenum para el 2019, se obtendría un ahorro de \$648,820.340 dólares. Sin embargo, al considerar el costo del molde para fundición, se tiene un ahorro total de \$534,376.44 dólares (Romero, 2019).

Por último, en la cuestión de Análisis Computacional de Fluidos, se utilizó el análisis del diseño original como referencia base para evaluar el comportamiento del fluido a través del plenum. Una vez evaluado este componente, se obtuvo que el Diseño 2 excede 3 de 4 parámetros con respecto al original (Romero, 2019).

Tabla 17. Comparación de Resultados para Diseño original y Diseño 2.

Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño Original	Desconocido	12.75	\$5,076.91	Referencia base
Diseño 2	3.05	11.08	\$3,061.94	Excede 3 de 4 parámetros

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con base a estos resultados, se pudo determinar que el objetivo global “Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación” se cumple. Puesto que se redujo el peso del diseño original, cumple con los requerimientos de funcionalidad y permitió reducir el costo del proceso de fabricación.

Referencias

- Agrawal, B. Platzer, M. (2018) Standard Handbook for Aerospace Engineers. (2da ed.) EEUU: McGraw-Hill
- American National Standards Institute, Inc. Surface Texture, ANSI B46.1-1978. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1978.
- Ashby M, Shercliff H, Cebon D (2014) Materials: engineering, science, processing and design. (3era ed.). Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- Ashby MF (2017) Materials selection in mechanical design. (5ta ed.) EEUU: Butterworth-Heinemann.
- Askeland, D. Fulay, P. (2010) Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. (2da ed.) México: CENGAGE Learning.
- Baran, I., Cinar, K., Ersoy, N., Akkerman, R., y Hattel, J. (2017). A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. Archives of Computational Methods in Engineering, 24(2), 365–395. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>
- Datta, G. (2014). Reinventing investment casting process for sustainable development. Indian Foundry J. 60, 21–27
- Flinn, R. (1995). Engineering Materials and Their Applications. EEUU: John Wiley & Sons.
- Fuoco R, Correa ER (2003) The effect of gating system design on the quality of aluminum gravity casting. Proceedings from the AFS International conference on Structure Aluminum Casting, Orlando, pp. 205–224
- Granta Design Ltd. (2016) CES Selector 2016
- Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. (3era ed.) México: McGraw Hill

- Gundlach, J. (2012). *Designing Unmanned Aircraft Systems - A Comprehensive Approach*. Estados Unidos: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Recuperado de:
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDUASACA1/designing-unmanned-aircraft/designing-unmanned-aircraft>
- Hassan, M., Othman, A. y Kamaruddin, S. (2017). A review on the manufacturing defects of complex-shaped laminate in aircraft composite structures. *Reino Unido: International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9–12), 4081–4094. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s00170-017-0096-5>
- Honeywell Aerospace (1996). *DETAIL SYSTEM SPECIFICATION FOR GULFSTREAM V ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM*. [Especificación de sistema]. Copia en posesión del autor de este trabajo.
- Honeywell Aerospace (2016). *ECS Plenum Part Family*. [Manual de Diseño]. Copia en posesión del autor de este trabajo.
- Honeywell (2018). *TODAY'S HONEYWELL* Recuperado de:
<https://www.honeywell.com/who-we-are/overview>
- Kadambi, V. y Prasad, M. (2015). *Turbomaquinaria*. Estados Unidos: New Academic Science. Recuperado de:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011NQLD4/turbomachinery-3rd-edition/aerodynamic-thermal-design>
- Pattnaik S, Karunakar DB, Jha PK (2013) Multi-characteristic optimization of wax patterns in the investment casting process using grey–fuzzy logic. *Int J Adv Manuf Technol* 67(5–8):1577–1587. doi: 10.1007/s00170-012-4591-4. Recuperado de la base de datos de Springer.
- Pedefferri P. (2018) Galvanic Corrosion. In: *Corrosion Science and Engineering. Engineering Materials*. Doi: https://ebiblio.cetys.mx:4083/10.1007/978-3-319-97625-9_10 Recuperado de la base de datos de Springer

Segarra, M, Barrenche, C. Calderón, A. Fernández, A. (2019). Recent Advancements in Materials and Systems for Thermal Energy Storage: *Materials Selection for Thermal Energy Storage Applications (pp. 55-66)*. Nueva Zelanda: Springer Nature

Thammachot N, Dulyapraphant P, Bohez ELJ (2013) Optimal gating system design for investment casting of sterling silver by computer-assisted simulation. *Int J Adv Manuf Technol* 67(1–4):797–810. doi: 10.1007/s00170-012-4523-3. Recuperado de la base de datos de Springer.

ANEXOS

ANEXO A

En este anexo se muestran los 168 materiales resultantes de la fase 2 dentro del Bloque 1 para el desarrollo de esta investigación.

1. Al(2009)-15%SiC(w) MMC powder
2. Al(2009)-20%SiC(p) MMC powder
3. Al(2024)-30%SiC(p) MMC powder
4. Al(2124)-15%SiC(w) MMC powder
5. Al(2124)-20%SiC(p) MMC powder
6. Al(2618)-12%SiC(p) MMC powder
7. Al(6013)-15%SiC(w) MMC powder
8. Al(6061)-25%SiC(p) MMC powder
9. Al(6091)-25%SiC(p) MMC powder
10. Al(8089)-20%SiC(p) MMC powder
11. Al(AMC217-xa,T351)-17%SiC(p) MMC powder
12. Al(AMC217-xe,T4)-17%SiC(p) MMC powder
13. Al(AMC217-xe,T4)-17%SiC(p) MMC powder
14. Al-40%AlN(p)
15. Al-47%SiC(f), 0/90/0/90
16. Al-47%SiC(f), transverse
17. Al-48%B(f), transverse
18. Al-50%B(f), transverse
19. Al-60%C-M40(HM-C-fiber), transverse
20. Aluminum, 2014, T4
21. Aluminum, 2014, T6
22. Aluminum, 2014, T62
23. Aluminum, 2014, T651
24. Aluminum, 2014, T6510
25. Aluminum, 2014, T6511
26. Aluminum, 2014, T652
27. Aluminum, 2017, T4
28. Aluminum, 2017, T42
29. Aluminum, 2017, T451
30. Aluminum, 2024, O
31. Aluminum, 2024, T3
32. Aluminum, 2024, T351
33. Aluminum, 2024, T3510/T3511
34. Aluminum, 2024, T36
35. Aluminum, 2024, T361
36. Aluminum, 2024, T4
37. Aluminum, 2024, T42
38. Aluminum, 2024, T6
39. Aluminum, 2024, T62
40. Aluminum, 2024, T72
41. Aluminum, 2024, T81
42. Aluminum, 2024, T851
43. Aluminum, 2024, T8510/T8511
44. Aluminum, 2024, T861
45. Aluminum, 2025, T6
46. Aluminum, 2026, T3511
47. Aluminum, 2124, T851
48. Aluminum, 2219, T62
49. Aluminum, 2219, T81
50. Aluminum, 2219, T851
51. Aluminum, 2219, T8511
52. Aluminum, 2219, T852
53. Aluminum, 2219, T87
54. Aluminum, 2224A, T351
55. Aluminum, 2424, T3
56. Aluminum, 2519, T87
57. Aluminum, 2524, T3
58. Aluminum, 2618, T4
59. Aluminum, 2618, T6
60. Aluminum, 2618, T61
61. Aluminum, 296.0, permanent mold cast, T6
62. Aluminum, 319.0, permanent mold cast, T6
63. Aluminum, 319.0, sand cast, F
64. Aluminum, 319.0, sand cast, T6
65. Aluminum, 336.0, permanent mold cast, T551
66. Aluminum, 336.0, permanent mold cast, T65
67. Aluminum, 518.0, die cast, F
68. Aluminum, 8009, rapid solidification
69. Aluminum, 8019, rapid solidification
70. Aluminum, A332.0, cast, T5
71. Aluminum, A332.0, cast, T6
72. Aluminum, EN AC-44300, die cast, F
73. Aluminum, EN AC-48000, chill cast, T5
74. Aluminum, EN AC-48000, chill cast, T6
75. Aluminum-polyethylene sandwich
76. Beryllium, grade 0-50, hot isostatically pressed
77. Beryllium, grade I-220B, vacuum hot-pressed
78. Beryllium, grade I-250, hot isostatically pressed
79. Beryllium, grade I-400, vacuum hot-pressed
80. Beryllium, grade I-70A, vacuum hot-pressed
81. Beryllium, grade S-200, extruded
82. Beryllium, grade S-200F, vacuum hot-pressed
83. Beryllium, grade S-200FC, cold isostatically pressed
84. Beryllium, grade S-200FH, hot isostatically pressed
85. Beryllium, grade S-65B, vacuum hot-pressed
86. Beryllium, grade SR-200, plate, >6.35 mm thick
87. Beryllium, grade SR-200, sheet, 0.5 to 6.35mm thick
88. Beryllium, Standard Grade, hot pressed
89. Beryllium, Standard Grade, stress relieved
90. Beryllium-aluminum alloy, AlBeMet 162
91. Beryllium-aluminum alloy, Beralcast 191, cast
92. Beryllium-aluminum alloy, Beralcast 310
93. Beryllium-aluminum alloy, Beralcast 363, cast
94. BMI/HS carbon fiber (fabric), biaxial laminate
95. BMI/HS carbon fiber (fabric), QI laminate
96. BMI/HS carbon fiber, QI laminate
97. Carbon (vapor deposited)
98. Duralcan Al-10Al₂O₃ (p) (W2A10A-T6)
99. Duralcan Al-10Al₂O₃ (p) (W6A10A-T6)
100. Duralcan Al-10SiC (p) cast (F3K10S)
101. Duralcan Al-10SiC (p) cast (F3S10S)
102. Duralcan Al-15Al₂O₃ (p) (W6A15A-T6)
103. Duralcan Al-20SiC (p) cast (F3K20S)
104. Duralcan Al-20SiC (p) cast (F3S20S)
105. Epoxy/HS carbon fiber (fabric), biaxial laminate
106. Epoxy/HS carbon fiber (fabric), QI laminate
107. Epoxy/HS carbon fiber, QI laminate
108. Magnesium, AZ31B
109. Magnesium, AZ61A
110. Magnesium, commercial purity, ASTM 9980A
111. Magnesium, EA55RS
112. Magnesium, Elektron 21
113. Magnesium, EQ21A, cast
114. Magnesium, EZ33A, cast, T5
115. Magnesium, QE22A, cast, T6
116. Magnesium, WE43A
117. Magnesium, WE43A, cast
118. Magnesium, WE43B, cast, T6
119. Magnesium, WE54A
120. Magnesium, WE54A, cast
121. Magnesium, Z6
122. Magnesium, ZM21
123. Mg(+2%Al)-30%graphite (f), longitudinal
124. Mg(+4%Al)-30%graphite (f), longitudinal
125. Mg-14%SiC(p), rapid solidification
126. Mg-15%B4C(p), powder metallurgy
127. Mg-15%SiC(p), powder metallurgy
128. Mg-15%SiC(w)

- | | |
|--|---|
| 129. Mg-20%B4C(p) | 150. PEKK (40% carbon fiber) |
| 130. Mg-20%SiC(p) | 151. PET (30% carbon fiber) |
| 131. Mg-20%SiC(w) | 152. PI (30% carbon fiber) |
| 132. Mg-21%SiC(p), liquid metallurgy | 153. PI (30% carbon fiber, crystallized) |
| 133. Mg-24%Al2O3(f), longitudinal | 154. Polyimide/HS carbon fiber (fabric), QI laminate |
| 134. Mg-25%B4C(p), powder metallurgy | 155. PPS (20% carbon fiber) |
| 135. Mg-30%B4C(p) | 156. PPS (30% carbon fiber) |
| 136. Mg-30%graphite (f), longitudinal | 157. PPS (30% carbon fiber, 15% PTFE) |
| 137. Mg-30%SiC(p) | 158. PPS (40% carbon fiber) |
| 138. Mg-70%B(f), transverse | 159. PSU (30% carbon fiber) |
| 139. PAI (30% carbon fiber) | 160. Silicon |
| 140. PARA (30% carbon fiber) | 161. SPS (10% carbon fiber) |
| 141. PBT (30% carbon fiber) | 162. SPS (15% carbon fiber, 15% PTFE) |
| 142. PEEK (30% carbon fiber) | 163. SPS (15% carbon fiber, 15% PTFE, 2%
silicone) |
| 143. PEEK (30% carbon fiber, lubricated) | 164. SPS (20% carbon fiber) |
| 144. PEEK (40% carbon fiber) | 165. SPS (30% carbon fiber) |
| 145. PEEK/IM carbon fiber, QI laminate | 166. SPS (40% carbon fiber) |
| 146. PEI (30% carbon fiber) | 167. Ti-60%beryllium (f) hot pressed, longitudinal |
| 147. PEK (20-30% carbon fiber) | 168. Ti-60%beryllium (f) hot pressed, transverse |
| 148. PEK (30% carbon fiber) | |
| 149. PEKK (30% carbon fiber) | |

ANEXO B

Fotografía del plenum actual siendo pesado y obteniendo un peso de 12.48 lbs. Este sub-ensamble no incluye el *bracket* de la parte de atrás, el cual, según las especificaciones del plano y modelos 3D por computadora, pesa 0.27 lbs. Razón por la que el peso del ensamble del plenum actual es de 12.75 lbs.



ANEXO C

Fotografía de la muestra de poliimida (*prepreg*) y su peso.

