

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

"Medición de Esfuerzos Residuales In Situ en Procesos de Adición de Material: Un Enfoque Experimental basado en el Método de Curvatura"

Diego Alejandro González Castellano

Valeria Anahí Barreto Cuesta

Christiam Nicolás Jaramillo Vallejo

Juan Fernando Jaramillo Maldonado

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniero Mecánico

Quito, 15 de diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**In Situ Residual Stress Measurement System in Material Addition
Processes using the Curvature Method.**

Diego Alejandro González Castellano

Valeria Anahí Barreto Cuesta

Christiam Nicolás Jaramillo Vallejo

Juan Fernando Jaramillo Maldonado

Alfredo Valarezo, PhD.

Quito, 15 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Valeria Anahí Barreto Cuesta

Código: 00212663

Cédula de identidad: 0924175243

Lugar y fecha: Quito, 15 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Diego Alejandro González Castellano

Código: 00214092

Cédula de identidad: 1760920056

Lugar y fecha: Quito, 15 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Christiam Nicolás Jaramillo Vallejo

Código: 00213996

Cédula de identidad: 1724475726

Lugar y fecha: Quito, 15 de diciembre de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Juan Fernando Jaramillo Maldonado

Código: 00209021

Cédula de identidad: 1726449224

Lugar y fecha: Quito, 15 de diciembre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El presente estudio tiene la finalidad de la medición de esfuerzos residuales in-situ para procesos de adición de material como lo son el depósito de recubrimientos por termorociado y manufactura aditiva por soldadura. Se presentan datos finales y resultados preliminares, respectivamente. El proyecto muestra tanto la construcción del módulo In-situ Coating Processing sensor (ICP), manufactura de sus partes, así como la metodología empleada, la cual se basó en el método de curvatura. Para la medición de la curvatura requerida se usó el láser CD22-100-485. Sus lecturas que fueron procesadas para la obtención de esfuerzos residuales. La metodología se basó en las ecuaciones de Stoney, Brenner-Senderoff y Tsui&Clyne, alimentadas por los datos del láser y por los espesores encontrados por procesos de metalografía. Los resultados de esfuerzos residuales promedio corresponden a probetas de acero y aluminio con recubrimiento de Ni-Cr, los cuales fueron en promedio: $\sigma_{\text{sustrato acero}} = 14$ [MPa], $\sigma_{\text{recubrimiento}} = -12$ [MPa] y $\sigma_{\text{sustrato aluminio}} = 62$ [MPa], $\sigma_{\text{recubrimiento}} = -387$ [MPa], respectivamente. Los resultados fueron comparados con bibliografía relacionada, a la par que se recurrió a un análisis de video para corroborar las lecturas de deflexión. Todo lo descrito comprueba la veracidad y exactitud de los resultados obtenidos, siendo esta investigación un paso fundamental para la comprensión del comportamiento de esfuerzos residuales.

Palabras clave: Esfuerzos residuales, láser, deformación, Stoney, Brenner-Senderoff, abaqus, tiempo real, termorociado, manufactura aditiva, ICP.

ABSTRACT

The present study aims to measure residual stresses in-situ for material addition processes such as the deposition of thermal spray coating and additive manufacturing by welding. Final data and preliminary results for each process are presented, respectively. The project includes the construction of the In-situ Coating Processing sensor (ICP) module, the manufacturing of its parts, and the employed methodology, which was based on the curvature method. The CD22-100-485 laser was used to measure the required curvature. The readings were processed to determine residual stresses. The methodology relied on the Stoney, Brenner- Senderoff, and Tsui&Clyde equations, fed by laser data and thickness measurements obtained through metallography processes. The results of mean residual stress correspond to steel and aluminum specimens with Ni-Cr coating, averaging: $\sigma_{\text{substrate,steel}} = 14$ [MPa], $\sigma_{\text{coating}} = -12$ [Mpa] and $\sigma_{\text{substrate,aluminum}} = 62$ [MPa], $\sigma_{\text{coating}} = -387$ [MPa], respectively. The results were compared with related literature, and video analysis was used to verify deflection readings. All described procedures confirm the truthfulness and accuracy of the obtained results, making this research a fundamental step in understanding the behavior of residual stresses.

Keywords: Residual stresses, laser, deformation, Stoney, Brenner-Senderoff, Abaqus, real-time, thermal spray, additive manufacturing, ICP.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen ejecutivo	11
Definición del problema	12
Diseño y selección de componentes.....	22
Gestión de proyectos	25
Estándares ingenieriles.....	25
Selección de materiales y componentes.....	28
Diseño para manufactura.....	33
Análisis ingenieril.....	41
Cálculo de diseño sistemas de refrigeración	46
Cálculo de Esfuerzos Residuales	49
Plan de pruebas del prototipo.....	53
Seguridad del diseño	57
Manual de operación y mantenimiento	63
Resultados.....	70
Discusión	75
Trabajo futuro.....	80
Agradecimientos.....	81
Apéndice 1: Planos mecánicos y cálculos detallados	87
APÉNDICE 1.1: Código MATLAB para control de robot KUKA.....	87
Apéndice 2: Gestión de proyectos.....	109
Apéndice 3: Carpeta	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Costos separados por categorías	24
Tabla 2 Especificación de soluciones y criterios	28
Tabla 3 Ponderación de los resultados, tabla de conclusiones. Para cada solución, multiplico la calificación con el ponderado del criterio.	32
Tabla 4 Cálculos Balances energéticos para recubrimiento y soldadura.....	45
Tabla 5. Parámetros y propiedades usadas en los cálculos.....	51
Tabla 6 Temperatura antes y después de las modificaciones al prototipo.....	54
Tabla 7 Riesgos referentes a daños al equipo	58
Tabla 8 Riesgos referentes a mal diseño.....	60
Tabla 9 Riesgos referentes a daño a los operadores	62
Tabla 10 Listado de partes del prototipo.....	63
Tabla 11. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de acero. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el sustrato.....	71
Tabla 12. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de acero. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el recubrimiento.....	72
Tabla 13. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de Al. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el sustrato.....	74
Tabla 14. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de Al. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el recubrimiento.....	74
Tabla 15 Reporte de gastos	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista lateral del sistema. Verde: Entrada de refrigeración. Azul: Entrada de aire para limpieza de filtros.....	18
Figura 2. Azul: Filtros de onda para lentes y recepción del láser.....	19
<i>Figura 3 Prototipo de sensor ICP (vista frontal)</i>	19
<i>Figura 4 Prototipo de sensor ICP (vista superior)</i>	19
Figura 5 Diseños preliminares del soporte.....	23
Figura 6 Costos desglosados en porcentajes.....	25
Figura 7 Dibujos de métodos considerados para medición de esfuerzos residuales. a) Método de Curvatura por Reloj Palpador. b) Método de Curvatura por Rayo Láser. c) Método de Curvatura por DIC. d) Método de Difracción de Rayos X (Madrid, 2017). e) Método de Agujero Ciego (TEST Systems , 2023).....	29
Figura 8 Diagrama de procesos para plan de manufactura.	35
Figura 9. Esquema de balance de energía del sistema con volumen de control macro.	42
Figura 10 Comparación entre resultados obtenidos con el sensor de distancia láser y análisis de video	55
Figura 11 Micrografía de una muestra de acero y recubrimiento de níquel cromo, con magnificación de 100X	56
Figura 12 Muestras de acero A36: recubrimiento de níquel-cromo (imagen superior) y manufactura aditiva (imagen inferior).....	57
Figura 13 Diagrama general.....	66
Figura 14 Vista explosionada.....	66
Figura 15 Diagrama de conexiones.....	67
Figura 16. Esquema del patrón de deposición para la medición in situ de la curvatura. La distancia vertical entre los pases de la flama es de 10 [mm].....	71
Figura 17. Esfuerzo a lo largo de la probeta para sustrato de acero con recubrimiento de Ni-Cr.....	73
Figura 18. Esfuerzo a lo largo de la probeta para sustrato de Al con recubrimiento de Ni-Cr.	75
Figura 19. Comportamiento de la curvatura y temperatura a lo largo del tiempo para probeta de acero con Ni-Cr.	76

Figura 20. Comportamiento de la curvatura y temperatura a lo largo del tiempo para probeta de Al con Ni-Cr.....	77
Figura 21 Cálculos en Matlab para la diferencia de temperatura y curvatura	108
Figura 22 Diagrama de Gantt.....	109
Figura 23 Cálculo manual 1	116
Figura 24 Cálculo manual 2.....	117
Figura 25 Cálculo manual 3.....	118
Figura 26 Factura 1	119
Figura 27 Factura 2	120
Figura 28 Factura 3	121
Figura 29 Factura 3	122
Figura 30 Factura 4.....	123
Figura 31 Factura 5	124
Figura 32 Factura 6.....	125
Figura 33 Factura 7	126
Figura 34 Factura 8.....	127
Figura 35 Factura 9.....	128
Figura 36 Factura 10.....	129
Figura 37 Factura 11.....	130

INTRODUCCIÓN

Resumen ejecutivo

El estudio se enfocó en el desarrollo de un módulo capaz de medir esfuerzos residuales (tensiones internas), comúnmente encontrados en los componentes de la industria, producto de procesos relacionados con la manufactura o procesamiento de materiales. La relevancia de su medición en piezas radica en los posibles problemas que podrían causar en caso de que el material sea sometido a nuevos esfuerzos; llegando a la posibilidad de que se produzcan fallos inesperados, por superposición de cargas

Acerca del objetivo principal, se puede confirmar que efectivamente se obtuvo un sistema y metodología capaz de medir esfuerzos residuales in-situ en tiempo real; los procesos de manufactura fueron los de adición de material como termorociado y manufactura aditiva (soldadura). Además, se corroboraron evaluaron los resultados por medios analíticos de bibliografía. El método experimental de medición de deflexión con láser se corroboró con análisis de video.

El costo neto de implementación y manufactura del proyecto es de 2.700 USD, usando los componentes descritos en este informe; siendo los gastos más significativos los referentes a la instrumentación, 850 USD (láser CD22-100-485) y la manufactura de los componentes, 1250 USD. Cabe destacar que varios componentes fueron un aporte por parte de distintas carreras de la Universidad San Francisco, por lo cual su costo no afectó directamente el presupuesto.

La importancia de este proyecto radica en la escasa cantidad de empresas que prestan servicios de medición de esfuerzos residuales en el mercado nacional. Ni universidades o empresas nacionales cuentan con el equipo necesario para las realizar las mediciones, por lo

que, si una parte interesada quisiera conocer las tensiones internas que sus procesos generan, deberían buscar apoyo extranjero. Actualmente, el módulo se encuentra en posesión de la Universidad San Francisco de Quito y funcional para la prestación de servicios a quienes lo requieran.

Los pasos futuros que podrían elevar el alcance del proyecto son la realización de pruebas con el brazo robótico KUKA para soldadura, para la obtención de resultados. Esto permitiría ampliar las opciones de procesos que pueden ser evaluados con el módulo. Así mismo, mejorar ciertos componentes como el uso de microcontroladores wifi y la mejora de las conexiones para hacerlas no permanentes. Otro tipo de recomendaciones son la incorporación de distintos sistemas como añadir un segundo láser y la medición por difracción de rayos X a las mismas probetas usadas.

Definición del problema

El cliente que ha solicitado el desarrollo del presente proyecto es la Universidad San Francisco de Quito. Se ha planteado como requerimiento principal, el diseño e implementación de un sistema que permita la medición de esfuerzos residuales por el método de curvatura, generados debido a un proceso de termorociado. No obstante, se diseñó el sistema para que se puedan realizar ensayos para procesos de adición de material como soldadura y manufactura aditiva, sin comprometer el proceso de recolección de datos ni la integridad de los componentes. El sistema debe tener la capacidad de realizar la medición en tiempo real, incorporando tanto las respuestas del sensor de distancia como aquellas de los sensores de temperatura que permitan monitorear el estado en distintos puntos del prototipo. Adicionalmente, se solicitó comparar los datos obtenidos mediante dos procesos independientes. El primer método de medición se realizará con láser, mientras el segundo se sustentará en un análisis de video ex-situ que rastreará la deformación de la muestra. Para

garantizar el correcto funcionamiento del sistema, se realizaron modificaciones sobre un prototipo de ICP (In-Situ Coating Property Sensor), basado en el modelo de la empresa Relia Coat (Relia Coat, 2012).

Tomando en cuenta los requerimientos del cliente, se han planteado los siguientes objetivos de mayor a menor prioridad. 1) La resolución del sistema de medición debe ser de un dato por segundo. Se ha tomado esta escala de tiempo dado que en el caso del recubrimiento, el calentamiento tiene una duración de alrededor de 2 minutos y el enfriamiento alrededor de 15 minutos. Dando como resultado más de mil datos que se emplean en la construcción de las curvas que encuentran en la sección de resultados. De esta manera se podrá comprobar la fiabilidad de los resultados y de cada método. 3) Mantener la temperatura interior del cuerpo principal menor a 45 °C en todo momento para evitar superar la temperatura de operación de sus componentes electrónicos. 4) Diseñar un sistema de apoyos que permita ubicar el sensor en posición horizontal o vertical dependiendo del proceso que se realice.

Los esfuerzos residuales son aquellas tensiones internas que permanecen incluso después de que una pieza haya dejado de ser sometida a una carga. La carga descrita puede ser de origen mecánico (como peso o deformación), térmico (como la exposición a altas temperaturas), o químico (como en recubrimientos por anodizado). Los esfuerzos residuales influyen en el comportamiento de la pieza, esto dado a que, al momento de someter por segunda vez al material a una carga, las tensiones se superponen (Tan, Li, & Persson, 1993). Los procesos tales como recubrimientos, soldadura, granallado, forja, doblado, tratamientos superficiales, tratamientos térmicos, cargas mecánicas, cargas térmicas y cambios químicos, generan esfuerzos residuales de tipo I o esfuerzos-macro debido a deformaciones no uniformes (Mugwagwa et al., 2021). En el caso de técnicas de adición de material, el esfuerzo residual global se obtiene a partir la superposición de dos tipos de esfuerzos: el primero es por temple en tensión y se debe a la fuerza generada por la contracción del material aplicado durante el

enfriamiento, el segundo es térmico en tensión o compresión y se debe a la diferencia entre la expansión térmica del recubrimiento y el material base o substrato (Matějček et al., 2019). La incertidumbre del comportamiento del material con tensiones residuales incrementa el riesgo de que se ocasionen deformaciones inesperadas, fallos o dislocaciones mecánicas en piezas críticas de un sistema.

Por consiguiente, se han desarrollado métodos para la medición de los esfuerzos residuales, y así, los procesos de producción usados en la industria no sean afectados. Dentro de los más usados en el mercado se encuentran: método de difracción de rayos X, neutrones y/o electrones, método de corte por secciones, método por ultrasonido y método de alivio de tensiones en un agujero. Todos estos procesos se caracterizan por realizar mediciones una vez que la carga ya incidió sobre la pieza; es decir, solamente se enfocan en las consecuencias del proceso, más no durante su ejecución. De igual forma, los métodos de corte por secciones y alivio de tensiones en un agujero son pruebas destructivas, lo que hace inviable su uso en partes funcionales de un sistema.

Los métodos de difracción se basan en el principio de medición de los ángulos incidentes de las ondas de rayos x, neutrones o electrones que reflejan sobre la muestra. A la pieza se la expone a una fuente de rayos X, neutrones o electrones, la cual rebota sobre la red cristalina del material. Dado que los esfuerzos residuales deforman la retícula, la variación o anomalías en las ondas difractadas provenientes de la muestra determina la ubicación de una tensión interna (Maximilian Goltz, 2023). El otro método no destructivo, por ultrasonido, también hace uso de las variaciones en las ondas, aunque en este caso usa longitudinales como lo son las del sonido. Al momento de medir las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas, se puede detectar si en ciertas locaciones han existido variaciones en su velocidad; que en materiales relativamente homogéneos debería ser constantes en la misma dirección.

Cabe destacar que en este método se deben realizar múltiples pruebas, pues cada una depende de la dirección en la que se dispare la onda ultrasónica.

Con respecto a los métodos destructivos de corte por secciones y alivio de tensiones en un agujero, ambos operan con el mismo principio. Al momento de realizar una perforación o un corte, los esfuerzos residuales causan deformaciones cerca de esos lugares. Al medir esas deformaciones se puede correlacionar la magnitud de los esfuerzos. Específicamente, para el método de corte por secciones las incisiones son hechas de tal forma que se obtienen muestras delgadas; en contraste, en el método de alivio de tensiones en un agujero se perfora un orificio de pequeñas dimensiones en la muestra.

Todos estos métodos son válidos y comúnmente usados por diversas industrias. A manera de ejemplo, en la industria aeroespacial se usa principalmente la difracción de rayos X para medir la calidad de los componentes críticos, ya que serán sometidos a cargas significativas y se espera que cumplan con altos estándares de calidad (Maximilian Goltz, 2023). Asimismo, el método de ultrasonido es el predilecto para el análisis de tuberías. En el caso de procesos de manufactura como fundición y soldadura, los métodos por excelencia son los destructivos: alivio de tensiones en un agujero y corte por secciones (Nissar Ahmed, 2023). Siendo estos un número limitado de ejemplos de la importancia y aplicación de los procedimientos de evaluación mencionados.

La medición de esfuerzos residuales también se puede realizar en tiempo real, sin necesidad de realizar el proceso en un laboratorio. En este estudio se empleará el método de medición de esfuerzos residuales mediante la caracterización de la curvatura de una muestra. A diferencia de los ensayos indicados previamente, el método de curvatura permite detectar la deformación que presenta una probeta y calcular los esfuerzos residuales de forma instantánea. Las cargas que se aplican al espécimen se generan a partir de un proceso de termo rociado en caliente. Al fijar los extremos de la muestra y dejar el centro con libertad de movimiento, las

tensiones internas deformarán la placa cambiando radio de curvatura de la muestra durante las distintas etapas del proceso como lo son el calentamiento y enfriamiento hasta temperatura ambiente. Este sistema requiere de la implementación de un software que recopile datos en tiempo real de un sensor láser destinado a la medición del desplazamiento del punto central de la probeta y termocupas ubicadas en los extremos.

Los puntos de sujeción se plantean como referencia, por ende al medir el desplazamiento de la muestra en el centro se puede obtener la función que describe de la curva y por consiguiente el radio; valor que será posteriormente incluido en ecuaciones que permiten calcular los esfuerzos residuales de forma global. La precisión de este ensayo se asemeja notablemente a las mediciones obtenidas mediante el método de difracción de rayos X (Zhao et al., 2002), creando una ventaja competitiva en comparación a métodos que requieren un post procesamiento en laboratorio. Adicionalmente, se empleará como método de comprobación un análisis de imagen ex-situ para corroborar la curvatura de la muestra obtenida a partir del láser.

Los métodos empleados para medir la curvatura han sido empleados en estudios previos. Un ejemplo es el estudio realizado por Jianguo et al., en el cual describe la correlación digital de imágenes con el fin de medir esfuerzos residuales después de un proceso de recubrimiento por termo rociado. Se emplearon dos cámaras que graban el lapso de deformación de la muestra. Posteriormente, se determinan coordenadas en la posición inicial, mismas que son analizadas para medir la disparidad de los puntos de evaluación de un cuadro de video a otro. La curvatura en un instante de tiempo se obtiene mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La resolución de las cámaras es de 3272 x 2469 pixeles (Jianguo et al., 2001, p.1397). Las consideraciones necesarias para aplicar este método son ubicar las cámaras a una distancia prudente para que no se vean afectada por la temperatura del proceso y que estas tengan una alta calidad de imagen para reducir los errores experimentales.

A pesar de que la medición de esfuerzos residuales en un proceso frecuentemente empleado en la industria, existen aspectos que permanecen bajo investigación. Todos los métodos mencionados previamente cuentan con sus respectivas limitaciones, mismas que restringen la medición de esfuerzos residuales para todos los casos de estudio. De acuerdo con Vicenzo et al., la difracción por rayos x solo permite estimar los esfuerzos residuales y puede aplicarse únicamente en materiales con estructura cristalina (como se citó en Ma y Clarke, 1993), las pruebas por indentación tienen una complejidad elevada (como se citó en Lu, 1996) y por el método por curvatura solo se obtiene la distribución integral del esfuerzo, más no se llega a conocer los puntos específicos de la muestra en los cuales este se acumula (como se citó en Johnson-Walls et al., 1986). Adicionalmente, Según Zhang et al. no se ha estudiado a profundidad el efecto que tienen los esfuerzos residuales en el cambio de las propiedades mecánicas de las muestras que han experimentado un proceso de recubrimiento (Zhang et al., 2013, p. 1038). Es necesario conocer las limitaciones y alcance que tienen los métodos que se emplearán durante el proceso experimental para proponer soluciones adecuadas.

El presente proyecto está orientado a la medición de esfuerzos residuales en procesos de recubrimientos por rociado térmico por flama, en una placa metálica mediante un sistema integrado que replica el funcionamiento de un sistema llamado “In-situ coating property” (ICP) de la empresa ReliaCoat. El sensor “ICP-8 System” ha sido probado de forma exitosa con procesos de termo rociado: por plasma en atmósfera (APS), de alta velocidad con oxígeno (HVOF), por arco, por llama, en frío y con plasma y alimentación de precursores en solución (ReliaCoat Technologies, 2012).

El prototipo incluye un cuerpo principal de aluminio anodizado que aloja termocuplas y un sensor láser para medir distancia. En la parte exterior del cuerpo principal se encuentra un trípode que permite sostener la cámara que permita grabar el proceso de deformación. La

medición por láser, se encuentra respaldada por un software que integra las respuestas analógicas de las termocuplas y digitales del láser para procesar datos en tiempo real.

Durante el proceso de termorociado, para lograr un espesor de $0.3 \mu\text{m}$, se espera llegar a temperaturas en la placa entre 200 y $300 \text{ }^\circ\text{C}$, a pesar de que la flama se encuentre a más de $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. En el caso de la soldadura, la temperatura de la muestra sobrepasará los $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores referenciales son de gran importancia dado que el sensor láser puede trabajar a una temperatura máxima de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de acuerdo con su ficha técnica. Por lo tanto, para salvaguardar el correcto funcionamiento de los componentes internos, el cuerpo principal cuenta con un sistema de refrigeración por agua. Igualmente, se cuenta con un serpentín de aire para limpiar las impurezas que se adhieran a los filtros ubicados entre el láser y la probeta. Estos se encargan de permitir únicamente el paso de la luz que tenga una longitud de onda de igual magnitud a la del láser. El diseño descrito se lo puede apreciar de la Figura 1 a la Figura 4. Finalmente, los ensayos de termo rociado y soldadura MIG, se realizan con la ayuda de un brazo robótico que permite controlar las coordenadas y velocidades de estos procesos.

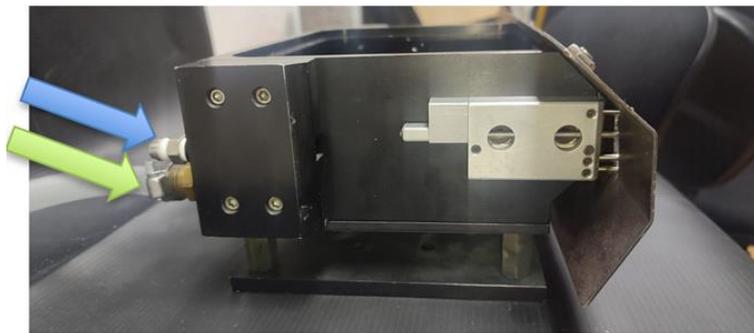


Figura 1. Vista lateral del sistema. Verde: Entrada de refrigeración. Azul: Entrada de aire para limpieza de filtros.

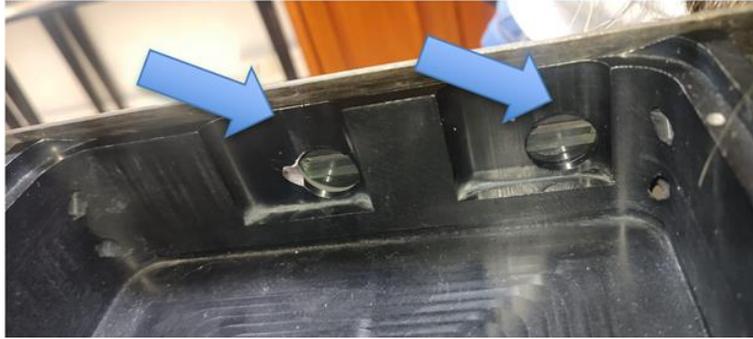


Figura 2. Azul: Filtros de onda para lentes y recepción del láser.

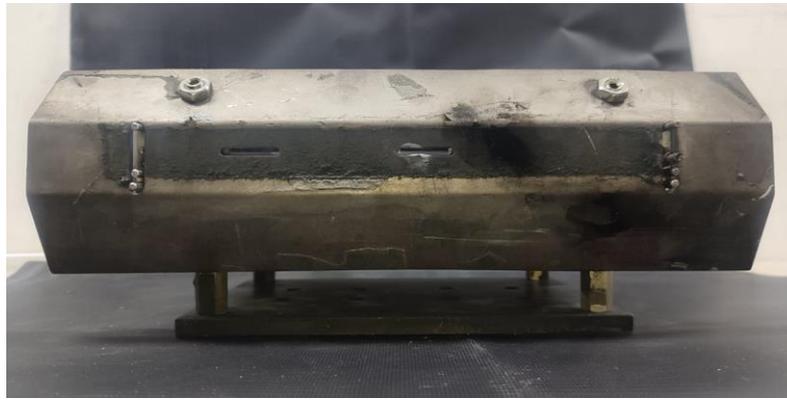


Figura 3 Prototipo de sensor ICP (vista frontal)



Figura 4 Prototipo de sensor ICP (vista superior)

La adaptabilidad del sistema es un criterio esencial que se consideró para el diseño del sistema mecánico. El prototipo debe ajustarse a la posición requerida para los dos métodos de

adición de material que se emplearon en este estudio, sin sacrificar la precisión. En el caso del termo rociado, la posición del cuerpo principal es horizontal, mientras que para la soldadura este debe estar en posición vertical. Además, la facilidad de implementación es un factor clave para permitir el traslado del sistema sin complicaciones ni pérdida de resolución de los datos obtenidos. Finalmente, se desarrollará una estrategia para llevar los resultados de las pruebas a procesos industrializados, añadiendo valor comercial al proyecto, que no solo tendrá relevancia académica.

De igual forma, se han realizado trabajos varios dentro del marco de la medición de esfuerzos residuales para procesos de adición de material. Gao et al (2023) en su investigación concluyeron que, no solo existe una relación directa entre la tasa de crecimiento de las fisuras presentes en una pieza y sus esfuerzos residuales, también encontraron que, con un debido proceso correctivo como la relajación progresiva del material, estos pueden desaparecer. No solo corrobora una posición ya instaurada, sobre los peligros de los esfuerzos residuales, mas, proponen métodos y soluciones para su tratamiento; implicando así para que más investigaciones se realicen dentro de este campo.

Otros métodos mencionados también han sido estudiados, como por leide et al (2023) en su trabajo sobre la medición de esfuerzos residuales por medio de DIC. En el escrito se expone sobre la validez del uso de DIC y como esta técnica puede llegar a valores tan cercanos a los reales que no son necesarios otros métodos comparativos como por elementos finitos. Sin embargo, en su investigación no se realizó una prueba a tiempo real dado que las imágenes que se capturaron por el microscopio electrónico de barrido (SEM) fueron cada minuto, y las recuperadas para el análisis por dic solo fueron en total dieciséis fotos.

Existen varios ensayos in-situ con la finalidad de obtener propiedades durante un proceso de conformado mecánico como el termo rociado y la soldadura. Un caso ejemplar es el estudio realizado por matějčíček, mušálek y veverka, con el objetivo de determinar la

evolución de los esfuerzos durante un proceso de termo rociado por plasma con distintas combinaciones de recubrimientos. Para la medición de datos se empleó el sensor ICP con el fin de obtener la variación en el tiempo de la temperatura de la muestra y su curvatura. Las propiedades mecánicas necesarias para calcular los esfuerzos residuales se consiguieron mediante flexión con cuatro puntos de apoyo, ensayos de dureza y metalografías (Matějčíček et al., 2019). Paralelamente a este estudio, se pueden encontrar varias publicaciones que destacan la aplicación exitosa del sensor ICP para estudiar los efectos en el material de diversos tipos de recubrimientos.

En cuanto a ensayos in-situ durante procesos de soldadura, Petrie y Sridharan realizaron un estudio con el fin de obtener un perfil de tensión longitudinal en el material con la ayuda de un reflectómetro óptico de retrodispersión (OBR). Este método detecta el cambio de longitud de onda en la fibra óptica debido a cambios de temperatura y tensión del material. El montaje experimental se emplearon fibras ópticas de aluminio recubiertas, adheridas a la superficie del material base y termocuplas para la recopilación de datos en tiempo real (Petrie & Sridharan, 2020). En contraste con el ejemplo anterior, el fin del presente estudio es conseguir un sensor ICP que permita la medición de esfuerzos residuales, tanto en procesos de recubrimiento por flama como en soldadura MIG manteniendo la precisión de los datos.

Los resultados previamente establecidos refuerzan no solo la importancia de la presente investigación, también su necesidad. En bibliografía actual, se puede obtener una variada cantidad de métodos por los cuales visualizar las deformaciones y medir los esfuerzos residuales que estas provocan, sin embargo, son pocos aquellos que ponen en valoración el hacerlo en tiempo real (in situ). Si bien un promedio permite obtener valores cercanos, y de hecho, correctos, es solo mediante el estudio en tiempo real que se conoce cómo se desarrollan y crecen los esfuerzos residuales dentro de la pieza. El estudio realizado provee de una

metodología y sistema para el análisis en tiempo real de muestras en el campo por medio de la medición de la curvatura.

Diseño y selección de componentes

La fase preliminar de diseño de enfocó en el análisis de las posibilidades de mejora en el prototipo original que se observa en las figuras 1, 2, 3 y 4. En función a los objetivos detallados en la sección 1.2, se identificaron los siguientes aspectos a mejorar. Primero, fue necesario añadir un sensor de distancia láser que tenga un rango de operación adecuado para la distancia entre el interior del cuerpo principal y la muestra, además de contar con un tiempo de respuesta inferior a un segundo. Por estas razones, se empleó un sensor láser CD22-100-485 de la empresa Fastus (OPTEX FA CO., LTD., (n.d.)). Segundo, para garantizar que los datos obtenidos a partir de los dos sistemas de medición para la deflexión de la muestra sean comparables, se diseñó un soporte que permita sostener la cámara de forma perpendicular al proceso. Se tomó la decisión de diseñar este componente en lugar de comparar un soporte prefabricado por la restricción de presupuesto con la que se contó para este proyecto. Tercero, dado que la ficha técnica del sensor de distancia indica que la máxima temperatura de operación es de 50 °C, se deben ejecutar todas las modificaciones respectivas para evitar que el interior del ICP se acerque a este límite. Por ende, se planificó un rediseño del escudo de calor dado que este se encontraba en contacto con el cuerpo principal. Esta condición aumentaba el riesgo de transferencia de calor por conducción. Consecuentemente, se planificó separar el escudo de calor del cuerpo principal y aumentar su tamaño, consideraciones que se calcularon posteriormente en la fase de pruebas que se describe en la sección 3.3. Además, se diseñó un sistema de refrigeración compuesto por una bomba no sumergible, un radiador y un reservorio de agua de recirculación. Para seleccionar los componentes adecuados se realizaron experimentos y cálculos que sustenten estas decisiones. Dicho subsistema aprovechó el

serpentín que se encuentra en la parte inferior del cuerpo como principal intercambiador de calor. Cuarto, para reducir los errores entre la simulación en los ensayos en el laboratorio, se realizaron pruebas de las cuales se recopilaron datos experimentales.

Finalmente, se diseñaron dos apoyos que permitan tener una posición de funcionamiento versátil del cuerpo principal. Esto amplía la posibilidad de procesos que se pueden poner a prueba con este sensor, durante la duración del proyecto como a futuro. A continuación, se muestran los diseños preliminares que se consideraron en la Figura 5. No obstante, se seleccionó la opción c) debido a que brindaba una mejor estabilidad sin aumentar considerablemente el peso del sistema total.

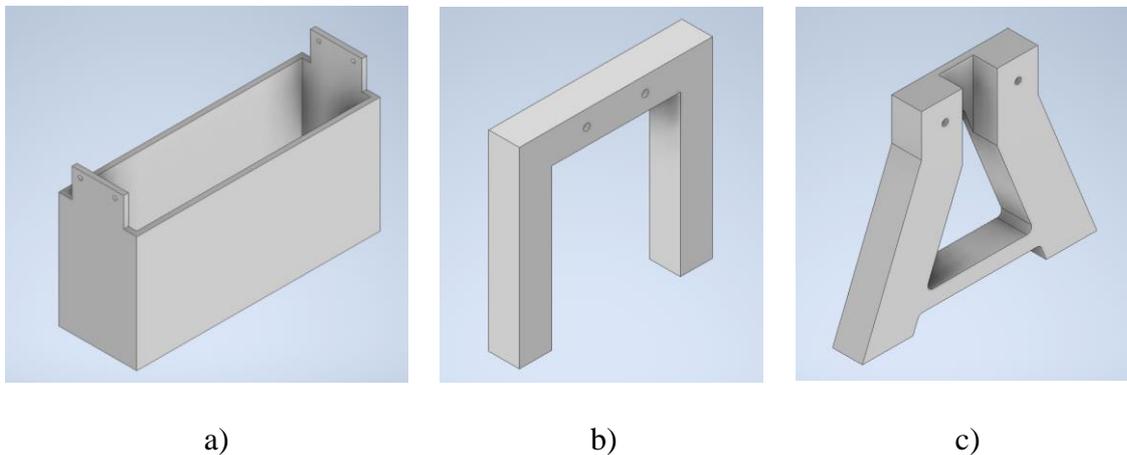


Figura 5 Diseños preliminares del soporte

Subcomponentes

Una vez identificados las soluciones que se implementarían para cumplir con los objetivos establecidos, se determinaron los subcomponentes del sistema. El módulo del sensor o ICP tiene la función de sostener las muestras mientras se desarrolla el proceso que desea poner a prueba, como termo rociado o soldadura. Además, aloja el sensor de distancia láser al igual que las termocuplas que medirán la temperatura de la muestra y la del punto central. La disipación correcta del calor es una de las características primordiales que debe desempeñar el ICP. Así mismo, trabaja en conjunto con el subsistema de refrigeración que se encarga de

trasferir el calor acumulado en el cuerpo principal hacia el aire. El tablero electrónico es el tercer subsistema. Este se encarga de energizar todos los componentes que requieran una entrada de voltaje y enviar señales desde los sensores hasta el computador mediante el cual se procesan los datos. El último subsistema se compone por la cámara Nikon COOLPIX P510 y su soporte, conformado por un trípode y una viga que mantiene a la cámara perpendicular a la deflexión de la muestra.

Escala del prototipo

Uno de los objetivos de este proyecto es que el prototipo tenga una fácil movilidad, por esta razón se optó por una escala manejable. El ICP tiene 16 cm de alto, 30.5 cm de ancho y 28.8 cm de largo. El sistema de refrigeración está contenido en un tablero metálico con dimensiones de 30x30x15 cm. De igual manera, se empleó un tablero metálico para proteger el circuito con dimensiones de 40x30x15 cm.

Costo

Para la fabricación completa del ICP se obtuvo un costo total de \$2,672.2. Si se agrupan los gastos por categorías, se puede observar que el costo de manufactura, el cual representa el 47% del total, es el más elevado por diferencia a los demás. Esto se debe, a la complejidad y tiempo que lleva modelar y fabricar las piezas mecánicas del prototipo. Los gastos detallados se encuentran en el APÉNDICE 2.2. No obstante, se pueden observar los costos desglosados por categorías en la Tabla 1 y de forma visual en la Figura 6.

Tabla 1 Costos separados por categorías

Grupo	Sumatoria
	Total (\$)
Componentes Mecánicos	\$366,0
Instrumentación	\$860,3

Manufactura	\$1.250,0
Sistema de Refrigeración	\$195,9
Total	\$2.672,2

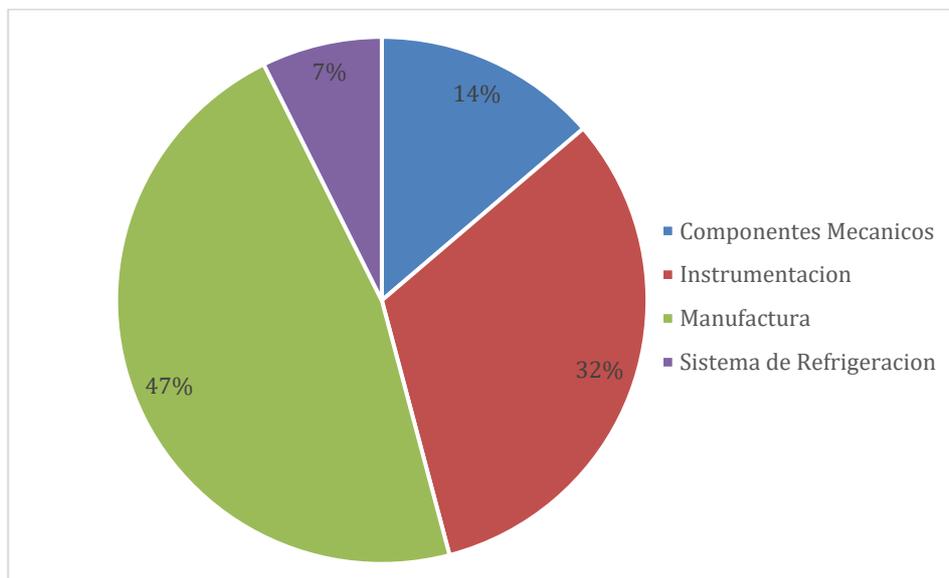


Figura 6 Costos desglosados en porcentajes

Gestión de proyectos

Para la fabricación del ICP se otorgó un presupuesto de 400\$ dados por la universidad, en los cuales debían entrar los gastos de materia prima, manufactura y todos los componentes eléctricos y electrónicos, así como el sistema de refrigeración necesarios para la fructífera construcción del ICP. Además, se realizó una planificación con fechas desde el primer día y las cuales se siguieron con la mayor rigurosidad posible para completar el trabajo a tiempo. dichas fechas planificadas se encuentran en el APÉNDICE 2.1.

Estándares ingenieriles

Para asegurar un desarrollo correcto del experimento, se usó la ficha técnica de la pistola de recubrimientos 5P-II ThermoSpray de la marca Oerlikon. Esta pistola especifica el

caudal correcto en el cual se debe calibrar para el flujo de los gases empleados. Estos son acetileno, oxígeno y aire comprimido, con caudales de 1.03 bar a 21.9 NLPM, 3.1 bar a 26.3 NLPM y 0.7 – 1.0 bar respectivamente. La distancia a la que se debe ubicar la pistola en referencia a la muestra debe mantenerse en el rango de 51 – 254 mm. La tasa de alimentación de polvo es de 0.9 a 9.1 kg/hr y se menciona que no se debe llenar más de $\frac{3}{4}$ del volumen total del contenedor de polvo. Se verificó rigurosamente con un flujómetro y los manómetros de tanques de gas y de la línea de aire comprimido, que se cumplan con los valores especificados en la ficha técnica. Además, se programó el recorrido y la posición del robot para que la punta de la pistola se encuentre a 15 cm de la muestra en todos los puntos de su trayectoria.

Adicionalmente, se empleó la norma ISO 14921 “Thermal spraying – Procedures for the application of thermally sprayed coatings for engineering components” e ISO 14923 “Thermal spraying - Characterization and testing of thermally sprayed coatings”. 1. Alcance de la norma La norma ISO 14921 indica los parámetros de selección de procedimientos y materiales para realizar un recubrimiento por “Thermal spraying” dependiendo de las características que se desea para el producto final. Debido a la amplia gama de recubrimientos, en la norma se indica que los procesos estipulados no son necesariamente definitivos, ya que estos dependerán de la aplicación o necesidades finales. Finalmente, se establece que la norma no aplica para recubrimientos de zinc ni aluminio. La norma ISO 14923 establece los criterios y procedimientos generales que se deben emplear para caracterizar las propiedades de materiales que han pasado por un proceso de recubrimientos en caliente. Debido a la variedad de materiales que se pueden emplear para realizar un recubrimiento, esta norma no especifica los procedimientos particulares que se requieren para cada material. 2. ¿Qué se va a utilizar de la norma? Debido a que la norma ISO 14921 describe los parámetros de selección de materiales y procedimientos y en el proyecto que se desarrollará ya se conocen ambas, esta norma se usará únicamente para tener una referencia acerca de las características de los recubrimientos

cerámicos y especificaciones acerca del proceso. Esto con el fin de comparar las condiciones que se tendrán en el laboratorio durante la aplicación del recubrimiento como distancia, tiempo, temperatura, velocidad, entre otras (Thermal spraying – Procedures for the application of thermally sprayed coatings for engineering components, 2010) Para la norma ISO 14923 se empleará:

- La sección 4.3 “Coating properties” para tener una referencia de las propiedades mecánicas que tendrá el material después del proceso de recubrimiento.
- La sección 4.4 “Technological and physical properties” con el fin de comprender las propiedades que se deberían esperar de la muestra con el recubrimiento al final del proceso.
- La sección 5.2 “Non-destructive test methods” y la sección 5.3 “Destructive test methods” para tener una referencia acerca de los métodos que se emplean para la caracterización del material. Es necesario conocer cómo se obtienen las características físicas y mecánicas de una muestra de forma experimental, ya que en las ecuaciones para traducir la curvatura del espécimen a esfuerzo residuales se tienen ecuaciones en las que se debe considerar valores como el módulo de elasticidad, entre otros (Thermal Spraying Characterization and Testing of Thermally Sprayed Coatings, 2003).

Materiales y métodos

Selección de materiales y componentes

Dentro de las alternativas que se consideraron para la medición de los esfuerzos residuales fueron los métodos por: curvatura por láser, difracción por rayos X, agujero ciego, curvatura por DIC y curvatura por medio de reloj palpador. Para analizar la factibilidad de dichos métodos se consideraron criterios imperativos para los propósitos de este estudio, los mismos fueron: la capacidad de cada método para visualizar los esfuerzos residuales en tiempo real, la resolución con la que se pueden detectar las tensiones residuales, la resistencia que tiene el método frente al procesos con grandes cantidades de calor, y el costo de implementación de dichos métodos. Los expresado previamente se puede se resume en la Tabla 2:

Tabla 2 Especificación de soluciones y criterios

PROBLEMA	Método de medición de esfuerzos residuales.
SOLUCION	<ul style="list-style-type: none"> • Solución A: Método por Curvatura por Láser • Solución B: Método de Difracción de Rayos X • Solución C: Método de Agujero Ciego • Solución D: Método de Curtura por DIC • Solución E: Método por Curvatura por Sensor Palpador
CRITERIOS	Medición en tiempo real Resolución Resistencia al calor Costo

Para la determinación y calificación cuantitativa de los criterios, se implementó el “Método de Evaluación de Soluciones” (Ver Apéndices). En este método, primero se determina el orden de prioridad de los criterios. Para este estudio los autores determinaron que el criterio

más importante es la resolución del método, seguido de la capacidad de detectar en tiempo real empatada con la resistencia al calor, y finalmente el costo de implementación. Para la determinación sobre la eficacia con que cada método responde a cada criterio, se basó en la bibliografía expuesta en el capítulo de introducción, así como en los diseños preliminares de cómo se implementaría cada uno. En la Figura 7, se muestran las posibles configuraciones para cada método presentado:

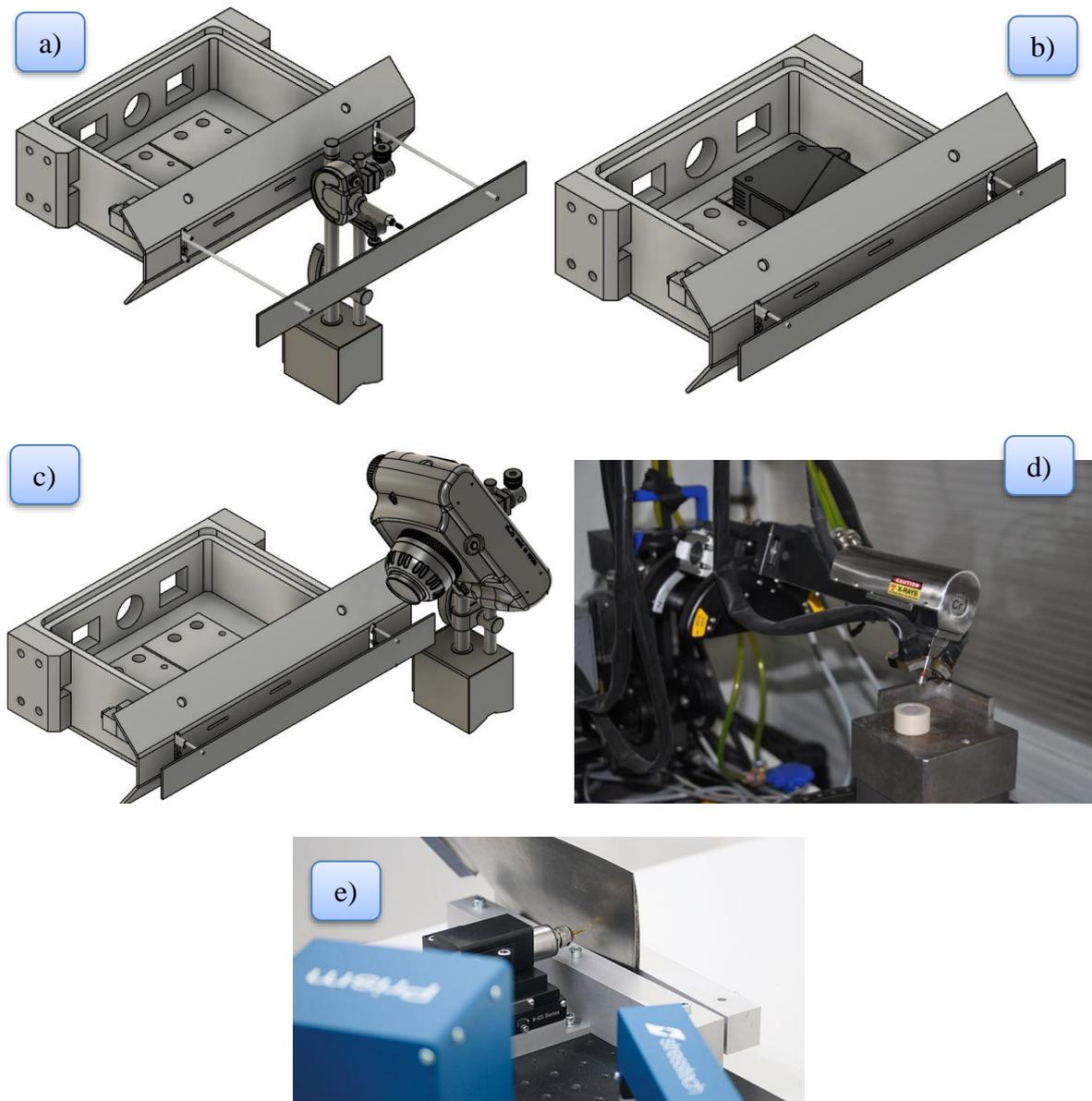


Figura 7 Dibujos de métodos considerados para medición de esfuerzos residuales. a) Método de Curvatura por Reloj Palpador. b) Método de Curvatura por Rayo Láser. c) Método de Curvatura por DIC. d) Método de Difracción de Rayos X (Madrid, 2017). e) Método de Agujero Ciego (TEST Systems , 2023).

De esta manera, se determinó la eficacia con que cada método respondía a cada criterio. Con respecto al primero acerca de la capacidad de medir en tiempo real, se llegó a la conclusión de que tanto los métodos por DIC, láser y por reloj palpador podrían proporcionar datos en tiempo real. Esto debido a que su medición puede seguir a la par la curvatura que se produzca. En contraste, tanto los métodos de agujero ciego y por difracción de rayos X no pueden hacerlo, dado que se necesita que el proceso haya terminado y preparar la muestra a ser sometida al estudio.

Para el criterio sobre cuál podría proporcionar datos más exactos al poseer una mejor resolución, se encontró que el mejor método es el de difracción por rayos X al poder medir los esfuerzos residuales presentes en cada celda de estructura cristalina, seguida por el láser, dado que este puede detectar hasta centésimas de milímetro e incluso más si se aplican mejores tecnologías. El siguiente seleccionado fue el reloj palpador por su resolución de décimas de milímetro, por encima del método de agujero ciego pues las curvaturas deben ser visibles para ser detectadas, y finalmente el DIC puesto que al igual que el agujero ciego, la cámara debe poder ver las deformaciones.

A continuación, los métodos por excelencia para la resistencia al calor son tanto la difracción por rayos X, como el agujero ciego. Ambos, al tener una muestra posterior a los procesos de adición de material o soldadura, no presentan limitaciones de un calor máximo a soportar, de hecho, la limitación estaría dada por el mismo material a analizar. El método por láser es el siguiente, pues se cuenta con un sistema de refrigeración, además de un escudo de calor protegiendo el sensor. Luego, el método por DIC por la exposición que tendría la cámara al necesitar estar cerca del proceso y por sus limitaciones de detección de imagen al enfocar los puntos de calor. Como último método el reloj palpador porque necesita estar en contacto con la placa a someter al proceso y esto sugiere una transferencia de calor directa.

El último criterio analizado fue sobre la evaluación de aquella alternativa menos costosa. Por esto, se determinó que el método más barato de implementar es el agujero ciego al ser una prueba simple de llevar a cabo. El siguiente, el método de DIC dado que su mayor costo relacionado es la compra de una cámara con buena resolución de video. El tercero es la implementación del láser, dado que la adquisición de este puede resultar costosa, aunque se obtiene buena resolución sin una inversión cuantiosa. Los últimos métodos son el reloj palpador y la difracción de rayos X, en ese orden. El primero porque se necesitaría invertir en una punta cerámica o acople afín, que pueda soportar las temperaturas, así como la compra de un reloj digital. Y el segundo porque se necesita de un sistema especializado capaz de lanzar un haz de rayos X sobre la muestra, y la respectiva recepción, por lo que la implementación de esta prueba sería costosa.

La ponderación de los criterios descritos, así como la calificación de cada método se ven resumidos en la Tabla 3:

Tabla 3 Ponderación de los resultados, tabla de conclusiones. Para cada solución, multiplico la calificación con el ponderado del criterio.

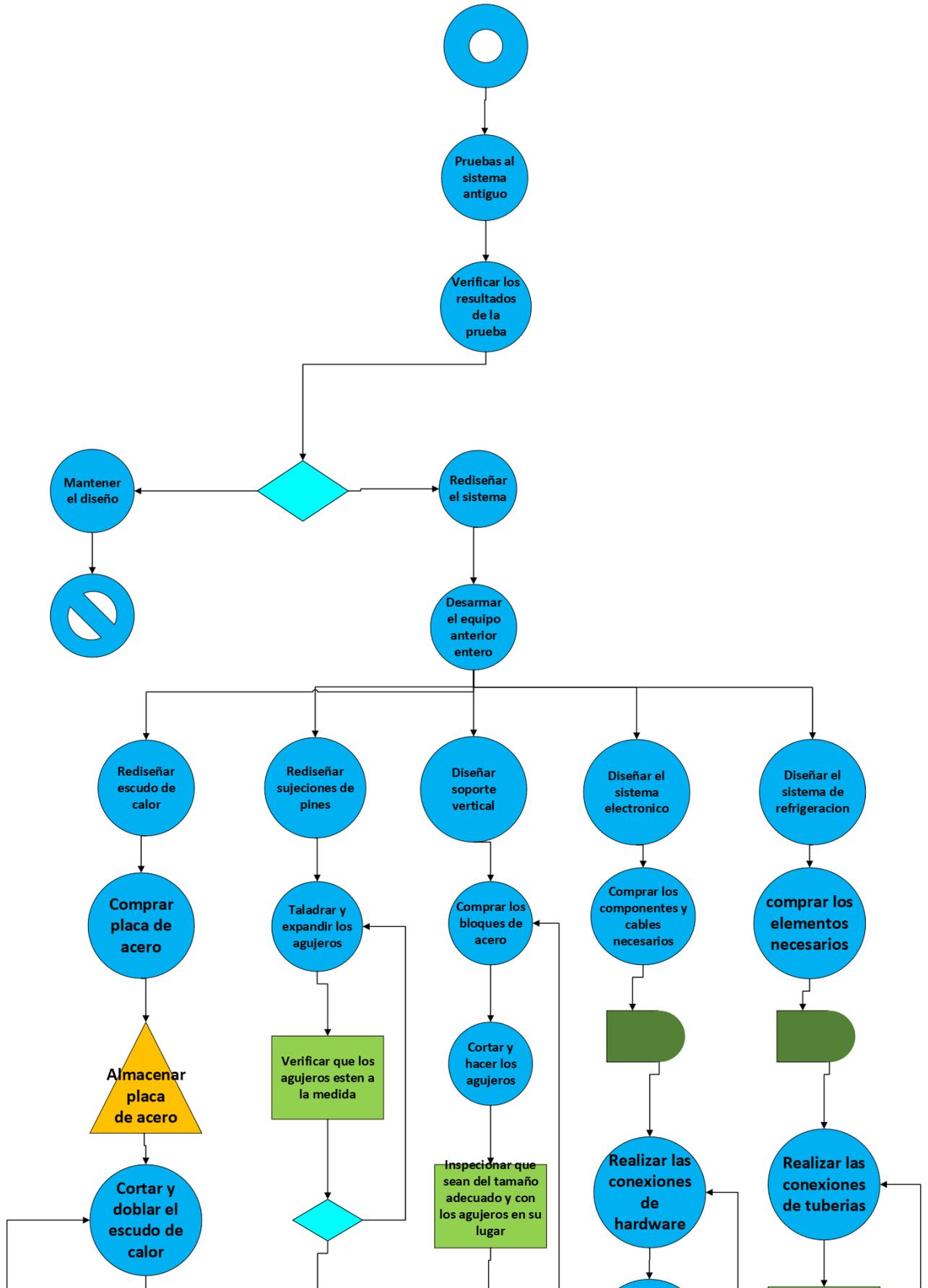
CRITERIO	Ponderado del Criterio 1	Poderado Calificación Criterio 1: Medición en tiempo real	Producto	Ponderado del Criterio 2	Poderado Calificación Criterio 2: Resolución	Producto	Ponderado del Criterio 3	Poderado Calificación Criterio 3: Resistencia calor	Producto	Ponderado del Criterio 4	Poderado Calificación Criterio 4: Costo	Producto	SUMA DE LOS PRODUCTOS	PRIORIDAD
Solucion A	0,25	0,27	0,067	0,4	0,27	0,107	0,25	0,20	0,050	0,1	0,20	0,020	0,243	1
Solucion B	0,25	0,10	0,025	0,4	0,33	0,133	0,25	0,30	0,075	0,1	0,07	0,007	0,240	2
Solucion C	0,25	0,10	0,025	0,4	0,13	0,053	0,25	0,30	0,075	0,1	0,33	0,033	0,187	3
Solucion D	0,25	0,27	0,067	0,4	0,07	0,027	0,25	0,13	0,033	0,1	0,27	0,027	0,153	5
Solucion E	0,25	0,27	0,067	0,4	0,20	0,080	0,25	0,07	0,017	0,1	0,13	0,013	0,177	4

Con la ponderación final, y siguiendo el método utilizado, se llega a la conclusión de que el método que cumple mejor todos los criterios y con la prioridad de cada uno es la solución A sobre la medición de esfuerzos residuales por curvatura mediante láser. Igualmente, se debe destacar de que la solución B con respecto a la difracción de rayos X también es una posible solución al estar separada por solo 3 milésimas de la primera opción. Sin embargo, la solución B presentaba ciertas dificultades locales para su implementación. Las entidades locales, sean estas universidades o empresas, no cuentan con el equipamiento especializado para realizar los ensayos de rayos X, por lo que, en caso de seleccionar dicho método, se debería buscar a nivel regional lo que supone un alza en los costos y tiempos; mencionando además que el método no permite visualizar en tiempo real, siendo este un criterio importante dentro del estudio.

Diseño para manufactura

Plan de Manufactura

Acercas del proceso de manufactura y el diseño de los componentes, se desarrolló un esquema que resume los pasos que se siguieron, así como las decisiones tomadas. El diagrama de procesos parte desde la verificación y análisis del módulo antiguo, hasta llegar a la comprobación de la replicabilidad y lectura de los datos con todo el ensamble funcional. El diagrama en cuestión se muestra en la Figura 8.



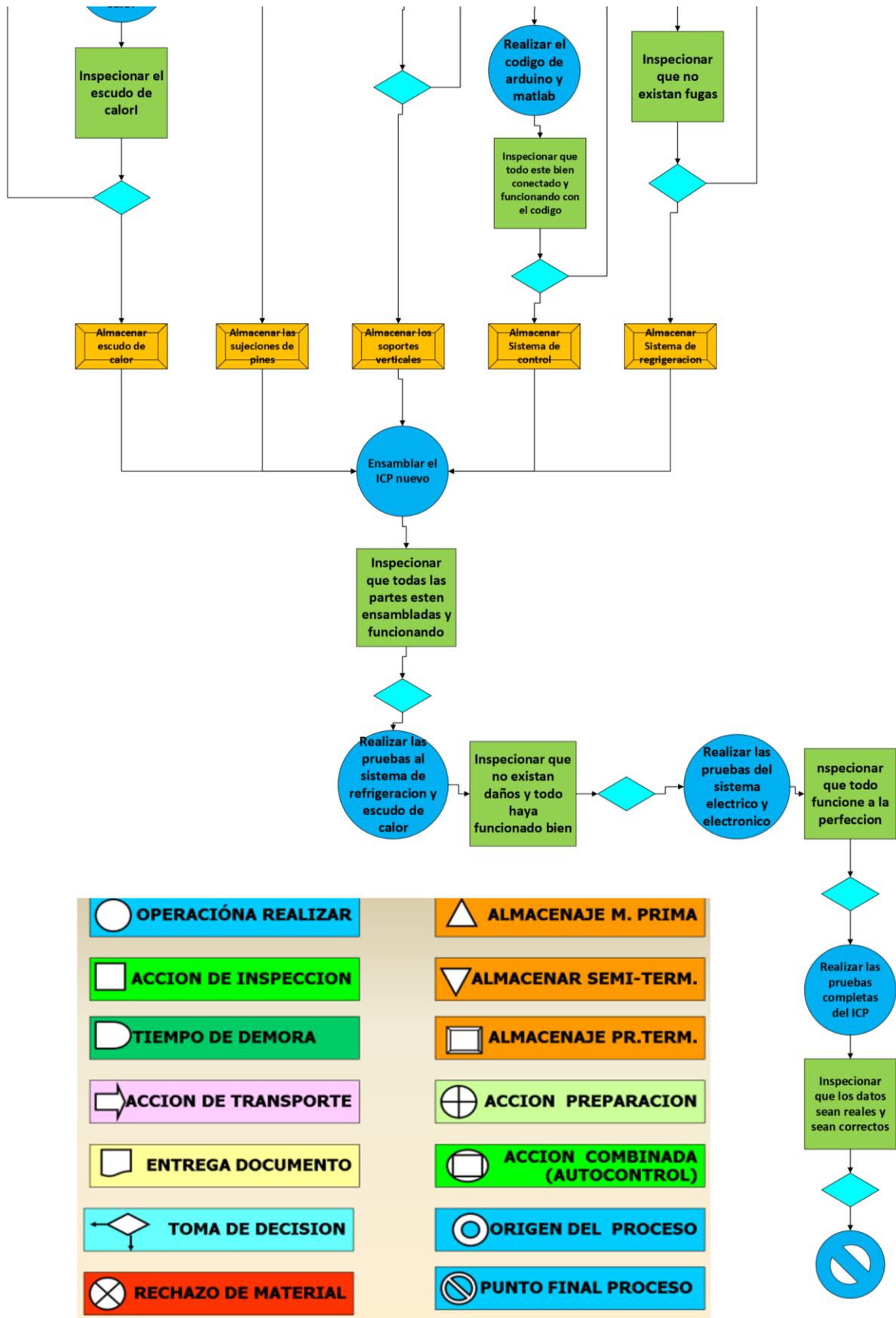


Figura 8 Diagrama de procesos para plan de manufactura.

De esta manera se llegó a la conclusión y decisión de rediseñar ciertos componentes, los mismos que fueron sometidos a un plan de manufactura. Como se detalla en la figura anterior los componentes principales fueron: escudo de calor, sistema de sujeción de pines, soporte vertical, y los sistemas de electrónica como de refrigeración; estos últimos siendo aquellos que no necesitan un proceso de manufactura.

El escudo de calor por su parte, fueron necesarios los procesos de doblado, corte láser, y taladrado. El doblado necesario para alcanzar los ángulos requeridos para cubrir completamente al módulo ICP, el corte láser para la precisión y acabado de las ranuras por donde pasaría el haz del láser, y los taladrados para realizar los agujeros necesarios para su sujeción con el cuerpo principal.

Con respecto al sistema de sujeción de pines, fue necesario inicialmente un taladrado para cumplir con el nuevo diámetro de los pines que mantendrían en posición a la probeta, así como un post procesamiento. En esta segunda parte se lijaron los agujeros y se comprobaron sus tolerancias, esto con el fin de que los pines que estarían en esa posición no tuvieran problemas en ser introducidos a voluntad, a la par que su movimiento se redujera al mínimo.

Finalmente, para el soporte vertical se realizaron varios procesos de manufactura. Inicialmente se consiguieron las figuras deseadas, tipo "A", por medio de corte por láser; eligiendo este proceso tanto por su precisión como por la disponibilidad económica de los autores. A continuación, los agujeros se obtuvieron por medio de una fresa de precisión, la cual permitió realizar el ranurado interno necesario para la sujeción del cableado. En la misma maquinaria de manufactura se realizaron rectificadores para corroborar la planitud y tolerancia, dado que dichos componentes se caracterizan por proporcionar un plano estable para las pruebas. Como último paso se generó la rosca con un machuelo en los agujeros para el paso de los pernos?? roscados.

Como se puede notar, se tomaron las especificaciones de las características en consideración para elegir el proceso idóneo en la manufactura de cada pieza. Resultando en una optimización del diseño, y de los procesos encontrados; resultando en piezas completamente funcionales, conseguidas con la menor inversión de tiempo y capital posible. De igual manera, se pueden encontrar los planos de cada componente para más información de los procesos realizados en los archivos adjuntos. Sobre el costo de los componentes, referirse a la sección de “Diseño y selección de subcomponentes”.

Plan de Mantenimiento

Sobre el mantenimiento necesario para las piezas mencionadas y el ensamble general, se ha dividido las instrucciones necesarias en dos grupos principales: mantenimiento en uso y mantenimiento preventivo. El mantenimiento en uso se refiere a aquellas acciones a realizarse antes y durante las pruebas, esto con el fin de garantizar tanto el buen funcionamiento de todos los sistemas, así como prevenir tanto que alguno de estos se encuentre en mal estado, como que alguna sección pueda ser dañada o interferir durante el proceso. Acerca del mantenimiento preventivo, es aquel que debe realizarse por recomendación de los autores cada tres meses para la verificación de los componentes y el reemplazo, de ser necesario, de algún componente que se encuentre desgastado. Juntos, conforman el plan de mantenimiento.

El mantenimiento en uso es el siguiente:

- Verificar que toda la tornillería este ajustada antes de cada prueba.
- Verificar que el láser esté funcionando adecuadamente (enceramiento con cada inicio de proceso de recopilación de datos).
- Verificar el funcionamiento del ventilador y la bomba al energizar el sistema.
- Asegurarse de la limpieza de los componentes eléctricos y electrónicos antes de encender.
- Asegurarse que el tanque de agua este lleno antes de encender la bomba.

Para el mantenimiento preventivo, se recomienda lo siguiente:

- Asegurarse de que la cinta térmica en la parte posterior del escudo de calor se encuentre sujeta.
- Asegurarse que el escudo de calor no presente deformaciones permanentes en áreas críticas como los agujeros de tornillería y las ranuras para el haz del láser.
- Revisar las superficies extendidas del radiador y asegurarse que están en óptimas condiciones.
- Revisar las conexiones eléctricas y asegurarse que están limpias (sin polvo) y sin corrosión. Para esto se recomienda desconectar los componentes y verificarlos individualmente.
- Revisar el cuerpo en general y verificar si mantiene el anodizado y pavonado en sus piezas, puesto que el desgaste por uso o roces podrían retirarlos. En caso de encontrar zonas afectadas, llevar la pieza a realizarse el tratamiento superficial respectivo.
- Verificar y cambiar los pines si no están rectos o se detecta alguna curvatura en ellos, puesto que esto afectaría a las probetas y consecuentemente a las pruebas.
- Tomando estas consideraciones, se prevé una larga vida útil del sistema y pruebas caracterizadas por su replicabilidad y rendimiento.

Análisis de Ciclo de Vida

Dado que se cuenta con procesos relacionados desde la adquisición del material, como normativas a seguir a lo largo del uso del módulo, es necesario realizar un análisis del ciclo de vida de todo el sistema. Para el análisis de ciclo de vida se delimitó el sistema a: los procesos de manufactura, la extracción de materia prima, los procesos de adición de material realizados durante las pruebas, y los posibles reemplazos necesarios de componentes defectuosos en el transcurso de su vida útil.

Sobre la extracción de materia prima se realizó una aproximación a lo que sería la energía consumida por los kilogramos de metal usados. Según el estudio por Macías et al. de 2017 sobre “*Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador*” concluyen que, para Quito, Ecuador se tiene que por cada kilogramo de metal se consumen alrededor de 24,84 [MJ] de energía; vista como materiales y su transporte. Por esto, para nuestro módulo y componentes que en conjunto representan de alrededor de 8 [kg] de material, se tendría que su huella energética es de 198,72 [MJ] de energía. También es importante recalcar que tanto el acero como el aluminio tienen características positivas como su durabilidad al tratarse de metales, más aún por su tratamiento superficial, a la vez que son fácilmente reciclables. El consumo de la energía relacionada a estos está presente en su mayoría en sus procesos de extracción y producción.

Siguiendo con esta idea sobre los impactos positivos de los procesos seleccionados, se encuentra el pavonado y anodizado. Ambos procedimientos permiten una protección contra la corrosión lo que magnifica el tiempo de vida útil del módulo, lo que representa una menor extracción a largo plazo. A pesar de esto, se debe mencionar el costo que estos tienen en el ambiente, dado que se debe hacer uso de agua para estos procesos. Lo que se traduce en energía gastada por el tratamiento de efluentes para mejorar las condiciones y devolver las propiedades del agua antes de devolverla a su medio. Según bibliografía (Salazar, et al. 2022) se concluye que, para devolver las propiedades a un metro cúbico de agua, cantidad aproximada necesitada para cada proceso, se necesitarían 7,92 [KJ] de energía. Resultando un total de 15,84 [KJ].

Como último análisis se tomó en cuenta al reemplazo de los componentes defectuosos. Se debe mencionar que se han tomado consideraciones para minimizar estos aspectos. Por un lado, el operario es capaz de reemplazar componentes específicos sin la necesidad de hacerlo con todo el ICP, por lo que se promueve el consumo justificado. Así mismo, los componentes electrónicos están caracterizados por su miniaturización y reciclabilidad, lo que permite reducir

el consumo de materiales a la par que se pueden reutilizar los desgastados. Por esto, el consumo energético de los componentes se lo tendrá en cuenta como un porcentaje del valor final, dado que se podrán reciclar los componentes, no generando desperdicio y previniendo el consumo de nueva materia prima, y a la imposibilidad de determinar cuáles y cuántos componentes fallarán.

Si se suman los valores anteriores, da un consumo de 198,74 [MJ]. Para un año de operaciones, en un caso conservativo donde pocos componentes fallen, se aumentaría solo un 5% de ese valor final; con un consumo neto de 208,67 [MJ]. Ahora bien, en caso de que por alguna falla del operario o fuerzas externas dañen el módulo y varios componentes deban ser reemplazados, se añade un consumo extra del 15%; dando un nuevo consumo neto de 228,55 [MJ]. En definitiva, se puede llegar a la conclusión que los consumos energéticos iniciales llegarán al orden de los $2E+8$ [J] y anualmente por temas de reparación estará en el orden de los $1E+7$ [J] por motivos relacionados al reemplazo y mantenimiento de componentes.

El análisis general del uso del módulo destaca la importancia de considerar tanto los aspectos positivos y negativos en cada etapa del ciclo de vida, a la par que se buscan oportunidades de mejora con respecto a la sostenibilidad mediante prácticas eficientes y sostenibles. Un análisis más detallado podría realizarse en un futuro cuando se cuente con datos sobre el porcentaje de elementos defectuosos o por mantenimientos que se deban reemplazar al año.

Resultados y discusión

Análisis ingenieril

Subcomponentes del sistema: Cálculos Asociados

El prototipo diseñado consta de varios subcomponentes que trabajan conjuntamente para asegurar el correcto funcionamiento del sistema recolección de datos y precautelar la integridad del equipo. El primer subcomponente consta de los dispositivos eléctricos como el láser CD22M-100-485 para la medición del desplazamiento de la placa descrita previamente. Adicionalmente, se tienen 6 termocuplas que se emplearán para monitorear la temperatura del sustrato, el interior del cuerpo principal, la entrada y la salida del agua y el escudo de calor. Todos los sensores se controlan y programan en Arduino.

El siguiente subcomponente, ligado a la medición del desplazamiento de la placa, es la cámara ubicada de forma fija sobre el cuerpo principal. Tanto la respuesta de los sensores como de la cámara se visualizan en Matlab en tiempo real. El tercer subcomponente es el cuerpo principal y la estructura física para la sujeción de la placa y el soporte del peso del equipo en posición horizontal y vertical. Se realizaron modificaciones de los componentes físicos originales para aumentar la resistencia al calor y la versatilidad del sistema general. Finalmente se tiene el sistema de enfriamiento logrado con agua de recirculación mediante un radiador con una bomba no sumergible y el escudo de calor con material aislante. A continuación, se presentan los cálculos realizados haciendo referencia a los subcomponentes identificados.

Balance de energía

En cuanto a la simulación se asume que el escudo de calor está a una temperatura de 450 grados centígrados, donde se asumió que la temperatura del agua de entrada era 10 grados

centígrados con un flujo constante de 20 L/min. Lo cual resultó en una temperatura interna de la placa que sostiene el láser de 28 °C. Confirmando el hecho de que es seguro usar el láser en este tipo de aplicaciones. Adicionalmente, se realizó un ensayo experimental para obtener la temperatura del agua, de la superficie del sustrato y la temperatura dentro del cuerpo principal. Se mantuvo una antorcha de oxiacetileno a 20 cm de la placa por 30 minutos, para simular un tiempo de exposición prolongado para el proceso de termo rociado. Los resultados experimentales fueron una temperatura inicial del agua de 10 °C y final de 31 °C, temperatura del sustrato de 250 °C y temperatura interna del cuerpo principal de 45 °C. Cabe recalcar que este ensayo se realizó sin las medidas adoptadas en el prototipo final como espacio entre el escudo de calor y el cuerpo principal, capa de material aislante adherida al escudo de calor y sistema de enfriamiento con agua de recirculación.

A continuación, se realizó un análisis térmico del sistema para encontrar las magnitudes de calor de entrada y de salida para tanto el caso del recubrimiento como de la soldadura. Este esquema se visualiza en la Figura 9.

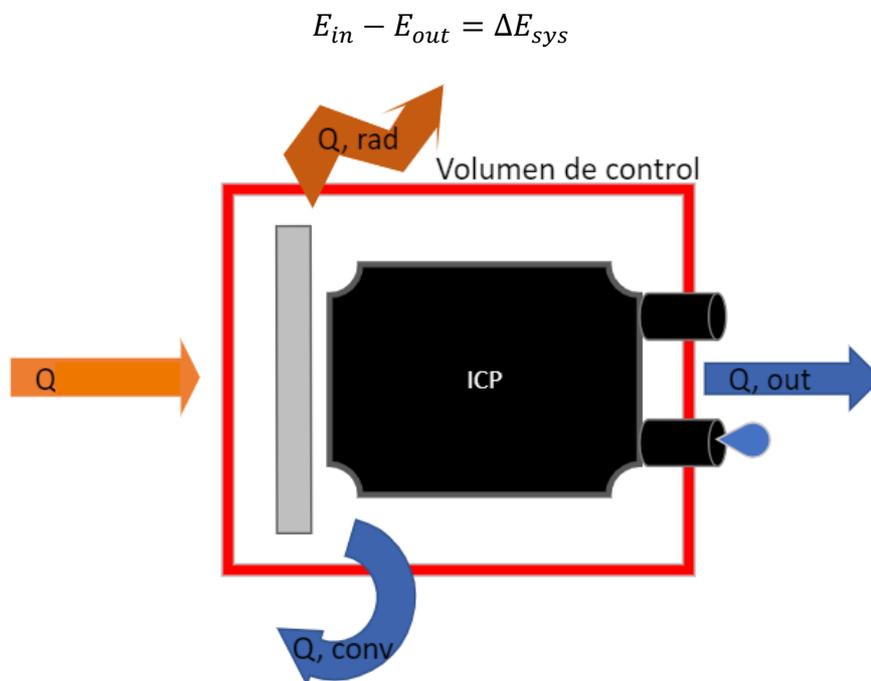


Figura 9. Esquema de balance de energía del sistema con volumen de control macro.

Los balances de energía se descomponen en los siguientes términos:

Para el recubrimiento:

$$q_{flame} - q_{conv} - q_{rad} - q_{out,w} = 0$$

El calor generado por la flama se emplea el calor generado por la combustión del acetileno y el flujo volumétrico de este gas.

$$q_{flame} = q_{comb,acetylen} \cdot \dot{V}_{acetylene}$$

En el caso de la radiación se usa una temperatura superficial de 250 °C y de los alrededores de 25 °C.

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{surr})$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{surr})(T_s^2 + T_{surr}^2)$$

Donde ε es la emisividad del sustrato, en este caso aluminio y σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

El calor extraído por el agua se calcula con el caudal de la bomba adquirida para el sistema de enfriamiento de 20 L/min y las temperaturas de entrada y salida mencionadas previamente.

$$q_{out,w} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p (T_{in,w} - T_{out,w})$$

Para calcular el calor que se transfiere por convección se debe encontrar el coeficiente de convección utilizando la expresión del número de Nusselt N_{uL} y Rayleigh R_{aL} de Bergman y Lavine (2017, pp.550-551).

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty)$$

$$h_c = \frac{N_{uL} * K}{L}$$

$$N_{uL} = C R_{aL}^n$$

$$R_{aL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu \alpha}$$

$$\beta = 1/T_{film}$$

$$T_{film} = \frac{T_s - T_\infty}{2}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, L es alto de la placa, ν tiene un valor de $26.4E-6$ [m^2/s], α es $38.3E-6$ [m^2/s], $C = 0.59$, $n = 1/4$ y K es la conductividad del aire correspondiente a 0.0338 [W/mK] (Bergman & Lavine, 2017, p.551).

Para la soldadura:

$$q_{MIG} - q_{conv} - q_{rad} - q_{out,w} = 0$$

El calor generado por la soldadura se calculará mediante el balance de energía ya que se requiere la realización de un experimento para obtener los datos necesarios para el cálculo teórico. No obstante, para calcular el calor extraído del volumen de control por convección natural, se considera al sustrato como una placa horizontal. La temperatura de la superficie para este caso es 1400 °C. El sistema de ecuaciones empleado se muestra a continuación:

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty)$$

$$h_c = \frac{N_{uL} * K}{L}$$

$$N_{uL} = 0.54 R_{aL}^{1/4}$$

$$R_{aL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu \alpha}$$

$$\beta = 1/T_{film}$$

$$T_{film} = \frac{T_s - T_\infty}{2}$$

Donde L en este caso es la longitud del sustrato, 21 cm.

En contraste al calor trasferido por radiación durante el proceso de recubrimiento, para la soldadura solo cambia la emisividad a 0.35, dado que el sustrato empleado para este ensayo será acero, la temperatura superficial a 1400 °C y la temperatura de los alrededores a 50 °C. Finalmente, el calor extraído por el sistema de enfriamiento será considerado con la misma magnitud hasta realizar un ensayo experimental ara corroborar los datos de la temperatura de salida y entrada del agua. Los resultados se observan en la Tabla 4.

Tabla 4 Cálculos Balances energéticos para recubrimiento y soldadura

Proceso	Recubrimiento	Soldadura
Calor generado por el proceso	19911 W	20767 W
q_{conv}	0.1275 W	0.5917
q_{rad}	24 W	1305 W

$q_{out,w}$	19462 W	19462 W
-------------	---------	---------

Debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan durante la soldadura, las magnitudes del calor generado en el proceso, la energía transferida por convección y radiación son mayores con respecto a las del recubrimiento.

Cálculo de diseño sistemas de refrigeración

Para el proceso de diseño de tanto el sistema de refrigeración y el escudo de calor, toda la información en relación con las fórmulas, tablas, gráficos y propiedades fueron obtenidos del libro “Bergman, T. L., Lavine, A., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2019). Fundamentals of heat and mass transfer (8th ed.). John Wiley & Sons, Inc.” Comenzando por el diseño del escudo de calor, se debe comenzar por el cálculo del número de Nusslet y Rayleigh (2019, pp. 604-605). La primera ecuación:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Esta primera ecuación representa la sección vertical del escudo de calor

$$Ra_L = \frac{g \cos(\theta) \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu\alpha}$$

Mientras que la segunda ecuación hace referencia a las secciones inclinadas del escudo de calor. En cuanto a las propiedades usadas dentro de la ecuación, se tomó en cuenta una temperatura ambiente de 20°C y 134°C en el escudo de calor, dato que se obtuvo en pruebas preliminares. Por lo que las propiedades quedan de la siguiente manera, tal que g es la aceleración de la gravedad, Θ es la inclinación de la placa con valor de 45 grados, L es el alto de las secciones individuales del escudo de calor, ν es la viscosidad cinemática tiene un valor de 20.92E-6 [m²/s], α es la difusividad térmica es 29.9E-6 [m²/s], $C = 0.59$, $n = 1/4$ asumiendo

que se trabaja bajo condiciones laminares, β es la uno sobre la temperatura de film equivalente a 0.00285 (Bergman & Lavine, 2017, p.551).

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = cRa_L^n$$

Usando la relación de numero de Nusslet con el número de Rayleigh, donde h es el coeficiente de convección, y K es la conductividad del aire 0.03 [W/mK], ecuación la cual se modifica para dejar todo en términos del coeficiente de convección.

$$\overline{h} = \frac{k}{L} cRa_L^n$$

$$\overline{h}_v = \frac{k}{L} c \left(\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \right)^n$$

$$\overline{h}_{inc} = \frac{k}{L} c \left(\frac{g \cos(\theta) \beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \right)^n$$

Obtenido, la ecuación en función de L ; se puede continuar con el proceso de diseño para añadir los efectos del calor, con la siguiente ecuación, donde se reemplazan las ecuaciones obtenidas anteriormente, y se realiza el algebra necesaria para despejar L .

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$q = \left(\frac{k}{L} c \left(\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \right)^n + \frac{k}{L} c \left(\frac{g \cos(\theta) \beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \right)^n \right) \cdot 3LW \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$q = kc \left(\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \right)^n (1 + \cos(\theta)) \cdot 3W \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$L = \left(\frac{q}{kc \left(\frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu\alpha} \right)^n (1 + \cos(\theta)) \cdot 3W \cdot (T_s - T_\infty)} \right)^{\frac{4}{3}}$$

$$L = 0.078 [m]$$

Siguiendo con el diseño de nuestro sistema de refrigeración, se debe comenzar por el conseguir el coeficiente de convección de tanto el aire como el agua que pasa por el mismo.

Seguindo la relación encontrada en la tabla 8.1 del libro (pp. 552) asumiendo una relación intermedia de 4 entre la altura y ancho de cada uno de los pasos, se puede seguir con el diseño.

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} = 4.4$$

Dentro de esta ecuación tenemos a lo que llamamos, el diámetro hidráulico, el cual está en función del área transversal y el perímetro “mojado”. Lo cual asumiendo que el espaciado entre los diferentes pasos es constante en todos, con la siguiente relación, donde N es el número de pasos, y L es el alto del radiador.

$$a = \frac{N}{L}$$

Por lo que la ecuación del diámetro hidráulico queda de la siguiente manera:

$$D_h = \frac{4A_c}{P}$$

$$D_h = 2a$$

Lo cual reemplazando dentro de la relación del número de Nusslet y despejando en función del coeficiente de convección, y reemplazando las respectivas propiedades obtenemos los coeficientes de convección del aire y agua.

$$h = \frac{4.4k}{2a} = 2.2 \cdot \frac{KN}{L}$$

$$h_w = 1.375 \frac{N}{L}$$

$$h_a = 0.0579 \frac{N}{L}$$

Sabiendo el valor de esas relaciones se comienza a calcular el valor total del coeficiente de convección, a partir de las relaciones encontradas como la fórmula 11.1a (pp.708).

$$U = \frac{1}{1/h_a + 1/h_w}$$

A partir de la ecuación anterior, usando la relación 11.14 (pp. 714) podemos relacionar el calor que entra dentro del sistema, con el número de pasos y longitud de nuestro radiador, como también los cambios de temperatura dentro del sistema.

$$UA = \frac{q}{\Delta T_{lm}} = \frac{L^2(N-1)}{1/h_a + 1/h_w}$$

Realizando el algebra necesaria, y reemplazando las ecuaciones obtenidas para los coeficientes del agua y aire, podemos obtener la siguiente relación.

$$L = \frac{q}{3.873N(N-1)}$$

Sabiendo que el equipo va a tener que caber dentro de un espacio reducido, al ver la gráfica que esta ecuación crea se observa que necesitamos un radiador que tenga entre 15-18 pasos y tenga una altura de 17 hasta 15 cm.

Cálculo de Esfuerzos Residuales

Dentro de los subcomponentes de este estudio, se encuentra la parte analítica de los cálculos con respecto a las relaciones entre deformación, temperatura y esfuerzos residuales. Las ecuaciones se dividen entre aquellas a usarse para la determinación de esfuerzos residuales y curvatura para el material del recubrimiento, y aquellas a usarse para el material base o sustrato. Se hace esa distinción porque las suposiciones hechas para el recubrimiento no pueden

ser aplicadas para la soldadura. De igual manera, la determinación del estrés residual sigue la metodología experimental y teórica vista por Kuroda y Clyne (1991). Durante el proceso de deposición de material se registró la temperatura y la curvatura del sustrato. El esfuerzo (esfuerzo de tracción) de temple (QS) se determinó a partir del grosor del recubrimiento y de los datos de curvatura del período de deposición. El esfuerzo térmico (TS) del recubrimiento se determinó a partir de los datos de temperatura y curvatura del período de enfriamiento. Finalmente, la distribución de esfuerzos residuales (RS) en toda la muestra se determinó mediante la superposición de las distribuciones de QS y TS. Se asumió un estado de tensión biaxial en el plano del recubrimiento.

Para los procesos de recubrimiento, se usaron las ecuaciones de Stoney (1909) y las de Brenner-Senderoff (1942). La ecuación de Stoney puede detectar los esfuerzos residuales en el sustrato, y la de Brenner-Senderoff para aquellos encontrados en el recubrimiento. Su uso puede ser usado bajo las suposiciones de que el espesor del recubrimiento es significativamente menor al espesor del sustrato (placa base), cuando el recubrimiento es solo de varias decenas de micrómetros, y asumiendo que la curvatura a formarse es parte de una circunferencia. Dado que el estudio cuenta con esos requerimientos, se las implementó para la obtención de esfuerzos residuales, siendo estas:

$$\text{Stoney: } \sigma_s = \frac{E_s h_s^3}{6(1-\nu_s) R h_f^2 \left(1 + \frac{h_s}{h_f}\right)}$$

$$\text{Brenner-Senderoff: } \sigma_f = M_s \frac{h_s}{h_f} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right) \left[1 + \frac{h_s}{h_f} \left(\frac{4M_f}{M_s} - 1\right)\right]$$

En donde E_s es el módulo de Young del sustrato, h_s y h_f el espesor del sustrato y del recubrimiento respectivamente, ν_s el coeficiente de Poisson del sustrato, R el radio de curvatura, M_s y M_f los módulos biaxiales para el sustrato y el recubrimiento, los mismos que se pueden calcular según la fórmula siguiente:

$$M_i = \frac{E_i}{(1 - \nu_i)}$$

Para los datos a continuación, se tomaron en cuenta las propiedades de los materiales y dimensiones indicadas en la tabla 5:

Tabla 5. Parámetros y propiedades usadas en los cálculos.

Módulos de Young [GPa]		Coefficiente de Poisson	
Es	195	vs	0,3
Ef, recubrimiento	300	vf, recubrimiento	0,21
Ef, soldadura	210	vf, soldadura	0,3
Espesores [mm]		Deflexión máxima [mm]	
hs, recubrimiento	3	K (recubrimiento)	0,12
hf, recubrimiento	0,74	K(soldadura)	0,2
hf, soldadura	1,5		

Las propiedades corresponden a un sustrato de acero, a una soldadura MIG con alambre de aleación de acero, y un recubrimiento de alúmina (óxido de aluminio). Cabe destacar que, para la comparación de la metodología expuesta se usa el valor de h_s igual a 3 [mm] puesto que este valor es el encontrado en bibliografía. De esta forma, se corrobora analíticamente la metodología al obtener resultados comparables como se verá a continuación. Con respecto a los datos experimentales, se encontrará por medio de ensayos metalográficos el valor de h_s correspondiente para las varillas usadas en este informe. Es así que, se muestra el proceso analítico corroborado con ejemplos de cálculo, para posteriormente aplicarlos con el dato de h_s empírico encontrado.

Usando la ecuación de Brenner-Senderoff y las suposiciones descritas se tienen los siguientes resultados de los esfuerzos residuales en el cordón de soldadura y sustrato:

$$\sigma_{f,soldadura} = 177,43 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_s = 19,85 \text{ [MPa]}$$

Los datos se ajustan a resultados encontrados en bibliografía. Yan et al. en su publicación *An Arrhenius equation-based model to predict the residual stress relief of post weld heat treatment of Ti-6Al-4V plate*, donde lleva a cabo un estudio para encontrar esfuerzos residuales durante soldadura encontró que el esfuerzo residual en el cordón tomó valores máximos de 150 [MPa], y en la placa base de 25 [MPa]. Resultados concordantes con los encontrado en este estudio.

Para el esfuerzo resultando de los procesos de recubrimientos de material, usando alúmina, se usó la ecuación de Stoney. Igualmente, las propiedades usadas y parámetros se pueden encontrar en la Tabla 5. Los resultados se muestran a continuación:

$$\sigma_{f,recubrimiento} = 175,27 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_s = 14,89 \text{ [MPa]}$$

Nuevamente, se contrastó con literatura para corroborar los resultados obtenidos. En la publicación de Matějčiček (2019) sobre la evolución de esfuerzos residuales en recubrimientos, se encontró que: para planchas de acero con deflexiones de alrededor de 0,12 [mm] se tiene un esfuerzo residual producto de una variación térmica de 20 [MPa]. De igual forma, el recubrimiento de tipo alúmina llega a valores de esfuerzos residuales de 105 [MPa].

Relación entre temperatura y curvatura

De igual manera, la ecuación planteada por Tsui y Clyne (1997) son idóneas para relacionar la curvatura de la viga a analizar con la diferencia en temperatura alcanzada durante el enfriamiento. La ecuación, al igual que las anteriores, se basan en las propiedades de los materiales, así como en los parámetros físicos. Tsui y Clyne afirman que, la diferencia en curvatura tiene una relación directamente proporcional al cambio de temperatura, y a su vez, a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica de los materiales. La ecuación es:

$$\Delta k = \frac{1}{\Delta R} = \frac{6E_f E_s h_s h (h_f + h_s) \Delta T \Delta \alpha}{E_f^2 h_f^4 + 4E_f E_s h_f^3 h_s + 6E_f E_s h_f^2 h_s^2 + 4E_f E_s h_f h_s^3 + E_s h_s^4}$$

Donde Δk es la diferencia en curvatura, ΔT es la diferencia entre la temperatura ambiente y el máximo recibido, y $\Delta\alpha$ la diferencia de los coeficientes de expansión térmica. Para la valoración de la ecuación se usaron los valores de 220 [GPa] como módulo de Young para la soldadura, 209 [GPa] para el sustrato (acero), un espesor de 1,5 [mm] en la soldadura y 3 [mm] en la vara, un coeficiente de expansión térmica de 0,000012 [1/°C] para la soldadura y 0,0000125 [1/°C] para el acero. Además de 0,3 como coeficiente de Poisson para el recubrimiento y acero. La diferencia de temperatura es 150 [°C] por el poco tiempo del proceso. El resultado es de 2 [1/cm] de diferencia de curvatura.

Plan de pruebas del prototipo

Para precautelar la integridad del prototipo y verificar el correcto funcionamiento del sistema de recolección de datos, se realizaron una serie de pruebas y experimentos. Las mismas fueron evaluadas con respecto a cinco criterios ingenieriles. Estos son seguridad para el prototipo, replicabilidad de datos, congruencia de datos entre distintos métodos, fiabilidad del ensayo y versatilidad.

La primera prueba que se realizó fue la medición de la temperatura en el escudo de calor, en el interior del cuerpo principal y a la entrada y salida del agua. Este ensayo se realizó previo a implementar las modificaciones que se explican anteriormente y con agua conectada de forma directa desde una toma, omitiendo el sistema de refrigeración. Para calentar la muestra se utilizó el soplete con una mezcla de oxiacetileno por 20 minutos. Es decir, un tiempo diez veces mayor al de la duración del ensayo de recubrimiento desempeñado por el brazo robótico Kuka con una duración de 2 minutos. Los datos obtenidos se emplearon para realizar los cálculos de transferencia de calor. Tanto el diseño del nuevo escudo de calor como la selección de componentes para el sistema de refrigeración se basaron en los resultados de esta

prueba. Una vez que se aplicaron las mejoras se esperaba no tener una temperatura en el cuerpo inicial superior a 40 °C. Como se puede observar en la tabla 6 al añadir un escudo de calor con mayores dimensiones y cinta térmica adherida en la parte posterior, además del sistema de refrigeración se lograr resultados comprometedores. La temperatura máxima alcanzada en el interior del cuerpo principal fue de 32 °C, por ende, se cumple con el criterio ingenieril que se refiere a precautelar la seguridad del prototipo. Los valores experimentales se indican en la Tabla 6.

Tabla 6 Temperatura antes y después de las modificaciones al prototipo

	Temperatura final interna [°C]	Temperatura final del agua [°C]	Temperatura del escudo de calor [°C]	Tiempo [min]
Antes de modificaciones	48	36	350	20
Después de modificaciones	32	25	200	20

Posteriormente, se corroboró que las termocuplas funcionen correctamente. Esto se logró monitoreando la temperatura interna del ICP con una termocupla conectada al Arduino y otra a un PID (controlador proporcional, integral y derivativo). El objetivo era obtener temperaturas similares en la lectura del código y la pantalla del PID. Se comprobó el funcionamiento de cada una de las termocuplas. Con este ensayo de cumplió con el criterio de replicabilidad de datos, validando el correcto funcionamiento de los sensores de temperatura.

Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos mediante dos métodos de medición distintos. En el primero se empleó el sensor de distancia láser de la empresa Fastus,

con una resolución de 10 micras. En el segundo, se realizó un análisis ex-situ o post proceso en el cual también se midió la deflexión del punto central de la muestra mediante la aplicación tracker. Esta permite indicar un eje de referencia al igual que una medida conocida. Para obtener la medida de la distancia se debe seleccionar la posición del punto de interés en distintos fotogramas del video. El programa automáticamente genera un gráfico con el desplazamiento de punto de interés en función del tiempo que se muestra en la Figura 10.

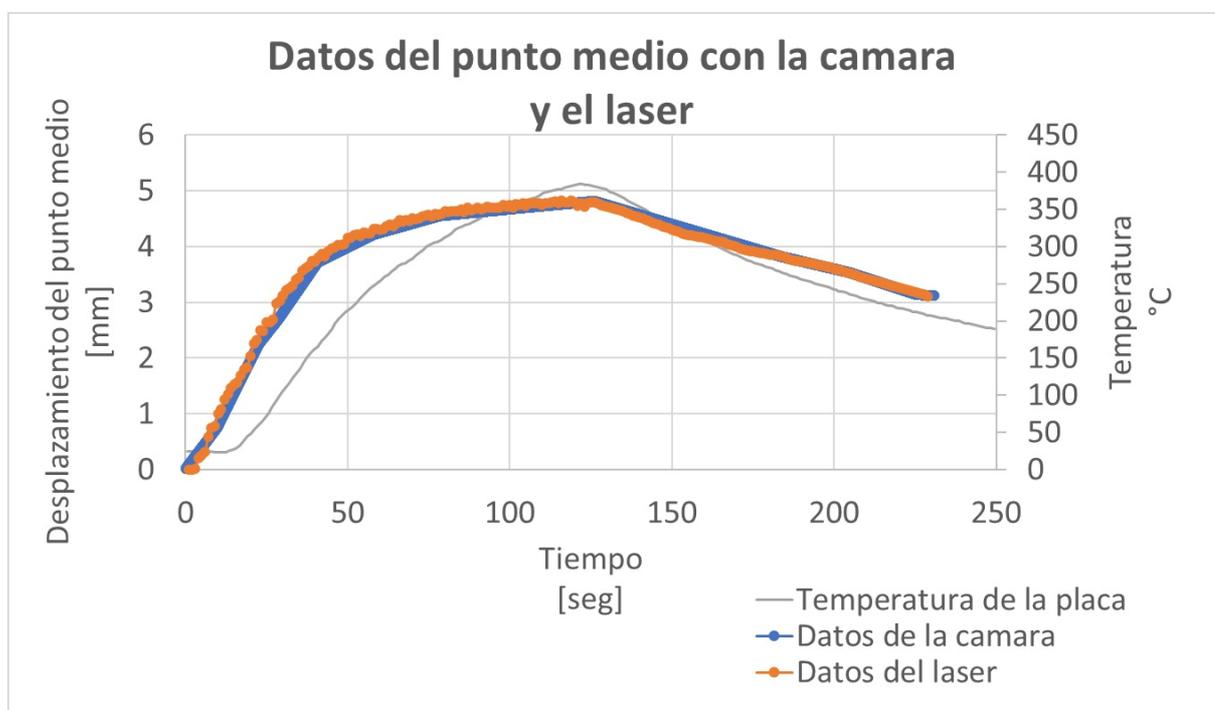


Figura 10 Comparación entre resultados obtenidos con el sensor de distancia láser y análisis de video

Como se observa en la figura 10, tanto la gráfica obtenida mediante el código y aquella del programa Tracker, tienen la misma tendencia. Debido a la resolución de la cámara, en este caso 1080 y 30 fps, se pudo inducir un error experimental entre ambos métodos. No obstante, este es despreciable. Por ende, se cumple con el criterio de congruencia de datos entre distintos métodos.

Una vez comprobado el funcionamiento de los métodos de recolección de datos, se procedió a indagar si el termorociado se realizó correctamente. Por ende, realizó una

micrografía con una sección de la muestra en la cuál se analizó si el recubrimiento estaba adherido correctamente. Así mismo, se midió el espesor de la capa de recubrimiento como se indica en la Figura 11. Este valor fue posteriormente ingresado en el código para la medida de esfuerzos residuales.

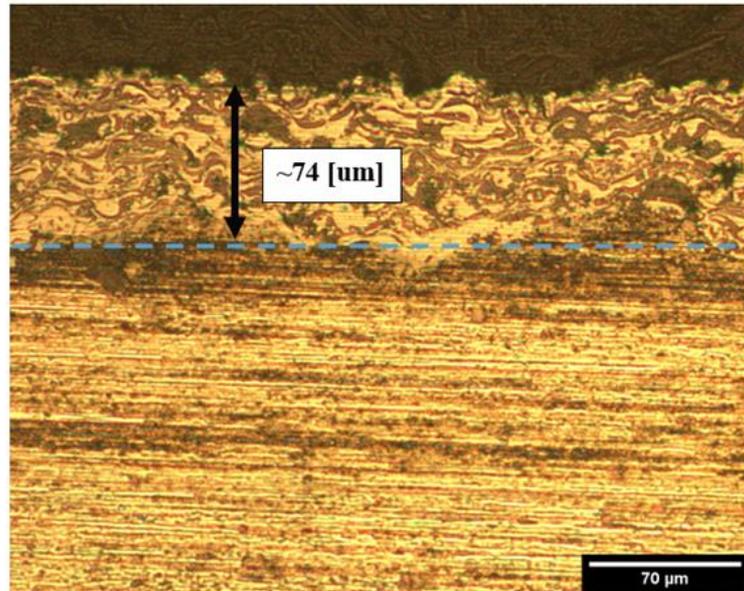
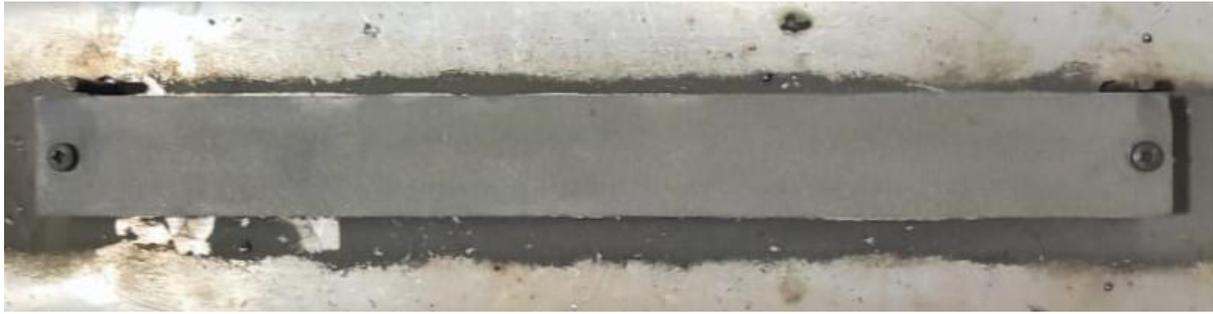


Figura 11 Micrografía de una muestra de acero y recubrimiento de níquel cromo, con magnificación de 100X

Como se observa en la figura 11, la capa de recubrimiento promedio que se obtiene con el brazo robótico Kuka en un tiempo de 2 minutos es de 74 μm . Al verificar que el recubrimiento se adhirió correctamente y que el espesor de la capa es relativamente uniforme se pudo establecer que el proceso cumple con el cuarto criterio, la fiabilidad.

Finalmente, se puso a prueba el prototipo con otros métodos de adición de material como la soldadura y la manufactura aditiva. En la sección de trabajo futuro se indica cómo mejorar la confiabilidad de estos procesos, ya que en este ensayo se realizó de forma manual. A continuación, se muestran dos probetas de acero A36 en la Figura 12. La primera corresponde a un ensayo de termorociado con un recubrimiento de níquel-cromo, mientras la segunda es un ensayo de manufactura aditiva.



a)



b)

Figura 12 Muestras de acero A36: recubrimiento de níquel-cromo (imagen superior) y manufactura aditiva (imagen inferior)

Se logró recopilar datos de curvatura con ambos procesos, comprobando que el prototipo es versátil. En síntesis, cada ensayo se realizó para verificar si el diseño y los subsistemas trabajan correctamente en conjunto para validar el cumplimiento de los criterios ingenieriles en los cuales se guía este proyecto.

Seguridad del diseño

Durante la fase de diseño del presente proyecto es necesario realizar un análisis minucioso de riesgos, para prevenir situaciones adversas antes, durante y después de la construcción del prototipo. Es importante contar con un plan de acción que se pueda implementar para mitigar los efectos que se puedan desencadenar a partir de la ocurrencia de un imprevisto. Por esta razón, se identificaron tres categorías en las cuales se describen los principales riesgos, estas son daños del equipo o sus componentes físicos, limitaciones

funcionales debido a un mal diseño y lesiones a los operarios. Durante de las fases de diseño, pruebas experimentales y posterior uso, se deben especificar todas las directrices para precautelar el bienestar del equipo y sus usuarios. A continuación, se detalla el impacto y la probabilidad de los riesgos más significativos, dentro de tres matrices separadas por categorías en la Tabla 7.

Tabla 7 Riesgos referentes a daños al equipo

Riesgos (Daños al equipo)	Impacto [I]	Probabilidad [P]	Ponderación [IxP]
Sobrecalentamiento de algún componente electrónico.	5	3	15
Fugas de agua que comprometan a los componentes electrónicos.	3	4	12
Falla catastrófica del láser.	5	1	5
Fallo del heat-shield y que suficiente calor penetre dentro del cuerpo principal y dañe los componentes electrónicos.	5	1	5
Daños estructurales de la tapa del cuerpo metálico que no permitan su cierre.	2	2	4

Los riesgos referentes a daños en el equipo tienen una mayor ponderación dado el caso de que los componentes electrónicos se encuentran comprometidos. Para mitigar cada uno de estos riesgos se han planteado medidas que se deben aplicar previo a las pruebas in-situ de los procesos de recubrimiento y soldadura sobre el sustrato. La prevención del sobrecalentamiento de los componentes electrónicos que se encuentran dentro del cuerpo principal, tales como cables y conexiones, se logrará al añadir protecciones térmicas y termo encogibles, además de monitorear la temperatura en el punto central del cuerpo principal mediante una termocupla. El impacto de este riesgo es alto dado que el cálculo de esfuerzos residuales depende en su totalidad del correcto funcionamiento de los componentes electrónicos. La probabilidad de

sobrecalentamiento de los elementos electrónicos es tiende a ser alta dado que el periodo de pruebas es extenso. Debido a la criticidad de este riesgo se debe monitorear continuamente el estado del sistema de recolección de datos.

El segundo riesgo con una ponderación significativa es la fuga de agua. Para su prevención, se deben implementar procesos corroborativos de ajuste de las abrazaderas que sostienen las mangueras conectadas a la entrada y salida del sistema de enfriamiento del cuerpo principal. El protocolo seleccionado para mitigar este riesgo es realizar una señal con un marcador una vez se ajusten las abrazaderas. Adicionalmente, no accionar la bomba del agua de recirculación hasta verificar que todas las abrazaderas tengan su marca respectiva. El impacto de este riesgo tiene una calificación de 3 sobre 5 dado que el sistema eléctrico tendrá protecciones adecuadas y una probabilidad alta. Tomando en cuenta estas consideraciones, se deben realizar pruebas únicamente con el sistema de enfriamiento e inspeccionar si se presentan fugas.

El tercer riesgo identificado es la falla catastrófica del láser. Este componente electrónico es uno de los más significativos de todo el sistema, dado que es la principal herramienta para la recolección de datos de curvatura de la muestra debido a su precisión de 10 micras. No obstante, la falla de este componente tiene una baja probabilidad si se mantiene bajo una temperatura de 70 [°C] en los alrededores. Esto se logrará mediante el diseño adecuado del sistema de enfriamiento y el escudo protector de calor. Así mismo, antes de realizar ensayos con el láser, se pondrá a prueba el sistema mediante los procesos de adición de material para verificar mediante las termocuplas que la temperatura se mantenga debajo del límite de operación del láser. Es importante limitar el tiempo de funcionamiento del láser, por lo tanto, dos personas se asegurarán de forma independiente que se haya desconectado de su fuente de poder. Finalmente, se deben prevenir golpes al transportar el láser en un contenedor adecuado.

El siguiente riesgo identificado es el fallo del escudo de calor. Debido al bajo costo de los materiales aislantes se aumentará el factor de seguridad de este componente sobredimensionando su capacidad aislante. Además, se modificó el diseño del escudo original para que tenga una mayor área de cobertura y se separó 3 cm del cuerpo principal para evadir la transferencia de calor por conducción. Los únicos puntos de contacto entre el escudo de calor y el cuerpo principal son elementos de sujeción. El último riesgo de la primera categoría son los daños estructurales del cuerpo principal. Esto puede ocurrir en el caso de una manipulación indebida del equipo por parte de los operadores o por la falta de rigurosidad en el proceso de maquinado de las partes. Para reducir la probabilidad de ocurrencia de este riesgo se verificarán las tolerancias del diseño y durante la fabricación y establecer en el manual del operador los procesos que se deben seguir para precautelar el bienestar del equipo. A continuación, se encuentra la ponderación para cada riesgo en la Tabla 8.

Tabla 8 Riesgos referentes a mal diseño

Riesgo (Mal diseño)	Impacto [I]	Probabilidad [P]	Ponderación [IxP]
Al momento de recopilar los datos de imagen, la cámara capta demasiado ruido producto de las chispas y gases relacionados a los procesos, lo que causa que no pueda	5	4	20
Temperatura de entrada del agua al sistema no llegue a los 10 [C]*	5	3	15

Vibraciones del sistema por mala fijación del soporte al cuerpo principal, o a la superficie.	4	2	8
Fallas en el código que no permitan la correcta lectura de los datos.	3	2	6
Falla en la traducción de los valores emitidos por el protocolo de comunicación del láser, a valores decimales.	5	1	5

Uno de los factores críticos de este proyecto es validar el diseño previamente para que todos los subsistemas funciones correctamente. El primer riesgo de la categoría de deficiencias en el diseño es el exceso de ruido en la imagen captada por la cámara debido a las chispas y los gases generados por los procesos de adición de material. Este riesgo tiene un impacto alto ya que eliminaría la posibilidad de implementar el sistema de análisis de imágenes para corroborar los datos de desplazamiento obtenidos por el láser. Por ende, se ha optado por emplear un filtro en el lente de la cámara que reduzca la cantidad de luz entrante al diafragma y emplear pintura reflectiva en el borde del diafragma para facilitar su detección. La efectividad de estas medidas se probarán experimentalmente para realizar las modificaciones necesarias antes de su implementación en el prototipo final.

El segundo riesgo se refiere a la temperatura de entrada del sistema de enfriamiento. Esta debe tener una temperatura de 10 °C para garantizar que la temperatura dentro del cuerpo principal se mantenga debajo del límite operativo de los componentes electrónicos. Para reducir este riesgo se diseñará un sistema de enfriamiento mediante agua de recirculación eficiente para extraer la cantidad de calor necesaria del agua, este se corroborará mediante

cálculos y. Las vibraciones en el sistema por mala fijación de los soportes pueden generar irregularidades en los sistemas de medición empleados. Para eliminar la incidencia de las vibraciones se añadirán reguladores de nivel en cada punto de apoyo de la pieza con cauchos que brinden una mayor fijación y estabilidad. Los dos últimos riesgos hacen referencia a fallas en el código que permite controlar los sensores desde un computador o en la lógica que se emplea para recopilar los datos desde el Láser CD22M-100-485 mediante el protocolo de comunicación RS485. Fallas en el código pueden resultar en datos erróneos, por ende, es imprescindible mantener un orden en las versiones que se corrigen y guardarlas por separado e identificadas correctamente. Adicionalmente, se comprobarán los datos recibidos en el código mediante un método experimental adicional. En el caso de las termocuplas se empleó un termómetro láser para corroborar que el valor de ambos sea congruente. Finalmente, para el láser se debe analizar si el valor indicado en el display el láser sea el mismo recibido en el código de Matlab. La ponderación para esta categoría se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Riesgos referentes a daño a los operadores

Riesgo (Daño a los operadores)	Impacto [I]	Probabilidad [P]	Ponderación [IxP]
Daño a los operadores (quemaduras) por el calor generado durante el proceso.	3	3	9
Daños a los operadores (ojos) por mal uso del láser.	2	1	2

La última categoría corresponde a los riesgos que se relacionen con daños a los operadores debido a accidentes por mal uso del equipo e incumplimiento de los protocolos de seguridad. La solución que se implementará para reducir la probabilidad de ocurrencia de estos

riesgos es una descripción clara, concisa y visual en el manual del usuario, de todas las directrices de seguridad que se deben seguir para la manipulación del equipo.

Manual de operación y mantenimiento

Descripción general del producto

El ICP o In-Situ Coating Property Sensor es un dispositivo que se utiliza para medir esfuerzos residuales en tiempo real en procesos de adición de material (recubrimiento, soldadura, etc.) por medio del método de curvatura, la cual se mide por medio de un láser. El diseño está basado en, Además, cuenta con sensores de temperatura en la placa y en el interior, además de otras partes para monitoreo de estas. Se utiliza una placa Arduino para controlar el láser y Matlab para graficar y recopilar los datos en tiempo real.

Características básicas

- Temperatura máxima de operación en el interior: 50 grados C
- Peso del ICP: 8.81 Kg
- Voltaje de alimentación del sistema hidráulico y del láser: 12V
- Voltaje de alimentación del sistema electrónico: 5V
- Posición de operación: Horizontal y vertical según se necesite.

Lista de partes

En la Tabla 10, se puede observar la cantidad de cada una de las piezas del prototipo.

Tabla 10 Listado de partes del prototipo

#	Pieza	Cantidad
1	Escudo de calor	1
2	Caja base	1
3	Lentes	2

4	Tapa de los lentes	1
5	Soporte vertical en A	2
6	Soporte horizontal	1
7	Sujeción termocuplas	2
8	Sujeción pines	2
9	Tapa serpentín	1
10	Niple ¼ x 2''	1
11	Niple reductor 1/3 a 2/5	2
12	Adaptador NPT 3/8	6
13	Niple ¼	4
14	Laser CD22-100-485	1
15	Soporte laser	1
16	Cinta térmica	1
17	Tapa de la caja base	1
18	Soporte hexagonal	4
19	Placa Arduino mega	1
20	Cable USB de 5 metros	1
21	Modulo max485	1
22	Modulo max6675	6
23	Termocuplas pequeñas	4
24	Termocuplas largas	2
25	Placa de distribución (galleta)	1
26	Bomba de agua	1
27	Radiador con ventilador	1

28	Metros de maguera 3/8	5
29	Codo de 3/8	5
30	Pasa muros de 3/4	2
31	Caja de sistema eléctrico	1
32	Caja de sistema hidráulico	1
33	Pines de sujeción de 3mm x 1m	1
34	AS 1420 – 1973 – M4x20	12
35	ANSI B18.3.6M – M3X0.5X5, BHSSSFPM	10
36	ASME/ANSI B18.3M – M4x14(2)	4
37	AS 1420 – 1973 – M5x16	4
38	ISO 140642 – M2x8	14
39	IS 1826 – A M8x1x55	2
40	ANSI B18.2.2 – 5/16 – 18,HNI	2
41	ASME/ANSI B18.3.5M – M6x14(2)	4
42	Screw GB/T 77 M3x2	6
43	Acople pistola kuka	1
44	Acople cilíndrico kuka	1

Esquemas

A continuación, se muestra un diagrama del módulo de medición denominado ICP con sus componentes generales y cada componente por separado en las Figuras 13 y 14.

Además, un diagrama de conexiones del microcontrolador Arduino en la Figura 15.

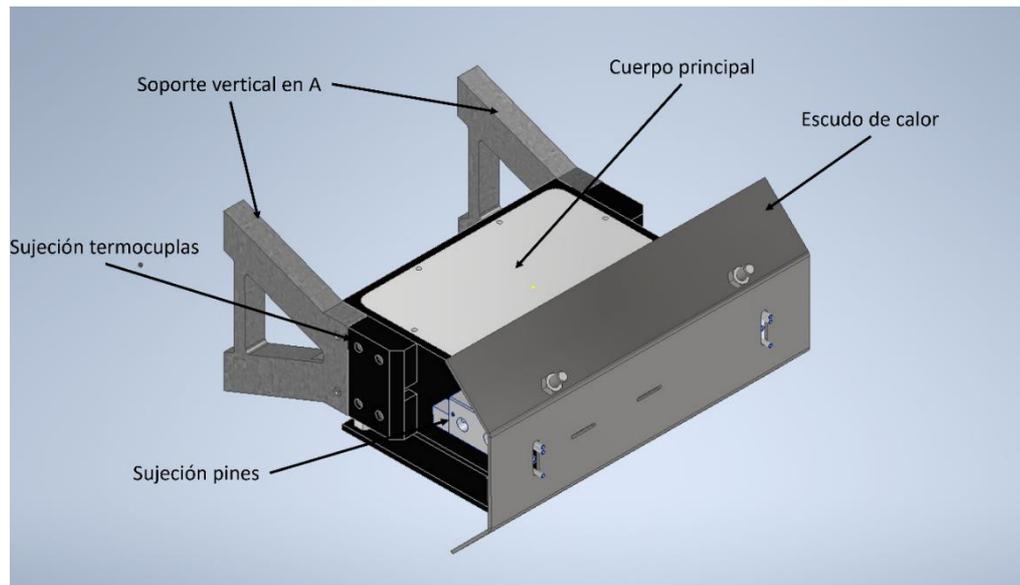


Figura 13 Diagrama general

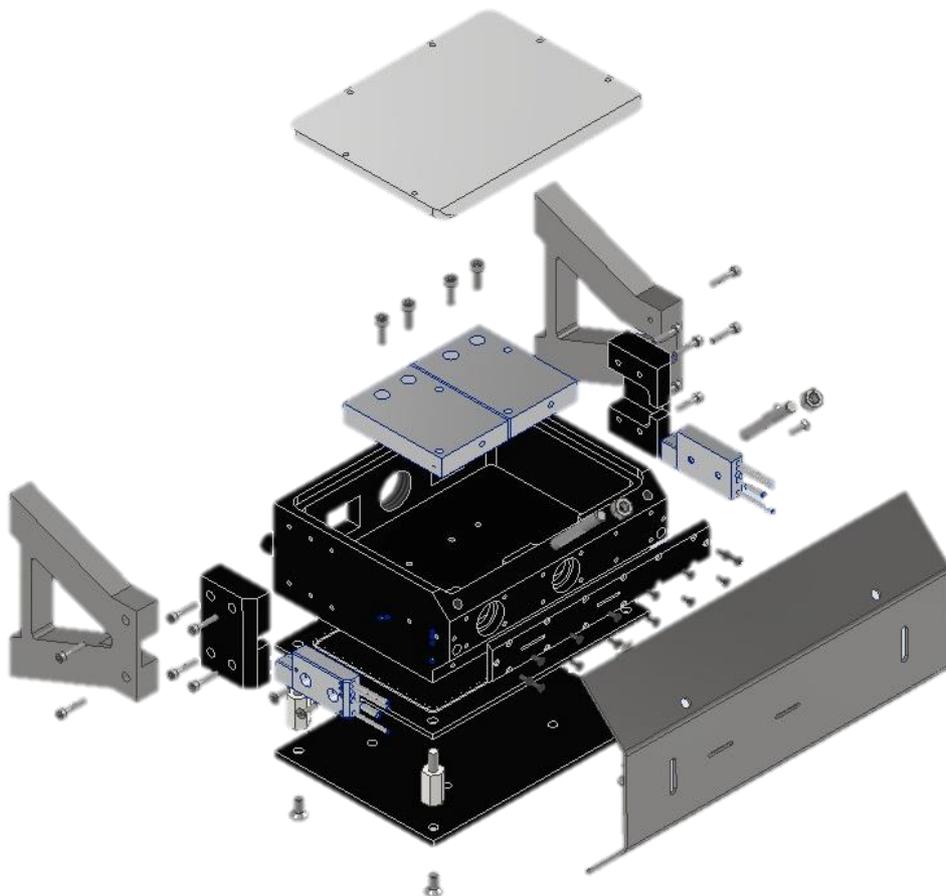


Figura 14 Vista explosionada

En la figura anterior, se indican todos los componentes que conforman el ICP. Se observa cómo se ensambla cada parte que está tabulada en el plano de ensamble en el APÉNDICE 3.4.

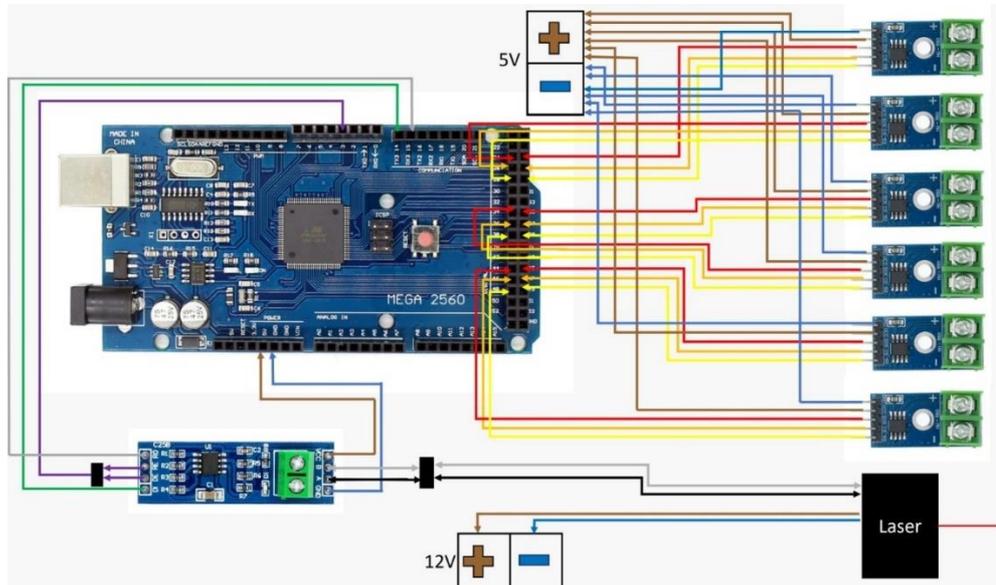


Figura 15 Diagrama de conexiones

Información de seguridad

1. Nunca utilice el equipo sin asegurar el escudo de calor.
2. No toque ni manipule el equipo hasta pasados los 15 minutos después del proceso.
3. Asegure que el cuerpo esta fijo en la superficie.
4. Asegúrese que los cables y las mangueras están lejos del fuego.
5. Verificar el cableado antes de energizar.
6. Monitorear que la temperatura interna no supere los 45 grados C.
7. No permita que el láser le dé en los ojos.

Operación

Arranque del ICP

1. Preparar las muestras granallando la superficie en la cual se desarrollará el proceso.

2. Colocar el equipo en posición horizontal o vertical según el proceso a realizar. Para el ensayo de soldadura se recomienda poner el equipo en posición vertical.
3. Colocar el escudo de calor, asegurando los 4 espárragos al cuerpo principal.
4. Colocar las termocupas en su posición de operación. Dos termocupas se sujetan a los lados del ICP, verificando que estas estén en contacto con la muestra una vez que esta se coloque. La tercera termocupla se debe insertar dentro del cuerpo principal en el agujero encontrado en la parte lateral del soporte del láser.
5. Colocar el láser en su posición de operación ajustando los pernos al soporte del láser.
6. Conectar el microcontrolador (Arduino) al puerto de la computadora.
7. Energizar el tablero de control por medio de las fuentes de 5V y 12V.
8. Cargar el código de Arduino.
9. Verificar que se están recopilando los datos en la pantalla de la computadora.
10. Colocar y asegurar la muestra por medio de la sujeción de los pines ajustando cada uno hasta que no se tengan desplazamientos laterales ni rotaciones.
11. Fijar el ICP a la superficie en contacto con la parte inferior mediante pernos y tuercas.
12. Iniciar el programa de Matlab al momento de iniciar el proceso de adición de material.

Operación del ICP

1. Al iniciar el proceso no puede tocar ni mover el láser o interferir en el haz de luz.
2. No manipular el sistema eléctrico o hidráulico durante la operación.
3. Luego de terminado el proceso en caliente, esperar 15 minutos más de recopilación de datos hasta que se enfríe el sistema.
4. No detener la recopilación de datos a menos que exista un problema de fuerza mayor que atente contra la integridad de los componentes.
5. Detener la recopilación de datos luego de los 15 minutos posteriores a finalizar el proceso o hasta que se enfríe la muestra.

Apagado del ICP

1. Al haber finalizado la recopilación de datos se debe desenergizar el sistema.
2. Desconectar, sacar y guardar el láser en su caja.
3. Vaciar el tanque de almacenamiento de agua.

Almacenamiento

El ICP completo puede ser almacenado en cualquier ambiente que no supere los 50 grados C. Se debe asegurar que todas las conexiones estén sin energía y que el tanque de agua este vacío por completo para evitar cualquier desgaste innecesario. Nunca dejar al laser suelto, debe estar en su caja o en dado caso, dentro del ICP asegurado con sus tornillos.

Manual de mantenimiento

Mantenimiento en uso:

1. Verificar que toda la tornillería este ajustada antes de cada prueba.
2. Verificar que el láser esté funcionando adecuadamente (encendido con cada inicio de proceso de recopilación de datos).
3. Verificar el funcionamiento del ventilador y la bomba al energizar el sistema.
4. Asegurarse de la limpieza de los componentes eléctricos y electrónicos antes de encender.
5. Asegurarse que el tanque de agua este lleno antes de encender la bomba.

Mantenimiento preventivo (cada 3 meses)

1. Asegurarse que el escudo de calor mantiene la cinta térmica.
2. Revisar los “fins” del radiador y asegurarse que están en óptimas condiciones.
3. Revisar las conexiones eléctricas y asegurarse que están limpias y sin corrosión.
4. Revisar el cuerpo en general y verificar si mantiene el anodizado y pavonado en sus piezas.
5. Verificar y cambiar los pines si no están rectos o se detecta alguna curvatura en ellos.

Resultados

Los resultados mostrados a continuación se basaron en las ecuaciones vistas en el apartado 3.2 y usando la metodología descrita por Matejicek y Sampath (2003). Es así como se obtuvieron los esfuerzos residuales presentes tanto en muestras de acero, como de aluminio para un recubrimiento de níquel y cromo (Ni-Cr). Se presentan los resultados según la común visualización de perfiles a través del espesor de las probetas, mismas que se pueden encontrar en bibliografías relacionadas (Matejicek y Sampath. 2003, Tsui y Clyde. 1997, Matjicek, Musalek y Veverka. 2019).

Todas las pruebas se realizaron con el robot programable KUKA. Lo que permite mantener las suposiciones de curvatura suave, y perteneciente a una circunferencia con un radio igual a la deformación de la probeta, por la deposición homogénea de recubrimiento y calor. Igualmente, la utilización del robot KUKA permite la replicabilidad del proceso.

El patrón para la deposición de recubrimiento se puede encontrar en la Figura 16:

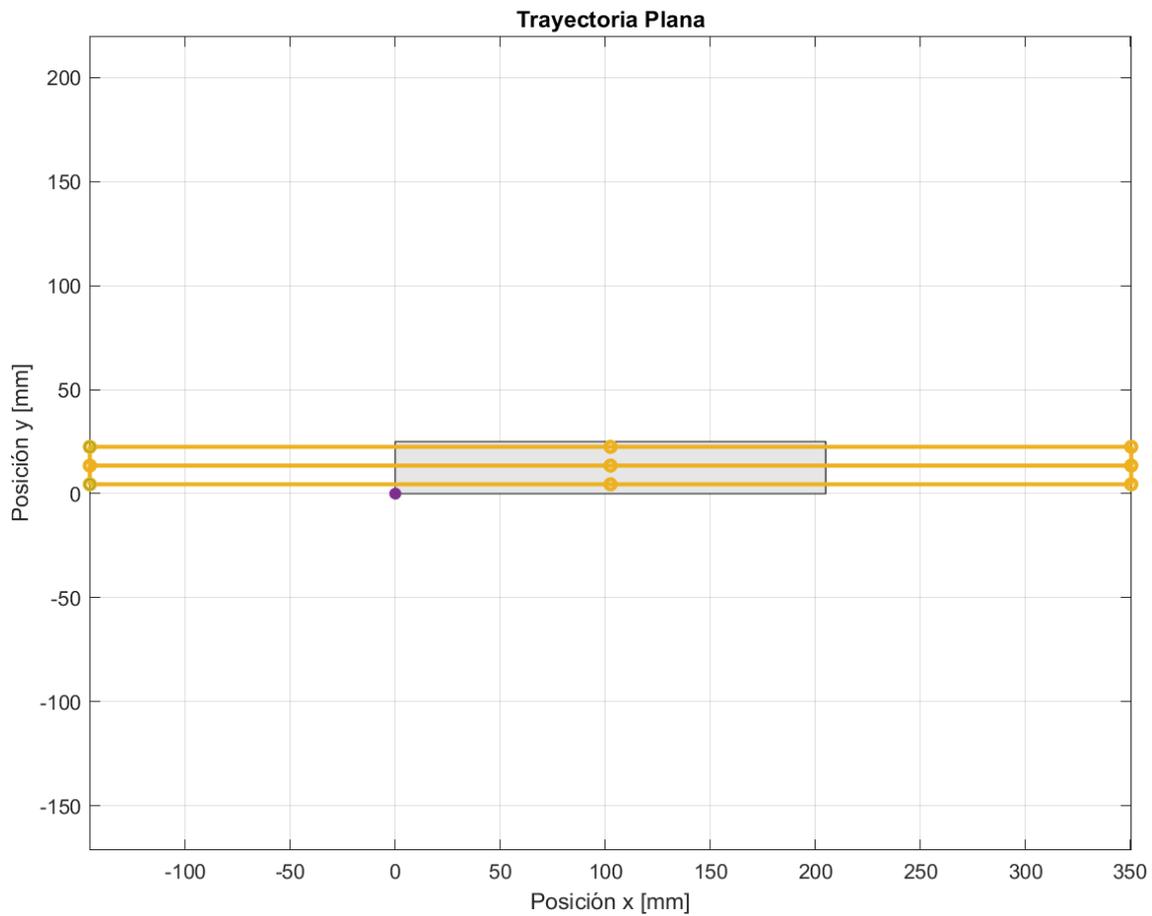


Figura 16. Esquema del patrón de deposición para la medición in situ de la curvatura. La distancia vertical entre los pases de la flama es de 10 [mm].

Acero con Ni-Cr

Para las probeta de acero con recubrimiento de Ni-Cr se obtuvieron los resultados indicados en las Tablas 11 y 12:

Tabla 11 Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de acero. T_a , temperatura de deposición. Q_S , T_S y R_S : esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el sustrato

Sustrato						
T_a [°C]	Q_S [MPa]		T_S [Mpa]		R_S [Mpa]	
Promedio	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
208	43	-36	-21	42	22	6

Recubrimiento

T _a [°C]	QS [Mpa]		TS [Mpa]		RS [Mpa]	
Promedio	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
208	-65	-54	32	63	-33	9

Tabla 12. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de acero. T_a, temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el recubrimiento.

Los resultados anteriores son los correspondientes al inicio y final de cada proceso de QS y TS, y a la derecha los esfuerzos residuales netos producto de la superposición de los primeros. A la izquierda se describe la temperatura de deposición del material, siendo ésta la temperatura máxima a la que llegó la probeta que, por el estado estable encontrado y realizando un promedio a ambas termocuplas encontradas detrás de la pieza, se llegó a dicho valor.

Los valores pueden y deben ser vistos a través de su comportamiento a lo largo de la probeta en su sección transversal al plano de adición de material. Es decir, ver el comportamiento que tuvieron los esfuerzos a lo largo del espesor del espécimen y cómo actúan los esfuerzos residuales dentro de la probeta. Cabe destacar que dicha forma de mostrar los esfuerzos se ha convertido en un estándar para los estudios que usan el método de curvatura, pues es el único que puede mostrar su comportamiento y crecimiento, visualizada en la Figura 17.

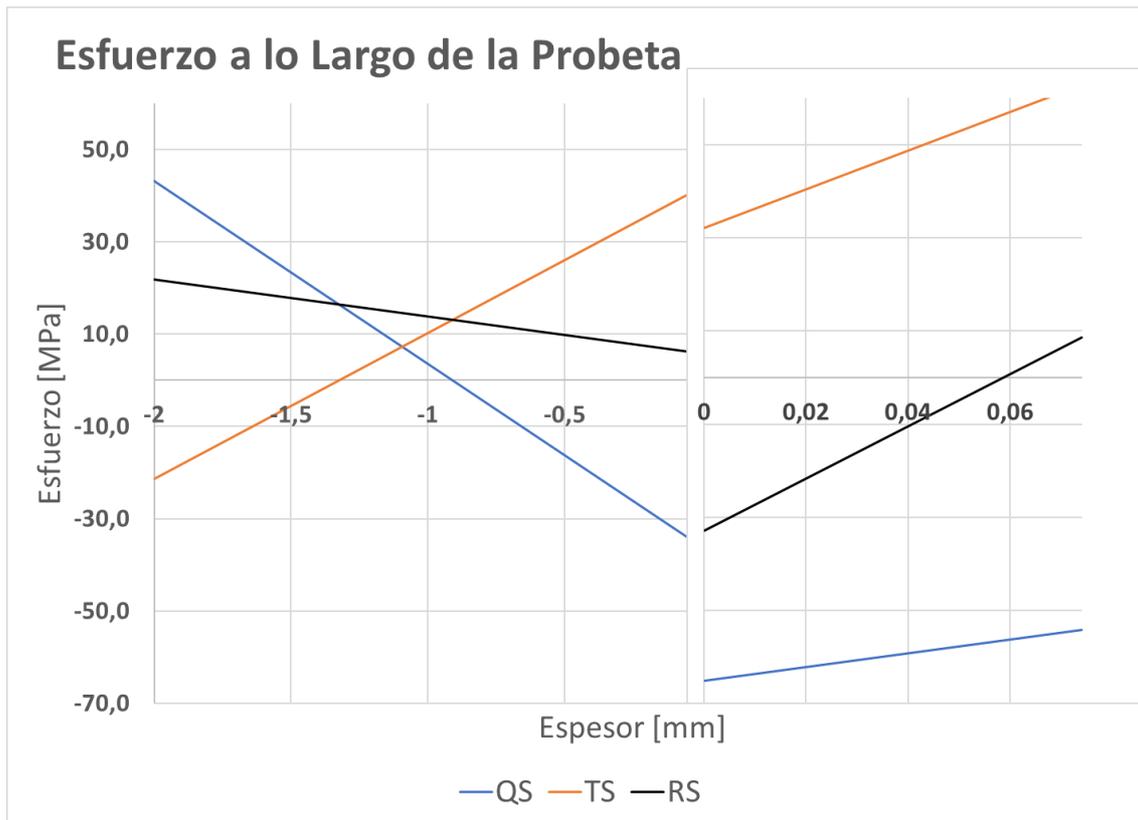


Figura 17. Esfuerzo a lo largo de la probeta para sustrato de acero con recubrimiento de Ni-Cr.

Como se muestra en la figura anterior, se puede notar que los esfuerzos en el sustrato (mitad izquierda) pasan de positivo a negativo. Esto dado al comportamiento mecánico conocido de una viga sometida a una carga variable; la superficie que se encontraba en tensión pasará a estar en compresión y viceversa, lo que permite encontrar los cortes de las series a lo largo del eje x característicos. No así los esfuerzos en el material de adición (mitad derecha), en donde se encuentran series para QS y TS que no cortan el eje x. Esto es consistente con el comportamiento físico-mecánico, dado que el espesor del material añadido está por debajo del plano neutro. En otras palabras, tanto para los fenómenos de QS y TS solo existen esfuerzos de compresión o tensión respectivamente.

Aluminio 7075 con Ni-Cr

Con respecto a la probeta con sustrato de Al-7075 con recubrimiento de Ni-Cr, los resultados procesados de los datos experimentales pueden encontrarse en las Tablas 13 y 14:

Sustrato

T_d [°C]	QS [MPa]		TS [MPa]		RS [MPa]	
Promedio	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
406	362	-187	-58	8	303	-179

Tabla 13. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de Al. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el sustrato.

Recubrimiento

T_d [°C]	QS [MPa]		TS [MPa]		RS [MPa]	
Promedio	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
406	-580	-300	94	13	-486	-287

Tabla 14. Resultados para recubrimiento de Ni-Cr a sustrato de Al. T_d , temperatura de deposición. QS, TS y RS: esfuerzo de temple, térmico y residual neto respectivamente para el recubrimiento.

De manera similar, los resultados son mostrados para el inicio del proceso y al momento de su finalización. La temperatura alcanzada se encuentra al inicio (izquierda) de la tabla, y a continuación los esfuerzos para QS, TS y los esfuerzos residuales netos RS. Su visualización y comportamiento a lo largo de la probeta se describe en la Figura 18:

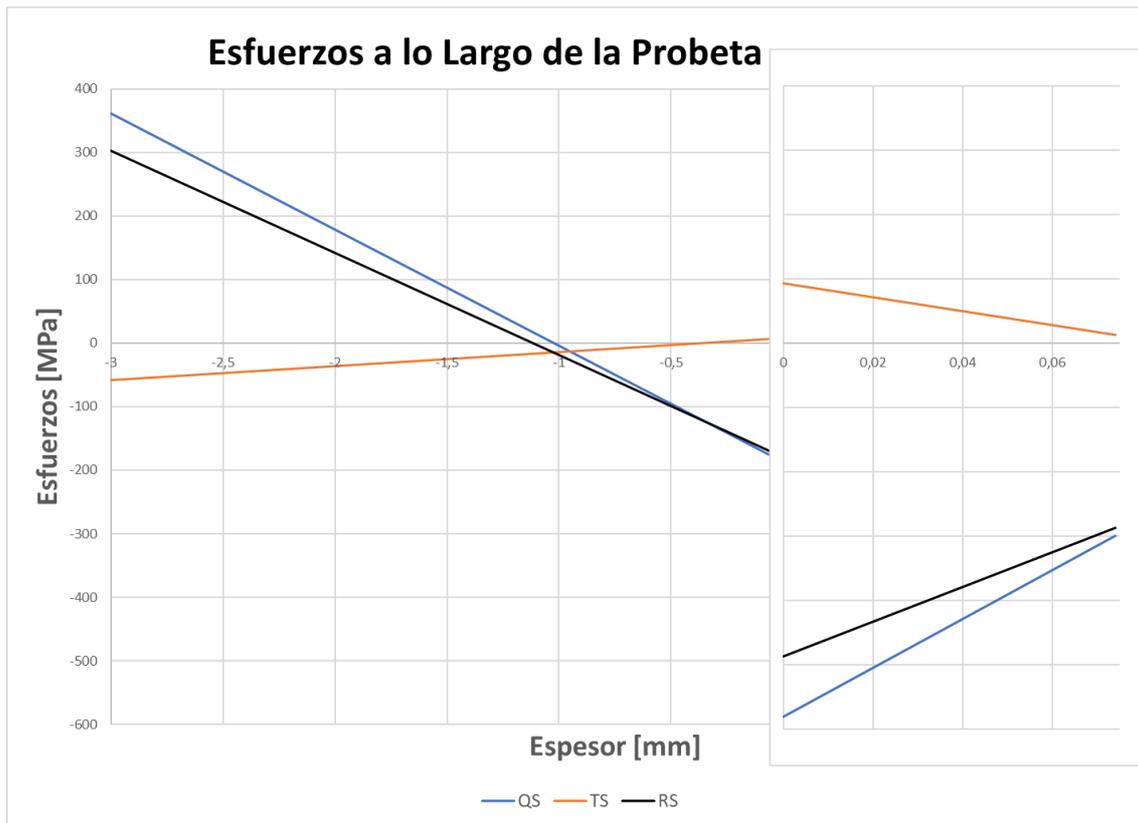


Figura 18. Esfuerzo a lo largo de la probeta para sustrato de Al con recubrimiento de Ni-Cr.

Similarmente, el comportamiento de los esfuerzos en el recubrimiento no llega a cruzarse entre positivo y negativo, recalcando una vez más el distanciamiento entre el material añadido y el plano neutro. Este comportamiento variaría en caso de que el espesor del recubrimiento fuera comparable a aquel del sustrato. También se puede observar que el esfuerzo dominante, y aquel que termina por determinar el comportamiento de RS, es QS. La aportación de TS al crecimiento de los esfuerzos es significativamente menor.

Discusión

Los resultados obtenidos para la probeta de acero con Ni-Cr pueden ser caracterizados y analizados desde varias perspectivas. En primer lugar, la temperatura a la que llegó la probeta fue menor a la reportada para la prueba con Al. Esto es consecuente con las propiedades térmicas de los materiales, ya que el acero al tener una menor conductividad térmica restringe

más el calor absorbido; no así el aluminio que tiene una conductividad térmica significativamente mayor. Por esta razón, los valores reportados por QS y TS son menores a los encontrados en la probeta de aluminio, esto debido a que una temperatura mayor está directamente relacionada con mayores deformaciones (curvaturas) lo que a su vez causa los esfuerzos. En otras palabras, menores temperaturas se traducen a menores deformaciones lo que se refleja en valores menores de esfuerzos.

A la par, los esfuerzos de QS y TS son comparables entre sí, lo que puede sustentado por las deformaciones de magnitudes similares para ambos procesos. Esto puede ser visualizado en la Figura 19 donde encontramos el comportamiento de la curvatura en la probeta a lo largo del tiempo:

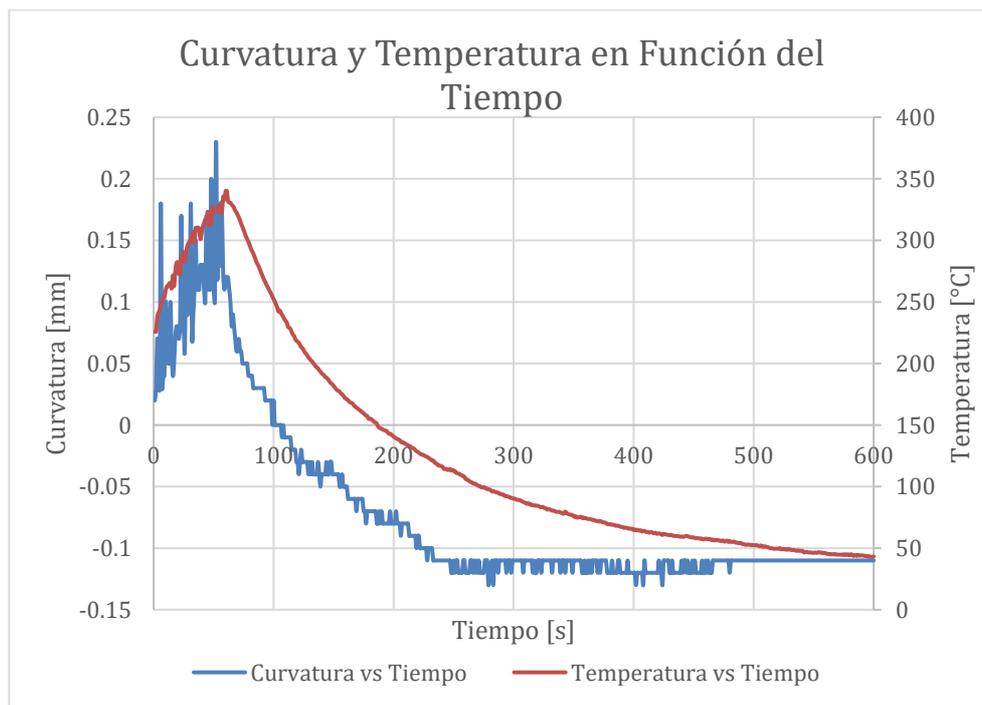


Figura 19. Comportamiento de la curvatura y temperatura a lo largo del tiempo para probeta de acero con Ni-Cr.

El valor reportado de curvatura al momento de terminar el proceso (cuando la temperatura se encuentra en su máximo) es de alrededor de 0,12 [mm], y al terminar su enfriamiento llega a valores de -0,1 [mm]. Este comportamiento es consistente con las magnitudes similares reportadas por QS y TS. Con respecto a los valores de RS se los comparó

con bibliografía de experimentos similares realizados por Tsui & Clyde (1997) en su artículo para *Thin Solid Films*, en donde se utilizó un recubrimiento similar de Ni-Cr y Al al 1% con un sustrato de PK33 (superaleación de níquel). Estos resultados son comparables dado que el sustrato presenta propiedades similares al acero: módulo de Young 209 [GPa] y coeficiente de expansión térmica $12,3 \cdot 10^{-6}$ [1/°C] (Special Metals, 2004). Siendo sus resultados para QS (sustrato), y RS (recubrimiento): 65 [Mpa] y 10-60 [Mpa], respectivamente. Dado que los reportados en esta investigación fueron de 43 [Mpa] y 22-6 [Mpa], no solo se encuentran en los mismos órdenes de magnitud, también muestran magnitudes similares.

Sobre los resultados de la deposición de Ni-Cr sobre sustrato de Al, se puede verificar rápidamente que los esfuerzos QS son dominantes, lo que puede ser explicado con el comportamiento de la curvatura a lo largo del tiempo. Los resultados se observan en la figura 20.

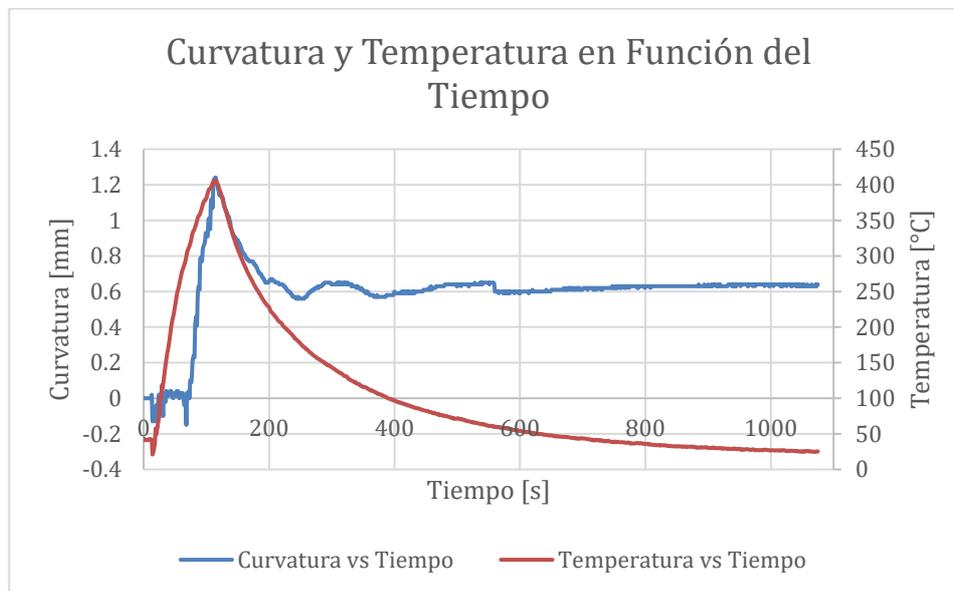


Figura 20. Comportamiento de la curvatura y temperatura a lo largo del tiempo para probeta de Al con Ni-Cr.

Como se observa en la gráfica anterior, la curvatura está dominada por la deformación durante el proceso de adición de material QS, y la deflexión de TS no llega a igualar sus magnitudes. Es por esto que, el esfuerzo neto RS replica en gran medida el comportamiento de

QS. De igual manera, la curvatura nunca vuelve a su posición inicial, indicando una deformación permanente en la probeta.

Para la comparación de estos datos, se recurrió a bibliografía similar en donde se probaron probetas de Al, sin embargo, su recubrimiento fue cerámico de TiC (Kadolkar, Watkins, De Hosson, Kooi, & Dahotre, 2007). En dicha publicación se encuentran valores de sus esfuerzos residuales comparables σ_{11} y σ_{22} llegan a valores de ~ 300 [MPa] y ~ 250 [MPa]. En concordancia, los esfuerzos residuales encontrados en la investigación rondan los valores de ~ 200 [MPa] para el sustrato y ~ 400 [MPa] para el recubrimiento. Las discrepancias pueden encontrarse en las características mecánicas propias de los recubrimientos usados, aun así, se encuentran valores en los mismos órdenes de magnitud. Además, la temperatura alcanzada por la probeta de aluminio (cerca de 400°C) podría reducir significativamente la resistencia mecánica de la probeta y no considerarse en régimen elástico. Los mayores valores encontrados en las probetas de aluminio se deben a su mayor curvatura.

Conclusiones

Se obtuvo exitosamente el módulo ICP capaz de medir esfuerzos residuales. Las lecturas hechas permiten visualizar el comportamiento en tiempo real, además, gracias a la metodología basada en el método de curvatura se puede observar el comportamiento que los esfuerzos residuales tienen a lo largo de la probeta. A su vez, la recopilación de datos está debidamente protegida no solo en su lectura, gracias al uso de un protocolo de comunicación RS-485, también por un sistema de refrigeración que permite mantener la temperatura interna a la que se somete el láser menor a 35 °C.

Con respecto a los resultados, estos también fueron comparados y confirmados por bibliografía que obtiene valores similares. Del mismo modo, se realizaron estudios independientes para la confirmación de los resultados. Un análisis de video que muestra lecturas con varianzas mínima de 0,15 [mm] con el láser, las cuales podrían ser incluso menores si se mejorase la resolución de la cámara.

Es por esto que, se puede aseverar que se ha producido uno de los primeros sistemas a nivel nacional capaz de medir esfuerzos residuales por medio de la metodología descrita. El proceso y construcción puede ser utilizado por la industria y así ser una opción para todo aquel que desee hacer uso de este.

Trabajo futuro

A pesar de que el ICP funciona idealmente, siempre existen espacios de mejoras, y este trabajo no es la excepción, es por eso que se consideraron varios puntos a trabajar en un futuro; el primero de ellos es conseguir un relé de 220V para realizar las pruebas de soldadura, de esta manera se elimina la variabilidad que existe en el cordón al ser hecho por un operador. Además se busca mejorar el sistema de sujeción de la cámara de tal forma que pueda ser utilizada en cualquier proceso y en cualquier posición. Otra mejora fundamental radica en la implementación de un Arduino Wifi donde el proceso pueda ser monitoreado desde cualquier lugar del mundo, sin necesidad de estar presente en el lugar de las pruebas y mejorando la portabilidad del dispositivo. Asimismo, cambiar las conexiones tanto de mangueras como de termocuplas para facilitar la conexión y desconexión. Por último, para asegurar la precisión y confiabilidad del dispositivo, sería recomendable realizar pruebas de esfuerzos residuales con otros métodos de medición como rayos X u orificio ciego, y de esta manera asegurar la eficacia y la utilidad del ICP.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincera muestra de gratitud a aquellas personas que acompañaron durante todo el desarrollo del proyecto, y aportaron con sus conocimientos, a la par de tiempo, en áreas específicas de este proceso académico.

En primero lugar, se quiere agradecer a las familias de los autores, quienes han sido un pilar fundamental para la culminación exitosa del proyecto. Su apoyo incondicional y aliento fue necesario, especialmente en aquellas etapas donde el proyecto tuvo mayores dificultades. El cariño y fuerza moral proveniente de ellos han permitido que el trayecto de esta investigación se haya caracterizado por alegrías y palabras de aliento.

También, se debe hacer una mención muy especial a la comunidad de la Universidad San Francisco de Quito, sin ellos no se habrían obtenido los resultados satisfactorios que definen a esta investigación. A la carrera de ingeniería civil por su altruista y abnegado apoyo al proporcionar a los autores con el láser necesario para la recopilación de datos; factor determinante para el método y precisión requerida. A los profesores de la carrera de ingeniería mecánica: Sebastián Insuasti, Gabriel Gallo, Edison Bonifaz, Westly Castro, Laurent Sass, Samantha Criollo, David Escudero y Krutskaya Yépez, quienes aportaron con su conocimiento en sus áreas específicas permitiendo a los autores trascender el conocimiento plasmado en las páginas, y quienes organizaron sus horarios para poder ser un apoyo en todo momento. Así mismo, agradecer a Cristian Luciani de la carrera de física por su asesoramiento sobre el uso de láseres. Dentro de la comunidad se debe mencionar a Luis Castellanos, quien a lo largo del proceso no solo aportó con sugerencias para oportunidades de mejora, sino también con su amistad y franqueza; los autores consideran estas cualidades muy valiosas y recíprocas.

Igualmente, se debe agradecer a consultas externas realizadas por los autores a personal técnico especializado por su asesoramiento en procesos específicos. A la empresa

Fortuny Technology por su ayuda en el protocolo de comunicación RS-485 quienes brindaron su experticia y consejos para su correcto uso. Además, a José Luis Ortiz, de la empresa SLB quien proporcionó su experiencia en el manejo de instrumentación electrónica.

Finalmente, a Carla Vásquez y Nicole Vega por su asistencia durante el proceso de diseño de la presentación final de resultados, al brindar su consejo en sus áreas de comunicación y oratoria; los autores están muy agradecidos.

Referencias bibliográficas

- Alexander J. Leide, Thomas A. Haynes, Nassia Tzelepi, John Payne, Matthew Jordan, Steven Knol, Jan A. Vreeling, Mark Davies, David T. Goddard, Manuel J. Pfeifenberger, Markus Alfreider, Daniel Kiener, Dong Liu, Measurement of residual stresses in surrogate coated nuclear fuel particles using ring-core focussed ion beam digital image correlation, *Nuclear Materials and Energy*, Volume 36, 2023, 101470, ISSN 2352-1791, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101470.A>. Brenner, S. Senderoff, Calculation of stress in electrodeposits from the curvature of a plated strip, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 42 (1942) 105.
- Bergman, T. & Lavine, A. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Ed. 8. John Wiley & Sons, Inc.
- OPTEX FA CO., LTD. (n.d.). CD22 Series. <https://www.optex-fa.com/>
- Ganesh Kumar, S., Bharath Kumar, S., Praveenkumar, K., & Swaroop, S. (2022). Bending analysis and residual stress measurement of thin stainless-steel alloy. *Materials Today: Proceedings*, 65, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.167>
- Gao, Z., Gan, J., Liu, H., Liu, X., & Wu, W. (2023). Fatigue crack growth prediction for shot-peened steel considering residual stress relaxation. *Materials & Design*, 234(112301), 112301. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112301>
- G.G. Stoney, The tension of metallic films deposited by electrolysis, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 82 (1909) 172.
- Göltz, M., Helmreich, T., Börner, R., Kupfer, T., Schubert, A., & Rosiwal, S. (2023). Spatial distribution of thermally induced residual stresses in HF-CVD diamond coatings on microstructured steel surfaces. *Diamond and Related Materials*, 136, 109931. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109931> microstructured steel surfaces.

Diamond and Related Materials, 136, 109931.

<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109931>

Kadolkar, P. B., Watkins, T. R., De Hosson, J. T., Kooi, B. J., & Dahotre, N. B. (2007). State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys.

Acta Materialia, 1203-1214. doi:10.1016/j.actamat.2006.07.049

Kendall, O., Abrahams, R., Paradowska, A., Reid, M., Qiu, C., Mutton, P., Schläfer, T., & Yan, W. (2023). Influence of multi-layer laser cladding depositions and rail curvature on residual stress in light rail components. *Engineering Failure Analysis*, 150, 107330.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107330>

Macias, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A., & Soriano, G. (2017).

Embodied and operational energy assessment of different construction methods

employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107-120.

Matějčiček, J., Mušálek, R., & Veverka, J. (2019). Materials and processing factors influencing stress evolution and mechanical properties of plasma sprayed coatings. *Surface & Coatings Technology*, 371, 3–13.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.105>

Mugwagwa, L., Yadroitsava, I., Makoana, N. W., & Yadroitsev, I. (2021). Residual stress in laser powder bed fusion. In *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals* (pp. 245–276). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824090-8.00014-7>

Petrie, C. M., & Sridharan, N. (n.d.). In situ measurement of phase transformations and residual stress evolution during welding using spatially distributed fiber-optic strain sensors *. <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-pl>

ReliaCoat Technologies. (2012). *In-Situ Coating Property Sensor The Most Advanced Tool for Real-Time Monitoring of Thermal Spray Processes*, East Setauket. USA.

<http://www.reliacoat.com/>

- Salazar, C., Kurbatova, A., Kupriyanova, M., Mikhaylichenko, K., Savenkove, E., & Basamykina, A. (2022). Environmental Assessment of Water Treatment Plants of the Republic of Ecuador and Comparative Analysis of Water Disinfection Technologies using the LCA Method. *Advances in Systems Science and Applications*, 22(2), 1250. doi:<https://doi.org/10.25728/assa.2022.22.2.1250>
- Sglavo, V. M., Bonafini, M., & Prezzi, A. (2005). Procedure for residual stress profile determination by curvature measurements. *Mechanics of Materials*, 37(8), 887–898. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.09.003>
- Special Metals. (2004). *NiMoNiC Alloy PK33*. Special Metals Corporation.
- Tsui, Y. C., & Clyne, T. W. (1997). An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings Part 1: Planar geometry. *Thin Solid Films*, 306(1), 23–33. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00199-5](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00199-5)
- Yan, G., Crivoi, A., Sun, Y., Maharjan, N., Song, X., Li, F., & Tan, M. J. (2018). An Arrhenius equation-based model to predict the residual stress relief of post weld heat treatment of Ti-6Al-4V plate. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 763–772. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.004>
- Zhang, X., Watanabe, M., & Kuroda, S. (2013). Effects of processing conditions on the mechanical properties and deformation behaviors of plasma-sprayed thermal barrier coatings: Evaluation of residual stresses and mechanical properties of thermal barrier coatings on the basis of in situ curvature measurement under a wide range of spray parameters. *Acta Materialia*, 61(4), 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.020>
- Zhao, Z. B., Hershberger, J., Yalisove, S. M., & Bilello, J. C. (2002a). Determination of residual stress in thin films: A comparative study of X-ray topography versus laser

curvature method. *Thin Solid Films*, 415(1–2), 21–31. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(02\)00489-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(02)00489-3)

Zhu, J., Xie, H., Hu, Z., Chen, P., & Zhang, Q. (2011). Residual stress in thermal spray coatings measured by curvature based on 3D Digital Image Correlation Technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1396–1402. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.062>

Apéndices

Apéndice 1: Planos mecánicos y cálculos detallados

APÉNDICE 1.1: Código MATLAB para control de robot KUKA

A continuación, se muestra el código de Matlab mediante el cual se establece el protocolo de comunicación con el láser, se monitorea la temperatura y se recopilan los datos.

```

clc;
clear variables;
close all;

%% PARÁMETROS A EDITAR

nombre="Revestimientos"
cond=2; % 1 para xy (Plano hacia abajo), 2 para yz (Hacia Pared del Fondo), 3 para xz (Hacia Pared Izquierda)
longitud=505; %En mm
radio=4.5;
altura=25;
longitud_real=205;
altura_real=25;
resolucion=3;
resolucion_curva=2;
loops=8;
velocidad="5.0"

% Coordenadas iniciales
x_0=738.69;
y_0=54.27;
z_0=588.83;
A_0=87.73;
B_0=-14.11;
C_0=89.66

%% CREACIÓN DE POSICIONES PLANAS
[h_b,v_b]=serpentin(longitud,radio,altura, resolucion,resolucion_curva);

% Inicializar la trayectoria
h=h_b;
v=v_b;

if h(1)==h(end)
for i=1:loops-1
    h=[h h_b]
    v=[v v_b]
end
else

```

```

h_e=longitud- h_b;
for i=1:loops-1
    if mod(i, 2) == 0
        h=[h h_b];
    else
        h=[h h_e]
    end
    v=[v v_b];
end
end

% Posicionar el serpentín respecto a la pieza
h=h-(longitud-longitud_real)/2

% Crear geometría de la pieza, dibujarla y sombrearla
hr=[0 longitud_real longitud_real 0 0]
vr=[0 0 altura_real altura_real 0]
puntos=length(h);

fig1=figure(1);
ax1=axes('Parent',fig1)
f1=plot(ax1, hr,vr,'k'); hold on;
fill(ax1, hr,vr,[0.9, 0.9, 0.9]);
title(ax1,'Trayectoria Plana')
xlabel(ax1,'Posición x [mm]')
ylabel(ax1,'Posición y [mm]')

% Dibujar serpentín
plot(ax1, h, v, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 5);
axis equal;
grid on;

% Marcar el punto que debe tomarse como x_0,y_0,z_0
plot(ax1, 0,0, '.', 'MarkerSize',20);

% Marcar el inicio y el final
plot(ax1, [h(1) h(end)], [v(1) v(end)], 'o', 'MarkerSize', 5);

hold off;

%% CREACIÓN DE POSICIONES TRIDIMENSIONALES

if (cond==1) %XY HACIA ABAJO
    x=x_0+h;
    y=y_0-v;
    z=z_0*ones(length(h));
end

if (cond==2) %YZ HACIA EL FRENTE
    x=x_0*ones(length(h));
    y=y_0-h;
    z=z_0+v;
end

```

```

if (cond==3) %XZ HACIA LA PARED IZQUIERDA
    x=x_0+h;
    y=y_0*ones(length(h));
    z=z_0+v;
end

A=A_0*ones(length(h));
B=B_0*ones(length(h))
C=C_0*ones(length(h))

fig2=figure(2);
ax2=axes('Parent',fig2)
plot3(ax2,x,y,z);
title(ax2,'Trayectoria Tridimensional');
xlim([-1000 1000]);
ylim([-1000 1000]);
zlim([0 2000]);
xlabel(ax2,'Posición x [mm]');
ylabel(ax2,'Posición y [mm]');
zlabel(ax2,'Posición z [mm]');
grid on;

%% CREACIÓN DE CÓDIGO PARA .SRC

line(1,:)= "DEF "+ nombre + "("
line(2,:)= "GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ()"
line(3,:)= "INTERRUPT ON 3"
line(4,:)= "BAS (#INITMOV,0 )"

home(1,:)= "$BWDSTART = FALSE"
home(2,:)= "PDAT_ACT=PDEFAULT"
home(3,:)= "FDAT_ACT=FHOME"
home(4,:)= "BAS (#PTP_PARAMS,100)"
home(5,:)= "$H_POS=XHOME"
home(6,:)= "PTP XHOME"

punto1= "SPTP XP1 WITH $VEL_AXIS[1] = SVEL_JOINT("+velocidad+"), $TOOL =
STOOL2(FP1), $BASE = SBASE(FP1.BASE_NO), $IPO_MODE =
SIPO_MODE(FP1.IPO_FRAME), $LOAD = SLOAD(FP1.TOOL_NO), $ACC_AXIS[1] =
SACC_JOINT(PPDAT1), $APO = SAPO_PTP(PPDAT1), $GEAR_JERK[1] =
SGEAR_JERK(PPDAT1), $COLLMON_TOL_PRO[1] = USE_CM_PRO_VALUES(0)"

for i=1:puntos
str1 = "PTP {X ";
x(i);
str2 = ", Y ";
y(i);
str3 = ", Z ";
z(i);

```

```

str4 = ", A "
A;
str5=", B "
B;
str6=", C "
C;
str7=", E1 0, E2 0, E3 0, E4 0}";
str8= " C_PTP"
STR=str1+x(i)+str2+y(i)+str3+z(i)+str4+A(i)+str5+B(i)+str6+C(i)+str7;
String(i,:)=STR+str8;
if i==puntos, String(i,:)=STR; end

```

```
end
```

```

% Exportar el archivo como texto
SRC=[line; home; punto1; String; home;"END"]
writematrix(SRC, nombre+'SRC.txt');

```

```
%% GRÁFICA TIEMPO REAL
```

```

% Muestra la Trayectoria del Programa
fig3=figure(3);
ax3=axes('Parent',fig3);
title(ax3,'Animación Trayectoria'); hold(ax3,'on');
xlabel(ax3,'Posición x [mm]')
ylabel(ax3,'Posición y [mm]')
axis equal
rel=resolucion_curva+resolucion
offh=longitud/4
offv=altura/2
for i = 1:length(h)
    plot(ax3,hr,vr,'k'); hold(ax3,'on');
    fill(ax3,hr,vr,[0.9, 0.9, 0.9]);
    axis (ax3,'equal');
    axis(ax3, [min(h)-offh max(h)+offh min(v)-offv max(v)+offv]);
    if i<=rel
        ha=h(1:i);
        va=v(1:i);
    else
        ha=h(i-rel:i)
        va=v(i-rel:i)
    end
    if i~=1&&i~=length(h)
        delete(pl)
    end
    pl=plot(ax3,ha,va,'o-b');
    pause(0.01); % Pausa por 1 segundo
end

```

```
%% FUNCIÓN PARA CREAR PATRÓN DE SERPENTÍN
```

```
function [x,y]=serpentin(longitud, radio, altura, resolucion,resolucion_curva)
```

```

l=longitud-2*radio;
r=radio;
n=round(altura/radio)/2;

% Inicializar puntos
x = [];
y = [];

% Establecer la posición inicial
x_cur = radio;
y_cur = radio;

% Establecer dirección inicial
dir = 1; % 1 para derecha, -1 para izquierda

% Repetir el patrón n veces
for i = 1:n
    % Agregar puntos para la línea horizontal
    x = [x, x_cur + linspace(0,l*sign(dir),resolucion)];
    y = [y, y_cur*ones(1, resolucion)];

    % Actualizar posición actual
    x_cur = x_cur + l*dir;

    % Si no es la última repetición, agrega el arco de curvatura
    if i < n
        % Cambiar dirección
        dir = -dir;
        % Crear el semicírculo de transición
        if dir == 1
            theta = linspace(pi/2, -pi/2, resolucion_curva); % De izquierda a derecha
        else
            theta = linspace(-pi/2, pi/2, resolucion_curva); % De derecha a izquierda
        end
        x_arc = x_cur - dir*r*cos(theta);
        y_arc = y_cur + r - dir*r*sin(theta);

        % Agregar puntos del semicírculo al vector de puntos
        x = [x, x_arc];
        y = [y, y_arc];

        % Actualizar posición actual
        y_cur = y_cur + 2*r; % Se multiplica por 2 porque es un semicírculo completo
    end
end
end
end

```

APÉNDICE 1.2: Código de Arduino para controlar laser y termocuplas

```
//COMANDO PARA CONTROLAR TERMOCUPLAS

//Incluir libreria

#include "max6675.h"

//Definir pines de cada termocupla

int TM_in_H2O_SLK = 44;
int TM_in_H2O_CS = 46;
int TM_in_H2O_SO = 48;

int TM_out_H2O_SLK = 45;
int TM_out_H2O_CS = 47;
int TM_out_H2O_SO = 49;

int TM_right_plate_SLK = 24;
int TM_right_plate_CS = 26;
int TM_right_plate_SO = 28;

int TM_left_plate_SLK = 25;
int TM_left_plate_CS = 27;
int TM_left_plate_SO = 29;

int TM_heat_SLK = 35;
int TM_heat_CS = 37;
int TM_heat_SO = 39;

int TM_inside_SLK = 34;
int TM_inside_CS = 36;
int TM_inside_SO = 38;

//Definir las variables para cada modulo de termocupla

MAX6675 ktc_TM_in_H2O(TM_in_H2O_SLK, TM_in_H2O_CS, TM_in_H2O_SO);
MAX6675 ktc_TM_out_H2O(TM_out_H2O_SLK, TM_out_H2O_CS, TM_out_H2O_SO);
MAX6675 ktc_TM_right_plate(TM_right_plate_SLK, TM_right_plate_CS, TM_right_plate_SO);
MAX6675 ktc_TM_left_plate(TM_left_plate_SLK, TM_left_plate_CS, TM_left_plate_SO);
MAX6675 ktc_TM_heat(TM_heat_SLK, TM_heat_CS, TM_heat_SO);
MAX6675 ktc_TM_inside(TM_inside_SLK, TM_inside_CS, TM_inside_SO);

//COMANDOS PARA CONTROLAR EL LASER

//Definir el pin de lectura
#define de_re_pins 3

//Definir los comandos basicos para comunicarse con el laser

const byte STX = 0x02; // Start of Text
const byte ETX = 0x03; // End of Text
const byte ACK = 0x06; // ACK
```

```

const byte NAK = 0x15; // NAK
const byte C = 0x43; // Individual function commands
const byte W = 0x57; // Writing the setting
const byte R = 0x52; // Reading out setting

//Definir el orden de comunicacion con el laser

byte cmd, data1, data2, bcc;

//Convertir en una variable "double" a todos los input

double laser, temperatura_in_H2O, temperatura_out_H2O, temperatura_right_plate,
temperatura_left_plate, temperatura_heat, temperatura_inside;

//Definir el comando para enviar mensajes al laser

void sendMsg(byte cmd, byte data1, byte data2) {
  byte bcc = cmd ^ data1 ^ data2; // Calcula el BCC
  byte mensaje[] = {STX, cmd, data1, data2, ETX, bcc}; // Crea un arreglo de bytes para almacenar los
  datos
  digitalWrite(de_re_pins, HIGH); //Se pone en alto los pines DE y RE para transmitir informacion
  Serial3.write(mensaje, 6); // Enviar el arreglo de bytes a través de la comunicación serial
  delay(6);
  digitalWrite(de_re_pins, LOW);
}

// Definir el comando para encerrar el laser

void ZEROE(){
  cmd = C;
  data1 = 0xA1;
  data2 = 0x00;
  sendMsg(cmd, data1, data2);
}

//Definir el comando para liberar el enceramiento del laser

void ZEROR(){
  cmd = C;
  data1 = 0xA1;
  data2 = 0x01;
  sendMsg(cmd, data1, data2);
}

//Definir el comando para encender la luz del laser

void laserOn(){
  cmd = C;
  data1 = 0xA0;
  data2 = 0x03;
  sendMsg(cmd, data1, data2);
  //Serial.println("Comando: Laser ON enviado");
}

```

```

//Definir el comando para apagar la luz del laser

void laserOff(){
  cmd = C;
  data1 = 0xA0;
  data2 = 0x02;
  sendMsg(cmd, data1, data2);
  Serial.println("Comando: Laser OFF enviado");
}

//Definir el comando para enviar y recibir la medicion del laser

double measuring(){
  double aux = -1;
  cmd = C;
  data1 = 0xB0;
  data2 = 0x01;
  sendMsg(cmd, data1, data2);
  if(Serial3.available() >= 6){
    byte mensaje[6];
    // Lee los 6 bytes de la comunicación serial
    Serial3.readBytes(mensaje, 6);
    // Verifica el inicio y el final del mensaje
    if (mensaje[0] == STX && mensaje[4] == ETX) {
      cmd = mensaje[1]; // Lee el byte CMD
      data1 = mensaje[2]; // Lee el byte DATA1
      data2 = mensaje[3]; // Lee el byte DATA2
      bcc = mensaje[5]; // Lee el byte BCC
      if(cmd==ACK){
        int result = word(data1, data2);
        aux = (result*-1)/100.00;
      }
    }
  }
  return aux;
}

void setup() {
  pinMode(de_re_pins, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial3.begin(9600);
  ZEROE();
  ZEROR();
}

void loop() {
  String datos;
  laser = measuring();
  temperatura_in_H2O = leer_termopar_in_H2O();
  temperatura_out_H2O = leer_termopar_out_H2O();
  temperatura_right_plate = leer_termopar_right_plate();
  temperatura_left_plate = leer_termopar_left_plate();
}

```

```

temperatura_heat = leer_termopar_heat();
temperatura_inside = leer_termopar_inside();
datos = String(laser) + ";" + String(temperatura_in_H2O) + ";" + String(temperatura_out_H2O) + ";"
+ String(temperatura_right_plate) + ";"
+ String(temperatura_left_plate) + ";" + String(temperatura_heat) + ";" + String(temperatura_inside);
Serial.println(datos);
delay(1000);
}

```

```

double leer_termopar_in_H2O()
{
  uint16_t v;
  pinMode(TM_in_H2O_CS, OUTPUT);
  pinMode(TM_in_H2O_SO, INPUT);
  pinMode(TM_in_H2O_SLK, OUTPUT);
  digitalWrite(TM_in_H2O_CS, LOW);
  delay(1);

  // Read in 16 bits,
  // 15 = 0 always
  // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
  // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
  // 1..0 = uninteresting status

  v = shiftIn(TM_in_H2O_SO, TM_in_H2O_SLK, MSBFIRST);
  v <<= 8;
  v |= shiftIn(TM_in_H2O_SO, TM_in_H2O_SLK, MSBFIRST);

  digitalWrite(TM_in_H2O_CS, HIGH);
  if (v & 0x4)
  {
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
    return -1;
  }
  // The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
  v >>= 3;
  // The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
  return v * 0.25;
}

```

```

double leer_termopar_out_H2O()
{
  uint16_t v;
  pinMode(TM_out_H2O_CS, OUTPUT);
  pinMode(TM_out_H2O_SO, INPUT);
  pinMode(TM_out_H2O_SLK, OUTPUT);
  digitalWrite(TM_out_H2O_CS, LOW);
  delay(1);

  // Read in 16 bits,
  // 15 = 0 always
  // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First

```

```

// 2 = 1 if thermocouple is open circuit
// 1..0 = uninteresting status

v = shiftIn(TM_out_H2O_SO, TM_out_H2O_SLK, MSBFIRST);
v <<= 8;
v |= shiftIn(TM_out_H2O_SO, TM_out_H2O_SLK, MSBFIRST);

digitalWrite(TM_out_H2O_CS, HIGH);
if (v & 0x4)
{
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
    return -1;
}
// The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
v >>= 3;
// The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
return v * 0.25;
}

double leer_termopar_right_plate()
{
    uint16_t v;
    pinMode(TM_right_plate_CS, OUTPUT);
    pinMode(TM_right_plate_SO, INPUT);
    pinMode(TM_right_plate_SLK, OUTPUT);
    digitalWrite(TM_right_plate_CS, LOW);
    delay(1);

    // Read in 16 bits,
    // 15 = 0 always
    // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
    // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
    // 1..0 = uninteresting status

    v = shiftIn(TM_right_plate_SO, TM_right_plate_SLK, MSBFIRST);
    v <<= 8;
    v |= shiftIn(TM_right_plate_SO, TM_right_plate_SLK, MSBFIRST);

    digitalWrite(TM_right_plate_CS, HIGH);
    if (v & 0x4)
    {
        // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
        return -1;
    }
    // The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
    v >>= 3;
    // The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
    return v * 0.25;
}

double leer_termopar_left_plate()
{
    uint16_t v;

```

```

pinMode(TM_left_plate_CS, OUTPUT);
pinMode(TM_left_plate_SO, INPUT);
pinMode(TM_left_plate_SLK, OUTPUT);
digitalWrite(TM_left_plate_CS, LOW);
delay(1);

// Read in 16 bits,
// 15 = 0 always
// 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
// 2 = 1 if thermocouple is open circuit
// 1..0 = uninteresting status

v = shiftIn(TM_left_plate_SO, TM_left_plate_SLK, MSBFIRST);
v <<= 8;
v |= shiftIn(TM_left_plate_SO, TM_left_plate_SLK, MSBFIRST);

digitalWrite(TM_left_plate_CS, HIGH);
if (v & 0x4)
{
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
    return -1;
}
// The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
v >>= 3;
// The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
return v * 0.25;
}

double leer_termopar_heat()
{
    uint16_t v;
    pinMode(TM_heat_CS, OUTPUT);
    pinMode(TM_heat_SO, INPUT);
    pinMode(TM_heat_SLK, OUTPUT);
    digitalWrite(TM_heat_CS, LOW);
    delay(1);

    // Read in 16 bits,
    // 15 = 0 always
    // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
    // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
    // 1..0 = uninteresting status

    v = shiftIn(TM_heat_SO, TM_heat_SLK, MSBFIRST);
    v <<= 8;
    v |= shiftIn(TM_heat_SO, TM_heat_SLK, MSBFIRST);

    digitalWrite(TM_heat_CS, HIGH);
    if (v & 0x4)
    {
        // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
        return -1;
    }
}

```

```

// The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
v >>= 3;
// The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
return v * 0.25;
}

double leer_termopar_inside()
{
  uint16_t v;
  pinMode(TM_inside_CS, OUTPUT);
  pinMode(TM_inside_SO, INPUT);
  pinMode(TM_inside_SLK, OUTPUT);
  digitalWrite(TM_inside_CS, LOW);
  delay(1);

  // Read in 16 bits,
  // 15 = 0 always
  // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
  // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
  // 1..0 = uninteresting status

  v = shiftIn(TM_inside_SO, TM_inside_SLK, MSBFIRST);
  v <<= 8;
  v |= shiftIn(TM_inside_SO, TM_inside_SLK, MSBFIRST);

  digitalWrite(TM_inside_CS, HIGH);
  if (v & 0x4)
  {
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
    return -1;
  }
  // The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
  v >>= 3;
  // The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
  return v * 0.25;
}

```

1.1. Código de Matlab para recopilar y graficar datos en tiempo real

```

%% Limpiar el command window y el workspace
clc;
clear;

%% Configura el puerto COM (ajusta el puerto COM según tu configuración)
delete(instrfind({'Port'}, {'COM12'}));
comPort = 'COM12'; % Reemplaza 'COM3' con el puerto COM correcto
serialObj = serial(comPort);
set(serialObj, 'BaudRate', 9600); % Ajusta la velocidad de baudios según la configuración de tu Arduino

%% Abre el puerto COM
fopen(serialObj);

%% Inicializa las variables para almacenar los datos
laser = [];

```

```

temperatura_in_H2O = [];
temperatura_out_H2O = [];
temperatura_right_plate = [];
temperatura_left_plate = [];
temperatura_heat = [];
temperatura_inside = [];
curvatura = [];
sigma_s = [];
sigma_f = [];
a = 0.001; % Inicializa 'a' con un valor escalar

%% Propiedades de los materiales (cambiar segun el proceso a realizar)
E_s = 200*10^9;
V_s = 0.3;
h_s = 0.002;
E_f = 300*10^9;
V_f = 0.21;
h_f = 0.0003;
M_s = calcularMs(E_s, V_s);
M_f = calcularMf(E_f, V_f);

longitud_placa = 20;
x_curva = linspace(0, longitud_placa, 100);

%% Crea las figuras para las gráficas
f1 = figure(1);
f1.Position = [90 150 450 625];

h = obtenerParametroH();

f2 = figure(2);
f2.Position = [550 150 450 625];

umbral_temperatura = 45;

f3 = figure(3);
f3.Position = [1025 150 450 625];

%% Lectura de datos recibidos por arduino
try
while ishandle(1)
    % Lee los datos desde el puerto COM
    data = fgetl(serialObj);

    % Divide la cadena en valores separados por punto y coma
    values = str2double(strsplit(data, ','));

    % Verifica si se recibieron todos los datos
    if length(values) == 7
        laser = [laser, values(1)];
        temperatura_in_H2O = [temperatura_in_H2O, values(2)];
        temperatura_out_H2O = [temperatura_out_H2O, values(3)];
    end
end

```

```

temperatura_right_plate = [temperatura_right_plate, values(4)];
temperatura_left_plate = [temperatura_left_plate, values(5)];
temperatura_heat = [temperatura_heat, values(6)];
temperatura_inside = [temperatura_inside, values(7)];

laser_data = values(1);
a = laser_data; % Actualiza el valor de 'a' con 'laser_data'

curvatura = [curvatura, calcularCurvatura(laser_data, h)];
y_curva = (-a * (x_curva - longitud_placa/2).^2 + a * (longitud_placa/2)^2)/100;

sigma_s(end+1) = calcularSigmaS(h_s, E_s, V_s, curvatura(end), h_f);
sigma_f(end+1) = calcularSigmaF(h_s, E_s, V_s, curvatura(end), h_f, M_s, M_f);

% Grafica los datos en la primera figura
subplot(3, 1, 1);
plot(sigma_f, 'r');
grid on;
hold on;
title('Esfuerzos residuales en el material de adiccion');

subplot(3, 1, 2);
plot(curvatura, 'm');
grid on;
hold on;
title('Radio de Curvatura');

subplot(3, 1, 3);
plot(sigma_s, 'm');
grid on;
hold on;
title('Esfuerzos residuales en el sustrato');

drawnow;

if temperatura_heat(end) > umbral_temperatura
    fs = 44100;
    t = 0:1/fs:2;
    y = sin(2*pi*1000*t);
    sound(y,fs);
end

% Grafica para la segunda figura
figure(2); % Cambia a la segunda figura
clf; % Limpia la segunda figura

% Grafica las temperaturas en .la segunda figura
% subplot(2, 2, 1); % Temperatura Right Plate
% plot(temperatura_right_plate, 'r');
grid on;
hold on;
plot(temperatura_left_plate, 'b');
title('Temperatura en la placa');

```

```

drawnow; % Actualiza la segunda figura

figure(3);
clf;

plot(x_curva, y_curva, 'b-', 'LineWidth', 2); % Curva en azul y más gruesa
grid on;
hold on;

% Agregar etiquetas y título
xlabel('Longitud (cm)');
ylabel('Altura (mm)');
title('Representación Curvada de una Placa de Acero');

% Configurar el eje x para mostrar la longitud de la placa
xlim([0, longitud_placa]);

% Configurar el eje y según sea necesario
ylim([-30 30]); % Ajustar según tus necesidades

% Mostrar la cuadrícula
grid on;

% Mostrar la leyenda si es necesario
legend('Placa de acero con curvatura');

drawnow;

figure(1); % Regresa a la primera figura
clf;
end
end
catch
% Cierra el puerto COM en caso de error o al finalizar
fclose(serialObj);
delete(serialObj);
clear serialObj;
end

function sigma_s = calcularSigmaS(h_s, E_s, V_s, curvatura, h_f)
sigma_s = abs((E_s*h_s^3)/(6*(1-V_s)*curvatura*h_f^2*(1+(h_s/h_f))));
end

function sigma_f = calcularSigmaF(h_s, E_s, V_s, curvatura, h_f, M_s, M_f)
sigma_f = abs(M_s*(h_s^2/h_f)*(1/curvatura)*(1+((h_f/h_s)*((4*M_f/M_s)-1))));
end

function M_s = calcularMs(E_s, V_s)
M_s = E_s/(1-V_s);
end

```

```
function M_f = calcularMf(E_f, V_f)
    M_f = E_f/(1-V_f);
end

function Rs = calcularCurvatura(laser_data, h)
    Rs = abs(((laser_data*0.001)/2) + ((h^2)/(8*laser_data*0.001)));
end

function h = obtenerParametroH()
    h = 0.2; % Cambia este valor según tus necesidades
end
```

APÉNDICE 1.3: Cálculos EES y Matlab

A continuación se muestran los cálculos realizados en EES para el balance energético durante el proceso de recubrimiento y soldadura.

Balance energético del recubrimiento

```
%Datos%
clear
clc

T_s = 250+273.15; %K%
T_inf = 20+273.15; %K%
T_surr = 25+273.15; %K%
T_1 = 17+273.15; %K%
T_0 = 31+273.15; %K%
m_dot = (20*0.001*997)/60; %[kg/s]%
c_p = 4183; %[J/kg-K]%
e = 0.76;
sigma = 5.67E-8; %[W/m^2-K^4]%
V_flame = 0.0003633333; %[m^3/s]%
H_c = 54800000; %[J/m^3]%
A = 0.21*0.04; %[m^2]%

%Cálculo h_conv de convección%
g = 9.81; %[m/s^2]%
T_film = ((T_s + T_inf)/2)+273.15; %[K]%
beta = 1/T_film;
C = 0.59;
h = 1/4;
K = 0.0338; %[W/m-K]%
L = 0.04; %[m]%
gamma = 26.4E-6; %[m^2/s]%
alpha = 38.3E-6; %[m^2/s]%
R_al = (g*beta*(T_s - T_inf)*L^3)/gamma*alpha;
N_ul = C * R_al^h;
h_conv = N_ul*K/L;
h_conv = (C * R_al^h*K)/L;

%Ecuaciones%

q_conv = h_conv*(T_s - T_inf)*A;
h_v = e*sigma* (T_s + T_surr)*(T_s^2 + T_surr^2);
q_rad = h_v*(T_s - T_surr)*A;
q_agua = m_dot*c_p*(T_0-T_1);
q_flame = V_flame * H_c;
Q = q_rad+q_conv+q_agua;
D = q_flame-Q;
%q_flame = q_conv + q_rad + q_agua;%
```

Value	Name ▲
0.0084	A
3.8300e-05	alpha
0.0015	beta
0.5900	C
4183	c_p
424.1797	D
0.7600	e
9.8100	g
2.6400e-05	gamma
0.2500	h
54800000	H_c
0.0660	h_conv
12.8322	h_v
0.0338	K
0.0400	L
0.3323	m_dot
0.0781	N_ul
1.9486e+04	Q
1.9462e+04	q_agua
0.1275	q_conv
1.9911e+04	q_flame
24.2529	q_rad
3.0749e-04	R_al
5.6700e-08	sigma
304.1500	T_0
290.1500	T_1
681.3000	T_film
293.1500	T_inf
523.1500	T_s
298.1500	T_surr
3.6333e-04	V_flame

Balance energético de la soldadura

%Datos%

clc

clear

$T_s = 1400 + 273.15$; % K%

$T_{inf} = 20 + 273.15$; % K%

$T_{surr} = 50 + 273.15$; % K%

$T_{film} = ((T_s + T_{inf})/2) + 273.15 + 273.15$; % K%

$T_1 = 17 + 273.15$; % K%

$T_0 = 31 + 273.15$; % K%

$m_{dot} = (20 * 0.001 * 997) / 60$; % [kg/s]%

$c_p = 4183$; % [J/kg-K]%

$e = 0.35$;

$\sigma = 5.67E-8$; % [W/m²-K⁴]%

$A = 0.21 * 0.04$; % [m²]%

%Cálculo h_conv de convección%

$g = 9.81$; % [m/s²]%

$\beta = 1/T_{film}$;

$K = 0.0338$; % [W/m-K]%

$L = 0.21$; % [m]%

$\gamma = 26.4 * 10^{(-6)}$; % [m²/s]%

$\alpha = 38.3 * 10^{(-6)}$; % [m²/s]%

$R_{al} = (g * \beta * (T_s - T_{inf}) * L^3) / (\gamma * \alpha)$;

$N_{ul} = 0.54 * R_{al}^{0.25}$;

$h_{conv} = N_{ul} * K / L$;

%Ecuaciones%

```

q_conv = h_conv*(T_s - T_inf)*A;
h_v = e*sigma*(T_s + T_surr)*(T_s^2 + T_surr^2);
q_rad = h_v*(T_s - T_surr)*A;
q_agua = m_dot*c_p*(T_0-T_1);
q_MIG = q_rad+q_conv+q_agua;

```

Value	Name ^
0.0084	A
3.8300e-05	alpha
6.5383e-04	beta
4183	c_p
0.3500	e
9.8100	g
2.6400e-05	gamma
0.0510	h_conv
115.0409	h_v
0.0338	K
0.2100	L
0.3323	m_dot
0.3171	N_ul
1.9462e+04	q_agua
0.5917	q_conv
2.0767e+04	q_MIG
1.3046e+03	q_rad
0.1189	R_al
5.6700e-08	sigma
304.1500	T_0
290.1500	T_1
1.5295e+03	T_film
293.1500	T_inf
1.6732e+03	T_s
323.1500	T_surr

APÉDICE 1.4: Cálculos en Matlab

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en Matlab para el cálculo de esfuerzos residuales y la relación de temperatura y curvatura.

Esfuerzos residuales Brenner_Senderoff

```

clc, close all; clear all;
% K = [0 0 0 0 1 1 1.5 1.7 1.8 1.9 2 2 2 2.6 2.7 2.9 2.9 3 3 3 3 3.4 3.5 3.6 3.8
4.3 4.5 4.6 4.7 4.8 4.85 4.9 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4
4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
K = [0 0 0.1 4.27 0.12 0.1];
E_s = 200*10^9;
E_f = 300*10^9;
h_s = 0.002;
v_s = 0.3;
v_f = 0.21;
h_f = 0.0003;
i=1;
sigma_substrato_t = [0 0];
K_1 = K./1000;
M_s = E_s/(1-v_s);
M_f = E_f/(1-v_f);

if K(i) > 0
    while i <= length(K)
        value = K_1(i);
        R = (value/2)+((0.2^2)/(8*value));
        sigma_film = M_s*((h_s^2)/h_f)*(1/R)*(1+((h_f/h_s)*((4*M_f/M_s)-1)));
        sigma_film_t(i+1) = sigma_film;
        t = linspace(0,i,i);
        [sigma_film_max, index] = max(sigma_film_t);
        t_max = t(index);
        plot(t,sigma_film_t, t_max, sigma_film_max, "ro")
        title("Esfuerzos Residuales en Material Añadido")
        ylabel("Esfuerzo Residual [Pa]")
        drawnow
        i = i+1;
    end
elseif K(i)<= 0
    while K(i) <= 0
        i = i+1;
    end
    while i <= length(K)
        value = K_1(i);
        R = (value/2)+((0.2^2)/(8*value));
        sigma_film = M_s*((h_s^2)/h_f)*(1/R)*(1+((h_f/h_s)*((4*M_f/M_s)-1)));
        sigma_film_t(i) = sigma_film;
        t = linspace(0,i,i);
        [sigma_film_max, index] = max(sigma_film_t);
        t_max = t(index);
        plot(t,sigma_film_t, t_max, sigma_film_max, "ro")
        title("Esfuerzos Residuales en Material Añadido")
        ylabel("Esfuerzo Residual [Pa]")
        drawnow
    end
end

```

```

    i = i+1;
end
end
sigma_film_max = max(sigma_film_t);

```

Esfuerzos residuales Stoney

```

clc, close all; clear all;
%K = [0 0 0 1 1 1.5 1.7 1.8 1.9 2 2 2 2.6 2.7 2.9 2.9 3 3 3 3 3.4 3.5 3.6 3.8
4.3 4.5 4.6 4.7 4.8 4.85 4.9 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4
4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
K = [0 0 0.1 3 4.27 0.1];
E_s = 200*10^9;
h_s = 0.002;
v_s = 0.3;
h_f = 0.0003;
i=1;
sigma_sustrato_t = [0 0];
K_1 = K./1000;
if K(i) > 0
    while i <= length(K)
        value = K_1(i);
        R = (value/2)+((0.2^2)/(8*value));
        sigma_sustrato = (E_s*h_s^3)/(6*(1-v_s)*R*(h_f^2)*(1+(h_s/h_f)));
        sigma_sustrato_t(i+1) = sigma_sustrato;
        t = linspace(0,i,i);
        set(plot(t,sigma_sustrato_t))
        title("Esfuerzo Residuales Sustrato")
        ylabel("Esfuerzo Residual [Pa]")
        drawnow
        i = i+1;
    end
elseif K(i)<= 0
    while K(i) <= 0
        i = i+1;
    end
    while i <= length(K)
        value = K_1(i);
        R = (value/2)+((0.2^2)/(8*value));
        sigma_sustrato = (E_s*h_s^3)/(6*(1-v_s)*R*(h_f^2)*(1+(h_s/h_f)));
        sigma_sustrato_t(i) = sigma_sustrato;
        t = linspace(0,i,i);
        [sigma_sustrato_max, index] = max(sigma_sustrato_t);
        t_max = t(index);
        plot(t,sigma_sustrato_t, t_max, sigma_sustrato_max, "ro")
        title("Esfuerzo Residuales Sustrato")
        ylabel("Esfuerzo Residual [Pa]")
        drawnow
        i = i+1;
    end
end
sigma_sustrato_max = max(sigma_sustrato_t);

```

Relación diferencia de temperatura y curvatura:

The screenshot displays the MATLAB interface with two windows open:

- Equations Window:**
 - Title: "Relación curvatura con diferencia de temperatura"
 - Section: "Propiedades:"
 - $E_c = 220000000$ [kPa]
 - $E_s = 209000000$ [kPa]
 - $E_{\text{prima}_c} = E_c / (1 - \nu_c)$
 - $E_{\text{prima}_s} = E_s / (1 - \nu_s)$
 - $t_c = 0.0015$ [m]
 - $t_s = 0.003$ [m]
 - $\delta T = 150$ [C]
 - $\delta_{\alpha} = \delta_{\alpha_c} - \delta_{\alpha_s}$
 - $\delta_{\alpha_s} = 0.000012$ [1/C]
 - $\delta_{\alpha_c} = 0.0000125$ [1/C]
 - $\nu_c = 0.3$
 - $\nu_s = 0.3$
 - Section: "Ecuación:"
 - $$\delta_{\alpha_k} = (6 * E_c * E_s * t_c * t_s * (\nu_c + \nu_s) * \delta T * \delta_{\alpha}) / (E_c^2 * t_c^4 + 4 * E_c * E_s * t_c^3 * t_s + 6 * E_c * E_s * t_c^2 * t_s^2 + 4 * E_c * E_s * t_c * t_s^3 + E_s^2 * t_s^4)$$
- Solution Window:**
 - Title: "Solution"
 - Section: "Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg"
 - Variables and Units:
 - $\delta_{\alpha_c} = 5.000E-07$ [1/C]
 - $\delta_{\alpha_s} = 0.000012$ [1/C]
 - $\delta T = 150$ [C]
 - $E_{\text{prima}_c} = 3.143E+08$ [kPa]
 - $E_s = 2.090E+08$ [kPa]
 - $t_s = 0.003$ [m]
 - $\nu_s = 0.3$
 - $\delta_{\alpha_c} = 0.0000125$ [1/C]
 - $\delta_k = 0.02243$ [1/m]
 - $E_c = 2.200E+08$ [kPa]
 - $E_{\text{prima}_s} = 2.986E+08$ [kPa]
 - $t_c = 0.0015$ [m]
 - $\nu_c = 0.3$
 - Message: "No unit problems were detected."

Figura 21 Cálculos en Matlab para la diferencia de temperatura y curvatura

Apéndice 2: Gestión de proyectos

APÉNDICE 2.1: Diagrama de Gantt

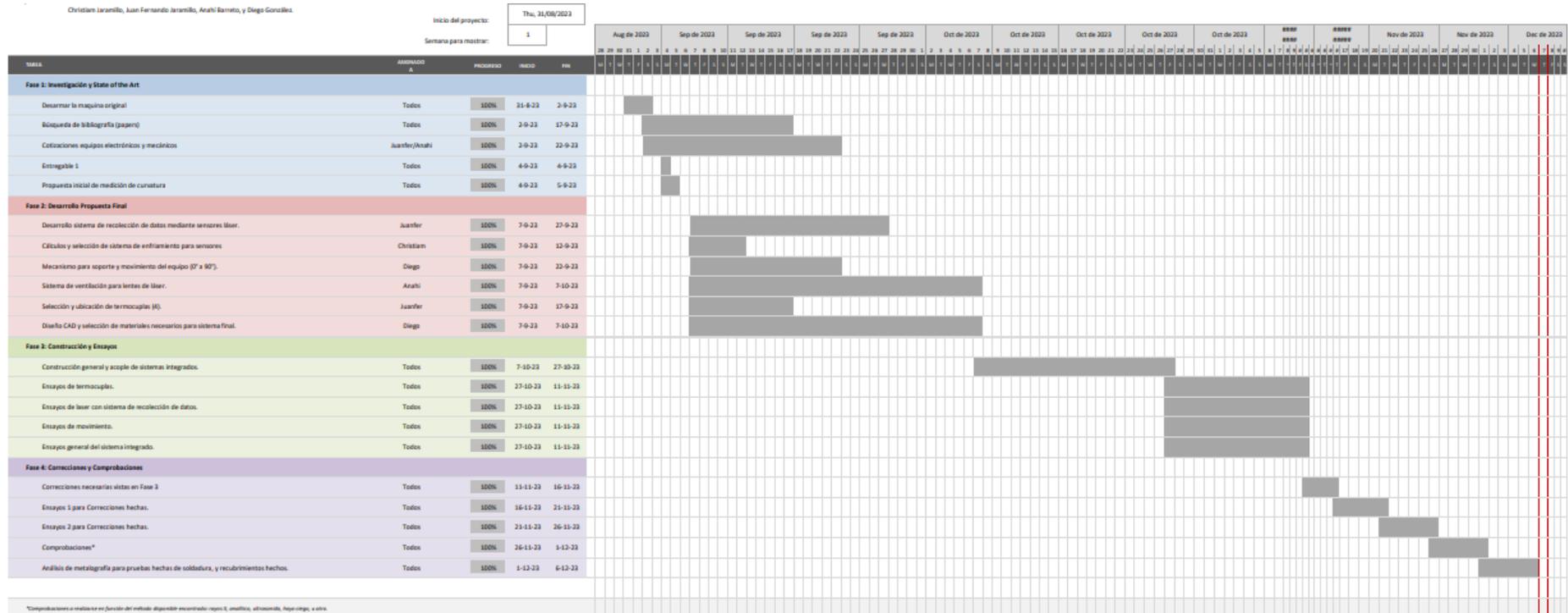


Figura 22 Diagrama de Gantt

APÉNDICE 2.2: Reporte de gastos*Tabla 15 Reporte de gastos*

#	Categoría	Pieza	Cantidad	costo unitario (\$)	Total (\$)
1	Sistema de Refrigeración	Escudo de calor	1	\$16,0	\$16,0
2	Componentes Mecánicos	Caja base	1	\$137,7	\$137,7
3	Componentes Mecánicos	Lentes	2	\$48,0	\$96,0
4	Componentes Mecánicos	Tapa de los lentes	1	\$2,0	\$2,0
5	Componentes Mecánicos	Soporte vertical en A	2	\$12,7	\$25,5
6	Componentes Mecánicos	Soporte horizontal	1	\$8,0	\$8,0
7	Componentes Mecánicos	Sujeción termocuplas	2	\$5,9	\$11,8
8	Componentes Mecánicos	Sujeción pines	2	\$3,0	\$6,1
9	Componentes Mecánicos	Tapa serpentín	1	\$8,0	\$8,0
10	Sistema de Refrigeración	Neplee 1/4 x 2"	1	\$0,7	\$0,7
11	Sistema de Refrigeración	Neplee reductor 1/3 a 2/5	2	\$5,0	\$10,0
12	Sistema de Refrigeración	Adaptador NPT 3/8	6	\$1,0	\$6,2
13	Sistema de Refrigeración	Neplee 1/4	4	\$0,7	\$2,9
14	Instrumentación	Laser CD22-100-485	1	\$721,6	\$721,6
15	Componentes Mecánicos	Soporte laser	1	\$4,3	\$4,3
16	Sistema de Refrigeración	Cinta térmica	1	\$19,0	\$19,0
17	Componentes Mecánicos	Tapa de la caja base	1	\$12,5	\$12,5
18	Componentes Mecánicos	Soporte hexagonal	4	\$7,0	\$28,0
19	Instrumentación	Placa Arduino mega	1	\$28,0	\$28,0
20	Instrumentación	Cable USB de 5 metros	1	\$13,8	\$13,8
21	Instrumentación	Modulo max485	1	\$0,9	\$0,9
22	Instrumentación	Modulo max6675	6	\$3,3	\$20,0
23	Instrumentación	Termocuplas pequeñas	4	\$11,6	\$46,3
24	Instrumentación	Termocuplas largas	2	\$13,9	\$27,7
25	Instrumentación	Placa de distribución (galleta)	1	\$2,0	\$2,0
26	Sistema de Refrigeración	Bomba de agua	1	\$62,2	\$62,2
27	Sistema de Refrigeración	Radiador con ventilador	1	\$23,0	\$23,0
28	Sistema de Refrigeración	metros de maguera 3/8	5	\$2,1	\$10,4
29	Sistema de Refrigeración	Codo de 3/8	5	\$1,0	\$5,0
30	Sistema de Refrigeración	Pasa muros de 3/4	2	\$3,2	\$6,4
31	Componentes Mecánicos	Caja de sistema eléctrico	1	\$7,4	\$7,4
32	Sistema de Refrigeración	Caja de sistema hidráulico	1	\$34,2	\$34,2

33	Componentes Mecánicos	Pines de sujeción de 3mm x 1m	1	\$1,2	\$1,2
34	Componentes Mecánicos	AS 1420 – 1973 – M4x20	12	\$0,2	\$2,6
35	Componentes Mecánicos	ANSI B18.3.6M – M3X0.5X5, BHSSSFPM	10	\$0,2	\$2,0
36	Componentes Mecánicos	ASME/ANSI B18.3M – M4x14(2)	4	\$0,5	\$2,0
37	Componentes Mecánicos	AS 1420 – 1973 – M5x16	4	\$0,3	\$1,2
38	Componentes Mecánicos	ISO 140642 – M2x8	14	\$0,1	\$0,7
39	Componentes Mecánicos	IS 1826 – A M8x1x55	2	\$0,1	\$0,2
40	Componentes Mecánicos	ANSI B18.2.2 – 5/16 – 18,HNI	2	\$0,1	\$0,1
41	Componentes Mecánicos	ASME/ANSI B18.3.5M – M6x14(2)	4	\$0,0	\$0,1
42	Componentes Mecánicos	Screw GB/T 77 M3x2	6	\$0,0	\$0,2
43	Componentes Mecánicos	Acople pistola kuka	1	\$6,3	\$6,3
44	Componentes Mecánicos	Acople cilíndrico kuka	1	\$2,2	\$2,2
45	Manufactura	Horas de maquinado de las piezas mecánicas	50	\$25,0	\$1.250,0
Total					\$2.672,2

Apéndice 3: Carpeta

APÉNDICE 3.1: Minutas de Reunión

Minuta de Reunión 1: Ecuación de Esfuerzos Residuales y Análisis Termodinámico del ICP

- **Fecha y Hora:** 27 de septiembre a las 5:06 PM
- **Lugar:** Campus Universidad San Francisco de Quito, Edificio Hayek
- **Asistentes:**
 - Christiam Jaramillo
 - Anahí Barreto
 - Alfredo Valarezo

Temas Discutidos:

1. Ecuación de Esfuerzos Residuales:

- Discusión sobre las ecuaciones de Stoney y Brenner-Senderoff para sustrato y recubrimiento.
- Exploración de posibles mejoras y adaptaciones para nuestro proyecto.

2. Relación Deformación y Temperatura:

- Planteamiento de la necesidad de encontrar una ecuación que relacione la deformación y la temperatura en nuestro contexto.
- Lluvia de ideas inicial sobre posibles enfoques y métodos.

3. Análisis Termodinámico del ICP:

- Primer análisis termodinámico del In-situ Coating Property Sensor (ICP).
- Identificación de posibles áreas de mejora y optimización.

Acciones Acordadas:

- Christiam y Anahí investigarán más sobre ecuaciones de esfuerzos residuales y posibles relaciones entre deformación y temperatura.

- Programar una sesión para un análisis más detallado del ICP.

Minuta de Reunión 2: Presentación de Ecuaciones y Datos Analíticos Preliminares

- **Fecha y Hora:** 4 de octubre del 2023 a las 4:45 PM
- **Lugar:** Campus Universidad San Francisco de Quito, Edificio Hayek
- **Asistentes:**
 - Christiam Jaramillo
 - Anahí Barreto
 - Diego González
 - Juan Jaramillo
- Alfredo Valarezo

Temas Discutidos:

1. Presentación de Ecuaciones:

- Christiam y Anahí presentaron las ecuaciones desarrolladas desde la última reunión.
- Discusión sobre su aplicabilidad y posibles mejoras.

2. Datos Analíticos Preliminares:

- Presentación de datos analíticos obtenidos hasta el momento.
- Evaluación conjunta de los resultados y discusión sobre próximos pasos.

3. Compra de Componentes:

- Propuestas y discusión sobre los componentes necesarios para el proyecto.
- Acuerdo sobre la planificación de compra.

Acciones Acordadas:

- Realizar ajustes a las ecuaciones según las sugerencias discutidas.
- Continuar la recopilación y análisis de datos.
- Investigar y hacer una lista detallada de los componentes a comprar.

Minuta de Reunión 3: Resultados Finales y Construcción Preliminar del Módulo ICP

- **Fecha y Hora:** 18 de octubre del 2023 a las 4:00 PM
- **Lugar:** Campus Universidad San Francisco de Quito, Edificio Hayek
- **Asistentes:**
 - Christiam Jaramillo
 - Anahí Barreto
 - Diego González
 - Juan Jaramillo
- Alfredo Valarezo

Temas Discutidos:

1. Resultados Finales:

- Presentación de los resultados finales obtenidos con las ecuaciones y datos analíticos.
- Discusión sobre la validez y relevancia de los resultados.

2. Construcción Preliminar del Módulo ICP:

- Revisión del progreso en la construcción del ICP.
- Evaluación de posibles ajustes y mejoras.

3. Incorporación de Cámara para Medir Curvatura:

- Discusión sobre la viabilidad de incorporar una cámara para medir la curvatura.
- Consideración de limitaciones y posibles soluciones.

Acciones Acordadas:

- Continuar con la construcción del módulo ICP.
- Evaluar detalladamente la viabilidad de incorporar la cámara.
- Planificar pruebas adicionales para validar los resultados obtenidos.

Minuta de Reunión 4: Propuesta de Simulación y Continuación de la Construcción

- **Fecha y Hora:** 25 de octubre del 2023 a las 4:45 PM
- **Lugar:** Campus Universidad San Francisco de Quito, Edificio Hayek
- **Asistentes:**
 - Christiam Jaramillo
 - Anahí Barreto
 - Diego González
 - Juan Jaramillo
 - Alfredo Valarezo

Temas Discutidos:

1. Simulación como Segundo Método de Medición:

- Propuesta de incorporar simulaciones como un segundo método de medición y comparación.
- Discusión sobre las ventajas y desventajas de esta propuesta.

2. Continuación de la Construcción:

- Presentación de los avances en la construcción del proyecto.
- Demostración del código funcional para la lectura de datos en tiempo real.

Acciones Acordadas:

- Investigar y desarrollar la implementación de la simulación.
- Continuar con la construcción del proyecto según el plan establecido.
- Programar sesiones regulares de seguimiento para evaluar el progreso y realizar ajustes si es necesario.

Minuta de Reunión 5: Decisión sobre Cámara, Investigación de Simulación y Adición de Soldadura

- **Fecha y Hora:** 4 de diciembre del 2023 a las 4:03 PM
- **Lugar:** Campus Universidad San Francisco de Quito, Edificio Hayek
- **Asistentes:**
 - Christiam Jaramillo
 - Anahí Barreto
 - Diego González
 - Juan Jaramillo
 - Alfredo Valarezo

Temas Discutidos:

1. Incorporación de la Cámara:

- Discusión sobre la viabilidad de incorporar la cámara para medir la curvatura.
- Toma de decisión respecto a su inclusión o desarrollo de razones por las cuales no es viable.

2. Investigación de Simulación en Abaqus:

- Revisión y discusión de la simulación realizada en Abaqus.
- Corroboración de los datos obtenidos y evaluación de su confiabilidad.

3. Diseño y Construcción Terminada:

- Presentación de la finalización del diseño y construcción del proyecto.
- Discusión sobre los detalles finales y la calidad del trabajo realizado.

4. Adición de Soldadura:

- Planteamiento de la posibilidad de añadir soldadura a los procesos de adición de material.
- Discusión sobre los beneficios y desafíos de esta adición.

Acciones Acordadas:

- Investigar a fondo la incorporación de la cámara y desarrollar un informe detallado sobre su viabilidad o limitaciones.
- Verificar la precisión de la simulación en Abaqus a través de métodos adicionales si es necesario.
- Realizar una revisión final del diseño y construcción antes de la presentación final.
- Investigar y evaluar los procesos de soldadura para determinar su viabilidad y beneficios potenciales.

APÉNDICE 3.1: Cálculos manuales

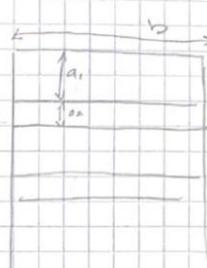
Cálculo variables

Medidas tomadas de un verticedor

$$N_{uo} = \frac{h_c D_p}{k} = 4.4$$

$$\frac{b}{a} = 3.5$$

Equation 8.66 $\rightarrow D_p = \frac{4Ac}{\phi}$

$$= 2a, \quad a = \frac{\phi c}{k N}$$


$h_c = \frac{4.4 \cdot k}{2a}$
 $= \frac{4.4 \cdot k N}{2L}$

$h_w = 1.375 \text{ N/m}^2$
 $h_n = 0.05386 \text{ N/m}^2$

$K_w @ T=35 = 0.625$
 $K_n @ T=35 = 0.0265$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_n} + \frac{1}{h_w}}$$

$$UA = \frac{\phi}{\Delta T_m} = \frac{L^2(N-1)}{\frac{1}{h_n} + \frac{1}{h_w}}$$

$$L = \frac{\phi}{\Delta T_m (N-1)} \left[\frac{1}{h_n} + \frac{1}{h_w} \right]$$

$$= \frac{\phi}{\Delta T_m N(N-1)} \left[\frac{1}{1.375} + \frac{1}{0.0538} \right]$$

$$= \frac{\phi}{5.873 N(N-1)}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$\Delta T_1 = 35 - 20$$

$$\Delta T_2 = 25 - 23$$

$$= \frac{9 - 2}{\ln(1/2)} = 4.65$$

Figura 23 Cálculo manual 1

Calculos heat shield

$$q = 17911 \text{ W} \quad A = L \cdot w \quad c = 0.59, \quad n = 1/4$$

$$q = \bar{h} A (T_s - T_\infty), \quad \overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} L}{k} = C R_{\text{Gr}}^n, \quad R_{\text{Gr}}^* = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha}$$

$$\bar{h} = \frac{k}{L} \cdot C \cdot \left(\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \right)^{1/4}$$

$$q = (\bar{h}_1 + 2\bar{h}_2) A (T_s - T_\infty)$$

$$= \left(\frac{k}{L} C \left(\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \right)^{1/4} + 2 \frac{k}{L} C \left(\frac{g \cos 45^\circ \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \right)^{1/4} \right) L w (T_s - T_\infty)$$

$$q = \left(\frac{k}{L} C \left(\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \right)^{1/4} (1 + \cos \theta) \right) L w (T_s - T_\infty)$$

$$L^{3/4} = \frac{q}{w k C (1 + \cos 45^\circ) (T_s - T_\infty) \left(\frac{g \beta (T_s - T_\infty)}{\nu \alpha} \right)^{1/4}}$$

$$T_s = 232^\circ \text{C}$$

$$T_\infty = 25^\circ \text{C}$$

$$T_f = 400$$

$$k = 33.8 \times 10^{-3}$$

$$\nu = 26.4 \times 10^{-6}$$

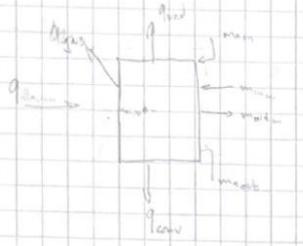
$$\alpha = 38 \cdot 10^{-6}$$

$$Pr = 0.69$$

$$\beta = 0.0025$$

$$w = 305 \text{ mm} = 0.305$$

Figura 24 Cálculo manual 2



$q_{rad} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4)$
 $q_{conv} = h_c A (T_s - T_{amb})$
 $q_{surr} = h_r A (T_s - T_{surr})$
 $q_{cool} = \dot{m} C_p (T_s - T_o)$
 $q_{heating} = \dot{m} C_p (T_s - T_o)$

$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{surr}$
 $q_{heating} - (q_{rad} + q_{conv}) + \dot{m} C_p (T_s - T_o) = 0$

$N_{Gr} = \frac{h L}{k} = C R_{aL}^n$
 $R_{aL} = \frac{g \beta (T_s - T_o) L^3}{\nu^2 \alpha}$

$T_s = 250 + 20 = 270 \text{ K}$
 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
 $\beta = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{408}$
 $k = 33.8 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$
 $\nu = 26.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $\alpha = 38.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $L = \text{altura de la tabla}$

$\bar{h} = \frac{k}{L} \cdot C R_{aL}^n$

$T_s \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_{surr} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_s = 15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_o = 31 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\dot{m} = \text{ m}^3/\text{s}$
 $\dot{m} = 20 \text{ L/m}^3 = 0.33 \text{ m}^3/\text{s}$
 $C_{p,a} = 4.18$
 $\epsilon_s = 0.36$
 $\sigma = 5.67$
 $n_1 \approx 10.7$

Indentes obtenidos
 a través de free con

Figura 25 Cálculo manual 3

APÉNDICE 3.3: Facturas



**RIEGO
ECUADOR**

RUC 1792630436001
FACTURA
No. 001-005-000009030
 NÚMERO DE AUTORIZACIÓN
 1011202301179263043600120010050000090301234567810
 Ambiente PRODUCCIÓN
 Emisión Normal
CLAVE DE ACCESO

 1011202301179263043600120010050000090301234567810

RIEGO ECUADOR
 Dir. Matriz: 24 de septiembre SN, Tababela
 Dir. Sucursal: Direccion Local
 Obligado a Llevar Contabilidad SI
Agente de retención Resolución No. 1

Razón Social / Nombre y Apellidos: MALDONADO MARIA FERNANDA RUC / CI: 1706640560001
 Fecha Emisión: 10/11/2023 Dirección: JUNCAL 118

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	DESCUENTO	PRECIO TOTAL
00000527 *T00	BUSHING 1/2 M X 3/8 H - AZUL - C UND	2	0.220000	0.00	0.44
00000743 *T00	CONECTOR P/TANQUE 1/2 UND	2	5.500000	0.00	11.00
00001691 *T00	UNION 1/2 ROSC PLAST UND	2	0.412600	0.00	0.83

Información Adicional
 Agente de Retención No.Resolucion 1
 OBSERVA -

SUBTOTAL 12%	0.00
SUBTOTAL 0%	12.27
SUBTOTAL No sujeto de IVA	0.00
SUBTOTAL exento de IVA	0.00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	12.27
Descuento	0.00
ICE	0.00
IRBPNR	0.00
IVA 12%	0.00
Propina	0.00
VALOR TOTAL	12.27

Forma de Pago	Valor
OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO	12.2700

1 De 1

Figura 26 Factura 1

Electrónica del Norte

.com.ec

Emisor: RIVEROS VALENZUELA RODOLFO
RUC: 1707874408001
Matriz: SAN JUAN / AV. COLON OE1-42 Y AV. 10 DE AGOSTO
Correo: electronicadelnorte4@gmail.com
Teléfono: 994067732
Obligado a llevar contabilidad: SI
Agente de Retención
Resolución Nro. NAC-DNCRASC20-00000001

FACTURA **No.002-003-000247914**

Número de Autorización:
0811202301170787440800120020030002479140000142514

Fecha y hora de Autorización:
08/11/2023 13:44:59

Ambiente: PRODUCCION
Emisión: NORMAL
Clave de Acceso:



0811202301170787440800120020030002479140000142514

Razón Social: MARIA FERNANDA MALDONADO	RUC/CI: 1706640560001
Dirección: JUNCAL	Teléfono: 0999367888
Fecha Emisión: 08/11/2023	Correo: ma_fermaldonado@hotmail.com

Código Principal	Cantidad	Descripción	Detalles Adicionales	Precio Unitario	Descuento	Total
235147	1.00	CABLE USB 2.0 IMPRESORA 7.5MTS AMPLIFICADO CON CHIP (SAA) (AE-USBAM-BM-7.5M-CP)		13.8400	\$0.00	\$13.84

Información Adicional	Subtotal Sin Impuestos:	\$13.84
Descripción VENTA DESDE PUNTO DE VENTA	Subtotal 12%:	\$13.84
	Subtotal 0%:	\$0.00
	Subtotal No Objeto IVA:	\$0.00
Formas de pago	Descuentos:	\$0.00
Tarjeta de crédito	ICE:	\$0.00
	IVA 12%:	\$1.66
	Servicio %:	\$0.00
	Valor Total:	\$15.50

Figura 27 Factura 2

 <p>ferrituvalco Cia. Ltda. IMPORTADORES INDUSTRIALES</p>	<p>FERRITIVALCO Cia Ltda R.U.C.: 1792073898001 Matriz: Av. Diego de Vásquez N72-72 / Prados del Oeste PB (Poncaano) Teléfonos: 2479-692 2478-536 Quito-Ecuador</p>
	<p>AGENTE DE RETENCIÓN RESOLUCIÓN NRO. NAC-DNCRASC20-00000001</p>

<p>CLIENTE: MALDONADO JARAMILLO MARIA FERNANDA DIRECCIÓN: CARCELÉN / EL JUNCAL 118 Y AV DE LOS EUCALIPTOS RUC: 1706640560001 CORREO: ma_fermaldonado@hotmail.com TELÉFONO: 0999567888 FECHA: 8 de noviembre de 2023 LUGAR: QUITO</p>	<p>FACTURA No. 001-002-000016753 Fecha y hora de Autorización 2023-11-08T12:50:47-05:00 Número de Autorización SRI</p>
--	--

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT.	V. UNIT.	TOTAL
1574	SS NEPLO SCH 40 NPT 304 1/4" X 2"	1.00	0.68	0.68
9895	SS NEPLO SCH 40 NPT 316 1/4" X 3	1.00	2.70	2.70

<p>FORMA DE PAGO: OTROS CON UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO 3.79</p>	<p>SUBTOTAL: 3.38 SUBTOTAL 0%: 0.00 DSCTO. 0.00 IMPONIBLE: 3.38 IVA 12% 0.41 PROPINA: 0.00 TOTAL: 3.79</p>
--	---

OBSERVACIONES:

Debo y pagaré incondicionalmente a la orden de FERRITIVALCO CIA. LTDA. en el lugar y fecha que se reconvenga el valor total expresado en este documento, más el máximo interés legal por mora autorizado. Sin protesto eximase de presentación para el pago así como de aviso por falta de este hecho. Renuncio domicilio y me someto a los jueces competentes de la ciudad de Quito y al trámite ejecutivo o verbal sumario a elección de FERRITIVALCO. Se recibirán retenciones máximo hasta 5 días después de emitida esta factura

Figura 28 Factura 3

MAXIMO JARA GUEVARA

INGENIERO MECANICO

Telf: 02-2472211 - 02-2476885 - 02-3463486

JARA GUEVARA MAXIMO ALBERTO

R.U.C.: 0908879331001

Dir Matriz: AV. GALO PLAZA LASSO N69-482 Y SEBASTIAN MORENO

Dir Sucursal: Galo Plaza Lasso Y Sebastian Moreno

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: SI

AGENTE DE RETENCIÓN RESOLUCIÓN NRO. NAC-DNCRASC20-0000001

CONTRIBUYENTE RÉGIMEN RIMPE

FACTURA

No. 001-001-000008629

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN:
0611202301090887933100120010010000086290908879314

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN:

AMBIENTE: PRODUCCION

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



06112023010908879331001200100100000862909088

Cliente: MALDONADO JARAMILLO MARIA FERNANDA RUC / CI: 1706640560001

Fecha de Emisión: 06/11/2023 Guía de Remisión:

Codigo	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
06PC1FS-R1S	FERRULA INDUSTRIAL 6PC1FS R1AT	1.00 UNIDAD	1.05	1.05

INFORMACION ADICIONAL

Email: ma_fermaldonado@hotmail.com

Dirección Cliente: JUNCAL 118

ORDEN DE COMPRA:

Valor a Pagar: 1.18

COD. QUANTUM: 08629

Usuario registra: PATRICIO

SUBTOTAL 12%	1,05
SUBTOTAL 0%	0,00
SUBTOTAL No objeto de IVA	0,00
SUBTOTAL Exento IVA	0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	1,05
DESCUENTO	0,00
IVA 12%	0,13
VALOR TOTAL	1,18

Forma de Pago	Total	Plazo	Tiempo
SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO	1,18	0	dias

Enviar sus retenciones al correo maxjarag@hotmail.com

Figura 29 Factura 3

MAXIMO JARA GUEVARA

INGENIERO MECANICO

Telf: 02-2472211 - 02-2476885 - 02-3463486

JARA GUEVARA MAXIMO ALBERTO

R.U.C.: 0908879331001

Dir Matriz: AV. GALO PLAZA LASSO N69-482 Y SEBASTIAN MORENO

Dir Sucursal: Galo Plaza Lasso Y Sebastian Moreno

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: SI
 AGENTE DE RETENCIÓN RESOLUCIÓN NRO. NAC-DNCRASC20-00000001
 CONTRIBUYENTE RÉGIMEN RIMPE

FACTURA

No. 001-001-000008629

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN:
0611202301090887933100120010010000086290908879314

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN:

AMBIENTE: PRODUCCION

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



06112023010908879331001200100100000862909088

Cliente: MALDONADO JARAMILLO MARIA FERNANDA RUC / CI: 1706640560001

Fecha de Emisión: 06/11/2023 Guía de Remisión:

Codigo	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
06PC1FS-R1S	FERRULA INDUSTRIAL 6PC1FS R1AT	1.00 UNIDAD	1.05	1.05

INFORMACION ADICIONAL

Email: ma_fermaldonado@hotmail.com

Dirección Cliente: JUNCAL 118

ORDEN DE COMPRA:

Valor a Pagar: 1.18

COD. QUANTUM: 08629

Usuario registra: PATRICIO

SUBTOTAL 12%	1,05
SUBTOTAL 0%	0,00
SUBTOTAL No objeto de IVA	0,00
SUBTOTAL Exento IVA	0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	1,05
DESCUENTO	0,00
IVA 12%	0,13
VALOR TOTAL	1,18

Forma de Pago	Total	Plazo	Tiempo
SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO	1,18	0	dias

Enviar sus retenciones al correo maxjarag@hotmail.com

Figura 30 Factura 4

MAXIMO JARA GUEVARA
INGENIERO MECANICO
Telf: 02-2472211 - 02-2476885 - 02-3463486

FACTURA

No. 001-001-000008594
 NÚMERO DE AUTORIZACIÓN:
 2710202301090887933100120010010000085940908879310
 FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN:
 AMBIENTE: PRODUCCION
 EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



27102023010908879331001200100100000859409088

JARA GUEVARA MAXIMO ALBERTO
 R.U.C.: 0908879331001
 Dir Matriz: AV. GALO PLAZA LASSO N69-482 Y SEBASTIAN MORENO
 Dir Sucursal: Galo Plaza Lasso Y Sebastian Moreno

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: SI
 AGENTE DE RETENCIÓN RESOLUCIÓN NRO. NAC-DNCRASC20-00000001
 CONTRIBUYENTE RÉGIMEN RIMPE

Código Descripción Cantidad Precio Unitario Total

GS-06-NEGRA	(METRO) MANG. MULTIUSO OSHENG DA GS 3/8 300 PSI COLOR NEGRA	3.00 METRO	2.07	6.21
-------------	---	------------	------	------

Cliente: MARIA FERNANDA MALDONADO RUC / CI: 1706640560001

Fecha de Emisión: 27/10/2023 Guía de Remisión:

INFORMACION ADICIONAL
 Email: ma_fermaldonado@hotmail.com
 Dirección Cliente: JUNCAL 118
 ORDEN DE COMPRA:
 Valor a Pagar: 6.96
 COD. QUANTUM: 08594
 Usuario registra: PATRICIO

SUBTOTAL 12%	6,21
SUBTOTAL 0%	0,00
SUBTOTAL No objeto de IVA	0,00
SUBTOTAL Exenio IVA	0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	6,21
DESCUENTO	0,00
IVA 12%	0,75
VALOR TOTAL	6,96

Forma de Pago	Total	Plazo	Tiempo
SIN UTILIZACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO	6,96	0	días

Enviar sus retenciones al correo maxjarag@hotmail.com

Figura 31 Factura 5

NO TIENE LOGO

R.U.C.: 1704103728001
FACTURA

No. 001-099-000025177
NÚMERO DE AUTORIZACIÓN
0711202301170410372800120010990000251770002517713

ING. FRANCISCO ROSENDO JARRIN JACOME

Dirección Av. 10 de agosto N57_47 y Borrero/Pana Norte tel 2408956
Matriz: 2408956

Dirección Av. 10 de agosto N57_47 y Borrero/Pana Norte tel 2408956
Sucursal: 2408956

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD SI

Agente de Retención Resolución No. 0000000

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN: 07/11/2023 14:38:29

AMBIENTE: PRODUCCIÓN

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



0711202301170410372800120010990000251770002517713

Razón Social / Nombres y Apellidos: MARIA FERNANDA MALDONADO

Identificación 1706640560001
Fecha 07/11/2023 Placa / Matrícula: Guía
Dirección:

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Cantidad	Descripción	Detalle Adicional	Precio Unitario	Subsidio	Precio sin Subsidio	Descuento	Precio Total
WR126		2.00	TERMOCUPLA CNC "J" o "K" TORNILLO LARGO 2mtrs		13.04	0.00	0.00	1.30	24.78

Forma de pago		Valor
01 - SIN UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO		27.75

Información Adicional	
EMAIL:	ma-fermaldonado@hotmail.com
DIRECCION:	EL JUNCAL #116 Y DE LOS EUCALIPTOS
TELEFONO:	2807908
REFERENCIA:	PAGO CON APP DEUNA
CONTRIBUYENTE RÉGIMEN	RIMPE

SUBTOTAL 12%	24.78
SUBTOTAL 0%	0.00
SUBTOTAL NO OBJETO DE IVA	0.00
SUBTOTAL EXENTO DE IVA	0.00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	24.78
TOTAL DESCUENTO	1.30
ICE	0.00
IVA 12%	2.97
TOTAL DEVOLUCION IVA	0.00
IRBPNR	0.00
PROPINA	0.00
VALOR TOTAL	27.75
VALOR TOTAL SIN SUBSIDIO	0.00
AHORRO POR SUBSIDIO: (Incluye IVA cuando corresponda)	0.00

Figura 33 Factura 7

NO TIENE LOGO

R.U.C.: 1300939194001
FACTURA

No. 001-002-000040239
NÚMERO DE AUTORIZACIÓN
0711202301130093919400120010020000402390004023913

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN: 07/11/2023 14:14:54
AMBIENTE: PRODUCCIÓN
EMISIÓN: NORMAL
CLAVE DE ACCESO

Ferrin Zambrano Mariana Del Jesus
Ferrin Zambrano Mariana Del Jesus
Dirección Matriz: Av. Galo Plaza Lasso N66-171 Y Los Cerezos
Dirección Sucursal: Av. Galo Plaza Lasso N66-171 Y Los Cerezos
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD SI
Agente de Retención Resolución No. 0

0711202301130093919400120010020000402390004023913

Razón Social / Nombres y Apellidos: Maria Fernanda Maldonado Jaramillo
Identificación: 1706640560001
Fecha: 07/11/2023 Placa / Matrícula: Guía
Dirección: El Juncal 118 Y Av. De Los Eucaliptos

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Cantidad	Descripción	Detalle Adicional	Precio Unitario	Subsidio	Precio sin Subsidio	Descuento	Precio Total
PIRO-029		4,00	Termocupla Tipo K C/Tornillo Cnc		9,50	0,00	0,00	3,80	34,20
Información Adicional									
Agente de Retención: No. Resolución: 0									
Forma de pago		Valor							
20 - OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO		38,30							
SUBTOTAL 12%									34,20
SUBTOTAL 0%									0,00
SUBTOTAL NO OBJETO DE IVA									0,00
SUBTOTAL EXENTO DE IVA									0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS									34,20
TOTAL DESCUENTO									3,80
ICE									0,00
IVA 12%									4,10
TOTAL DEVOLUCION IVA									0,00
IRBPNR									0,00
PROPINA									0,00
VALOR TOTAL									38,30
VALOR TOTAL SIN SUBSIDIO									0,00
AHORRO POR SUBSIDIO: (Incluye IVA cuando corresponda)									0,00

Figura 34 Factura 8



ACEROS INDUSTRIALES
HUGO GUERRERO B

R.U.C: 1801835495001

FACTURA

No.: 002002000059326

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN
1810202301180183549500120020020000593260216846015

AMBIENTE: PRODUCCION

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



1810202301180183549500120020020000593260216846015

HILDA MAGDALENA MANZANO NUNEZ

Dir Matriz: AV GALO PLAZA LASSO LOTE 7 Y AV DIEGO DE VASQUEZ

Dir Sucursal: AV GALO PLAZA LASSO LOTE 7 Y AV DIEGO DE VASQUEZ

Tel. Sucursal: 023500570

E-Mail Sucursal: aceroshgb2@hotmail.com

Contribuyente Especial No.:

AGENTE DE RETENCION RESOLUCIÓN Nro. 1

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: SI

Razón Social / Nombres y Apellidos: VALAREZO GARCES ALFREDO GUILLERMO Identificación: 1713449377

Moneda : DOLAR

Fecha Emisión: 18/10/2023 Referencia: tr Guía Remisión:

Código	Cant	Descripción	Unid.	Precio Unitario	% Desc.	Desc.	Precio Total
INOXR3/16	0,200	AC INOX 304 RED 3/16x 1000	KG	5,489225	0,00	0,00	1,10
SUBTOTAL 12,00%							1,10
SUBTOTAL 0%							0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS							0,00
DESCUENTO							0,00
IVA 12,00%							0,13
TRANSPORTE							0,00
VALOR TOTAL							1,23

INFORMACIÓN ADICIONAL

Dirección: CUMBAYA / DE LOS CEDROS 11 B

Télefono:

Email:

Vendedor: VIVIANA

Facturador: VIVIANA

Observación:

Forma de Pago	Valor	Plazo	Tiempo
TARJETA DE DÉBITO	1,23	0	

CANCELADO

R.U.C: 1801835495001

Figura 35 Factura 9

MARICELA REYES TIGUA - ANCLAJES DEL VALLE
 1714404116001
 CUMBAYA, ELOY ALFARO OE1-28 Y CHIMBORAZO
 E-mail: acerosdelvalle@hotmail.com Telf: 0985388987
 OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD : No

Factura Electronica
 No: 002-100-000021605

CLAVE _____

FECHA: 06/10/2023 COD CLTE: 13
 CLIENTE: ALFREDO VALAREZO GARCES FORMA DE PAGO: Contado
 RUC: 1713449377 FECHA VENCIMIENTO: 06/10/2023
 DIR: CUMBAYA

Cantidad	Descripción Producto	Precio	Importe
1.00	ABRAZADERA U GALV. 5/16 X 1 3/4 X 3-53279	1.5179	1.52



GRACIA POR SU COMPRA
CANCELADO

UNO CON 70/100

	SUBTOTAL:	1.52
	IVA 12%:	0.18
	TOTAL:	1.70

ANCLAJES DEL VALLE CLIENTE
jmiranda@usfq.edu.ec
 Nota:

Figura 36 Factura 10

MARICELA REYES TIGUA - ANCLAJES DEL VALLE
 1714404118001
 CUMBAYA, ELOY ALFARO OE1-28 Y CHIMBORAZO
 E-mail: acerosdelvalle@hotmail.com Telf: 0985388987
 OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD : No

Factura Electronica
 No: 002-100-000021599
 0610202301171440411800120021000000215991234567011

CLAVE 0610202301171440411800120021000000215991234567011

FECHA: 06/10/2023 COD CLTE: 13
 CLIENTE: ALFREDO VALAREZO GARCES FORMA DE PAGO: Contado
 RUC: 1713449377 FECHA VENCIMIENTO: 06/10/2023
 DIR: CUMBAYA

Cantidad	Descripción Producto	Precio	Importe
4.00	ARANDELA PLANA INOXIDABLE 10MM	0.1339	0.54
4.00	PERNO HEXAGONAL INOX 10 X 20	0.6250	2.50
3.00	PERNO HEXAGONAL INOX 6 X 20	0.2679	2.14
6.00	ARANDELA PLANA INOXIDABLE 6MM	0.0625	0.50



GRACIA POR SU COMPRA CANCELADO

SEIS CON 66/100

	SUBTOTAL:	5.68
	IVA 12%:	0.68
	TOTAL:	6.36

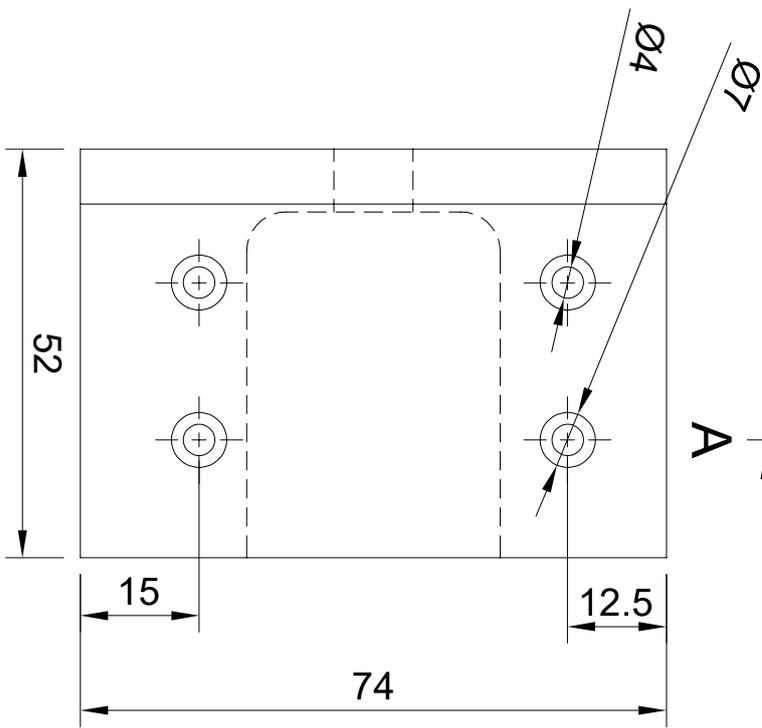
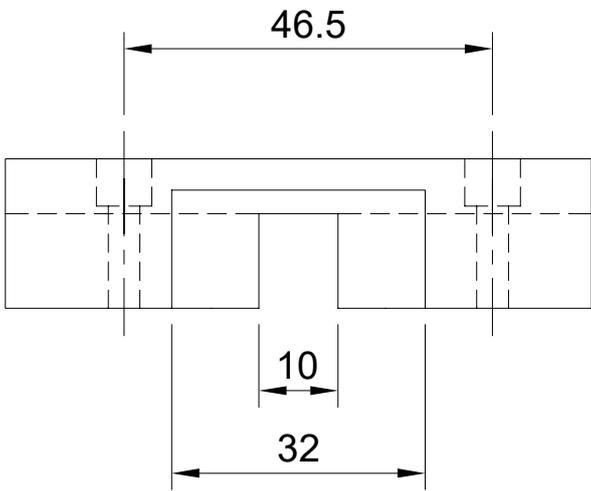
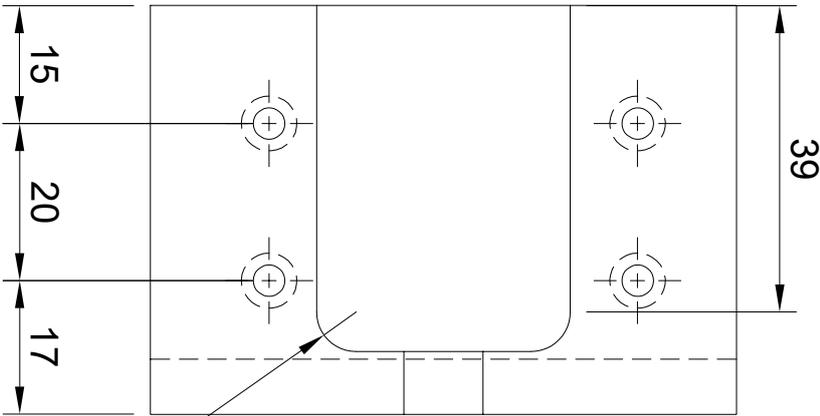
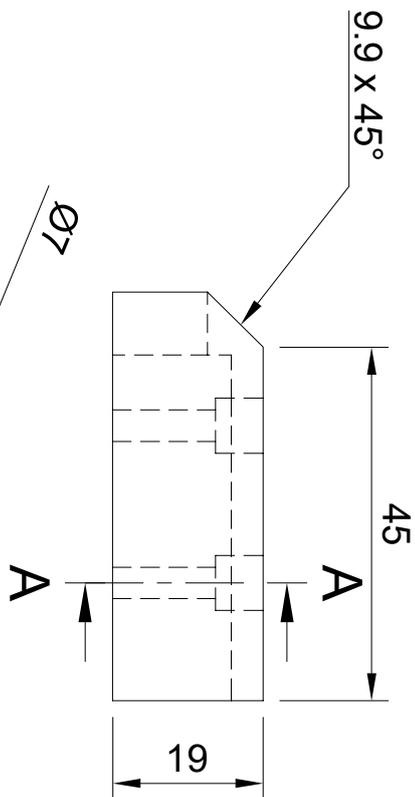
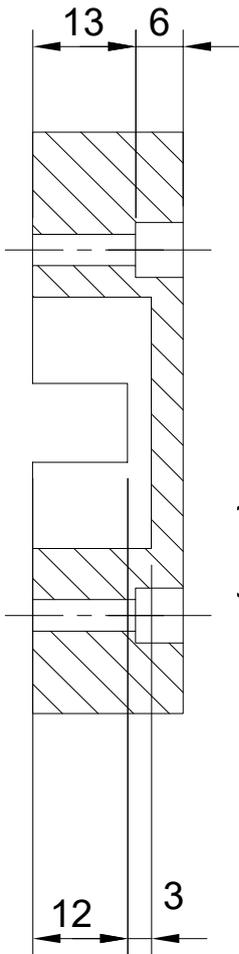
ANCLAJES DEL VALLE CLIENTE
 jamiranda@usfq.edu.ec

Nota:

Figura 37 Factura 11

APÉNDICE 3.4: Planos

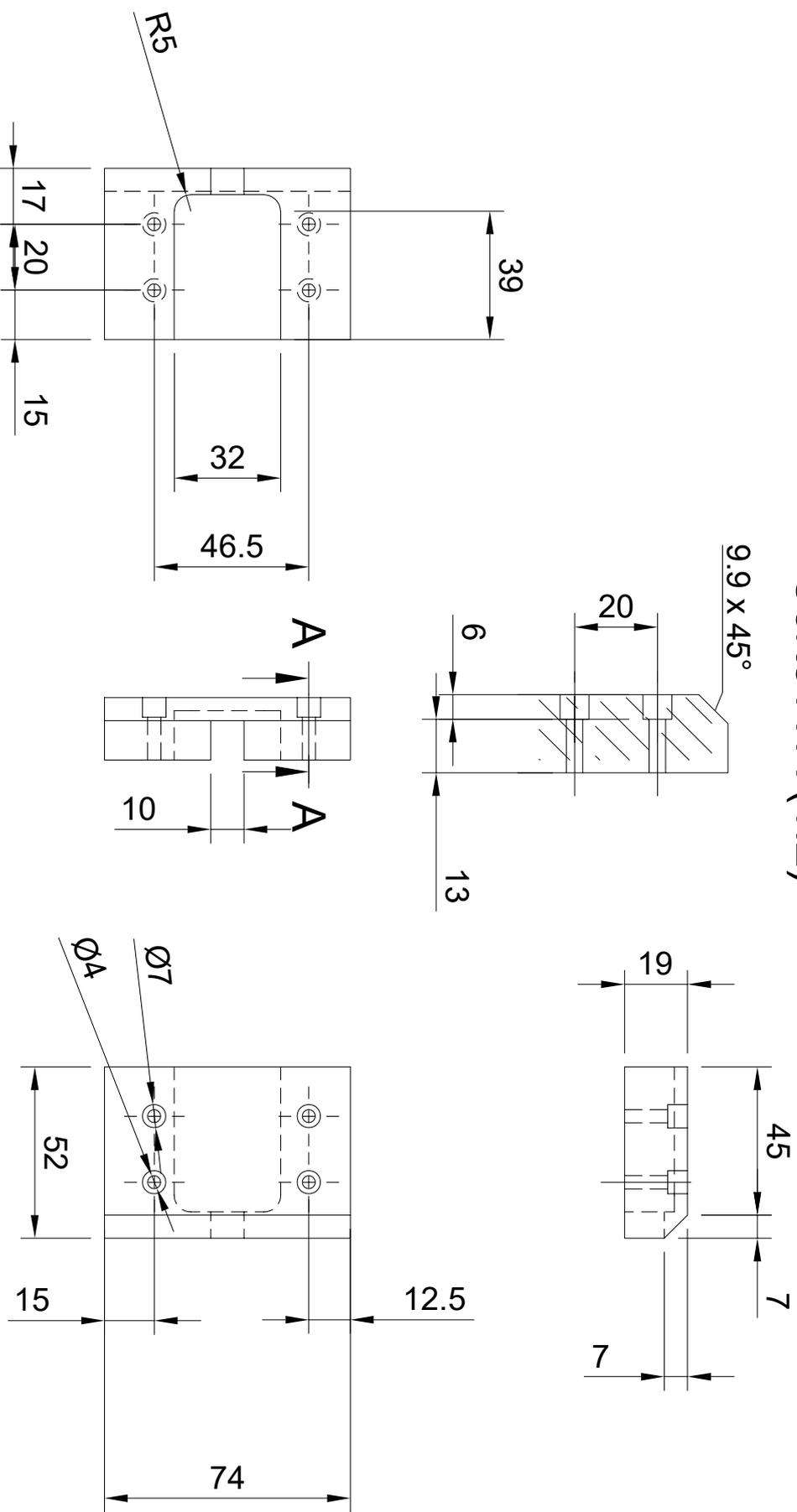
Corte A-A (1:1)



NOTAS:
- Eliminar aristas vivas.

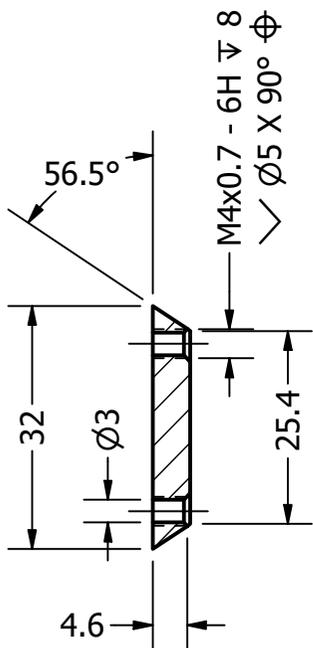
Tratamientos Superficiales Anodizado	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Christian Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González	Revisado por: Lorena Bejarano	Material Aluminio 6061
	UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	12/4/2023	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Código A01
			Denominación Sujeción Termocuplas izquierdo	Escala 1 : 1
				No. 1

Corte A-A (1:2)

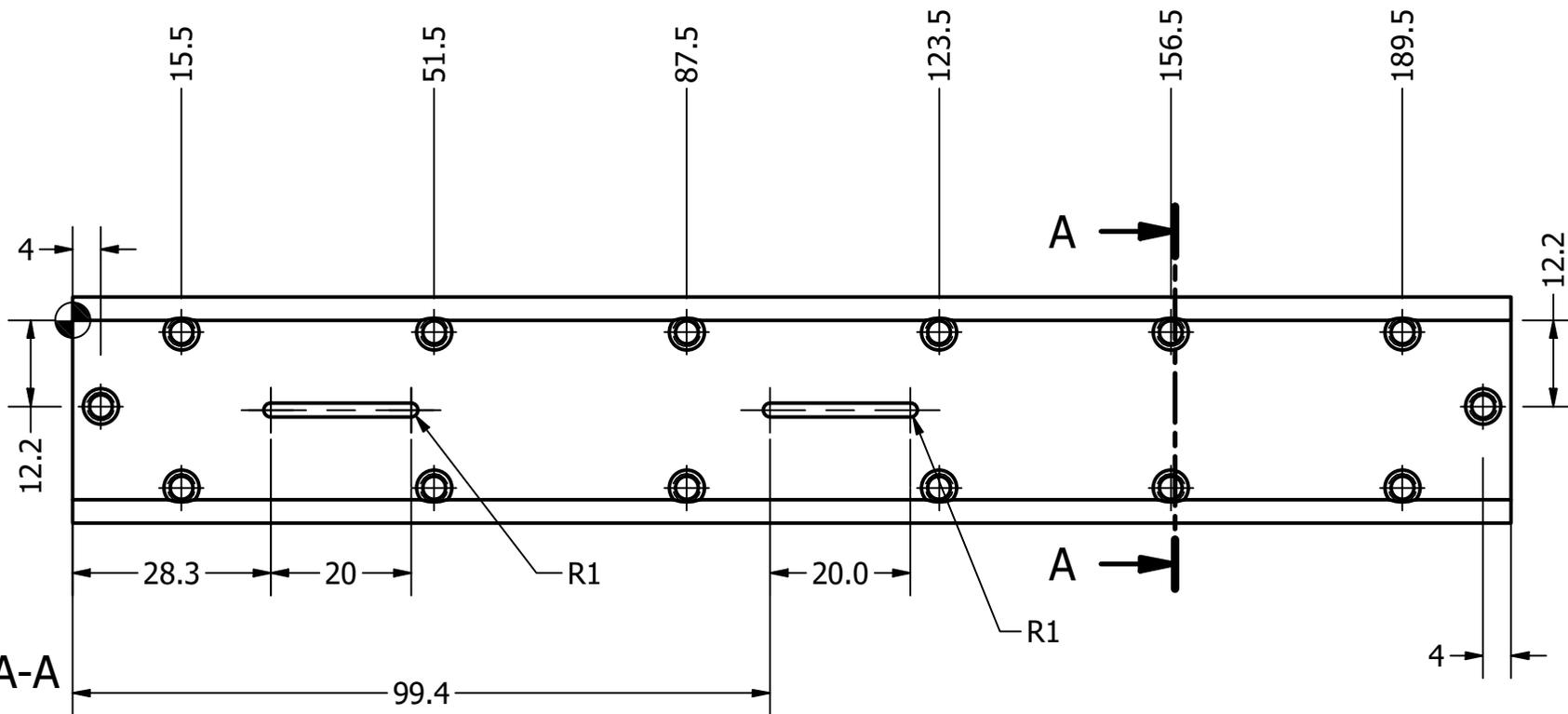


Tratamientos Superficiales Anodizado	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Christian Jaramillo-Anahí Barreiro Juan Jaramillo-Diego González	Revisado por: Lorena Bejarano	Material Aluminio 6061
			Aprobado por: Alfredo Valarezo	Código A02
			Denominación Sujeción Termocuplas derecho	Escala 1:2
				No. 2
				
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO				

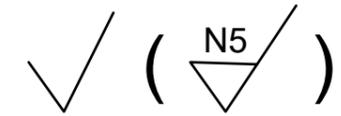
NOTAS:
- Eliminar aristas vivas.



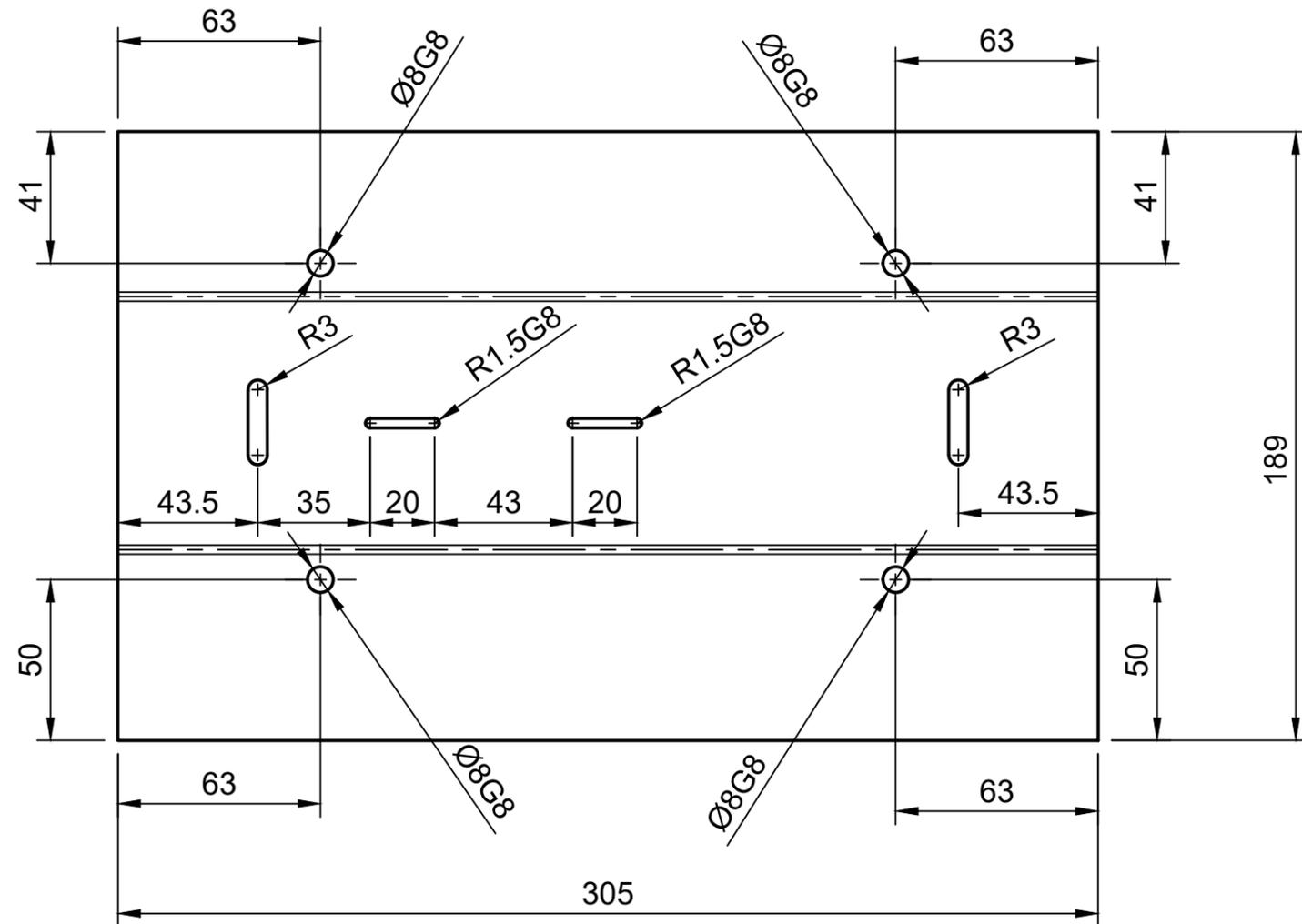
CORTE PARCIAL A-A
 ESCALA 1 : 1



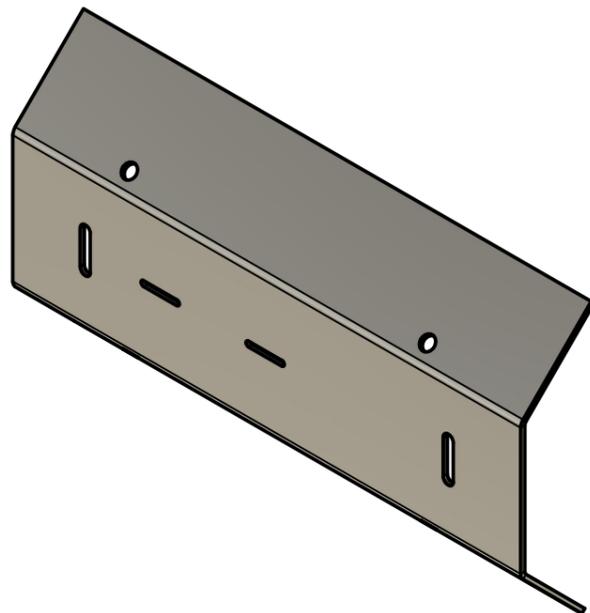
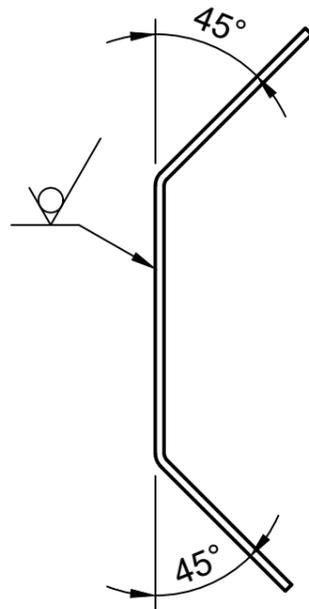
Tratamiento Superficial: Anodizado	Tolerancia General: ±0.1	Creado por: Anahi Barreto, Diego Gonzales, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material: Aluminio 6061	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Codigo: D03	
		Aprobado por: Alfredo Valerazo	Escala: 1:1	
		Denominacion: Placa Lente	No 4	



Plancha de acero antes del doblez



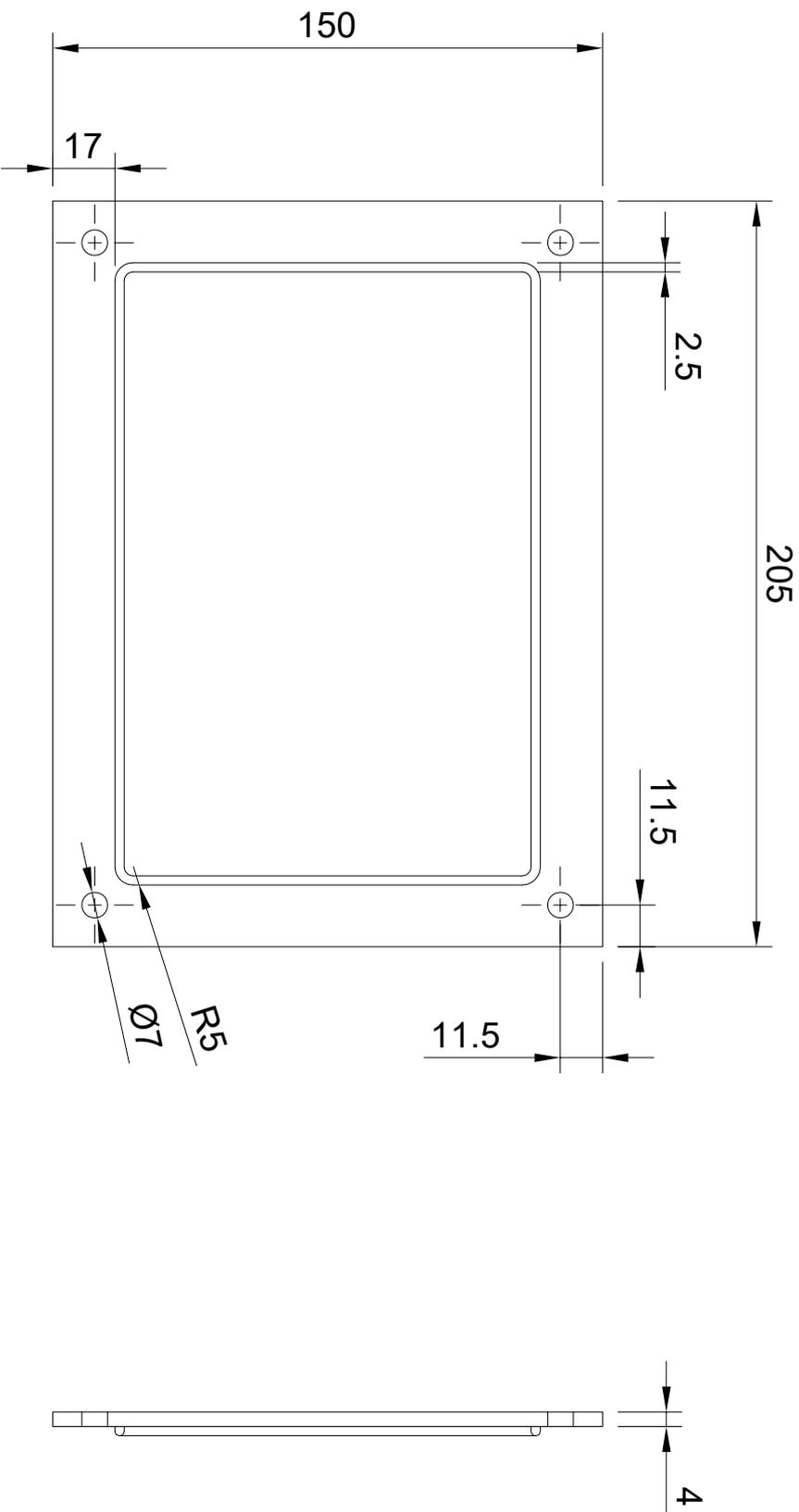
Plancha de acero después del doblez



NOTAS:

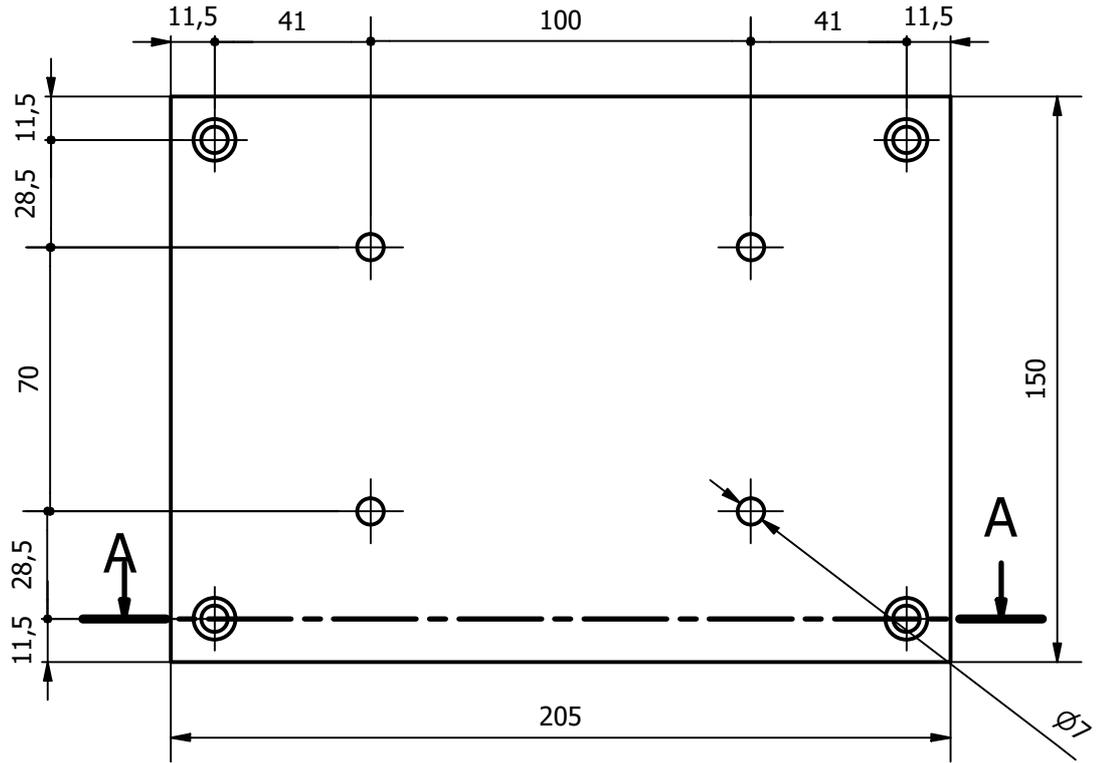
- Eliminar aristas vivas.
- Radios de acuerdo 0,3 mm.
- Pieza a partir de plancha de acero de 3mm de espesor.
- Realizar agujeros antes del doblez.

Tratamiento Superficial N.A.	Tolerancia General ±0,1 mm	Creado por: Christiam Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González 5/12/2023	Material Acero Inoxidable 304
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Código G03
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Denominación Protector termico
		Escala 1:2	No. 5



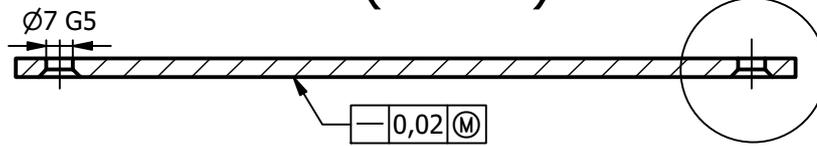
NOTAS:
 - Eliminar aristas vivas.

Tratamientos Superficiales		Tolerancia General		 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO
Anodizado		± 0.01		
Creado por:		Revisado por:		Material
Christiam Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González		Lorena Bejarano		
12/7/2023		12/7/2023		
Aprobado por:		Código		Aluminio 6061
Alfredo Vejarano		H04		
Denominación		Escala		No.
Tapa serpiente		1:2		
				6

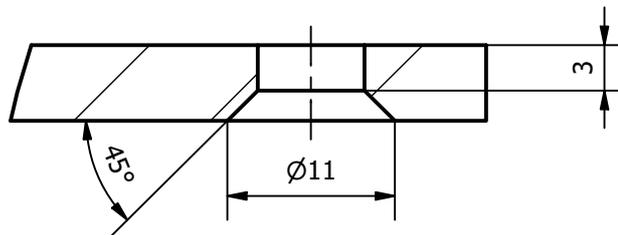


A-A (1 : 2)

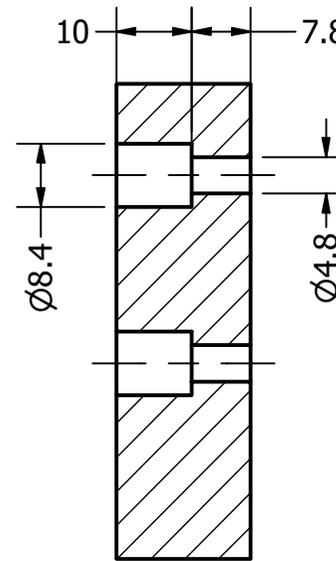
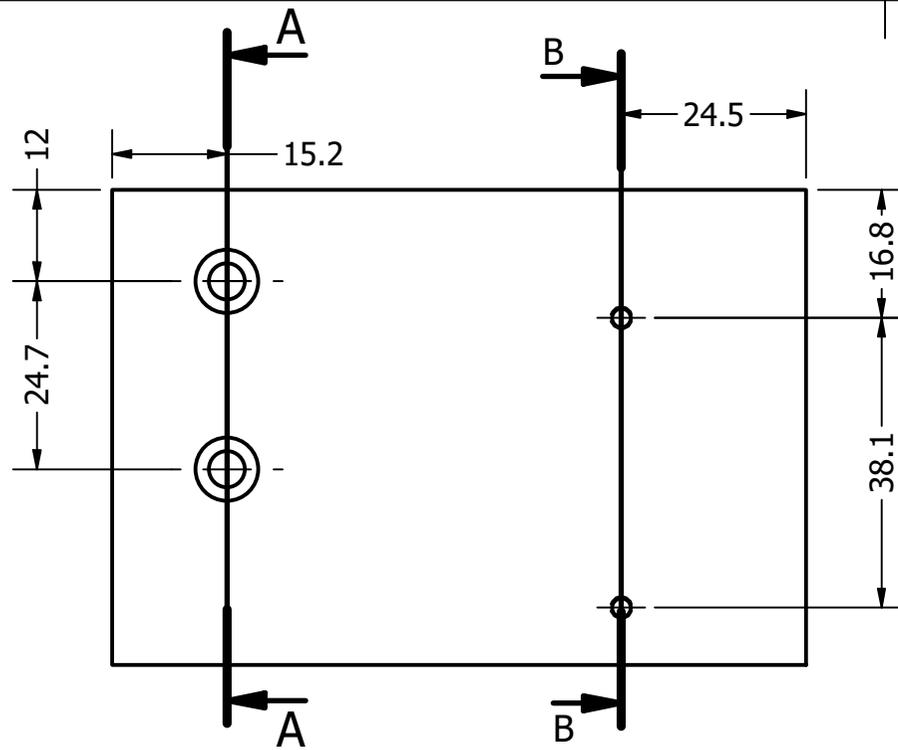
B



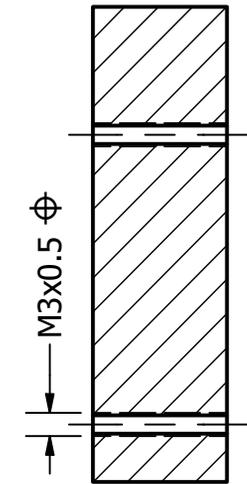
Detalle B (2 : 1)



Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código I04		
	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 1:2	No. 7	
	Denominación Base caja ICP			



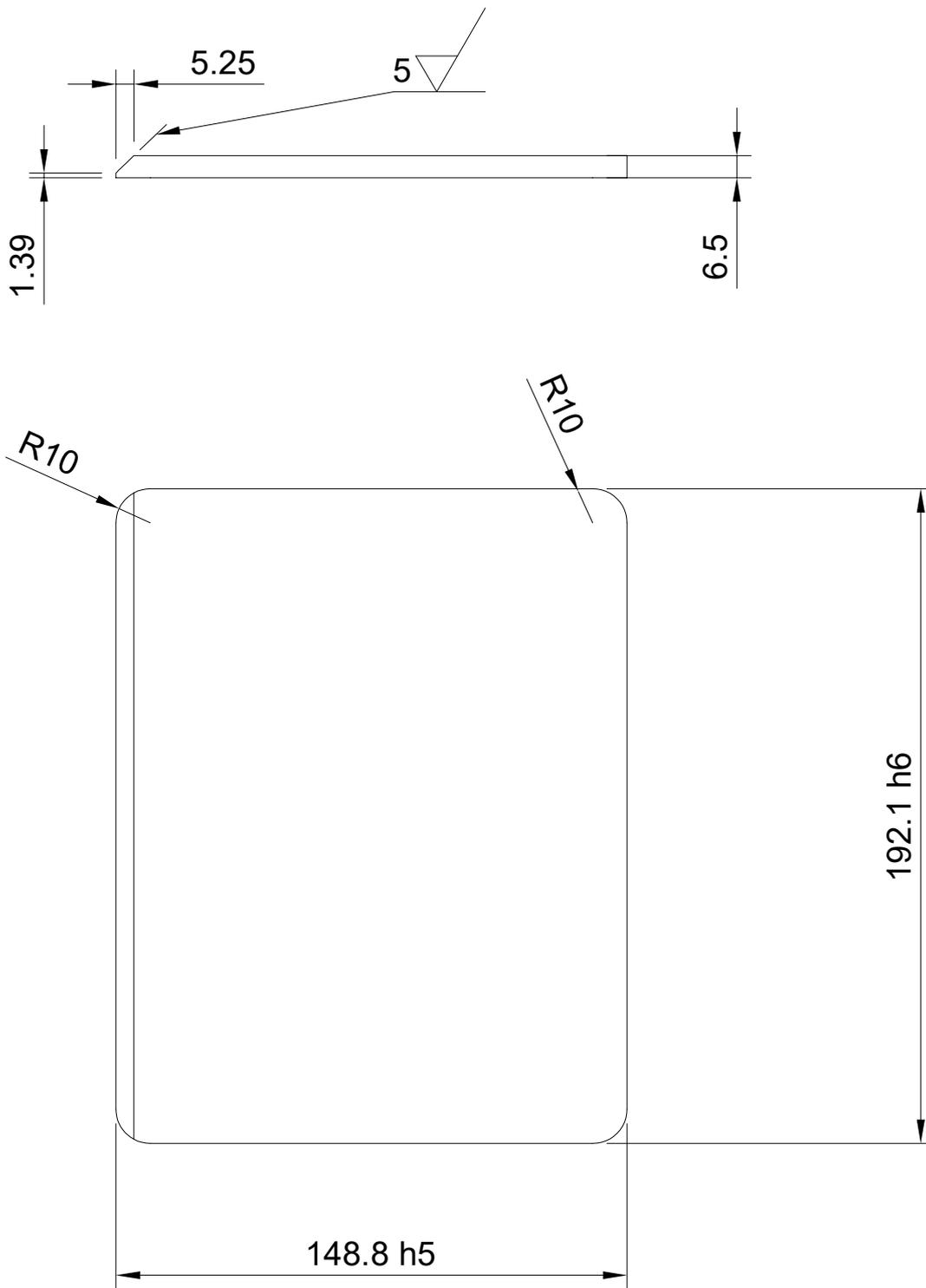
CORTE PARCIAL A-A
SCALA 1 : 1



CORTE PARCIAL B-B
SCALA 1 : 1

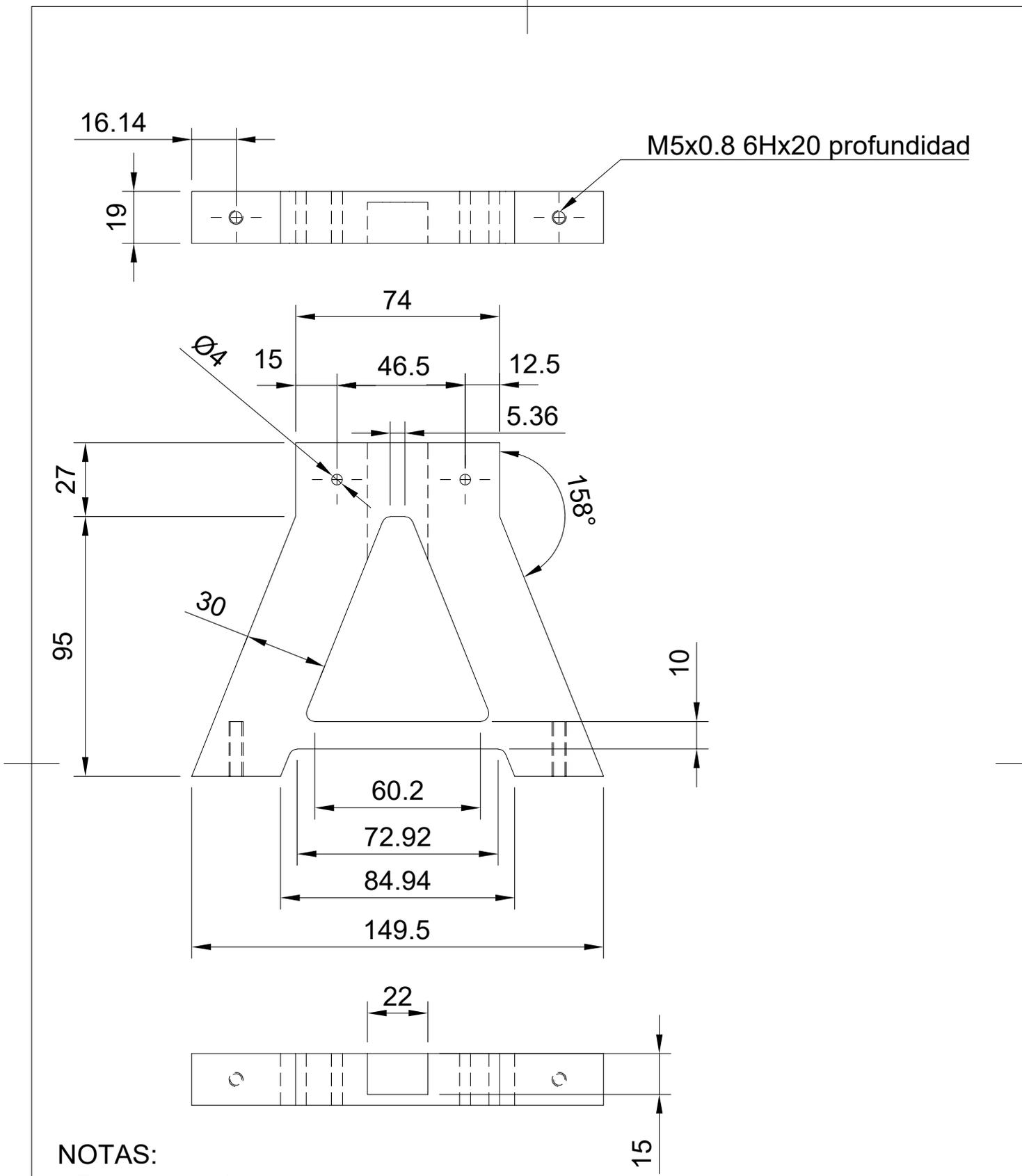


Tratamiento Superficial: N/A	Tolerancia General: ± 0.1	Creado por: Anahi Barreto, Diego Gonzales, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material: Aluminio 6061	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Codigo: M06	
		Aprovado por: Alfredo Valarezo	Escala: 1:1	
		Denominacion: Soporte Laser	No 8	



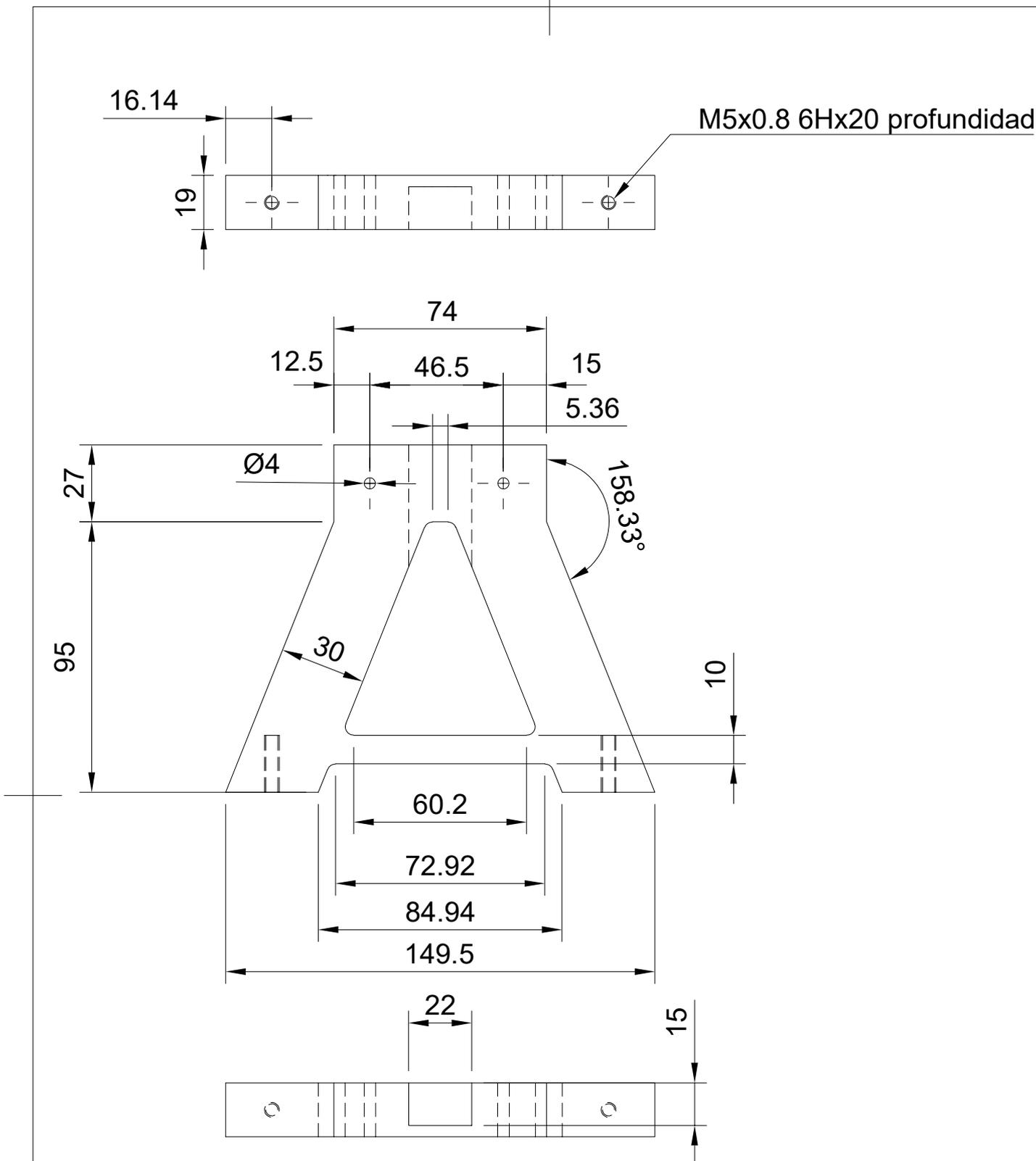
NOTAS:
 - Eliminar aristas vivas.

Tratamientos Superficiales Anodizado	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Christian Jaramillo-Anahi Barreto Juan Jaramillo-Diego González 12/4/2023	Material Aluminio 6061	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Código P06	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo		
		Denominación Tapa Caja	Escala 1:2	No. 9



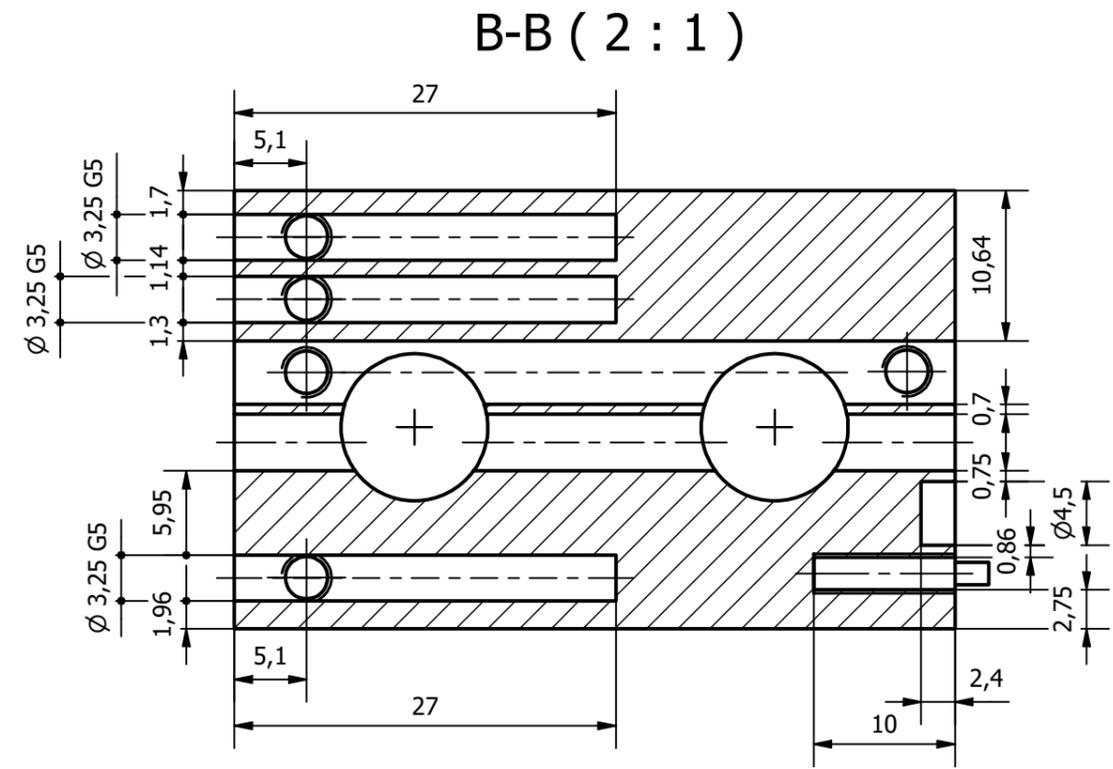
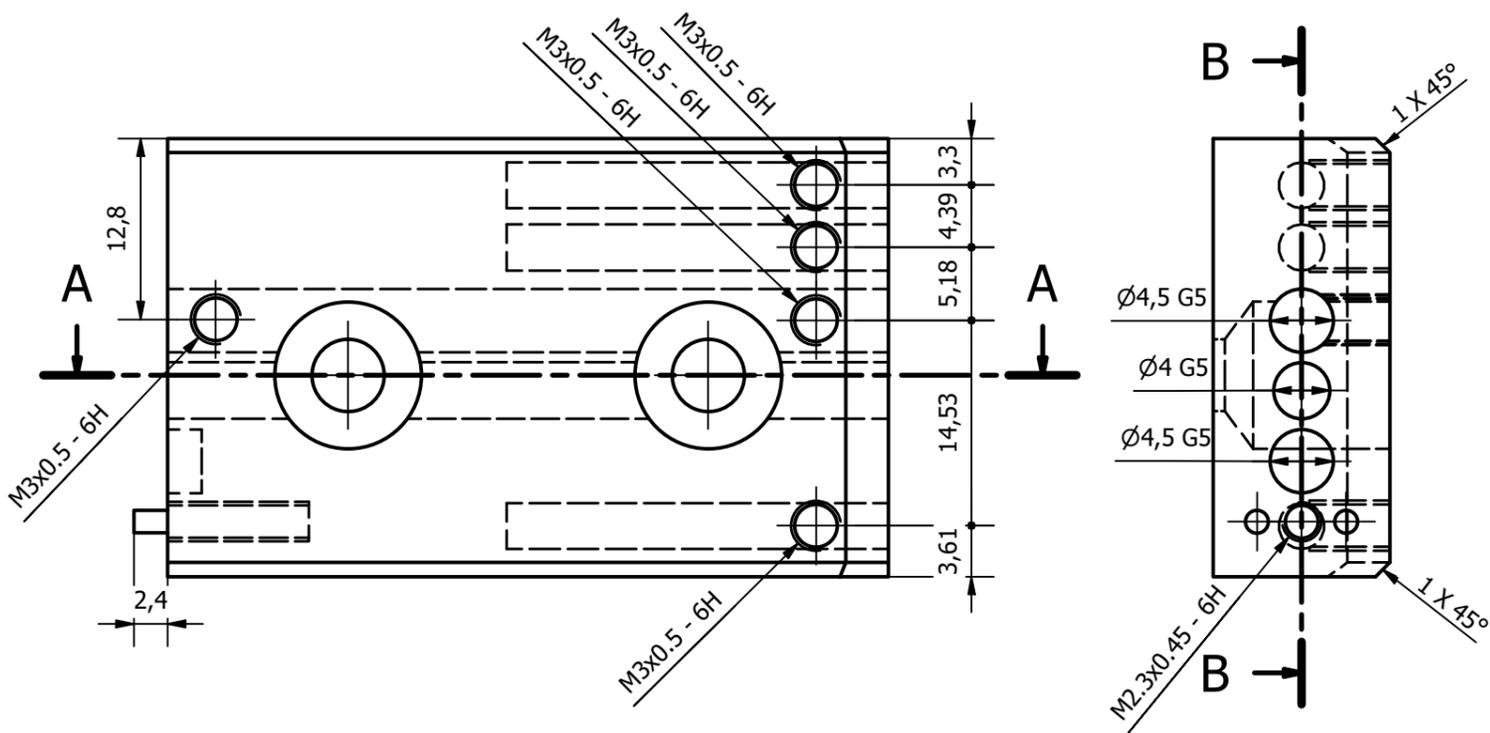
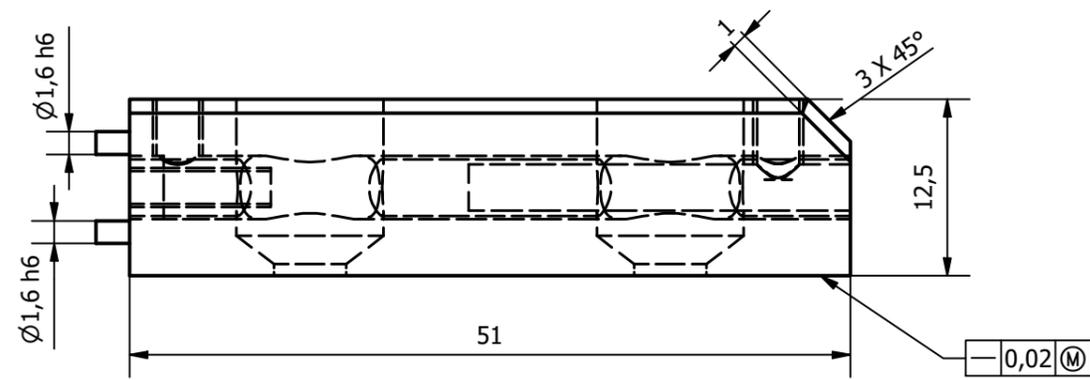
- NOTAS:**
- Eliminar aristas vivas.
 - Radios no acotados son de 3mm.

Tratamientos Superficiales Pavonado	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Christian Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González 12/7/2023	Material Acero A36	
 <p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código Q01	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 1:2	
		Denominación Soporte vertical derecho		

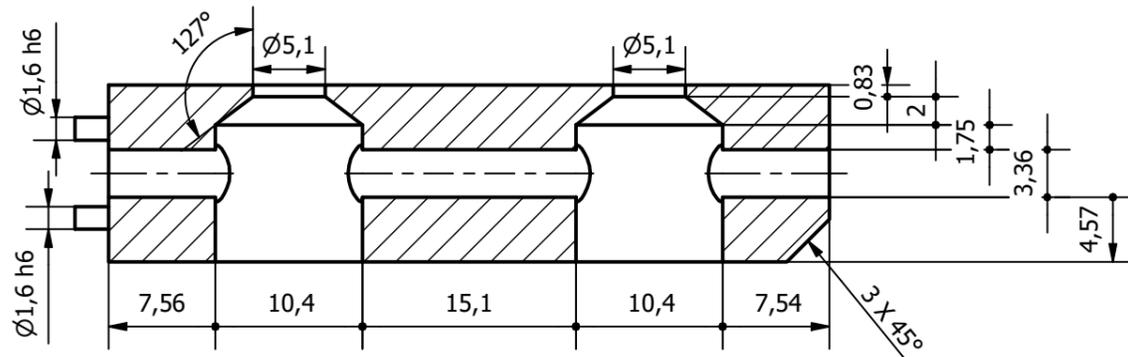


- NOTAS:**
- Eliminar aristas vivas.
 - Radios no acotados son de 3mm

Tratamientos Superficiales Pavonado	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Christian Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González 12/7/2023	Material Acero A36	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO			Revisado por: Lorena Bejarano	
			Código Q02	
			Escala 1:2	
Aprobado por: Alfredo Valarezo Denominación Soporte vertical izquierdo			No. 11	

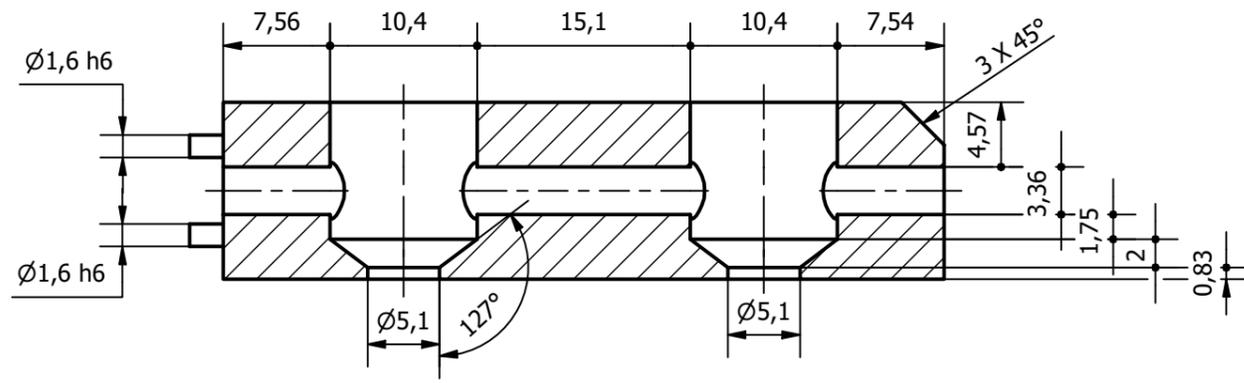


A-A (2:1)

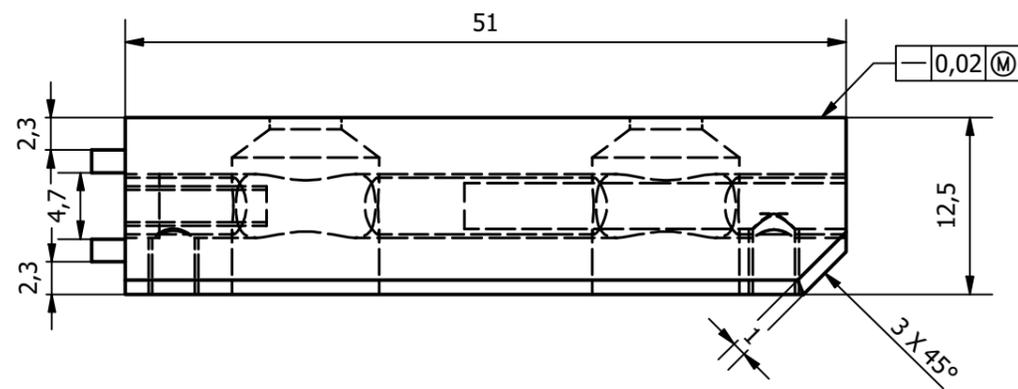
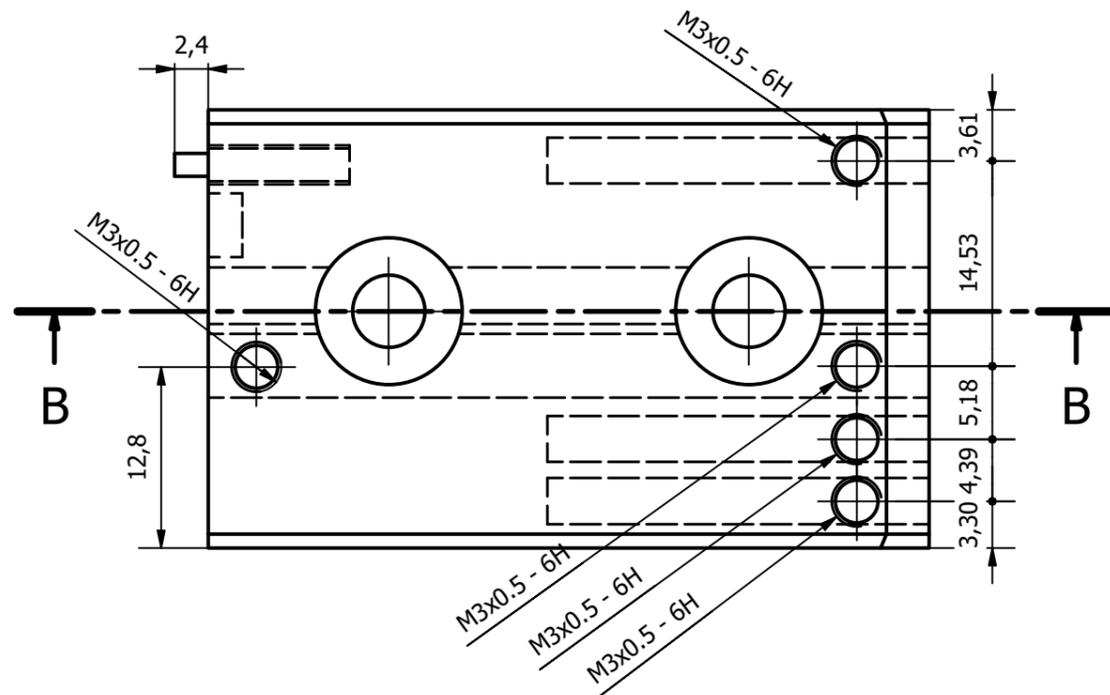
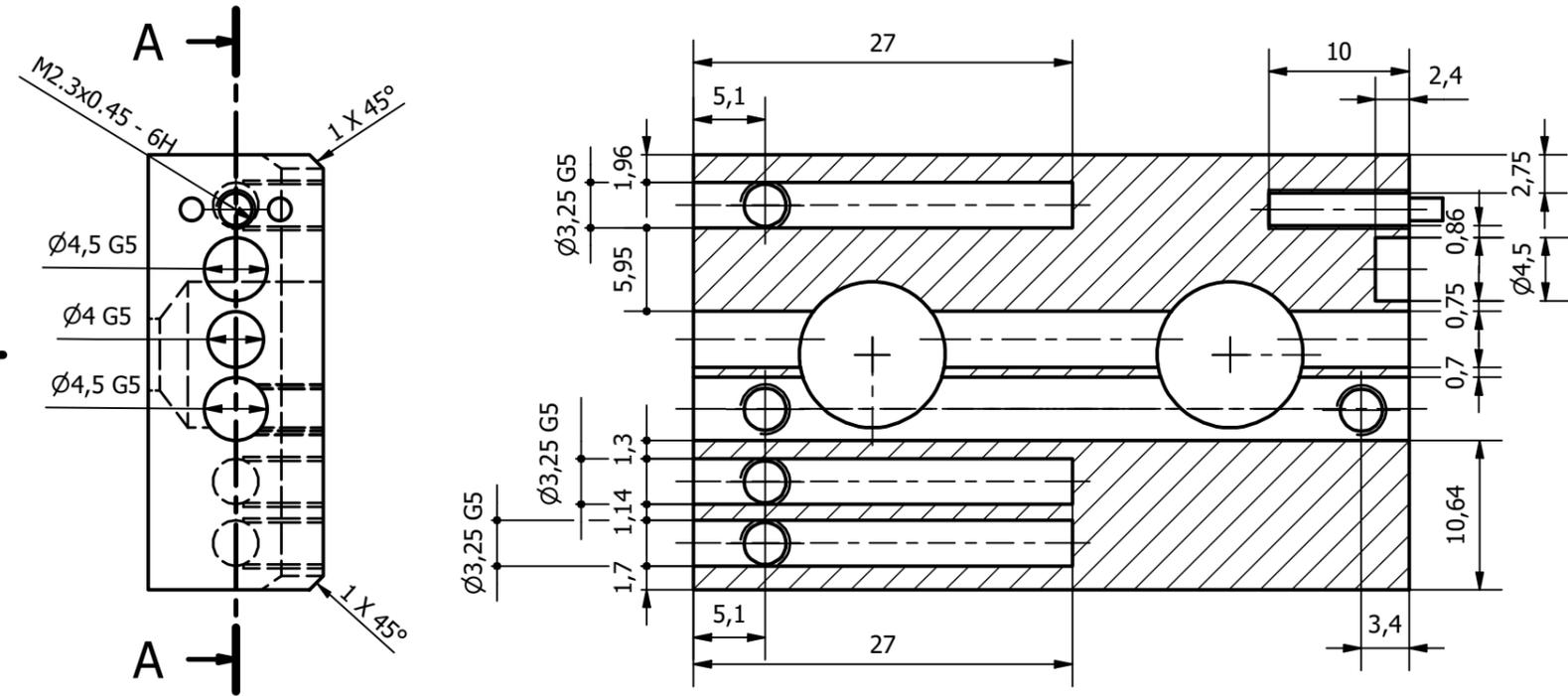


Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01	
	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Denominación Caja sujeción pines	Escala 2:1
		No. 12	

B-B (2 : 1)



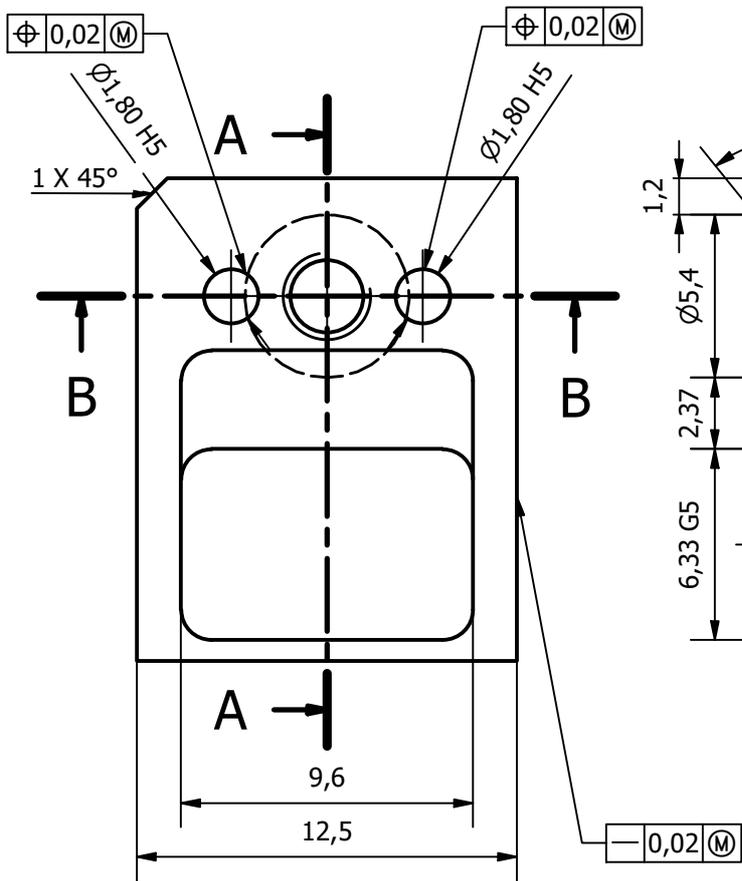
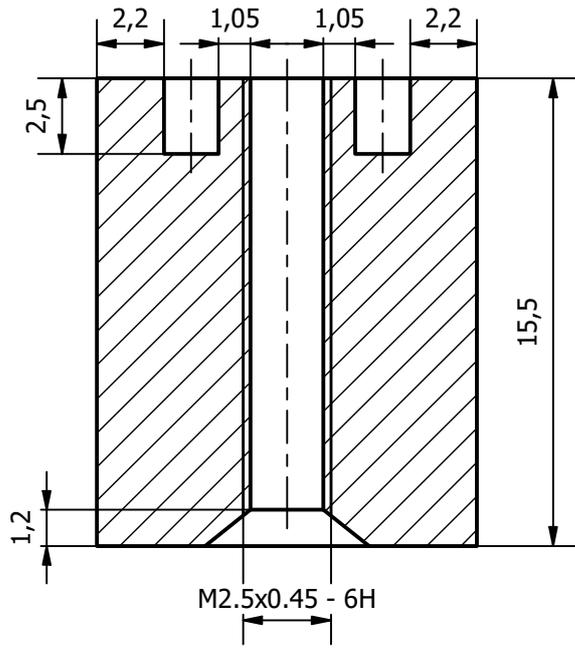
A-A (2 : 1)



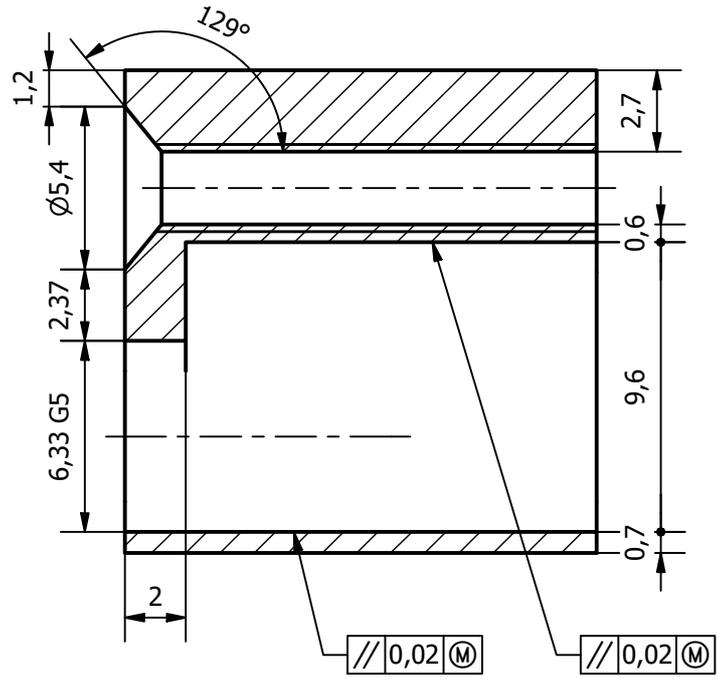
Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código R02	
	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 2:1	No. 13
	Denominación Caja sujeción pines 2		

B-B (4 : 1)

N5



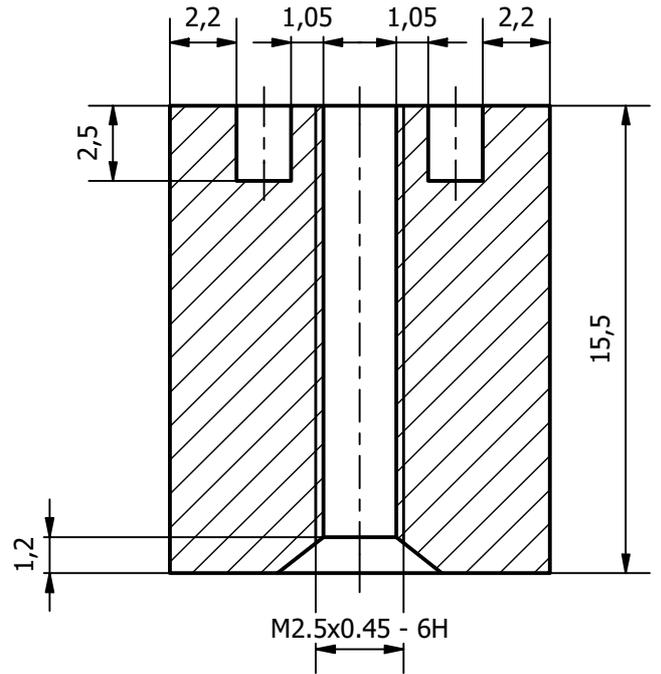
A-A (4 : 1)



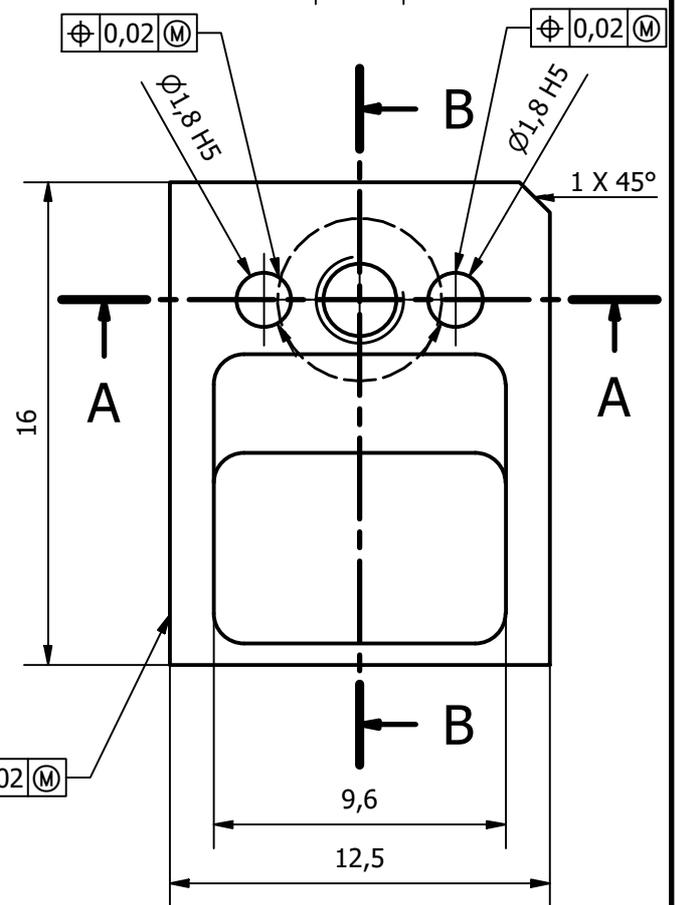
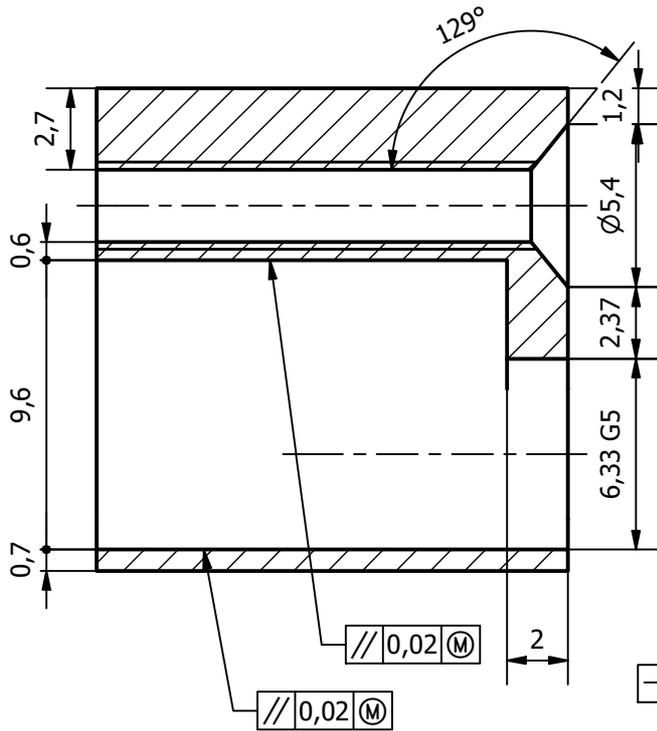
Notas:
Radios no acotados 1 mm

Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061	
<p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01.01	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 4:1	
		Denominación Caja resorte	No. 14	

A-A (4 : 1)



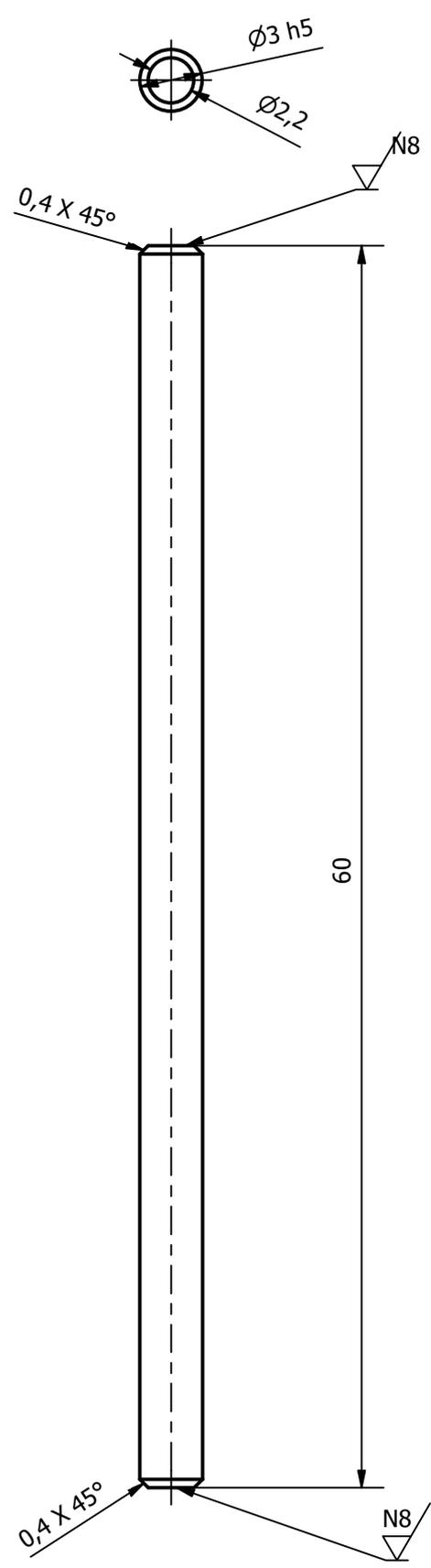
B-B (4 : 1)



Notas:
Radios no acotados 1 mm

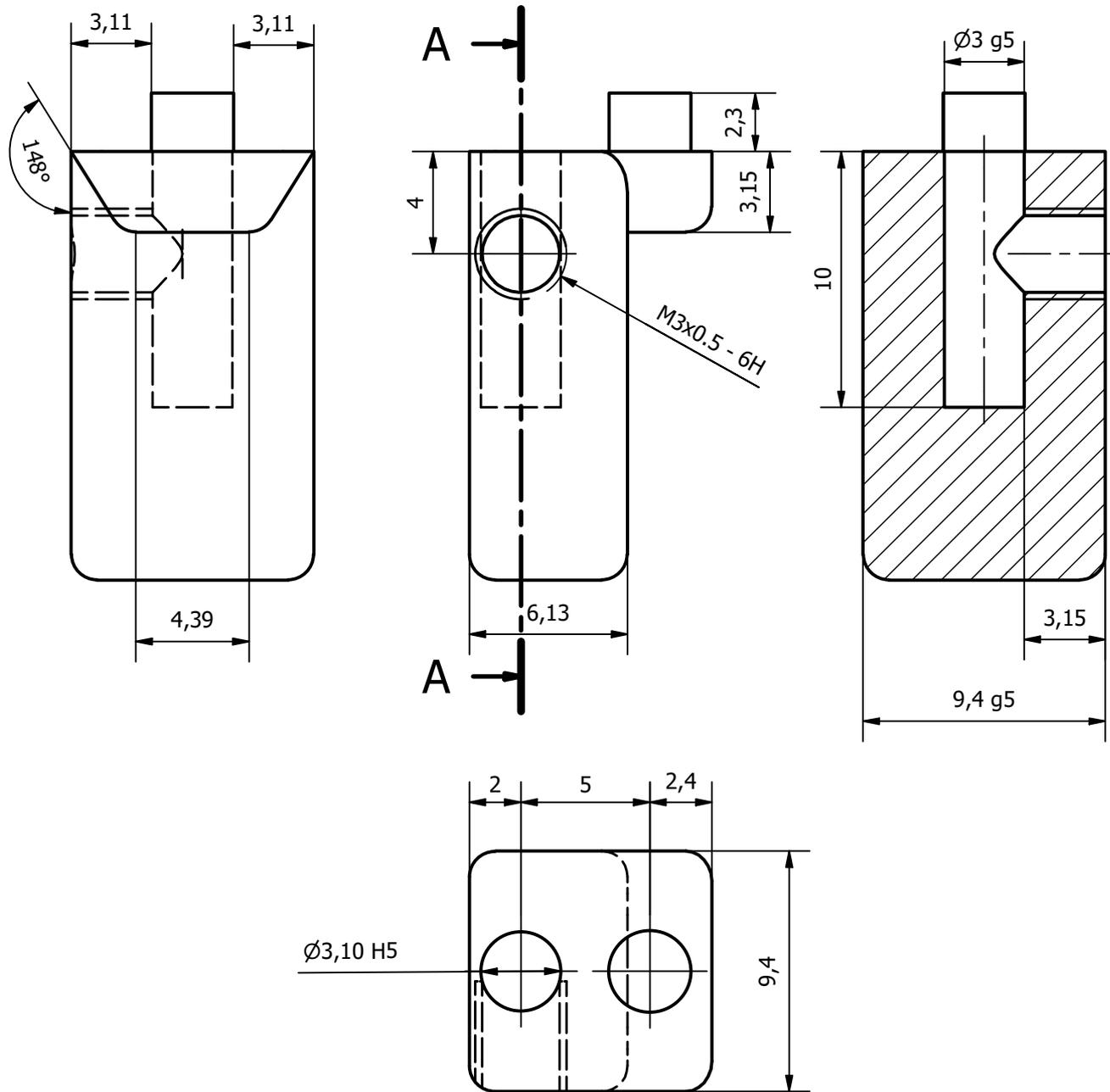
Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código R02.01		
	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 4:1	No. 15	
	Denominación Caja resorte			

N5 / (N8) ^{Limado}



Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Acero Inoxidable 304	
 <p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01/02.02	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 3:1	
		Denominación Cilindro sistema sujeción Muestra	No. 16	

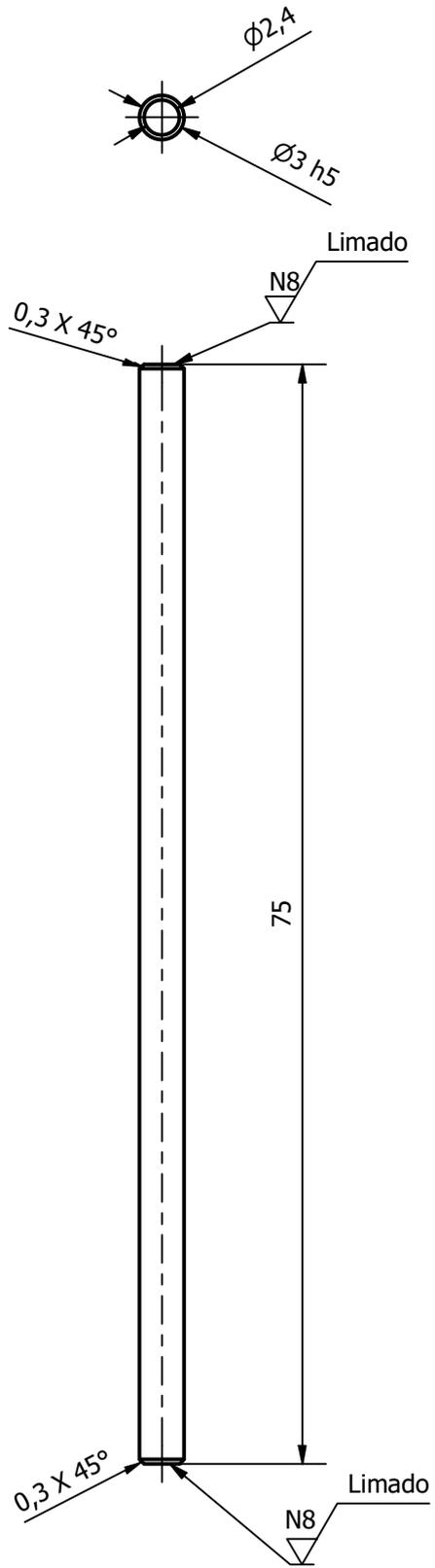
A-A (4 : 1)



Notas:
Radios no acotados 1 mm

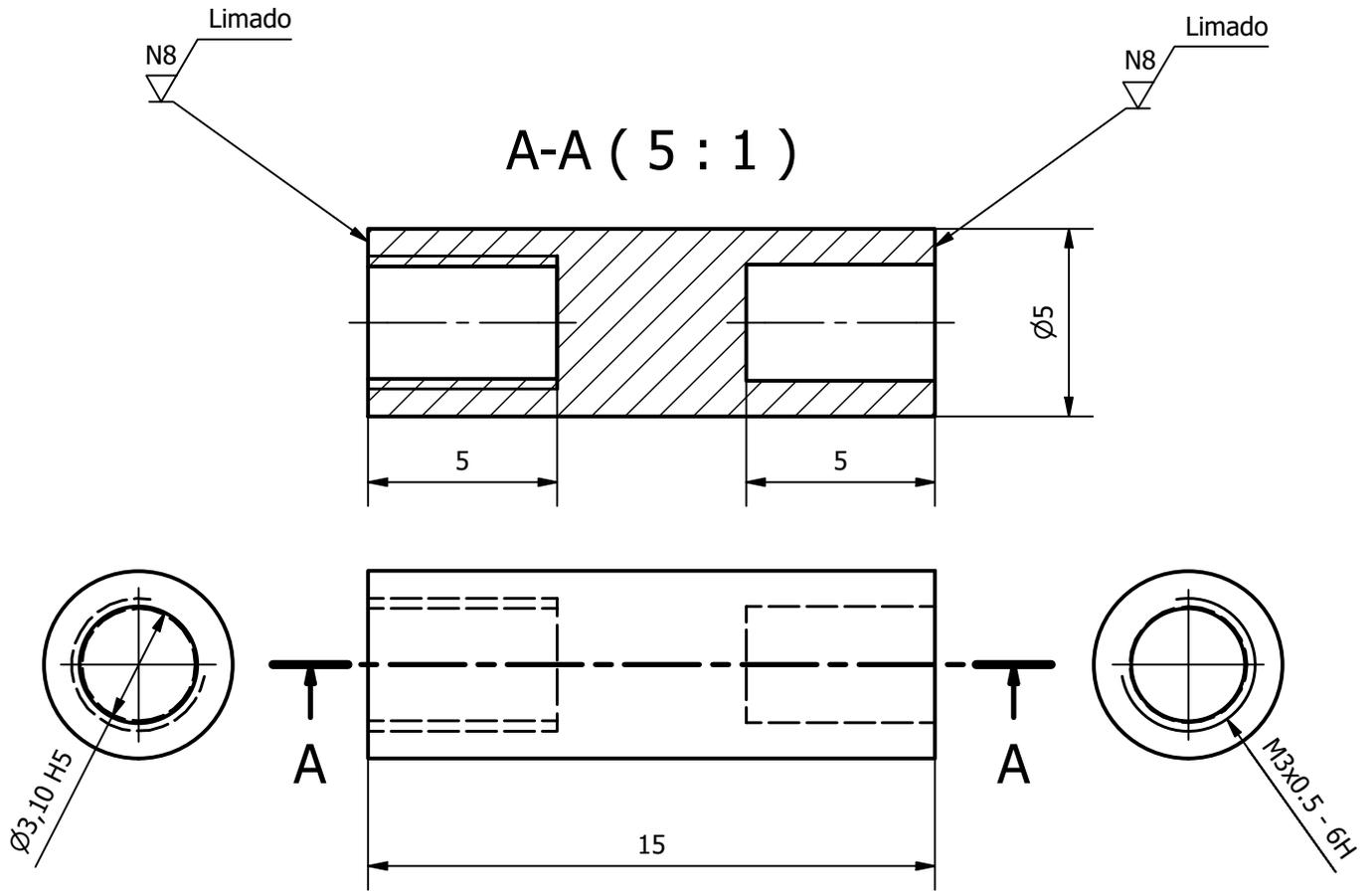
Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Aluminio 6061	
 <p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01/02.03	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 4:1	
		Denominación Cabeza gatillo	No. 17	

N5/ (N8 Limado)

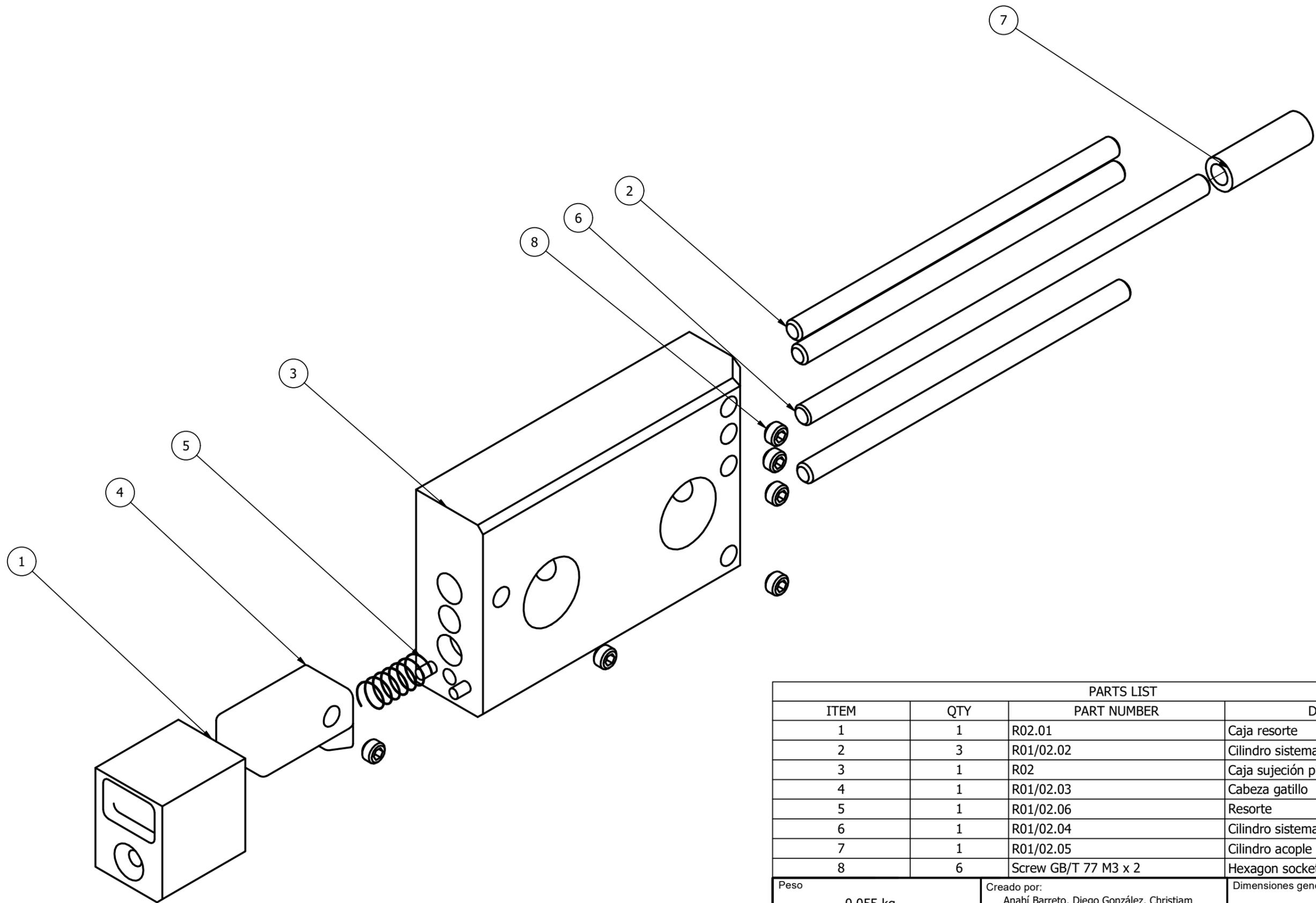


Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Acero Inoxidable 304	
 <p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01/02.04	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 2:1	
		Denominación Cilindro sistema gatillo	No. 18	

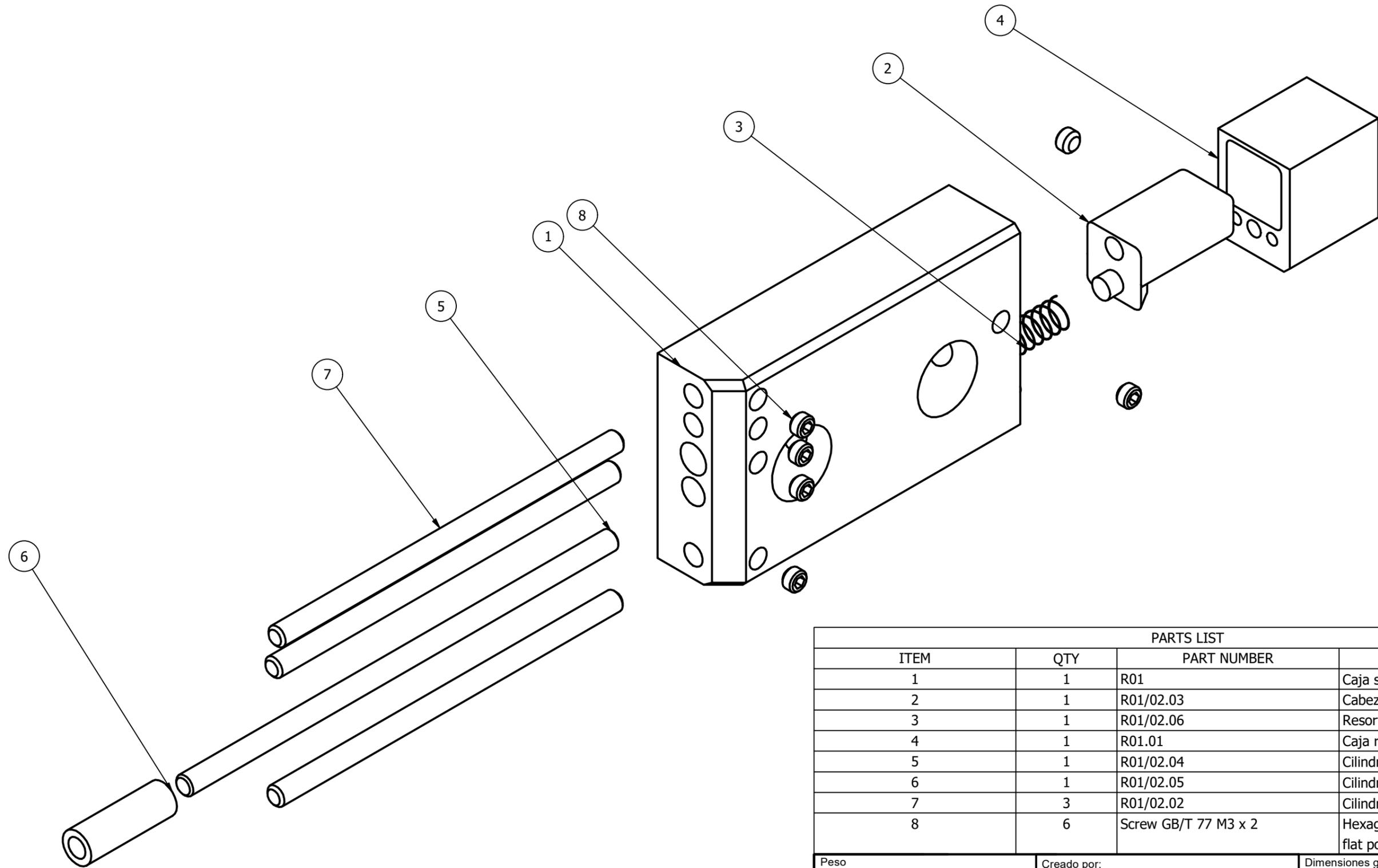
N5/ (N8/ Limado)



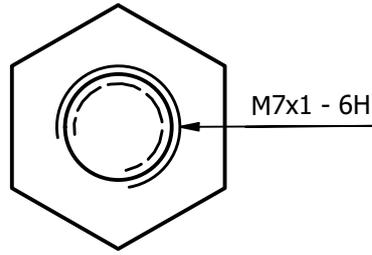
Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Acero inoxidable 304	
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Código R01/02.05	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 5:1	
		Denominación Cilindro acople sujeción	No. 19	



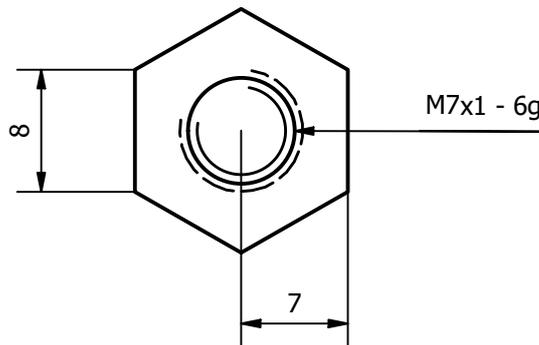
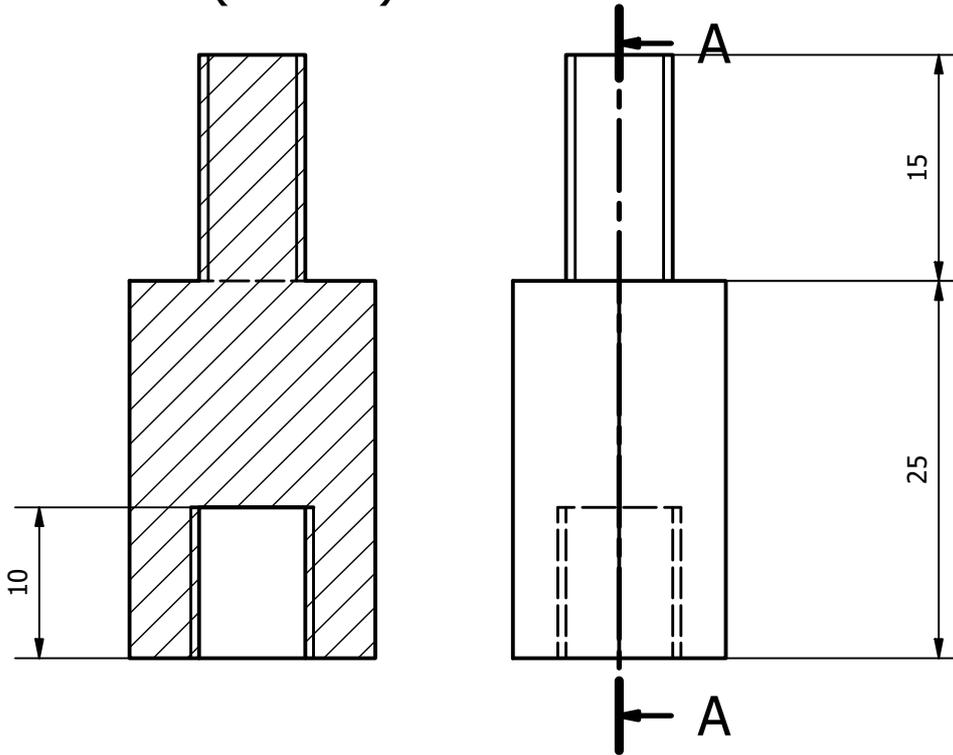
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	R02.01	Caja resorte
2	3	R01/02.02	Cilindro sistema sujeción muestra
3	1	R02	Caja sujeción pines
4	1	R01/02.03	Cabeza gatillo
5	1	R01/02.06	Resorte
6	1	R01/02.04	Cilindro sistema gatillo
7	1	R01/02.05	Cilindro acople sujeción
8	6	Screw GB/T 77 M3 x 2	Hexagon socket set screws with flat point
Peso 0.055 kg		Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Dimensiones generales 99 x 31 x 12.5 mm
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Código E_R02.01-06
		Denominación Sistema sujeción pines	Escala 2:1



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	R01	Caja sujeción pines
2	1	R01/02.03	Cabeza gatillo
3	1	R01/02.06	Resorte
4	1	R01.01	Caja resorte
5	1	R01/02.04	Cilindro sistema gatillo
6	1	R01/02.05	Cilindro acople sujeción
7	3	R01/02.02	Cilindro sistema sujeción muestra
8	6	Screw GB/T 77 M3 x 2	Hexagon socket set screws with flat point
Peso 0.055 kg		Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Dimensiones generales 99 x 31 x 12.5 mm
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Revisado por: Lorena Bejarano	Código E_R02.01-06
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 2:1
		Denominación Sistema sujeción pines	No. 21



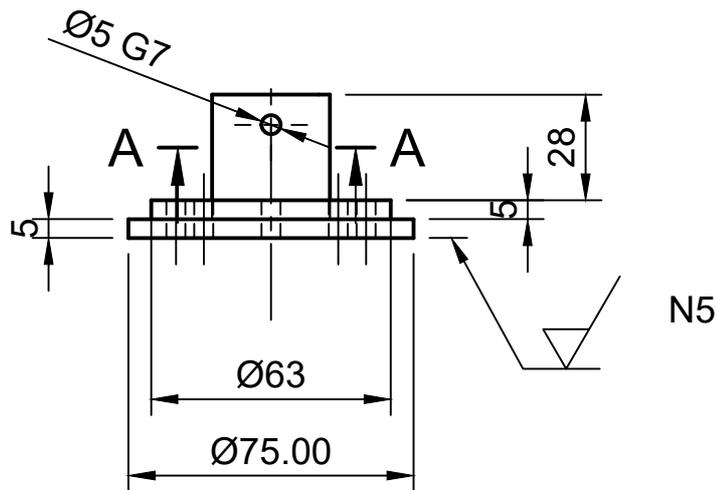
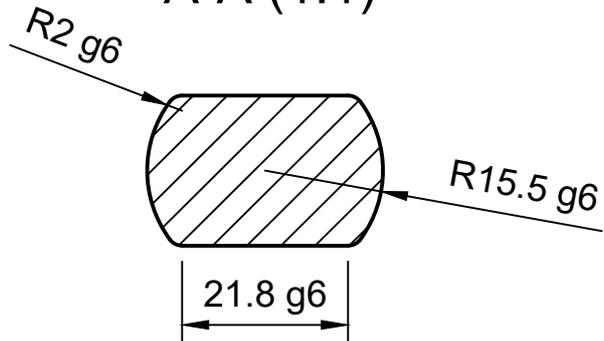
A-A (2 : 1)



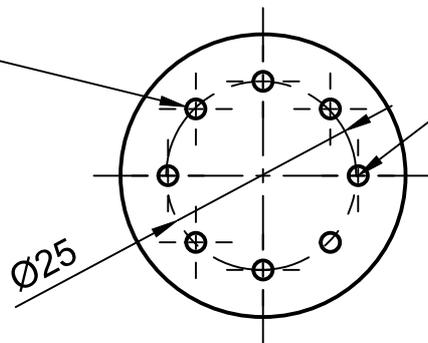
Tratamientos superficiales N.A.	Tolerancia General ± 0.01	Creado por: Anahí Barreto, Diego González, Christiam Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Material Acero inoxidable 304	
<p>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO</p>		Revisado por: Lorena Bejarano	Código S04	
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Escala 2:1	
		Denominación Soportes caja	No. 22	

Corte
A-A (1:1)

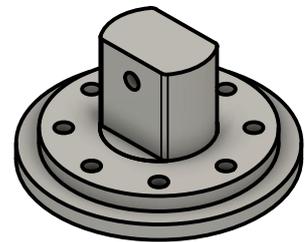
N5



⊕ 0,002 (M)



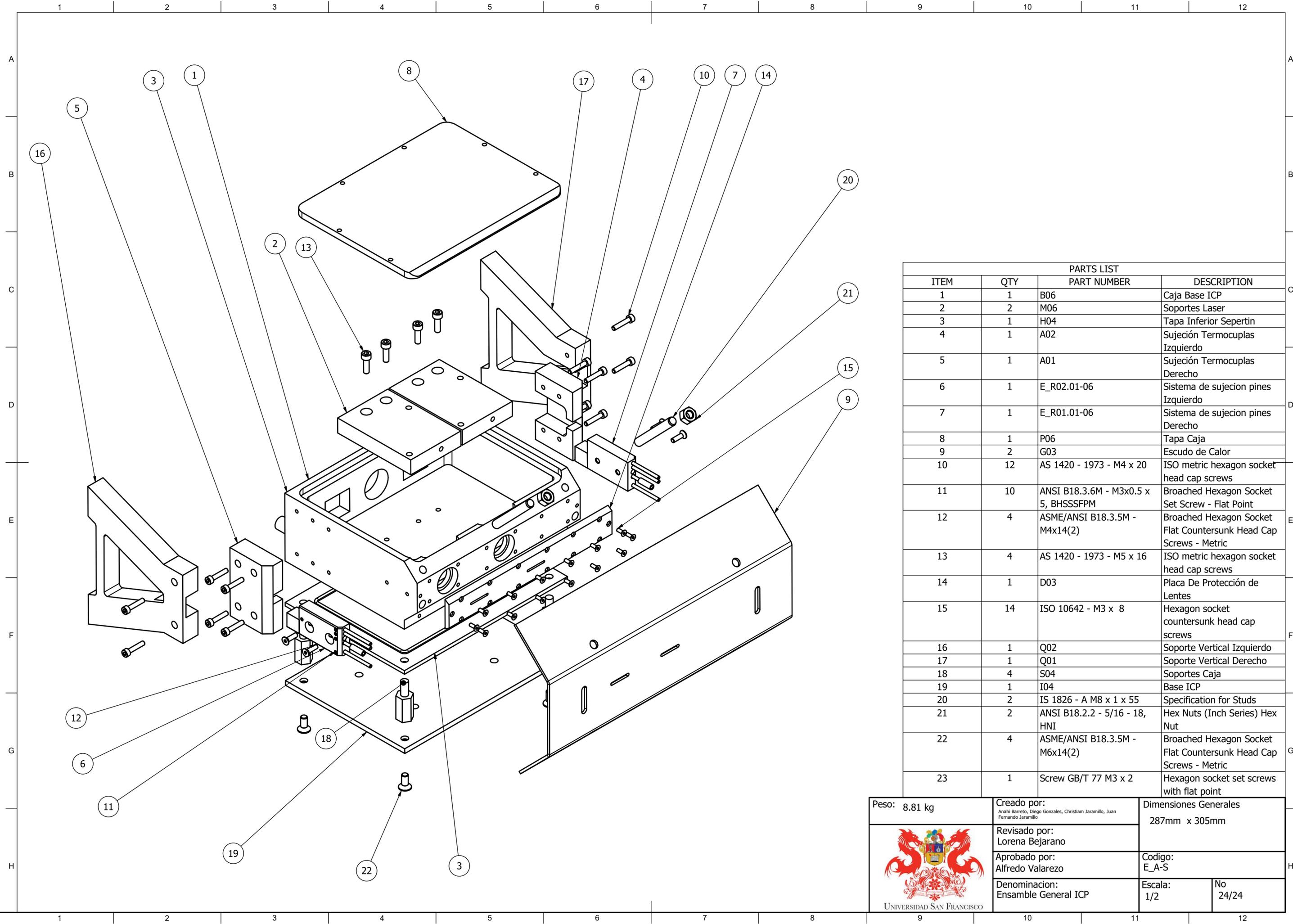
8 Agujeros Ø6 G6
equidistantes.



NOTAS:

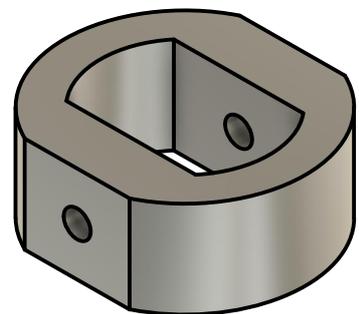
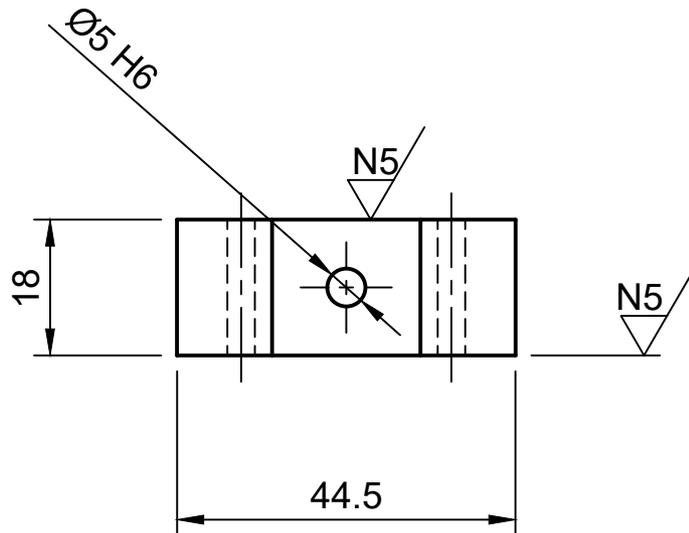
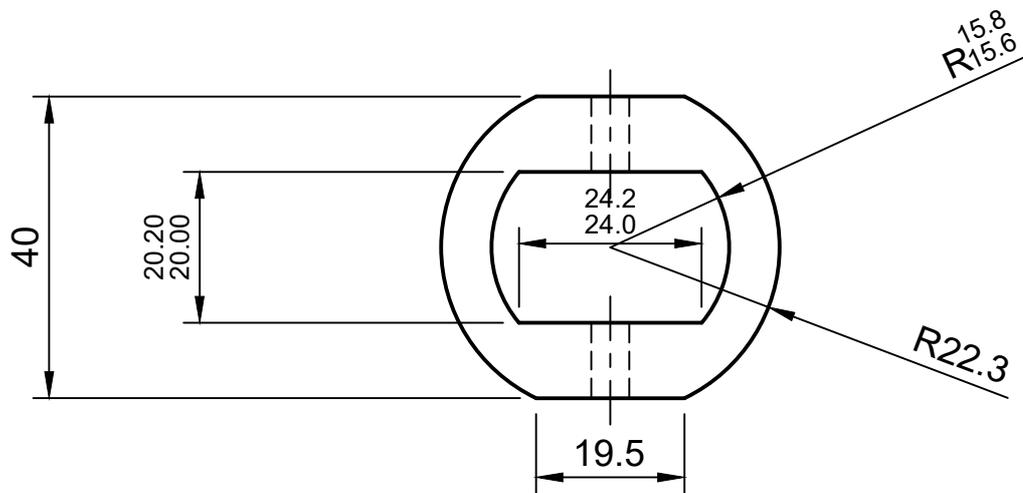
- Eliminar aristas vivas.
- Radios de acuerdo 0,3 mm.
- Todos los agujeros son pasadores.

Tratamiento Superficial N.A.	Tolerancia General ± 0,1 mm	Creado por: Christian Jaramillo-Anahi Barreto Juan Jaramillo-Diego González	4/12/2023	Material Acero 1018
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código T06		
	Aprobado por: Alfredo Valarezo			
	Denominación Acople circular robot			
		Escala 1:2	No. 23	



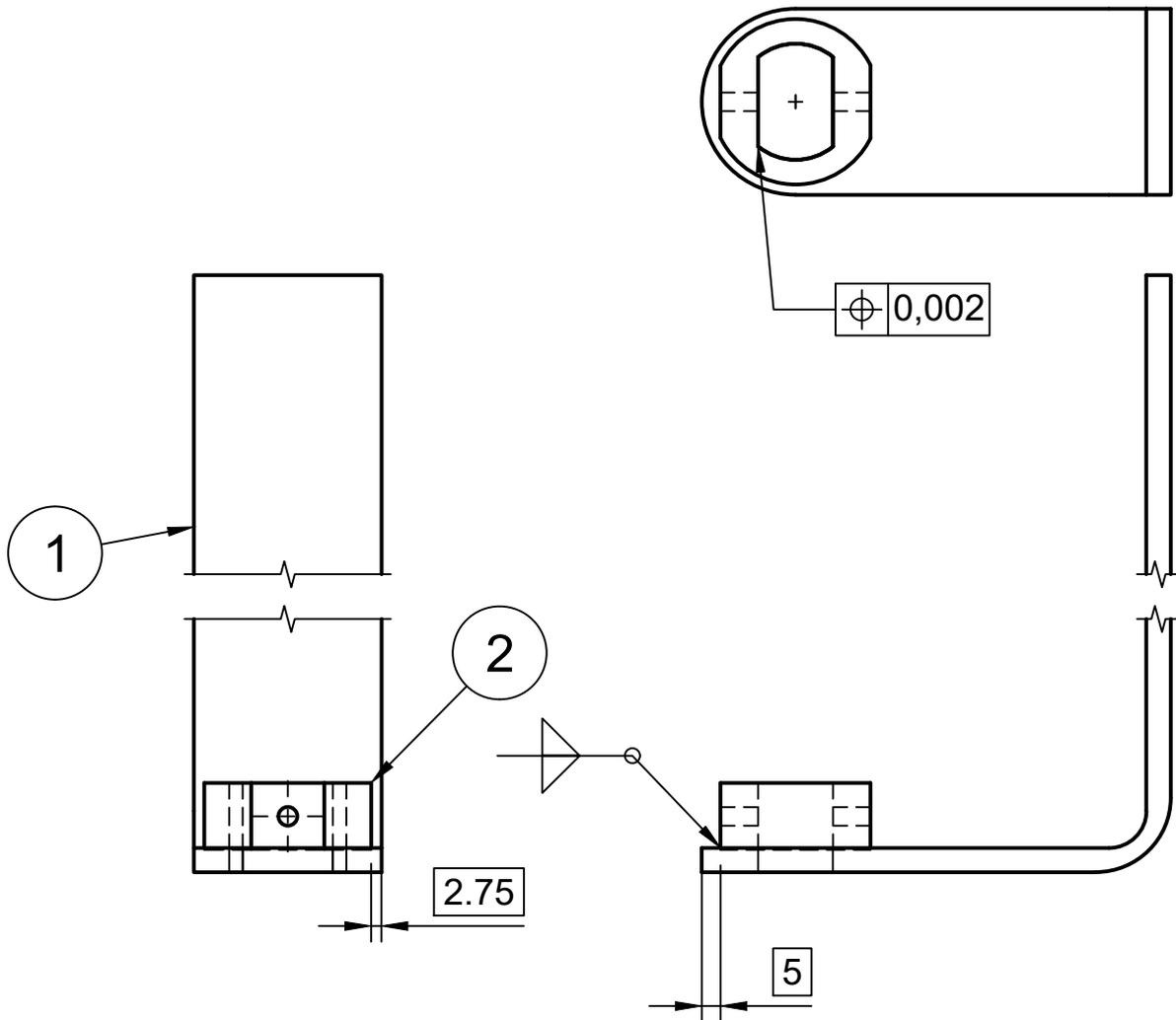
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	B06	Caja Base ICP
2	2	M06	Soportes Laser
3	1	H04	Tapa Inferior Sepertin
4	1	A02	Sujeción Termocuplas Izquierdo
5	1	A01	Sujeción Termocuplas Derecho
6	1	E_R02.01-06	Sistema de sujecion pines Izquierdo
7	1	E_R01.01-06	Sistema de sujecion pines Derecho
8	1	P06	Tapa Caja
9	2	G03	Escudo de Calor
10	12	AS 1420 - 1973 - M4 x 20	ISO metric hexagon socket head cap screws
11	10	ANSI B18.3.6M - M3x0.5 x 5, BHSSSFPM	Broached Hexagon Socket Set Screw - Flat Point
12	4	ASME/ANSI B18.3.5M - M4x14(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric
13	4	AS 1420 - 1973 - M5 x 16	ISO metric hexagon socket head cap screws
14	1	D03	Placa De Protección de Lentes
15	14	ISO 10642 - M3 x 8	Hexagon socket countersunk head cap screws
16	1	Q02	Soporte Vertical Izquierdo
17	1	Q01	Soporte Vertical Derecho
18	4	S04	Soportes Caja
19	1	I04	Base ICP
20	2	IS 1826 - A M8 x 1 x 55	Specification for Studs
21	2	ANSI B18.2.2 - 5/16 - 18, HNI	Hex Nuts (Inch Series) Hex Nut
22	4	ASME/ANSI B18.3.5M - M6x14(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric
23	1	Screw GB/T 77 M3 x 2	Hexagon socket set screws with flat point

	Peso: 8.81 kg	Creado por: Anahi Barreto, Diego Gonzales, Christian Jaramillo, Juan Fernando Jaramillo	Dimensiones Generales 287mm x 305mm	
		Revisado por: Lorena Bejarano		
		Aprobado por: Alfredo Valarezo	Codigo: E_A-S	
		Denominacion: Ensamble General ICP	Escala: 1/2	No 24/24



NOTAS:
- Eliminar aristas vivas.

Tratamiento Superficial N.A.	Tolerancia General ±0,1 mm	Creado por: Christiam Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González 4/12/2023	Material Acero Inoxidable 304
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Revisado por: Lorena Bejarano	Código T06.02	
	Aprobado por: Alfredo Valarezo	Denominación cilindro corte plano KUKA	
	Denominación cilindro corte plano KUKA	Escala 1:1	No. 25



NOTAS:

- Alinear agujeros para la suelta como representado en vista superior derecha.

Lista de piezas

elemento	nombre de pieza
1	Agarradera KUKA v5
2	Cilindro corte plano KUKA v1

Dimensiones Generales: 160 x 125 mm	Creado por: Christian Jaramillo-Anahí Barreto Juan Jaramillo-Diego González	4/12/2023		Peso 1.34 kg
	Revisado por: Lorena Bejarano	Aprobado por: Alfredo Valarezo		
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	Denominación Ensamble acople robot			Escala 1:2
				No. 26