



Mar del Plata, 18 de diciembre de 2025

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FINAL

*Estudio de factibilidad y prediseño de
brazo porta muestras automatizado
para pulidora metalográfica*



ESTUDIANTE: *Jennifer Roberts (Legajo 8529)*

TUTOR: *Dr. Amadeo Daniel Sosa*



1	MOTIVACIÓN	5
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVOS GENERALES	6
2.2	OBJETIVOS PARTICULARES	6
3	INTRODUCCIÓN TEÓRICA	7
3.1	MARCO CONCEPTUAL	7
3.1.1	<i>Etapas de la preparación mecánica</i>	<i>7</i>
3.1.2	<i>Parámetros del proceso</i>	<i>10</i>
3.1.3	<i>Selección de un método de preparación</i>	<i>13</i>
3.1.4	<i>Defectos del pulido</i>	<i>16</i>
3.2	EQUIPOS COMERCIALES	18
3.2.1	<i>Tegramin y LaboSystem</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Forcipol - Forcimat y Accura</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Automet</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Saphir y cabezal QPolGO</i>	<i>22</i>
3.2.5	<i>Resumen de características</i>	<i>23</i>
3.3	EQUIPOS EXISTENTES EN INTEMA	25
3.3.1	<i>Dimensiones de pulidoras del INTEMA</i>	<i>27</i>
4	DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	29
4.1	ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PULIDO	29
4.2	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	30
5	CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL PROCESO DE PULIDO	32
5.1	TRAYECTORIA Y ORIENTACIÓN DE LA MUESTRA	32
5.1.1	<i>Sistema de referencia absoluto</i>	<i>32</i>
5.1.2	<i>Sistema de referencia fijo en el centro del cabezal portamuestras</i>	<i>37</i>
5.1.3	<i>Sistema de referencia solidario al plato de pulido</i>	<i>39</i>
5.1.4	<i>Análisis numérico de la trayectoria de la muestra respecto al plato</i>	<i>42</i>
5.2	ACELERACIÓN Y CONTACTO EN EL EJE Z	49
5.3	FRICCIÓN ENTRE LA MUESTRA Y EL PLATO DE PULIDO	53
5.4	CONCLUSIONES	56
6	PREDISEÑO Y CONFIGURACIONES BÁSICAS	57





6.1	POSIBLES CONFIGURACIONES DEL EQUIPO.....	57
6.2	ANÁLISIS DE ACTUADORES.....	61
6.2.1	<i>Actuadores neumáticos.....</i>	<i>61</i>
6.2.2	<i>Actuadores hidráulicos.....</i>	<i>63</i>
6.2.3	<i>Actuadores eléctricos.....</i>	<i>63</i>
6.2.4	<i>Comparación.....</i>	<i>66</i>
6.3	DEFINICIÓN DEL MODELO BASE.....	66
7	SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES.....	68
7.1	TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO PRINCIPAL.....	74
7.1.1	<i>Motor principal.....</i>	<i>75</i>
7.1.2	<i>Diseño cinemático de la transmisión por correas.....</i>	<i>78</i>
7.1.3	<i>Selección de correas.....</i>	<i>81</i>
7.1.4	<i>Tensor de correas.....</i>	<i>87</i>
7.1.5	<i>Diseño de poleas y modos de uso.....</i>	<i>91</i>
7.2	CONJUNTO CABEZAL.....	94
7.3	ESTRUCTURA.....	100
7.3.1	<i>Desplazamiento vertical asistido y rotación manual.....</i>	<i>102</i>
7.3.2	<i>Fijación de la posición de trabajo.....</i>	<i>106</i>
7.3.3	<i>Fin de carrera.....</i>	<i>109</i>
7.3.4	<i>Brazo estructural para sujeción de motor principal y cabezal rotativo.....</i>	<i>111</i>
7.3.5	<i>Sujeción del eje principal del cabezal.....</i>	<i>114</i>
7.4	SISTEMA DE APLICACIÓN DE FUERZA INDIVIDUAL.....	118
7.4.1	<i>Selección de actuador para aplicación de la fuerza individual a las muestras.....</i>	<i>119</i>
7.4.2	<i>Sistema de precarga neumática.....</i>	<i>121</i>
8	CONCLUSIONES.....	124
9	TRABAJOS FUTUROS.....	125





Introducción personal

Mi primer trabajo relacionado a la carrera de ingeniería mecánica fue en el año 2019 en la empresa consultora de ingeniería Mewor a tiempo completo. Esta empresa se dedica a brindar soluciones profesionales para necesidades puntuales relacionadas a la industria metalmecánica. Mi puesto de trabajo consistía en desarrollar tareas de ingeniería básica y de detalle, así como memorias de cálculo de máquinas y herramientas de diseño propio. Los entregables eran planos de fabricación sumamente detallados asegurando el estricto cumplimiento de las normas IRAM de dibujo técnico.

Desde el año 2021 hasta el presente me desempeño a tiempo completo en la empresa Electroterma Mar del Plata SRL, dedicada al desarrollo de soluciones en climatización industrial (HVAC). Dentro de la compañía formo parte del área de ingeniería y diseño, donde he participado activamente en la concepción y ejecución de distintos proyectos vinculados tanto al diseño de equipos como a la planificación y desarrollo de obras industriales. Dado que la empresa tiene presencia en distintas regiones del país —entre ellas Ushuaia, Comodoro Rivadavia, Trelew, Misiones, Córdoba, Bariloche, provincia de Buenos Aires— tuve la oportunidad de viajar para relevar obras y reunirme con clientes, adquiriendo así una visión práctica del proceso de diseño y ejecución, y desarrollando criterio y experiencia en la gestión de proyectos.

A lo largo de este tiempo, he adquirido una amplia experiencia en dibujo técnico, diseño mecánico y en los procesos propios de la industria metalúrgica, tales como la selección de materiales, procedimientos de corte y plegado, procesos de soldadura, selección de componentes y la integración de estos elementos en el diseño de equipos industriales. Asimismo, incorporé conocimientos en termodinámica y balance térmico, aplicados al dimensionamiento y selección de equipos comerciales que respondan a las necesidades térmicas de cada instalación.

La carga de trabajo, viajes y responsabilidades profesionales que requiere mi trabajo hacen que resulte muy dificultoso asistir a la facultad o dedicar tiempo a la concreción de los requisitos académicos del trabajo final. Por ese motivo la concreción y cierre del mismo requirió de un esfuerzo significativo a lo largo de los últimos años.





Resumen

El presente proyecto final tiene como objetivo realizar el prediseño de una alternativa a los brazos portamuestras automatizados comerciales, que se pueda adaptar a distintas pulidoras metalográficas y constituya una opción accesible para su uso en el INTEMA. Se espera que la información recopilada y el prediseño de un prototipo, sirvan como base para que en el futuro pueda construirse una máquina que trabaje de manera autónoma para que, independientemente del operador, se obtengan resultados repetitivos que dependan únicamente de las condiciones de pulido.

Para alcanzar ese objetivo se realiza una recopilación bibliográfica en la cual se analizan íntegramente las distintas etapas del proceso de pulido, sus parámetros, métodos de preparación y posibles fallas para determinar los requerimientos necesarios del equipo. Asimismo, se realiza un relevamiento de las características principales de los equipos comerciales existentes en el mercado, con el objeto de obtener parámetros reales sobre los cuales establecer el prediseño.

Se analiza detalladamente el comportamiento cinemático y dinámico de una muestra en el proceso de pulido empleando modelado numérico. Se estudia la trayectoria y orientación de la muestra sobre el plato de pulido buscando relacionar las distintas velocidades de rotación involucradas en el proceso. Se realiza un ensayo para determinar la fuerza de fricción y se verifican las condiciones en las que se mantiene el contacto durante el trabajo.

Finalmente, teniendo en cuenta todos los parámetros y variables analizados, se elabora un prototipo virtual mediante un software de diseño 3D. En él se integran componentes comerciales y de diseño propio, con el fin de obtener un modelo preliminar de brazo portamuestras que sirva como punto de partida para futuros proyectos, en los cuales se continúe su desarrollo con mayor nivel de detalle para su fabricación.

Se describe el proceso de selección, dimensionado y verificación de varios subconjuntos, dejando algunos planteados como propuestas para considerarlos en una instancia futura.

Se excluyen del alcance de este trabajo final, los sistemas de control, verificación de ejes engranajes y rodamientos, aunque se tienen en cuenta en el prediseño.





1 Motivación

El INTEMA es un instituto de investigación de doble dependencia (CONICET y UNMDP) que nació como una asociación de grupos de R&I provenientes de la Facultad de Ingeniería de la UNMDP. Actualmente está integrado por 12 divisiones que llevan a cabo actividades de investigación, docencia y desarrollo tecnológico de materiales, entre otras.

Una de las divisiones, denominada Electroquímica Aplicada, trabaja en la investigación de biomateriales metálicos para uso como implantes ortopédicos y odontológicos. El desarrollo de estos materiales requiere de análisis metalográfico de muestras ensayadas in vitro. Los implantes se colocan quirúrgicamente en el receptor y permanecen durante un período de tiempo determinado con el fin de poder evaluar su degradación, osteointegración y posibles rechazos. Cuando se extraen para su análisis, se retira también el tejido óseo circundante, el cual debe permanecer intacto, al igual que la interfaz implante-tejido. La inclusión y pulido metalográfico son determinantes para poder evaluar estos aspectos, ya que el proceso debe mantener las particularidades del sistema, que se caracteriza por contener materiales de propiedades mecánicas significativamente diferentes.

Las muestras de aleaciones de magnesio, polímeros termoplásticos, así como los materiales biológicos como hueso y cartílago, considerados “blandos”, “rayables” o fácilmente desbastables, presentan dificultades cuando se requiere generar una superficie lisa y a su vez, cuando se busca repetitividad. Esto se debe a que sutiles desviaciones en la dirección de pulido, presión de contacto o vibraciones provocan cambios significativos en la superficie obtenida. Al mismo tiempo, las interfases y/o partículas débilmente adheridas pueden desprenderse y rayar la superficie, lo que hace que alcanzar una buena calidad superficial sea dificultoso.

En un relevamiento preliminar con usuarios de pulidoras de las otras divisiones, se detectó que también se presentan dificultades similares cuando se intenta preparar muestras pulidas de materiales muy duros, o en probetas con materiales disímiles.

Las pulidoras que posee el INTEMA en la actualidad no están adaptadas para el pulido de piezas muy pequeñas (<5mm) y blandas. Los modelos disponibles solo cuentan con plato porta-paño, en algunos casos de velocidad fija y otras programable. Sólo algunas de ellas cuentan con un carrusel de prestaciones deficitarias. Las probetas deben ser posicionadas y sujetas por el operador, siendo el resultado muy variable dado que la tarea requiere de mucha pericia.

Existen costosos equipos comerciales de origen extranjero que cumplen con las características requeridas. Sin embargo, adquirir una máquina de este tipo resulta prácticamente imposible debido a la situación económica del país.

El presente proyecto apunta a poder sustituir el pulido semi automático de muestras por un dispositivo que realice esta acción de manera autónoma y repetitiva con el fin de que los resultados sean independientes del operador y dependan únicamente de las condiciones de pulido.





2 Objetivos

En base a la necesidad de los diferentes laboratorios del INTEMA, expuesta previamente, y a las características generales disponibles en equipos comerciales que se encuentran fuera del alcance de los mismos, se plantea:

2.1 Objetivos generales

Presentar una opción de prediseño de un equipo portamuestras adaptable a la mayoría de las pulidoras disponibles en los laboratorios del INTEMA, que permita obtener superficies pulidas con resultados repetibles independientemente de la experiencia y capacidad técnica del operador.

2.2 Objetivos particulares

Para cumplimentar el objetivo planteado se propone abordar los siguientes:

- Analizar la información genérica sobre pulido de distintos materiales y determinar las variables más relevantes para la preparación adecuada de las superficies.
- Identificar los principales equipos comerciales, relevar sus características sobresalientes y definir un rango de valores esperables para el equipo.
- En base a los equipos comercialmente disponibles, definir un modelo constructivo base sobre el cual desarrollar la propuesta.
- Analizar los distintos tipos de actuadores, sistemas de guiado y articulaciones, transmisiones de movimiento y fuerza, para proponer un uso racional de los más adecuados.
- Generar un modelo virtual que permita simular las características funcionales del prediseño.





3 Introducción teórica

3.1 Marco conceptual

El análisis metalográfico es una técnica para el estudio de las características microestructurales de metales o aleaciones, las cuales están relacionadas con las propiedades mecánicas y comportamiento en servicio. El proceso de análisis consiste en tomar una muestra que sea representativa del objeto de estudio, prepararla mecánicamente para obtener una superficie especular, revelar su microestructura mediante un ataque químico, y observarla a través de un microscopio. Existen varios tipos de microscopios aplicables al análisis de materiales. Uno de los equipos más utilizado es el microscopio óptico, que permite conocer la microestructura del material mediante la interacción con un haz de luz (fotones). En este método, el campo focal es muy reducido, por lo que es muy importante que en la preparación se obtenga una superficie plana y pulida a espejo, lo cual es muy difícil de lograr a mano.

La preparación mecánica es el método más común de preparación de muestras para el examen microscópico. El requisito específico de la superficie preparada se determina mediante el tipo concreto de análisis o examen. Las muestras se pueden preparar con diferente grado de acabado según la necesidad concreta:

- Acabado espejo.
- Determinación y análisis de estructura cristalográfica.
- Desbaste: empleada en los casos en que la preparación se puede detener cuando la superficie sea adecuada para un examen específico.

El proceso básico de preparación mecánica de muestras es la eliminación de material utilizando partículas abrasivas en los sucesivos pasos de refinamiento, a fin de eliminar el material de la superficie hasta lograr el resultado requerido. Este proceso puede realizarse manualmente o empleando una pulidora metalográfica. Este equipo consta de un disco rotativo en el cual se colocan distintos paños o papel de lija en los que se van apoyando las muestras, ya sea manualmente o mediante un cabezal porta muestras. Producto del movimiento relativo entre la muestra y la superficie abrasiva, y ejerciendo presión por un determinado tiempo, se logra retirar pequeñas cantidades de material controladamente hasta alcanzar la terminación superficial deseada.

3.1.1 Etapas de la preparación mecánica

Los mecanismos de eliminación de material se pueden dividir en tres grupos, que difieren principalmente en los tamaños de abrasivos y el grado de deformación que sufre la superficie en contacto con ellos. En el procedimiento normal se emplean granos abrasivos de grit creciente hasta alcanzar el grado de terminación que requiere esa etapa.



3.1.1.1 Esmerilado o desbaste

El esmerilado es el primer paso para la remoción de material. Se utilizan partículas abrasivas de tamaño grueso ($6 < d < 20 \mu\text{m}$) que generan una viruta del mismo material de la muestra. Esta creación de virutas, sumada a un grano abrasivo cortante, produce una deformación mínima en la muestra a la vez que se logra una elevada tasa de eliminación.

El esmerilado se puede dividir en dos procesos (Struers, 2023)(Fig. 1):

- *Esmerilado plano*: Se utilizan discos de superficie dura con partículas abrasivas incrustadas (lija) de un tamaño de grano superior a $15 \mu\text{m}$. El esmerilado plano garantiza que las superficies de todas las muestras sean similares, con independencia del estado inicial y su tratamiento previo. El objetivo de esta primera instancia es lograr la mayor planitud posible en la superficie de la muestra para facilitar el trabajo en las instancias siguientes.
- *Esmerilado fino*: Se emplean discos compuestos duros, o rígidos, a la vez que se suministra continuamente una solución compuesta de líquido con partículas abrasivas de tamaños entre 6 y $15 \mu\text{m}$. Trabajar sobre una superficie dura permite a los granos de abrasivo incrustarse en la superficie de la muestra y proporcionar una eliminación uniforme de material, tanto en fases duras como blandas. El esmerilado fino produce una superficie con poca deformación que se puede eliminar fácilmente durante el pulido.

El resultado de cada etapa de desbaste es una superficie rayada que debería eliminarse en la siguiente etapa empleando un grano abrasivo más fino. Para esto, es conveniente que en cada etapa el rayado quede orientado en una única dirección, para que cuando se pase a la siguiente, se rote la muestra y sea más fácil identificar si se eliminó por completo la etapa anterior.

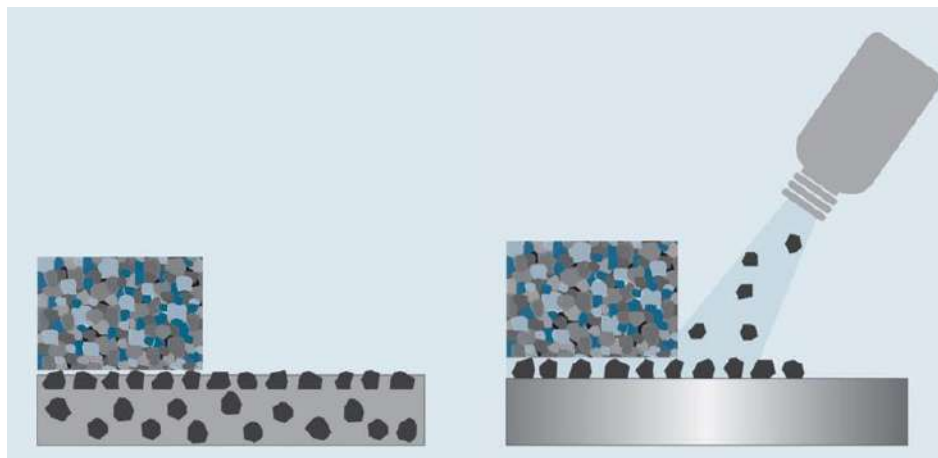


Fig. 1 – Esquemas de esmerilado. Esmerilado plano (izquierda) y esmerilado fino (derecha). (Struers, 2023)

3.1.1.2 Pulido

El pulido tiene por objeto eliminar las rayas producidas en la operación de desbaste y obtener una superficie especular en la muestra. Para ello se utilizan abrasivos de tamaño menor a los empleados en el desbaste. Su tamaño es tan pequeño que en lugar de emplearse pegados

a un papel con adhesivo (papel de lija), se pulveriza sobre un paño suave en el que las partículas de abrasivo quedan ancladas.

Es recomendable que en esta etapa la muestra varíe constantemente su orientación para que no haya un patrón definido de rayado, sino que se logre una superficie con un rayado imperceptible que tienda a desaparecer con el avance del proceso.

El pulido puede dividirse en dos procesos (Struers, 2023)(Fig. 2):

- *Pulido diamante:* Se utilizan paños de mayor resiliencia, junto con tamaños de grano menores, tales como 3 o 1 μm , para obtener un tamaño de viruta mínimo. El diamante se utiliza como un abrasivo para tratar la eliminación de material de forma más rápida y con excelentes resultados de planitud. Debido a su dureza, el diamante corta sin inconvenientes cualquier material y fase
- *Pulido de óxido:* Ciertos materiales, especialmente los blandos y dúctiles, requieren un pulido final en conjunto con revelado químico para obtener una calidad superior. Como ejemplo, suele emplearse sílice coloidal, con un tamaño de grano de aproximadamente 0,04 μm y un pH en torno a 9,8. La combinación del ataque químico y una abrasión suave y fina evita la aparición de arañazos y deformación en las muestras.

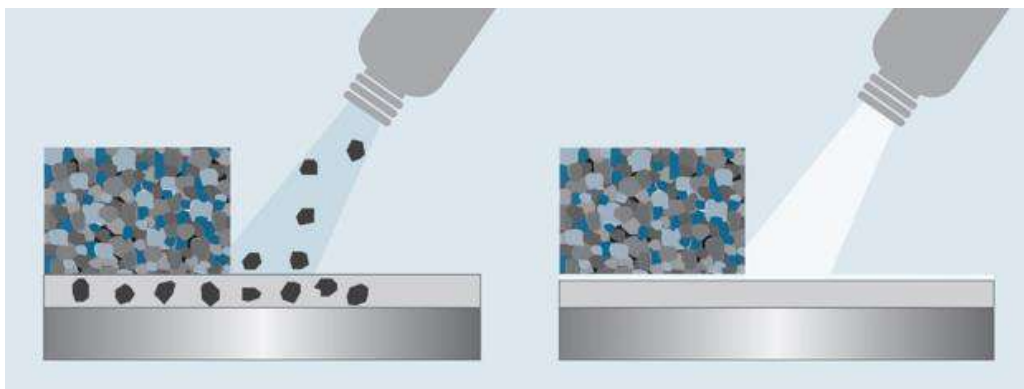


Fig. 2 – Esquemas de pulido. Pulido diamante (izquierda), pulido de óxido (derecha). (Struers, 2023)

3.1.1.3 Lapeado o lapidado

En el lapeado, se utiliza un abrasivo de tamaño de grano similar al del pulido, que se aplica en una suspensión sobre una superficie dura. Las partículas no se presionan sobre la superficie ni se fijan en ella. Se desplazan y mueven libremente en todas direcciones, desprendiendo pequeñas partículas de la superficie de la muestra e introduciendo deformaciones profundas, sin que se logren formar virutas como en las instancias anteriores (Fig. 3).

Durante el lapeado la tasa de eliminación de material es muy baja, lo que conlleva a procesos muy largos. En los materiales blandos, las partículas abrasivas con frecuencia se presionan sobre la superficie de la muestra donde se adhieren con firmeza. Tanto las deformaciones profundas como los granos incrustados se deben evitar en la preparación de muestras metalográficas. Esto



significa que el lapeado se debería utilizar sólo cuando se trabaja con materiales muy duros y quebradizos.

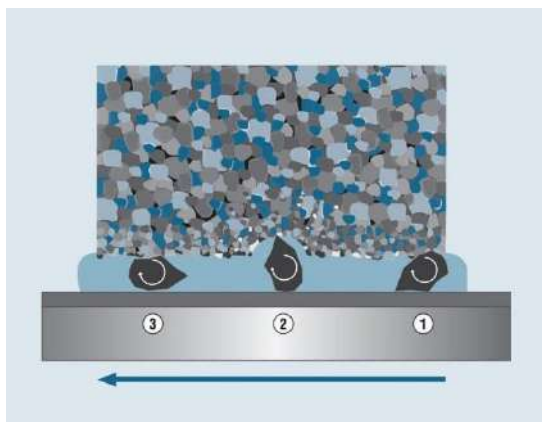


Fig. 3 – Esquema de lapeado (Struers, 2023).

3.1.2 Parámetros del proceso

Los métodos de preparación de muestras requieren de un conjunto equilibrado de parámetros para que el procedimiento de esmerilado y pulido se realice de manera adecuada (Struers, 2023). Su selección se realiza en función de sus características según se describe a continuación. Al mismo tiempo debe controlarse la orientación de la muestra durante las distintas etapas para lograr un acabado acorde a las expectativas del proceso de desbaste o pulido.

3.1.2.1 *Superficie de trabajo abrasiva*

Las superficies de trabajo se seleccionan cuidadosamente según el material de la muestra, los requisitos de preparación y el equipamiento que se vaya a utilizar, ya sea manual o empleando una pulidora automática. En rasgos generales pueden dividirse en tres grandes grupos: piedras de desbaste, papeles de esmerilado o lijas, discos de franela o paños. En cada grupo de superficies la diferencia en características incluye el tipo y adherencia del abrasivo, dureza, resiliencia, patrón de superficie y orientación de las fibras.

3.1.2.2 *Tipo de abrasivos*

La tasa de eliminación en el esmerilado y pulido está muy relacionada con el tipo de abrasivo utilizado. En general, el abrasivo debe tener una dureza de 2,5 a 3 veces la dureza del material a preparar. No es recomendable utilizar abrasivos más blandos, y la tasa de remoción resultaría seriamente afectada y debido a que pueden generarse defectos en la preparación.

El *diamante* es uno de los materiales más duros conocidos, esto significa que puede cortar fácilmente todos los materiales y fases. Hay diferentes tipos de diamantes disponibles. Gracias a los múltiples bordes cortantes de las partículas abrasivas de diamantes policristalinos se obtiene una elevada tasa de eliminación de material, a la vez que se logra una profundidad de corte reducida favoreciendo al acabado superficial.





El *carburo de silicio (SiC)* presenta una dureza inferior al diamante, aproximadamente de 2500 HV. Se utiliza ampliamente como abrasivo en los papeles de esmerilado o lijas, siendo empleado principalmente en aleaciones no ferrosas.

El *óxido de aluminio* posee una dureza aproximada de 2000 HV. Se utiliza como abrasivo en las piedras de esmerilado, siendo empleado mayormente en la preparación de aleaciones ferrosas. También se utiliza ampliamente como medio de pulido, aunque desde la introducción de los productos de diamante para este fin, ha perdido en gran parte su utilidad en esta aplicación.

La *sílice coloidal* se utiliza como una etapa posterior para obtener un acabado sin rayas en la preparación de superficies y pulido empleando óxido de aluminio.

Cuando se emplean partículas abrasivas en suspensión, la cantidad de abrasivos aplicable dependerá de la superficie de esmerilado/pulido y la dureza de la muestra. La combinación de paños con baja resiliencia y muestras duras requiere una cantidad mayor de abrasivos frente a los paños con alta resiliencia y muestras más blandas ya que las partículas abrasivas se desgastan más rápido.

3.1.2.3 *Tamaño del grano abrasivo*

Se designa con un número que indica la cantidad de partículas que cabe en un área determinada y se indica como “#500” o “grit 500” (para 500 partículas por unidad de área normalizada). La preparación siempre comienza con el tamaño de grano más pequeño posible para evitar daños excesivos en las muestras. Durante los pasos sucesivos de preparación se reduce el tamaño de partícula a fin de ir mejorando el acabado. En secuencias de desbaste se eligen intervalos lo más amplios posibles entre un tamaño de grano y el siguiente para minimizar el tiempo de preparación. En las etapas finales se prioriza el acabado y evitar la generación de rayas en la superficie que no puedan eliminarse en la instancia siguiente.

3.1.2.4 *Lubricante*

Dependiendo del tipo de material y la etapa de preparación se emplean diferentes lubricantes. Estos combinan distintos niveles de lubricación y refrigeración, así como otras características del líquido. Ello puede incluir, lubricantes fluidos con una refrigeración alta y un bajo efecto lubricante, lubricantes especiales para pulir materiales blandos y dúctiles, con base acuosa o de alcohol, etc. Dependiendo del tipo de material y del disco de esmerilado/pulido utilizado en la preparación, las cantidades de lubricante y refrigerante se deben equilibrar. Por lo general los materiales blandos requieren gran cantidad de lubricante para evitar daños, y una cantidad baja de abrasivo ya que estos sufren un desgaste mínimo. Por el contrario, los materiales duros requieren menos lubricante y mayor cantidad de abrasivos debido a su rápido desgaste. El exceso de lubricante impregna el abrasivo del disco y permanece como una capa densa entre la muestra y el disco, lo que reduce al mínimo la eliminación de material. La falta de lubricante puede producir una elevación en la temperatura de la superficie de la muestra,





pudiendo cambiar las propiedades del material. También, si la cantidad de lubricante es escasa, las virutas de corte comienzan a rellenar espacios entre los granos abrasivos y se empasta.

3.1.2.5 Velocidad de proceso (esmerilado, pulido y lapidado)

Este parámetro generalmente se aplica para la preparación de muestras mediante un equipo de pulido automático o semi automático en el que la superficie abrasiva es un disco rotante. En las primeras instancias de desbaste se utiliza una velocidad de rotación de la superficie abrasiva alta para obtener una rápida eliminación de material, pudiendo alcanzarse 300 a 500 rpm. Al mismo tiempo, se requiere una adecuada lubricación y refrigeración a fin de evitar la degradación del material y el empastado de la superficie abrasiva, como se mencionó previamente.

En las etapas de pulido, cuando se trabaja con abrasivos en suspensión, el empleo de velocidades elevadas podría arrojar las partículas en suspensión fuera del disco, por lo que se necesitarían mayores cantidades de abrasivo y lubricante. En el esmerilado fino las velocidades recomendadas para el disco de esmerilado/pulido se encuentran en el orden de 90 m/min, lo que equivaldría a una velocidad de rotación de 150 rpm en un disco de 200 mm de diámetro.

En las máquinas semiautomáticas que presentan portamuestras rotativos se deben equilibrar las velocidades de rotación de la superficie abrasiva con respecto a la del soporte porta muestras para que no se produzcan defectos en el pulido. Al mismo tiempo, si no se emplean velocidades de rotación adecuadas podría generarse desgaste localizado en los paños, que acortarían su vida útil y facilitarían la aparición de defectos de pulido.

3.1.2.6 Fuerza de contacto

El objetivo del proceso de preparación de muestras, como se mencionó anteriormente, es obtener una superficie con la mayor planitud posible y una rugosidad mínima. Para lograrlo, se debe ejercer en la superficie de contacto una presión uniforme independientemente del tamaño de muestra que se trabaje. Una inclusión estándar tiene un tamaño de 30 mm de diámetro, por lo que los valores de fuerza recomendados para los distintos materiales y etapas del proceso se calculan para ese tamaño de superficie. Si las muestras son más pequeñas se reducirá la fuerza para evitar daños tales como deformaciones. En muestras más grandes, se incrementará la fuerza ligeramente. En ese caso, el tiempo de preparación se incrementará.

Los valores de fuerza que se pueden utilizar dependen del material de la muestra, de su tamaño y de la etapa del proceso de preparación en la que se encuentre. Generalmente se comienza el proceso aplicando una carga elevada, ya que se busca una tasa de eliminación de material alta en el menor tiempo posible. Dependiendo del material, en estas primeras etapas de desbaste se suele emplear una fuerza entre 25 y 50 N. Luego, en las etapas de pulido fino se utilizan valores menores, que no suelen superar los 30 N, para evitar que la superficie quede despereja a pesar de verse plana a simple vista.

El control de la carga tiene un efecto significativo en la integridad y acabado de la muestra. El exceso de fuerza en este caso implica un aumento de temperatura debido a una mayor





fricción, pudiendo aparecer daños térmicos. Independientemente de la etapa del proceso, si se aplica una fuerza menor a la recomendada igualmente se alcanzará la calidad de superficie deseada, pero los tiempos de trabajo aumentan significativamente.

Con respecto al material a tratar, una muestra de un material de alta dureza requiere que se le aplique mayor fuerza que una de material más blando. El exceso de fuerza aplicada a un material de baja dureza puede provocar incrustaciones del abrasivo, que causan defectos en la superficie que se está preparando.

3.1.2.7 *Tiempo de preparación*

El tiempo de preparación depende de todas las variables explicadas anteriormente. En toda preparación metalográfica el objetivo es lograr la superficie deseada en el menor tiempo posible. Cuanto más fino sea el abrasivo que se utilice, se requerirá de mayor tiempo de preparación, ya que disminuye la tasa de remoción de material. En la etapa de desbaste se utilizan granos abrasivos de mayor tamaño y fuerzas de contacto elevadas, por lo que estos procesos llevan poco tiempo comparado con las etapas sucesivas de pulido y lepeado.

El exceso de tiempo de preparación provoca desgaste de los consumibles utilizados en el proceso, y defectos tales como relieves o redondeo de bordes. Si no se cumple con los tiempos recomendados, es posible que no se logre una superficie adecuada para su análisis y se tenga que repetir el proceso de preparación.

3.1.3 Selección de un método de preparación

Muchas veces se requiere analizar un material que ya ha sido estudiado o preparar varias muestras del mismo material. Esto implica que el resultado de la preparación debe ser reproducible. La manera más sencilla de lograrlo es aplicando un método o procedimiento de preparación sistemático. Para ello se requiere de un control estricto de las variables que intervienen en el proceso.

La preparación de la muestra sigue ciertas reglas que son válidas para la mayoría de los materiales. Diferentes materiales con propiedades similares (dureza y ductilidad) responden de forma análoga y requieren los mismos consumibles durante la preparación. Por consiguiente, todos los materiales se pueden desplegar en un gráfico general conforme a sus propiedades, y no en base a su inclusión en un grupo de materiales concreto.

El **metalograma** es un gráfico que agrupa a los materiales conforme a propiedades físicas concretas: dureza y ductilidad (Fig. 4).

Dureza: Se trata de la característica más sencilla de medir, aunque no aporta suficiente información sobre un material a fin de encontrar el método de preparación correcto. Constituye una medida de la carga que se requiere para producir deformación permanente.



Ductilidad: Alude a la capacidad de un material de deformarse plásticamente, siendo importante para el esmerilado y pulido. Esta propiedad expresa cómo responde el material a la abrasión mecánica.

En el metalograma el eje X representa la dureza en Vickers (HV) mientras que en el eje Y se representa el comportamiento frente a la deformación. Los valores no se muestran en una progresión lineal ya que la variedad de métodos de preparación en los materiales más blandos es mayor que en los duros.

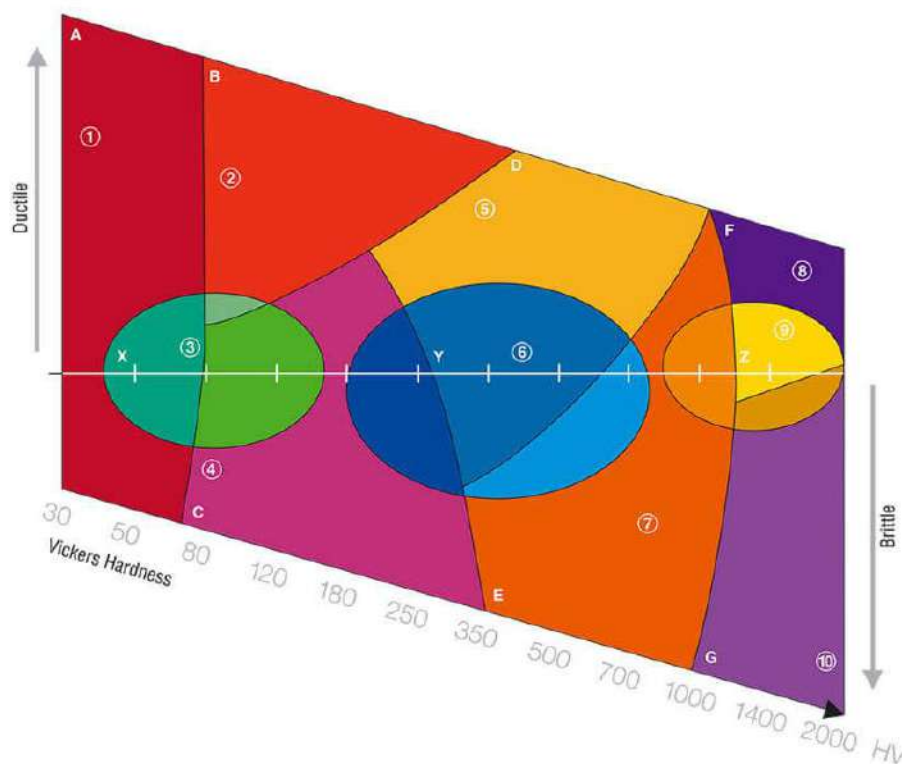


Fig. 4– Metalograma (Struers, 2023).

El metalograma se basa en diez métodos de preparación (Tabla 1). Siete métodos (de A a G) abarcan la gama completa de materiales. Se han diseñado para producir muestras con el mejor resultado posible. Además, se muestran tres métodos cortos: X, Y, Z, que tienen como objetivo obtener resultados rápidos y aceptables.

Independientemente de los requisitos de cada material, los objetivos generales de la preparación son los mismos:

- Se deben conservar todos los elementos microestructurales
- La superficie no debe presentar rayaduras ni deformación
- No se deben introducir objetos extraños en la superficie de la muestra
- La muestra debe ser plana y altamente reflectante
- Todas las preparaciones deben ser 100 % reproducibles



Tabla 1 – Ejemplo de cada método de preparación del metalograma (Struers, 2023).

Ejemplo	Método			Tamaño de grano	Lubricante	Veloc. de rotación [rpm]	Fuerza [N]	Tiempo [min]
Aleación MgAl, Fundido	A	Esmerilado	Plano	#320	Agua	300	25	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	3
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	25	5
			Oxido	0.04 mm	-	150	10	1
Cu, puro	B	Esmerilado	Plano	#320	Agua	300	30	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	4
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	25	2
			Oxido	0.04 mm	-	150	10	2
Acero al carbono medio, sobrecalentado	C	Esmerilado	Plano	#220	Agua	300	30	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	3
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	30	3
			Oxido	0.04 mm	-	150	10	2
Acero al carbono bajo	D	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	300	40	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	30	3
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	30	3
			Oxido	-	-	150	15	2
Hierro fundido blancio	E	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	300	40	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	3
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	30	3
			Oxido	0.04 mm	-	150	15	1
Carburo sinterizado WC/Co	F	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	150	40	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	5
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	30	3
			Oxido	0.04 mm	-	150	15	1
ZrO2	G	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	300	30	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	35	10
		Pulido	Diamante	-	-	-	-	-
			Oxido	0.04 mm	-	150	20	1
Aleación AlSi	X	Esmerilado	Plano	#320	Agua	300	30	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	35	5
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	25	3
			Oxido	-	-	-	-	-
Acero de herramientas	Y	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	300	30	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	30	3
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	25	3
			Oxido	-	-	-	-	-
Carburos en matriz metálica	Z	Esmerilado	Plano	Diamante	Agua	300	50	Hasta planitud
			Fino	9 mm	-	150	40	4
		Pulido	Diamante	3 mm	-	150	30	3
			Oxido	-	-	-	-	-





3.1.4 Defectos del pulido

Durante el proceso de pulido pueden surgir distintos tipos de fallas o defectos en la superficie de la muestra. Antes de continuar con la siguiente etapa de pulido se debe asegurar la completa eliminación de todos los daños que se puedan haber producido en un paso anterior. De no hacerlo, los defectos previos podrían permanecer en la superficie acabada, en cuyo caso sería imposible saber dónde se originaron. Es preciso comprender y conocer cuándo se originan los defectos para poder mejorar el método. Si el material está siendo preparado por primera vez, es importante examinar la muestra después de cada etapa con un microscopio para facilitar la identificación de posibles defectos en la preparación.

Los defectos más comunes en el acabado de muestras son:

- Arañazos: son surcos en la superficie de una muestra producidas por las aristas filosas de partículas abrasivas (Fig. 5a). Las causas más comunes de la aparición de arañazos son la utilización de un grano abrasivo de mayor tamaño al necesario, contaminación del paño de pulido por falta de limpieza entre las distintas etapas del proceso, exceso de abrasivo o falta de lubricante, tiempo de preparación insuficiente.
- Aplastamientos: deformación plástica de ciertas áreas de la muestra debido a que en vez de recortarse o eliminarse, el material se empuja y arrastra a través de la superficie (Fig. 5b). Los aplastamientos se generan debido a una aplicación incorrecta de abrasivo, lubricante, paño de pulido, o de una combinación de los anteriores, lo cual hace que el abrasivo actúe como si fuese una partícula desafilada.
- Redondeo de bordes: mayor desgaste del borde respecto al centro de la probeta (Fig. 5c). Puede apreciarse en muestras incluidas cuando la resina se desgasta más rápidamente que el material de estudio. Generalmente ocurren cuando se utiliza una superficie de pulido con alta deformación elástica.
- Relieves: ocurren cuando el material posee dos o más fases de distinta dureza, se produce un mayor desgaste de las zonas blandas respecto a las duras (Fig. 5d). Los relieves pueden deberse a un exceso de presión sobre la muestra o tiempos de preparación extensos.
- Colas de cometa: son defectos en la superficie de la muestra debido a inclusiones o poros (Fig. 5e). Son debidos a una técnica de preparación errónea: es decir, cuando el movimiento de la muestra es unidireccional respecto al movimiento del paño.
- Inclusiones sueltas: son partículas abrasivas sueltas introducidas a presión en la superficie de la muestra (Fig. 5f). Ocurre generalmente en muestras de materiales blandos. La incrustación de abrasivos puede deberse al tamaño de una partícula abrasiva pequeña, al hecho que el paño de esmerilado o pulido que se utiliza tiene una baja capacidad de deformación, o a que se utilice un lubricante con poca viscosidad.



- **Porosidad y rotura:** en los materiales blandos y dúctiles la porosidad tiende a cerrarse a causa de la deformación plástica de la muestra durante la preparación (Fig. 5g). En los materiales duros y frágiles, si se genera una porosidad mayor a la que debería tener, se puede producir una rotura (Fig. 5h). Las causas de este tipo de defecto pueden ser un exceso de fuerza ejercida en la muestra durante la preparación y tiempos insuficientes de permanencia de la muestra sobre la superficie de pulido.

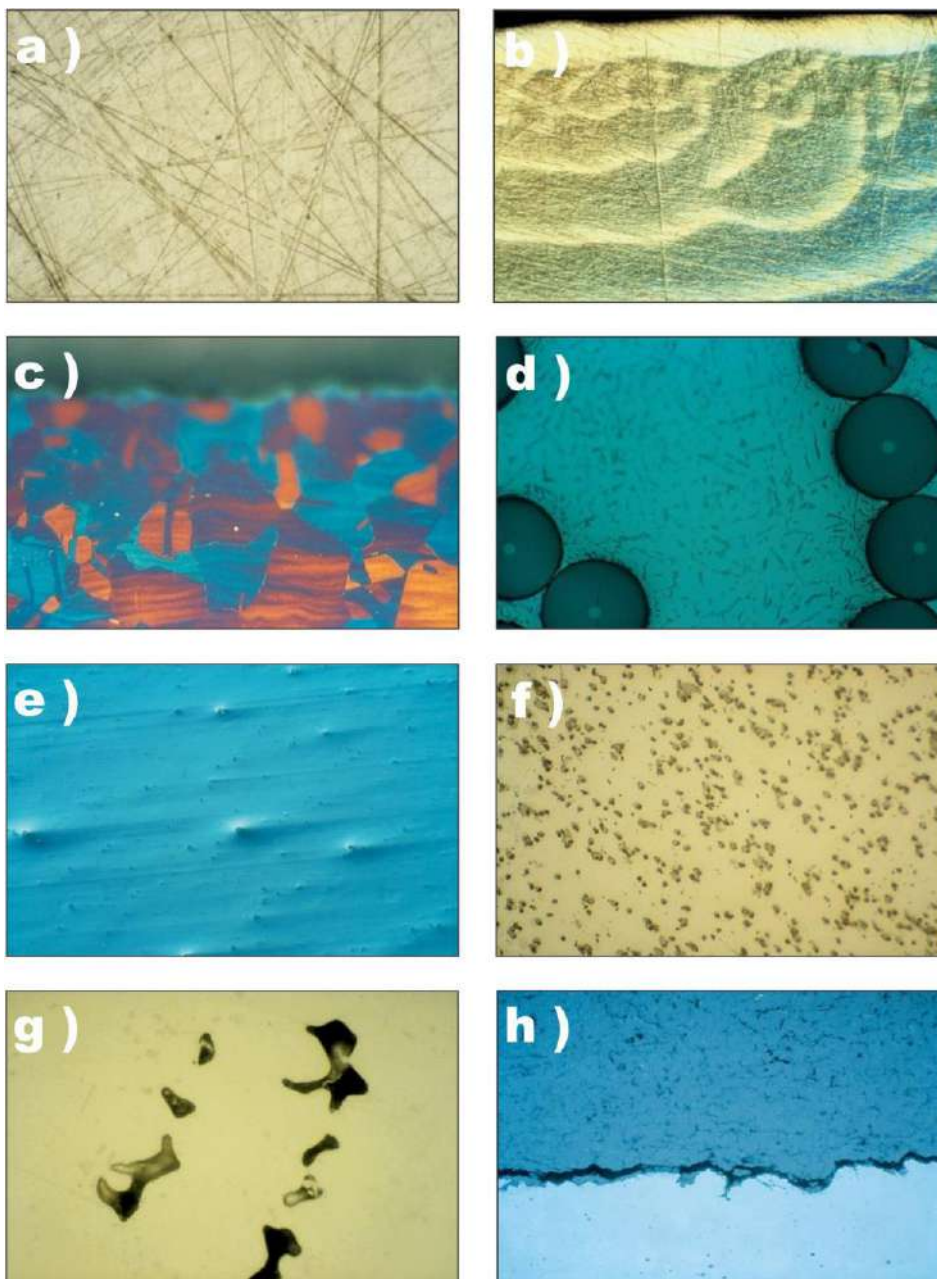


Fig. 5 — Defectos de pulido. a) Arañazos, b) Aplastamiento, c) Redondeo de bordes, d) Relieves, e) Colas de cometa, f) Inclusiones sueltas, g) Porosidad, h) Fractura o rotura (Struers, 2023).



En la preparación manual de superficies metalográficas pueden presentarse variaciones en algunas características del proceso que pueden llevar a la aparición de los defectos antes mencionados. Algunas de ellas son:

- Magnitud, modulación y punto de aplicación de la fuerza de contacto.
- Velocidad de rotación y orientación de la muestra con respecto al paño de pulido.
- Tiempo de preparación.
- Suministro de lubricante y abrasivo.
- Si la preparación es completamente manual, variaciones en la velocidad relativa entre la muestra y la superficie abrasiva.

La implementación de dispositivos mecánicos que permitan controlar las variables antes mencionadas disminuye la posibilidad de aparición de estos defectos. Esto facilita la preparación de la superficie, minimiza la intervención del operador y asegura una mayor repetitividad en las superficies resultantes.

3.2 Equipos comerciales

Las pulidoras metalográficas son máquinas automáticas o semiautomáticas que se utilizan para generar un acabado final en la superficie de las muestras antes de ser analizadas bajo el microscopio. Generalmente se componen de una o varias superficies planas rotantes, donde se colocan sucesivos paños o papeles de lija, que giran a una velocidad seteada por el usuario. Para realizar el pulido, la muestra se apoya sobre estos discos ejerciendo una fuerza determinada. Este procedimiento puede realizarse de forma manual sujetando la muestra de a una por vez, o bien, utilizando cabezales portamuestras automatizados que permiten trabajar con más de una muestra en simultáneo. Algunas de ellas presentan un sistema de dosificación de lubricante y partículas abrasivas.

Actualmente existe una gran variedad de equipos y accesorios comerciales de pulido metalográfico de distinta complejidad. La mayor parte de ellos corresponde a firmas extranjeras que suelen poseer distribuidores locales a través de los cuales podría tenerse acceso a los mismos. El contexto socioeconómico reciente del país limita significativamente las posibilidades de adquisición de equipamiento y componentes importados por parte de las instituciones públicas y privadas. Al mismo tiempo, las instituciones de educación pública presentan limitaciones presupuestarias que restringen aún más su situación.

Algunas de las alternativas comerciales que se presentan en el mercado internacional se analizan a continuación.

3.2.1 Tegramin y LaboSystem

Estos equipos son la alternativa más difundida de la empresa alemana Struers. La misma es globalmente reconocida con más de 145 años de antigüedad, dedicada principalmente a la fabricación de equipos para preparación e inspección metalográfica de muestras. Sus productos y servicios de mantenimiento son utilizados en empresas de distintos rubros, desde el sector



aeroespacial, fabricantes de automóviles y aviones a productores de teléfonos móviles (Struers, 2023).

Dentro del área de pulido metalográfico, la empresa cuenta con una línea de equipos de alta precisión que abarca un amplio rango de complejidades, desde equipos portátiles y manuales, equipos fijos simples manuales o semiautomáticos como el sistema LaboSystem, equipos complejos altamente automatizados como Tegramin, hasta centrales totalmente automatizadas que maximizan la eficiencia del proceso.

La línea de productos LaboSystem (Fig. 6) abarca un sistema modular de esmerilado y pulido que combina tres variantes de pulidoras LaboPol, junto con tres tipos de cabezales portamuestras LaboForce y dos unidades dosificadoras LaboDoser [Struers 2023]. En conjunto pueden formarse hasta siete combinaciones distintas que se adapten a las necesidades del usuario. Esta línea se caracteriza por su simpleza, facilidad de uso y rápida preparación de muestras. Los resultados obtenidos son de buena calidad comparado con equipos de la misma gama.



Fig. 6 – LaboPol-60 (izquierda) y LaboPol-30 (derecha). Ambos con portamuestras semiautomáticos LaboForce y sistemas dosificadores LaboDoser (Struers, 2023).

El modelo de pulidora Tegramin es un equipo altamente automatizado, compacto y robusto (Fig. 7). Posee un sistema de doble columna para la sujeción del cabezal portamuestras que minimiza las vibraciones. El cabezal tiene un soporte de muestras intercambiable que permite preparar muestras en forma individual o en distintas cantidades en simultáneo. El mismo cuenta con rotación controlada para detenerse en un punto preciso. La fuerza aplicada puede establecerse con precisión a través de un sistema neumático. Además, el equipo incluye un microprocesador que permite controlar la dosificación de abrasivo, establecer programas de trabajo predeterminados y medir la cantidad de material eliminado. Estas características favorecen la repetitividad de los resultados obtenidos.



Fig. 7 – Pulidora automática Tegramin con dosificador y cabezal portamuestras integrados (Struers, 2023).

3.2.2 Forcipol - Forcimat y Accura

La empresa de origen turco, Metkon, se dedica a la fabricación de equipos para preparación de probetas, instrumentos de ensayos, fungibles y análisis de microestructuras. La marca cuenta con entes distribuidores a nivel global, haciendo llegar sus productos a una amplia variedad de clientes de distintos rubros (Metkon, 2023).

Las líneas Forcipol, Forcimat y Accura son algunas de las alternativas de la gama intermedia de Metkon para el esmerilado y pulido metalográfico. La empresa además fabrica unidades completamente automatizadas y de alta complejidad que permiten trabajar con más de una probeta en simultáneo.

Las pulidoras Forcipol (Fig. 8) son equipos modulares de construcción robusta y de fácil operación, que pueden combinarse con accesorios como cabezales portamuestras Forcimat o unidades de control, según la necesidad del operador.



Fig. 8 – Forcipol 202 con unidad de control (izquierda) y Forcipol 102 con cabezal Forcimat (derecha) (Metkon, 2023).

El modelo de pulidora Accura (Fig. 9) es un equipo compacto que tiene todos sus componentes integrados en un mismo módulo. Al igual que sus competidores, cuenta con un sistema de sujeción de cabezal de doble columna para minimizar vibraciones, rotación controlada para detenerse en un punto preciso, sistema neumático para aplicación de fuerza,

dosificación controlada y programas de trabajo predeterminados. Todas estas características minimizan la intervención del operador y, en consecuencia, se obtienen resultados repetitivos.

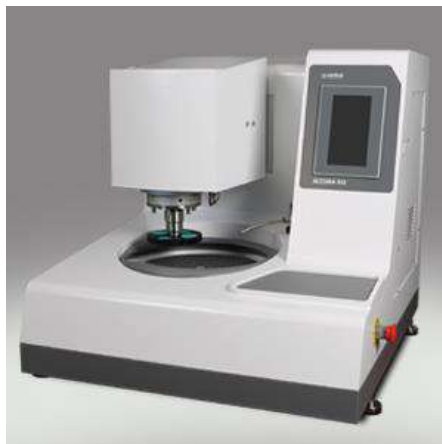


Fig. 9 – Pulidora automática Accura 102 (Metkon, 2023).

3.2.3 Automet

Estos equipos son la alternativa de la marca Buehler. La misma es una empresa multinacional de origen norteamericano con sede en seis países y más de 100 centros de distribución alrededor del mundo (Buehler, 2023). Con más de 85 años de experiencia en fabricación de equipos para uso en análisis de materiales, Buehler fue una de las primeras industrias en automatizar el proceso de pulido metalográfico.



Fig. 10 – Pulidora semiautomática AutoMet 250 Pro (Buehler, 2023)

La línea de productos Automet (Fig. 10) abarca pulidoras semiautomáticas con distintos tamaños de plato (200, 250, 300 mm) de características similares a las de sus competidores. Cuerpo y base de hierro fundido. AutoMet 250 Pro incluye controles de pantalla táctil a color y está diseñada para la preparación manual o automatizada de muestras. La máquina puede equiparse con una función de programación para dispensado automatizado, que permite

ahorrar costos y alcanzar resultados altamente reproducibles. Posee una función de programación avanzada que facilita la funcionalidad. Para configurar los procesos de manera sencilla, puede alternar rápidamente entre los pasos de un método.

3.2.4 Saphir y cabezal QPolGO

Son productos de la empresa QATM, que es un resultado de la co-operación de dos marcas: QNESS y ATM. La empresa tiene una sede en Mammelzen, Alemania y otra en Golling, Austria. En la primera se especializa en materialografía, consumibles, fabricación de mobiliario de laboratorio, desarrollo, fabricación y montaje de sus productos, mientras que en la segunda se llevan a cabo pruebas de dureza, análisis, desarrollo y ensamblaje de productos finales (QATM, 2023).

Los productos que ofrecen relacionados al análisis metalográfico abarcan desde máquinas de corte, embutición, lijadoras, pulidoras y durómetros de fabricación propia, hasta consumibles y accesorios.

Con respecto al pulido metalográfico, la empresa ofrece la opción de un cabezal portamuestras llamado QPOL GO (Fig. 11) adaptable a un modelo específico de pulidora manual de la misma marca.



Fig. 11 – Cabezal QPol GO en pulidora manual (QATM, 2023)

Algunas de sus características son:

- Construcción ligera
- Manejo cómodo y sencillo
- Presión individual variable
- Temporizador ajustable para el tiempo de preparación
- Sujeción del portamuestras sin herramientas
- Carcasa de aluminio con recubrimiento de polvo

La marca Saphir (Fig. 12) constituye una línea de productos más automatizados. El cabezal portamuestras se encuentra incluido en la propia pulidora, el cual posee una pantalla integrada de la cual se controlan todas las acciones de la máquina.

Algunas de sus características son:

- Presión central e individual
- Función de memoria
- Posibilidad de incorporar un dosificador u otros accesorios
- Función de medida de material desprendido



Fig. 12 – Pulidora automática Saphir (QATM, 2023)

3.2.5 Resumen de características

Se analizaron los equipos con mayor presencia en el mercado y se extrajeron las características de interés para el desarrollo del proyecto. Algunas marcas ofrecen cabezales portamuestras modulares o individuales tales como LaboForce (Struers), Forcimat (Metkon) y QPol Go (QATM). Asimismo, algunas pulidoras incluyen un cabezal propio no extraíble; este es el caso de Tegramin (Struers), Accura 102 (Metkon), Automet (Buehler) y Saphir (QATM).

Las mismas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2 – Características de cabezales portamuestras comerciales (Buehler, 2023) (Metkon, 2023) (QATM, 2023) (Struers, 2023)

Cabezales	Velocidad de rotación	Fuerza aplicada		Potencia Motor	Capacidad	Peso
		Central	Individual			
LaboForce	50 - 500 rpm	30 - 300 N	10 - 50 N	180 W	1 - 6 muestras	20,5 kg
Forcimat	50 - 150 rpm	30 - 500 N	5 - 60 N	100 W	1 - 10 muestras	16 kg
QPol Go	150 rpm	-	5 - 45 N	60 W	1 - 4 muestras	18,5 kg
Tegramin	50 - 150 rpm	30 - 400 N	5 - 65 N	160 W	1 - 6 muestras	98 kg
Accura 102	50 - 150 rpm	30 - 500 N	5 - 100 N	100 W	1 - 10 muestras	200 kg
Automet	30 - 60 rpm	20 - 260 N	5 - 45 N	116 W	1 - 6 muestras	77 kg
Saphir	30 - 150 rpm	20 - 400 N	5 - 100 N	170 W	1 - 6 muestras	85 kg

La mayoría de los equipos comerciales cuentan con motores de corriente continua que permiten variaciones de velocidades cada 10 rpm.

La fuerza de contacto en todos los casos se regula neumáticamente, ya sea de manera central aplicando una única carga que se reparte a todas las muestras, o de forma individual aplicando una carga distinta a cada probeta si es necesario.

Todos los equipos comerciales tienen la opción de intercambiar los distintos platos portamuestras mediante un acople rápido como los que se muestran en la Fig. 13. La mayoría puede sujetar hasta 6 muestras, pero el tamaño de estas dependerá del diámetro del plato de pulido. Algunos incorporan fijación de la muestra mediante un tornillo prisionero.



Fig. 13 – Platos portamuestras de acople rápido (Struers, 2023)



La mayoría de los cabezales investigados cuentan con programas de trabajo precargados en una memoria interna que pueden seleccionarse y modificar a través de una pantalla táctil digital incorporada al mismo.

Como conclusión, se resumen en la Tabla 3 los rangos comunes y extendidos que pueden adoptar las variables de interés en los cabezales portamuestras comerciales más destacados.

Tabla 3 – Resumen de variables de interés en cabezales portamuestras comerciales

		Rango común	Rango extendido
Velocidad de rotación		50 - 150 rpm	30 - 500 rpm
Fuerza aplicada	Central	30 - 300 N	20 - 500 N
	Individual	5 - 50 N	5 - 100 N
Potencia Motor		100 - 180 W	60 - 180 W
Capacidad		1 - 6 muestras	1 - 10 muestras
Peso		16 - 20 kg	16 - 20 kg

3.3 Equipos existentes en INTEMA

Actualmente en el INTEMA se encuentran en funcionamiento más de cinco modelos distintos de pulidoras metalográficas semiautomáticas (Fig. 14), algunas de las cuales cuentan con cabezales portamuestras mecánicos que permiten regular la fuerza aplicada mediante pesas calibradas con capacidad de hasta seis muestras en simultáneo (Fig. 15).

En cuanto a las velocidades de funcionamiento, algunas pulidoras ofrecen dos modos fijos de velocidad, a 150 rpm y 300 rpm. Otros modelos permiten variar la velocidad de forma discreta dentro de ese rango, y se ha observado que una de las pulidoras también puede ajustar la velocidad de manera continua.

A pesar de las variaciones en sus dimensiones generales, todas las pulidoras están equipadas con un plato de pulido de 200 mm de diámetro. Además, cada unidad tiene un dosificador incorporado que facilita la aplicación del lubricante usado para el pulido de las muestras.





Fig. 14 – Ejemplos de pulidoras de un laboratorio de INTEMA.





Fig. 15 – Pulidoras de INTEMA con portamuestras incorporado

3.3.1 Dimensiones de pulidoras del INTEMA

Se relevaron las dimensiones generales de siete máquinas diferentes que luego se compararon para establecer límites de movimiento y tamaño del cabezal portamuestras con el fin de que el brazo diseñado sea adaptable a la mayoría de las mismas.

Similitudes:

- El plato de pulido tiene 200 mm de diámetro.
- El plato de pulido se encuentra centrado a lo ancho de la pulidora.
- Alrededor del plato de pulido generalmente tienen un surco por donde drena el lubricante, seguido por un anillo que actúa como baranda protectora, que se encuentra a un nivel un poco más alto que el nivel del plato.
- En la mayoría, la totalidad de la base se apoya en la mesa de trabajo

Diferencias:

- Algunas de las pulidoras cuentan con dosificador incorporado en el mismo plano del plato de pulido.
- Algunas pulidoras cuentan con regulación de altura en la base.
- La altura de trabajo respecto a la mesa de apoyo varía notablemente entre pulidoras. La diferencia máxima entre el plato más bajo y el más alto es de 90 mm.
- La altura de la baranda protectora es distinta en todas las pulidoras. La diferencia máxima entre la superficie de trabajo y el punto más alto de la baranda, según lo relevado, es de 20 mm.



Conclusiones:

- Debido a las diferencias de altura de las máquinas, el cabezal deberá contar con un acercamiento rápido para posicionarse en la zona de trabajo y otro más lento para hacer contacto con el paño. Estos movimientos pueden ser realizados de manera manual o automática.
- El equipo deberá asegurar que la zona de trabajo quede despejada una vez terminado el pulido para poder retirar las muestras del portamuestras.
- El brazo portamuestras deberá estar apoyado a un lado de la pulidora, sobre la mesada de trabajo y deberá ser independiente de la misma. En consecuencia, tendrá que contar con un contrapeso en la base para asegurar la estabilidad del equipo.
- Como el objetivo es que el equipo sea adaptable a la mayoría de las pulidoras existentes, el mismo deberá ser lo suficientemente liviano y pequeño para poder ser trasladado de una posición a otra. Otra opción es que sea desarmable.





4 Determinación de las variables de diseño

Para definir las capacidades y características del equipo se partirá de las recomendaciones para el pulido de distintos materiales contenidas en la bibliografía y las características de los equipos más populares.

4.1 Análisis de las variables del pulido

En el capítulo de introducción se detallaron los posibles defectos que pueden aparecer en el acabado de superficies obtenidas por pulido metalográfico. Estos resultados eran causados ya sea por errores humanos en la preparación manual, errores en la selección de los parámetros del proceso o defectos propios del equipo.

La selección de los parámetros adecuados para realizar el pulido de determinada muestra es un aspecto importante del proceso de preparación. Algunos de ellos no se pueden variar durante el trabajo, pero otros pueden ser controlados con los accesorios adecuados. A continuación, se listan todos los parámetros del proceso de pulido mencionados en el marco conceptual.

- Superficie de trabajo abrasiva
- Tipo de abrasivo
- Tamaño de grano abrasivo
- Lubricante
- Velocidad del proceso
- Fuerza de contacto
- Tiempo de preparación

La velocidad del proceso, la fuerza de contacto y el tiempo de preparación son las tres variables que se deben poder controlar durante el proceso de pulido.

La velocidad de rotación que se recomienda en los métodos de preparación vistos en la Tabla 1 de la introducción sólo contempla la velocidad angular del disco de la pulidora sin tener en cuenta el diámetro del plato. Haciendo un análisis de toda la tabla se obtiene que la velocidad de giro del plato de pulido debe ser 150 o 300 rpm.

La velocidad depende de varios factores: de la velocidad a la que gire el disco de la pulidora, del tamaño del disco, de la posición de la muestra respecto al disco, de la variación de dicha posición con respecto al centro del disco.

Es recomendable que la relación de velocidades entre la muestra y el disco sea tal que permita que la muestra recorra toda la superficie del plato de manera uniforme. Existen relaciones de velocidades que hacen que la muestra siga siempre un mismo recorrido con respecto al plato, lo que hace que el disco de pulido se desgaste de manera localizada. Por ejemplo, si la muestra permanece inmóvil o rotando sobre sí misma, pero a una distancia fija del centro del plato, se forma un surco de desgaste circular concéntrico al disco que hace que se tenga que descartar.





Existen distintas maneras de variar la posición de la muestra sobre el plato de pulido. Puede ser de forma manual moviéndola de manera radial para que pase de un radio a otro, o de manera automática mediante un cabezal portamuestras rotativo o basculante.

En cuanto a la fuerza de contacto, en la Tabla 1 se proponen valores fijos de fuerza para una única muestra y para cada etapa del proceso, los cuales varían cada 5 N como mínimo. Los rangos de fuerza que se recomiendan abarcan el rango entre 10 N y 50 N.

Lo que hay que tener en cuenta es que se debe mantener lo más constante posible la presión sobre las muestras. Si se trabaja con más de una muestra igual a la vez utilizando un portamuestras, la fuerza aplicada debe ser la misma en todas las muestras.

También se deben tener en cuenta las oscilaciones que pueda a llegar a tener el plato de la pulidora en caso de que tenga alguna vibración. Esto puede provocar que la fuerza aplicada sobre la muestra sea oscilante y puede causar un desgaste irregular de la superficie de trabajo, o también que se pierda el contacto intermitentemente entre la muestra y el plato. El actuador que se seleccione para la aplicación de la fuerza debe tener la flexibilidad (o rigidez) adecuada para lograr la precisión necesaria.

Los tiempos de preparación no suelen extenderse más de 10 minutos consecutivos. Las recomendaciones de la Tabla 1 se encuentran dentro de ese rango. En la primera etapa de desbaste se indica que el tiempo de trabajo sea “hasta planitud”. Esto depende de cómo haya quedado la superficie de la muestra luego del proceso de corte y embutido, pero generalmente el proceso se divide en ciclos de trabajo de corto tiempo para inspeccionar de manera visual la superficie de la muestra entre cada ciclo.

El tiempo es una variable que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema de control del brazo portamuestras.

4.2 Definición de las variables de diseño

Tomando como base de referencia la información recopilada de modelos de cabezales portamuestras comerciales y teniendo en cuenta las recomendaciones para realizar el proceso de pulido según los tipos de materiales, indicadas en el marco teórico, se comienzan a definir las especificaciones del diseño.

Respecto a la velocidad de pulido, se parte de dos velocidades fijas para el plato de pulido: 150 y 300 rpm. Las pulidoras metalográficas más antiguas que se utilizan en el INTEMA permiten rotar en estas dos velocidades recomendadas de forma discreta. En cambio, las más nuevas permiten seleccionar cualquier valor dentro de ese rango. Por lo tanto, para el estudio cinemático del comportamiento del equipo se considerará que la velocidad de rotación del plato de pulido tendrá valores continuos dentro del rango de 150 a 300 rpm.

Como se mencionó previamente, para evitar un desgaste localizado en el paño de pulido, la velocidad de pulido (plato) y las velocidades de traslación y rotación de la muestra deberían cumplir ciertas relaciones. Las mismas se determinarán mediante un análisis cinemático





detallado. En cuanto a la velocidad de desplazamiento de las muestras, los cabezales de los equipos comerciales giran en un rango de 50 a 150 rpm, seleccionables de forma discreta, con saltos de 10 rpm. Más adelante se realizará un análisis cinemático detallado en el que se plantean distintas condiciones de funcionamiento en el rango de rpm mencionado y se determinarán las velocidades más convenientes, así como el grado de discretización requerido.

Para el análisis de la aplicación de la fuerza sobre la muestra se tomarán como punto de partida los valores de la columna “Rango común” de la Tabla 3, dado que abarca ampliamente el rango recomendado en los métodos de trabajo del metalograma (Fig. 4). Los valores de la columna “Rango extendido” se tendrán en cuenta para considerar desviaciones que puedan resultar del diseño o selección de los distintos componentes. Entonces, se considerará una fuerza máxima de 50 N en cada muestra para la selección del actuador correspondiente. Se puede observar que los equipos comerciales diferencian una fuerza central de una individual, pero en la bibliografía no se mencionan los actuadores que se utilizan para dichas fuerzas.

La cantidad de muestras que pueda sujetar el cabezal portamuestras que se está diseñando surge de la necesidad y frecuencia de uso que se le dé a la pulidora. De la consulta a varios usuarios frecuentes surge que en el INTEMA la cantidad de muestras que se usualmente se procesan en simultáneo es de 3 muestras. Si se emplea un sistema de fuerza individual, la cantidad de muestras a sujetar define la cantidad de actuadores necesarios para aplicar una fuerza individual. Por estas razones se optará por un diseño de portamuestras que pueda contener hasta 3 muestras en simultáneo atendiendo a las limitaciones de espacio y la premisa de minimizar los costos.

Con el desarrollo del proyecto se definirán otros aspectos del diseño tales como sistema de fijación, despeje y posicionamiento del cabezal, tamaño y posición de la base, sistemas de transmisión de movimiento, alimentación de los actuadores, etc.

En resumen, se busca diseñar un brazo portamuestras que cumpla con las siguientes condiciones:

- Poder trabajar con 3 muestras en simultáneo.
- Velocidad máxima de rotación del cabezal de 150 rpm.
- Carga máxima a aplicar sobre la muestra de 50 N.
- Carga mínima a aplicar sobre la muestra de 1 N.





5 Cinemática y dinámica del proceso de pulido

Se hace un breve análisis cinemático y dinámico del comportamiento de una muestra durante el proceso de pulido en distintas condiciones de funcionamiento con el objetivo de establecer los límites de trabajo del brazo portamuestras.

5.1 Trayectoria y orientación de la muestra

En una pulidora metalográfica con cabezal portamuestras como las analizadas en los capítulos previos, se pueden presentar distintas combinaciones de movimientos entre la muestra, el cabezal y el plato de la pulidora. Como resultado la muestra recorrerá diferentes trayectorias sobre el plato y presentará una orientación que depende de la velocidad de rotación de cada uno y de la posición relativa entre ellos.

En la Fig. 16 se presenta esquemáticamente, a modo de ejemplo, un plato de pulidora de 200 mm de diámetro en el cual se posiciona un cabezal portamuestras de 120 mm de diámetro, que contiene tres muestras de tamaño estándar (30 mm de diámetro). Esta es una distribución simplificada pero muy frecuente en el empleo de estos equipos. Para este caso se analizarán las trayectorias posibles, partiendo de un modelado numérico que describa el conjunto según un sistema de referencia inercial y uno relativo al plato. Finalmente se empleará simulación computacional para obtener las trayectorias descritas por la muestra sobre el plato.

5.1.1 Sistema de referencia absoluto

Se parte de la adopción de movimientos rotativos independientes para los tres elementos según la siguiente especificación:

- Velocidad de rotación absoluta del plato de pulido (ω_p)
- Velocidad de rotación absoluta del cabezal portamuestras (ω_c)
- Velocidad de rotación absoluta de la muestra (ω_m)

En el caso en que la magnitud de las tres coincida, se obtendría una trayectoria única sobre el plato de pulido y la orientación de la muestra se repetiría en cada ciclo. Como resultado el paño se gastaría formando un surco y la superficie de la muestra presentaría rayas orientadas preferencialmente. Esta condición debería evitarse, pero puede plantearse para verificar el análisis dada la previsibilidad del resultado.



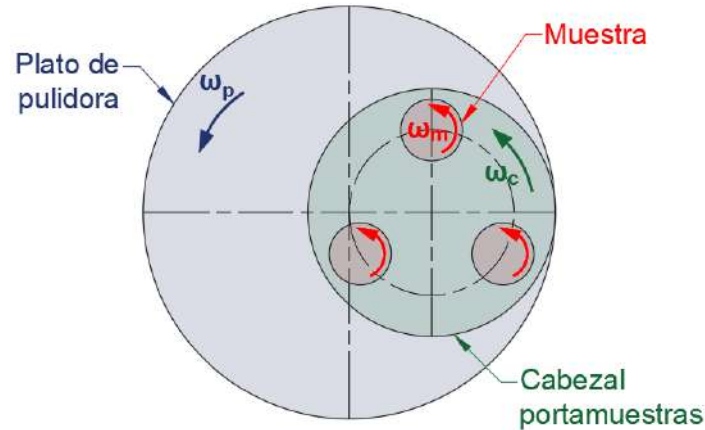


Fig. 16 – Esquema de componentes y movimientos en una pulidora metalográfica con cabezal portamuestras.

Se puede observar en el esquema propuesto que el portamuestras ocupa poco más de la mitad del plato de la pulidora. Si la muestra está sujeta de manera que pueda rotar libremente, cuando pasa por el centro del plato las fuerzas de fricción esquematizadas como tangenciales a cada lado de la misma son iguales, pero en sentido contrario, por lo que generan un par (momento) que hace que la muestra gire sobre sí misma un ángulo determinado por la velocidad del plato y el tiempo que permanece en esa zona (Fig. 17).

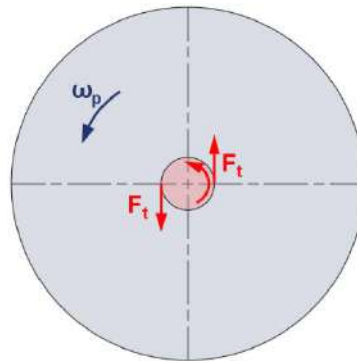


Fig. 17 – Rotación de la muestra sobre sí misma

En cualquier otra posición la muestra permanece sin rotación apreciable sobre sí misma. Su orientación no es controlada y cambia casi aleatoriamente al pasar por la zona del centro del plato. Este sistema es adoptado por pulidoras con portamuestras impulsados por la fuerza de fricción entre el paño y la muestra y controlados también por un freno de fricción en el eje del portamuestras como los de la Fig. 15.

Si se requiere un control total de la trayectoria y orientación sobre el plato, el equipo que se está diseñando debe permitir controlar las tres velocidades de rotación de manera independiente o mediante una relación de transmisión fija o variable. En dicho caso se pueden plantear las siguientes situaciones particulares:

1. La muestra y el portamuestras permanecen inmóviles ($\omega_m = \omega_c = 0$) mientras el plato de la pulidora rota sobre sí mismo con una velocidad absoluta (ω_p) (Fig. 18).

Como lo único que rota es el plato de la pulidora, los granos abrasivos siempre pasan en la misma dirección, de un lado a otro de la superficie de la muestra. La velocidad de pulido ($V_{t\text{ plato}}$) presenta una ligera variación en la superficie de la muestra siendo proporcional a la distancia al centro de rotación del plato. Esto da como resultado un patrón de rayas paralelas entre sí en la superficie, con una curvatura más pronunciada a medida que se encuentra más cercano al centro del plato. Al no haber un cambio de dirección en la muestra, los surcos formados por el abrasivo no se borran y se profundizan. Esta condición de trabajo solo es aceptable en las etapas de desbaste iniciales y debería cambiarse la orientación cada vez que se pasa a un abrasivo más fino.

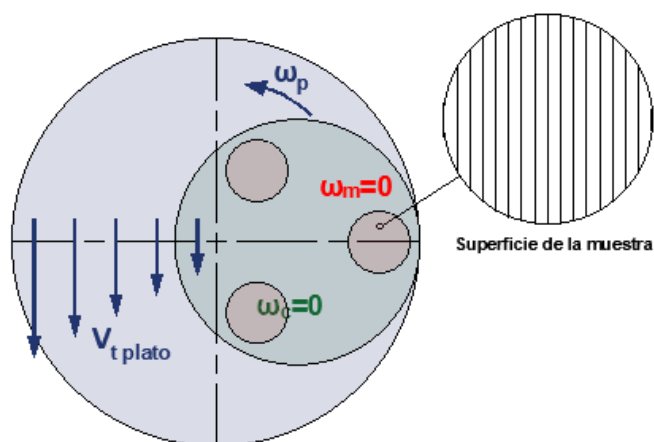


Fig. 18 – Patrón obtenido con rotación del plato pulidor y portamuestras y muestra fijos

2. La muestra rota sobre sí misma sin desplazarse mientras el plato gira sobre su propio eje. Al igual que en el caso anterior, el cabezal portamuestras permanece inmóvil ($\omega_c = 0$) (Fig. 19).

Como consecuencia, se forma un rayado entrecruzado en la superficie de contacto y a medida que pasa el tiempo de preparación éste desaparece. Un inconveniente es que, si hay más de una muestra ubicada en el portamuestras que permanece inmóvil, las mismas se estarían puliendo a velocidades diferentes por estar a distinta distancia del centro del plato. Como resultado el tiempo de pulido es diferente, así como la terminación lograda, al mismo tiempo que el paño de pulido sufre desgaste localizado.

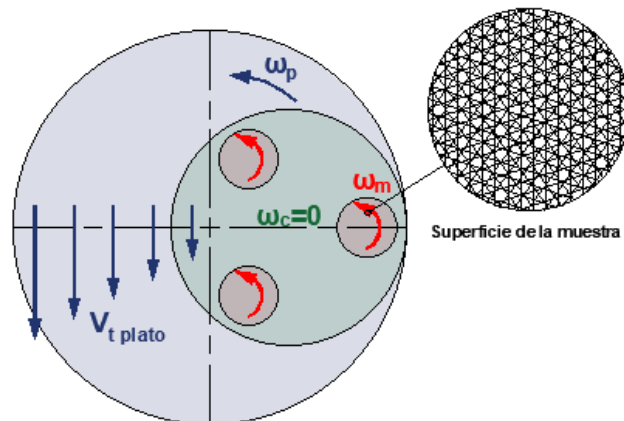


Fig. 19 – Patrón obtenido con rotación de plato pulidor y muestra sobre su propio eje, con portamuestras fijo

3. El portamuestras rota sobre su propio eje arrastrando las muestras mientras mantienen la orientación respecto del sistema inercial ($\omega_m=0$) y el plato de la pulidora rota sobre sí mismo (Fig. 20).

En este caso las muestras presentan un patrón de rayado, pero el mismo será no-uniforme. Esto se debe a que las probetas siempre quedarán orientadas en la misma dirección, pero se ubicarán sobre la superficie del plato en distintas posiciones radiales. En estas condiciones los surcos producidos por las partículas abrasivas presentan distintas curvaturas y se producen a distintas velocidades. Los más marcados se producirían cada vez que las muestras pasen por el punto más alejado al centro del plato dado que en este punto la velocidad de pulido ($V_{t\text{ plato}}$) es mayor, lo que hace que el trabajo de desbaste sea mayor.

La diferencia sustancial con el primer caso planteado es que, en él, el patrón de rayado resulta distinto en las tres muestras. En las muestras que están más cerca del centro del plato el patrón es más curvo y el pulido se produce a menor velocidad. En este caso (3) todas las muestras presentarán un patrón de rayado similar no uniforme y siempre orientado hacia la misma dirección.

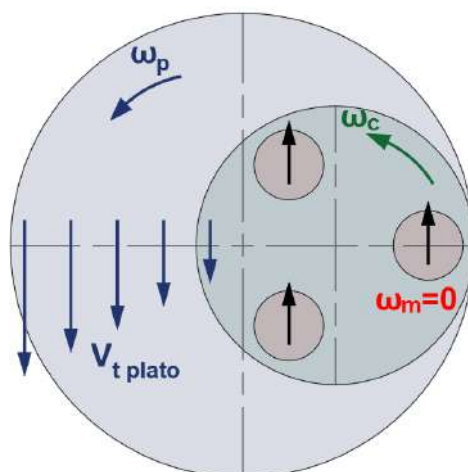


Fig. 20 – Rotación del plato y portamuestras, con muestra fija arrastrada por el portamuestras

4. En el último caso se plantea que los tres elementos rotan en el mismo sentido a la misma velocidad angular ($\omega_p = \omega_m = \omega_c$) (Fig. 21).

Así como en el caso anterior, cada vez que se cumple un ciclo de rotación, la muestra pasa por el mismo lugar donde comenzó con la misma orientación y dirección iniciales, pero habrá dado un giro completo.

El patrón de rayado en la superficie de la muestra en este caso resultaría bastante homogéneo y similar en todas las muestras, ya que las mismas rotan alrededor del eje del portamuestras que está excéntrico al plato de pulido. Esto produce que los granos abrasivos siempre pasan en un mismo sentido, pero a diferencia del caso 1, la muestra cambia de orientación respecto a la velocidad de pulido ($V_{t\text{ plato}}$) en cada punto mientras que dicha velocidad varía con la distancia al centro.

Este modo de funcionamiento es el que se utilizaría en las etapas de desbaste, rotando la muestra 90 grados entre etapas.



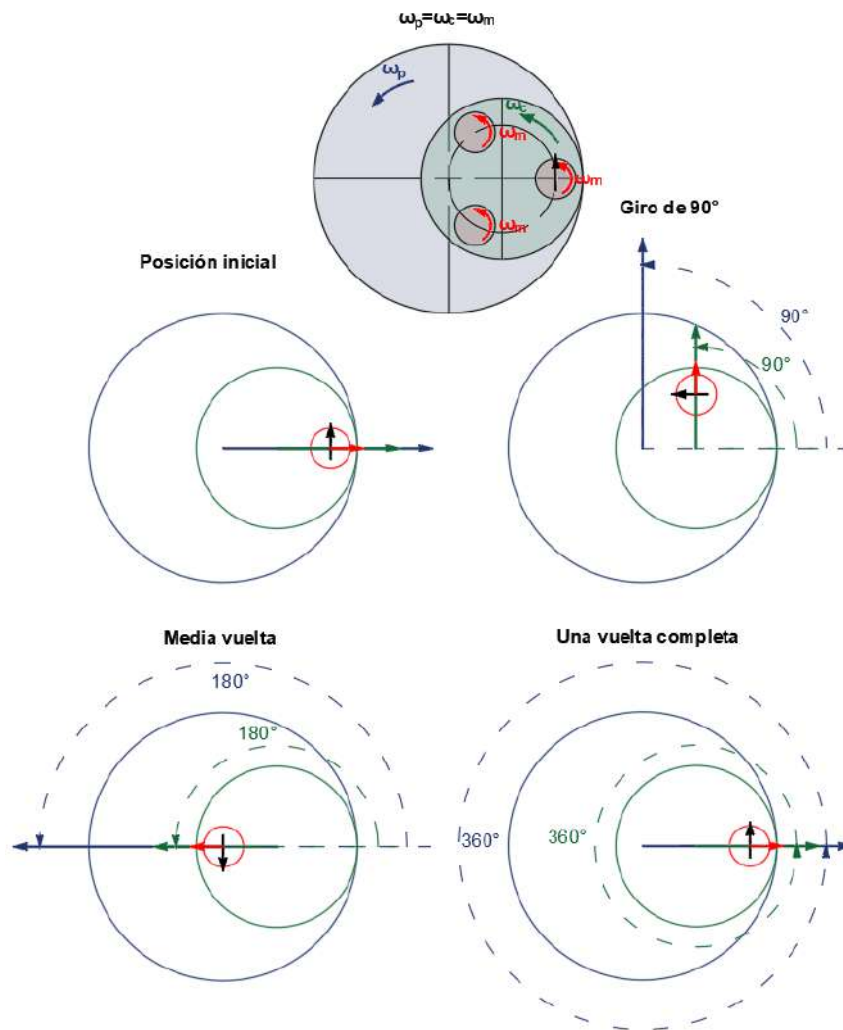


Fig. 21 – Etapas de rotación de los tres elementos en el mismo sentido y a igual velocidad angular

Con estos 4 casos de estudio se puede deducir que hay muchas combinaciones de velocidades y sentidos de giro del sistema que pueden llevar a resultados similares. Se plantea entonces realizar un análisis de las posibles combinaciones de velocidades (ω_p , ω_m , ω_c) para encontrar las condiciones de funcionamiento del sistema más adecuadas.

Se comienza por plantear otros sistemas de referencia para poder identificar los movimientos principales del conjunto e identificar el mejor enfoque para modelar la interacción entre el plato de pulido y las muestras.

5.1.2 Sistema de referencia fijo en el centro del cabezal portamuestras

Como se mencionó previamente la muestra se desplaza siguiendo una trayectoria circular mientras cambia de orientación y el plato bajo la misma se desplaza. Este movimiento puede describirse empleando distintos sistemas de referencia diferentes al inercial. A su vez el movimiento puede disociarse en traslación y rotación.

- Traslación de la muestra relativa al cabezal

En la Fig. 22 se representa esquemáticamente el sistema estudiado en dos posiciones diferentes correspondientes al inicio del movimiento ($t=0$) y un instante posterior ($t>0$). La primera en un estado inicial donde los tres cuerpos se encuentran alineados al eje "x", y un segundo momento (t) en el que el cabezal portamuestras rotó un determinado ángulo " θ_c " dado por su velocidad angular absoluta " ω_c ". En todo momento la muestra se encuentra a una distancia " a " del centro del portamuestras. Cuando el cabezal rota, la muestra se mantiene concéntrica al alojamiento de éste, quedando su centro siempre coincidente al eje "x" (Solidario al cabezal)". Como conclusión, la muestra no presenta traslación relativa al cabezal portamuestras.

- Rotación de la muestra relativa al cabezal

Para el análisis se adopta un caso en el que la velocidad de rotación absoluta de la muestra (ω_m) es mayor a la del portamuestras (ω_c) y en el mismo sentido antihorario (Fig. 22). Como se describió en el apartado previo, en todo momento la muestra se encuentra a la misma distancia del centro del portamuestras (a), es decir que no presenta traslación relativa. En un determinado tiempo (t), el portamuestras rota un ángulo (θ_c) dado por su velocidad angular absoluta $\theta_c = \omega_c * t$. A su vez la muestra gira a una velocidad absoluta $\omega_m > \omega_c$ que multiplicada por el mismo tiempo (t) resulta en un ángulo de rotación absoluto $\theta_m = \omega_m * t$. La rotación relativa de la muestra con respecto al portamuestras ($\theta_{m/c}$) está dada por la diferencia entre ambas rotaciones $\theta_{m/c} = \theta_m - \theta_c$. Y la velocidad angular relativa correspondiente está dada por la ecuación $\omega_{m/c} = \omega_m - \omega_c$.

Si en el cabezal se instala un dispositivo que se traslade con el mismo y transmita rotación a la muestra, su velocidad de rotación coincidirá con $\omega_{m/c}$. Este dispositivo es mucho más fácil de obtener que uno que transmita una velocidad de rotación absoluta a la vez que la posición del centro de rotación de la muestra se traslada describiendo una circunferencia con radio " a ". En este último caso se debe emplear un sistema de transmisión de movimiento planetario o epicicloidal.

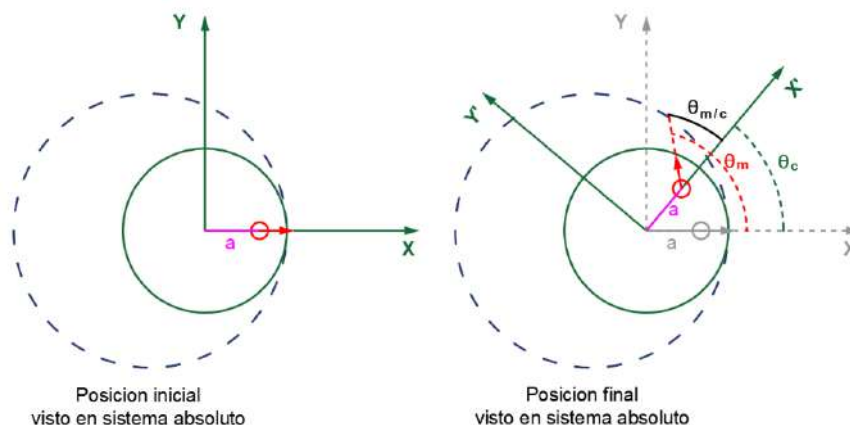


Fig. 22 - Representación gráfica de la traslación y rotación de la muestra relativa al portamuestras ($\theta_{m/c}$).

5.1.3 Sistema de referencia solidario al plato de pulido

Se presenta el caso en el que el portamuestras gira a una velocidad absoluta (ω_c) mayor a la del plato de pulido (ω_p) y en el mismo sentido. El portamuestras rota un ángulo absoluto (θ_c) dado por su velocidad angular absoluta en un determinado tiempo (t) $\theta_c = \omega_c * t$. A su vez el plato de pulido gira a una velocidad absoluta $\omega_p < \omega_c$ que multiplicada por el mismo tiempo (t) resulta en un ángulo absoluto $\theta_p = \omega_p * t$.

- Traslación de la muestra relativa al plato de pulido

En la configuración analizada la posición absoluta del centro de rotación del plato y del cabezal portamuestras permanecen inmóviles. Se propone una rotación antihoraria del cabezal y plato con velocidades absolutas $\omega_c > \omega_p$. En este caso, el centro de masa de la muestra corresponde a un punto que gira solidario y concéntrico al alojamiento en el cabezal portamuestras. En este análisis no se tiene en cuenta la orientación de la muestra, considerándola como un punto ubicado en su centro de masa.

Inicialmente la muestra se encuentra en una posición 1 a una distancia “R” del centro del plato de pulido (Fig. 23 izquierda). Si se considera que solo gira el plato, la muestra quedaría a la misma distancia $R' = R$ rotada un ángulo θ_p respecto al centro del plato, representada como la posición 0 en la Fig. 23 (derecha). Sin embargo, al girar el portamuestras el ángulo θ_c , la muestra se desplaza dentro del alojamiento y se acerca al centro del plato a una distancia “r” (Fig. 23 centro). La diferencia vectorial entre “R” y “r” es la traslación “ $T_{m/p}$ ” que hizo la muestra respecto al sistema de referencias ubicado en el centro del plato de pulido, que gira solidario al mismo ($X'-Y'$) con velocidad absoluta ω_p .

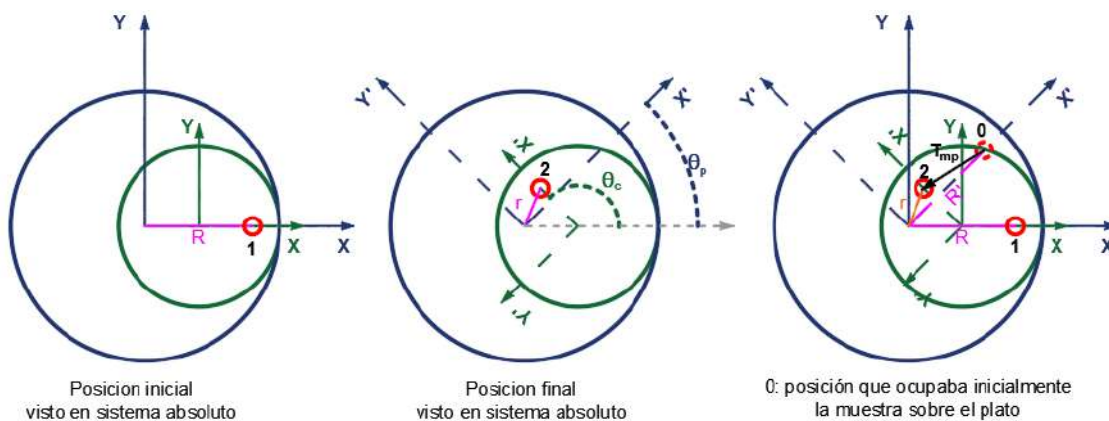


Fig. 23 - Representación gráfica de la traslación de la muestra relativa al plato de pulido ($T_{m/p}$).

- Rotación de la muestra relativa al plato de pulido

Tomando las condiciones mencionadas en el inciso anterior, el ángulo de rotación de la muestra relativa al plato de pulido resulta de la diferencia entre las rotaciones absolutas de la muestra y del plato $\theta_{m/p} = \theta_m - \theta_p$.

Para que la rotación absoluta de la muestra sea independiente de los demás movimientos involucrados, se necesitan actuadores que además de ejercer una presión sobre la muestra tengan rotación propia. Para lograr esto, el diseño del cabezal se torna muy complejo, lo cual excede el propósito de este trabajo. Para simplificar el diseño del equipo, pero obteniendo resultados similares, la rotación absoluta de la muestra será una variable dependiente de la rotación absoluta del cabezal.

Según esto, en el apartado 5.1.2 el valor de $\theta_{m/c}$ será una variable conocida, por lo que la rotación absoluta de la muestra será $\theta_m = \theta_{m/c} + \theta_c$. Con este dato, la ecuación de la rotación de la muestra relativa al plato de pulido (Fig. 24) queda de la siguiente manera:

$$\theta_{m/p} = \theta_{m/c} + \theta_c - \theta_p$$

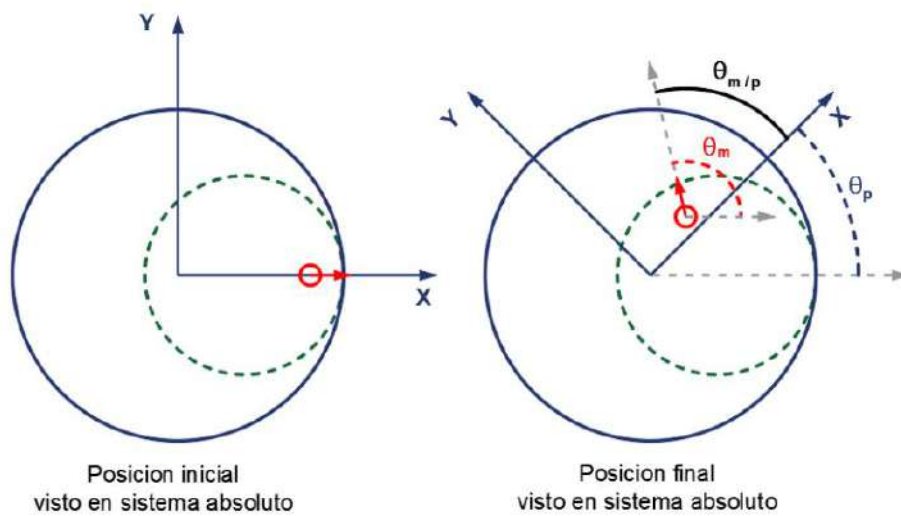


Fig. 24 – Representación gráfica de la rotación de la muestra relativa al plato de pulido ($\theta_{m/p}$)

- Traslación del centro del portamuestras relativa al plato de pulido

Con las mismas condiciones que en los incisos anteriores se analiza el movimiento del portamuestras relativo al plato de pulido.

En el primer esquema de la Fig. 25 se representan el plato y el portamuestras en su posición inicial. En el segundo esquema, la posición final luego de un tiempo t . Como se puede observar, la trayectoria del portamuestras sobre el plato de pulido ($T_{c/p}$) es un movimiento circular con radio “ R ” igual a la distancia del centro del cabezal al centro del plato.

La ecuación del movimiento de traslación en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$T_{c/p} \begin{cases} x_{c/p} = R \cos(-\omega_p t) \\ y_{c/p} = R \sin(-\omega_p t) \end{cases}$$

El signo negativo se debe a que el movimiento relativo del cabezal portamuestras es contrario al giro absoluto del plato (el centro del portamuestras se mueve en sentido horario respecto de un sistema de referencias solidario al plato).

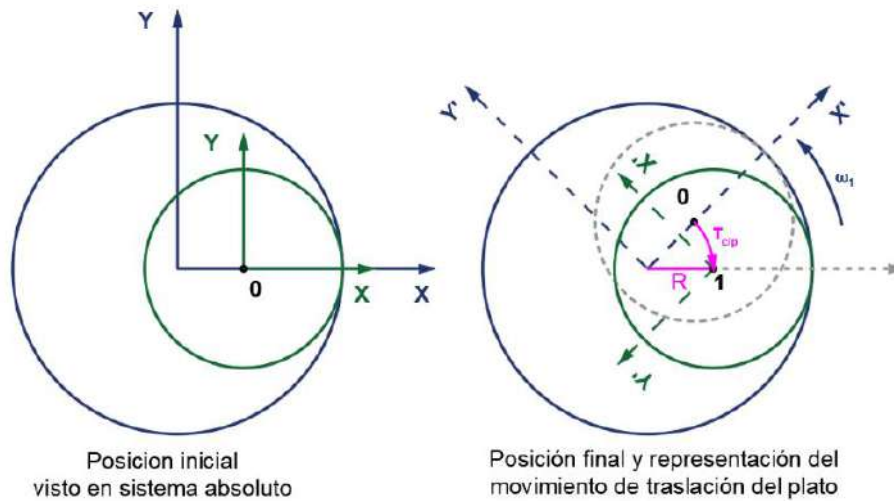


Fig. 25 – Representación gráfica de la traslación del centro del portamuestras respecto al plato de pulido ($T_{c/p}$).

- Rotación del portamuestras relativa al plato de pulido

La rotación del portamuestras relativa al plato de pulido está dada por la diferencia entre las rotaciones absolutas del portamuestras y del plato (Fig. 26). Si se considera que el plato y el cabezal presentan un giro antihorario con velocidades $\omega_p < \omega_c$. Para un determinado tiempo (t) donde el plato gira un ángulo $\theta_p = \omega_p * t$ y el cabezal $\theta_c = \omega_c * t$, el ángulo girado por el cabezal portamuestras respecto del plato resulta:

$$\theta_{c/p} = \theta_c - \theta_p$$

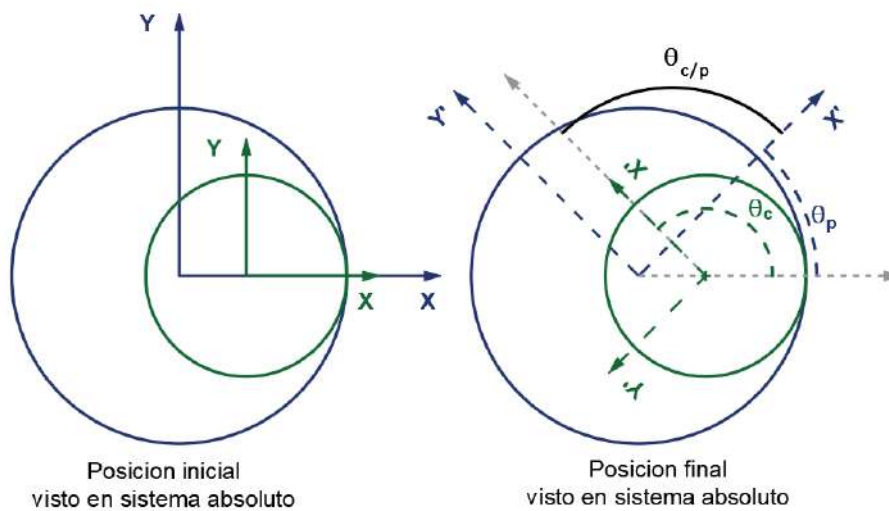


Fig. 26 – Representación gráfica de la rotación del portamuestras respecto al plato de pulido ($\theta_{c/p}$).

Las expresiones obtenidas permitirán modelar numéricamente el movimiento relativo de los componentes del sistema, particularmente interesa conocer las trayectorias que recorrerían las muestras sobre el plato.

5.1.4 Análisis numérico de la trayectoria de la muestra respecto al plato

Tomando como base el análisis de la posición de la muestra relativa al plato de pulido, se busca determinar cómo deberían ser las combinaciones de las variables empleadas para evitar generar un desgaste desparejo en el paño de pulido, producto de trayectorias repetitivas o cíclicas de la muestra sobre el paño. Como sólo se analizará la trayectoria de la muestra, no se tendrá en cuenta la rotación sobre su propio eje.

Para poder obtener un resultado claro y visible, se optó por generar un programa en un entorno de programación libre para análisis numérico (Octave) en el que se simulan distintas combinaciones. En el mismo se plantearon las ecuaciones de movimiento del sistema y se obtuvieron gráficas de la posición de la muestra sobre el plato en función del tiempo.

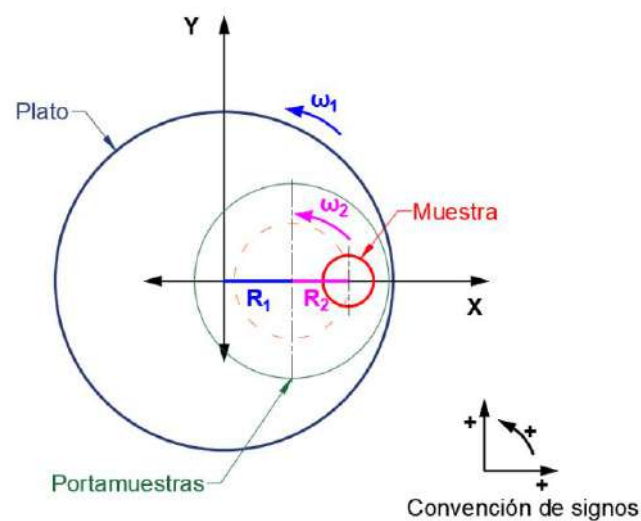


Fig. 27 – Esquema del sistema con las variables conocidas y convención de signos.

En la Fig. 27 se muestra un esquema con las variables del sistema conocidas, las cuales son:

- R_1 : Distancia del centro del portamuestras al centro del plato de pulido
- R_2 : Distancia del centro de la muestra al centro del portamuestras
- ω_1 : Velocidad angular absoluta del plato de pulido (ω_p)
- ω_2 : Velocidad angular absoluta del portamuestras (ω_c)
- t : Tiempo

En la Fig. 28 se representa la posición de la muestra en un determinado instante (t) donde el plato y el cabezal portamuestras giraron una determinada cantidad. La trayectoria recorrida por la muestra sobre el plato resultará de la sucesión de posiciones para distintos instantes.

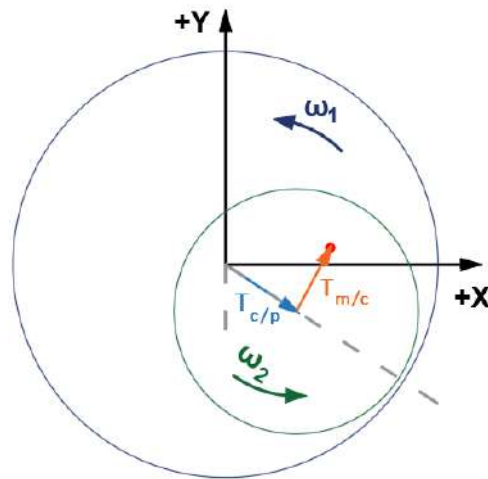


Fig. 28. Descomposición de la posición del centro de masas de una muestra

La posición de la muestra sobre el plato ($T_{m/p}$) estará dada por la suma de los vectores posición del centro del cabezal portamuestras respecto del eje del plato ($T_{c/p}$) y de la muestra respecto del centro del portamuestras ($T_{m/c}$) (Fig. 28).

$$T_{m/p} = T_{m/c} + T_{c/p}$$

Estas posiciones resultan de la rotación simultánea del plato y el cabezal portamuestras, las que trasladan el centro de masas de la muestra.

Los movimientos circulares que resultan de la sucesión de distintos instantes como el representado en la Fig. 28 pueden descomponerse en coordenadas cartesianas. Si se representan las posiciones relativas a un sistema de ejes cartesianos que rota solidario con el plato de pulido, introduciendo las variables conocidas del sistema, los movimientos circulares de cada parte se representan con las siguientes ecuaciones:

$$T_{c/p} \begin{cases} x_{c/p} = R_1 \cos(-\theta_p) \\ y_{c/p} = R_1 \sin(-\theta_p) \end{cases}$$

$$T_{m/c} \begin{cases} x_{m/c} = R_2 \cos(\theta_{c/p}) \\ y_{m/c} = R_2 \sin(\theta_{c/p}) \end{cases}$$

Donde:

- $x_{c/p}$: posición del centro del cabezal portamuestras relativo al plato en el eje x
- $y_{c/p}$: posición del centro del cabezal portamuestras relativo al plato en el eje y
- $x_{m/c}$: posición de la muestra relativa al cabezal portamuestras en el eje x
- $y_{m/c}$: posición de la muestra relativa al cabezal portamuestras en el eje y
- θ_p : ángulo de giro absoluto del plato de pulido
- $\theta_{c/p}$: ángulo de giro del portamuestras relativo al plato de pulido



Como se mostró en el apartado 5.1.3, el ángulo de giro del portamuestras relativo al plato de pulido está dado por la resta entre el giro absoluto del portamuestras y el giro absoluto del plato. Reemplazando esto mismo en las ecuaciones anteriores y poniendo los ángulos como el producto de las velocidades angulares por el tiempo, las ecuaciones de las posiciones resultan:

$$T_{c/p} \begin{cases} x_{c/p} = R_1 \cos(-\omega_1 t) \\ y_{c/p} = R_1 \sin(-\omega_1 t) \end{cases}$$
$$T_{m/c} \begin{cases} x_{m/c} = R_2 \cos((\omega_2 - \omega_1)t) \\ y_{m/c} = R_2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t) \end{cases}$$

Entonces, la ecuación de la trayectoria de la muestra relativa al plato de pulido en el sistema cartesiano quedaría de la siguiente manera:

$$T_{m/p} \begin{cases} x_{m/p} = R_1 \cos(-\omega_1 t) + R_2 \cos((\omega_2 - \omega_1)t) \\ y_{m/p} = R_1 \sin(-\omega_1 t) + R_2 \sin((\omega_2 - \omega_1)t) \end{cases}$$

Para poder graficar la trayectoria de la muestra sobre el plato, se programaron y simularon en el entorno de programación Octave, las ecuaciones planteadas. Para las constantes se adoptaron valores de referencia extraídos de una pulidora estándar de las disponibles en el INTEMA. En una pulidora estándar de ese tipo el diámetro promedio de discos de pulido es de 200 mm. Para lograr que el centro de masas de la muestra pase por el centro del plato se seleccionan valores iguales para las distancias R_1 y R_2 (Fig. 27), siendo 34 mm el valor empleado en las últimas iteraciones.

En la Fig. 29 se muestra el código ingresado en el programa Octave para graficar la trayectoria. El mismo es el resultado del análisis previo y de varias iteraciones que permitieron realizar un programa simple y compacto que representa las trayectorias recorridas por el centro de las muestras sobre el plato en un determinado período de tiempo. Las variables de entrada al programa son las velocidades de rotación del plato de pulido V_1 [rpm] y del cabezal portamuestras V_2 [rpm]. Para que las mismas se puedan ingresar en unidades de revoluciones por minuto, como se trabajarán en el resto del proyecto, en el programa se hizo la conversión a radianes por segundo con las variables (ω_1) y (ω_2) respectivamente. Luego, se iteró la ecuación de la posición en un rango de tiempo “dt” de 0 a 60 segundos, en intervalos de 0,001 segundos para que la gráfica de la trayectoria resultante se vea continua. Por último, para cada combinación de velocidades ingresada, se obtuvo un gráfico que representa las distintas posiciones que fue tomando la muestra en el plato de la pulidora.





```
1 v1=input("Velocidad de rotacion de la pulidora v1 [rpm]: ");
2 v2=input("Velocidad de rotacion del portamuestras v2 [rpm]: ");
3 R1=34;
4 R2=34;
5 w1=v1*pi/30;
6 w2=v2*pi/30;
7 for dt=0:60;
8     t=0:0.001:dt;
9     x=R1*cos(-w1*t)+R2*cos((w2-w1)*t);
10    y=R1*sin(-w1*t)+R2*sin((w2-w1)*t);
11 endfor
12 plot(x,y);
13 title("Posición de la muestra en el plano del plato pulidora");
14 axis([-100,100,-100,100]);
15 xlabel("x");
16 ylabel("y");
```

Fig. 29 – Código utilizado en el Entorno de programación Octave para obtener la trayectoria de la muestra relativa al plato de pulido, en función de las velocidades de rotación.

En los gráficos que se verán a continuación se representa el recorrido que realizaría el centro de la muestra sobre el plato, para distintas velocidades. Los ejes XY corresponden a un sistema cartesiano que gira con el plato cuyo origen de coordenadas se ubica en el centro del mismo. El rango seleccionado en cada eje va de -100 a 100 para representar la superficie de un plato de 200 mm de diámetro. Se realizaron diferentes simulaciones buscando las combinaciones de velocidades que permiten que la muestra pase por distintos puntos sobre el plato a medida que vaya cumpliendo ciclos de giro. En el gráfico esto se representa con más área del plato cubierta por líneas.

Para verificar que el programa funcione correctamente se plantearon dos situaciones particulares, que resultan en trayectorias muy fácilmente identificables:

- 1) Que el plato de pulido permanezca inmóvil ($v_1=0$) y el portamuestras tenga una velocidad angular absoluta $v_2=100$ rpm. El resultado fue el de la Fig. 30, donde la muestra describe una trayectoria circular excéntrica, a una distancia R_1 con radio R_2 , siendo $R_1=R_2=34$ mm. Se observa que, como se esperaba, la trayectoria pasa por el origen de coordenadas.



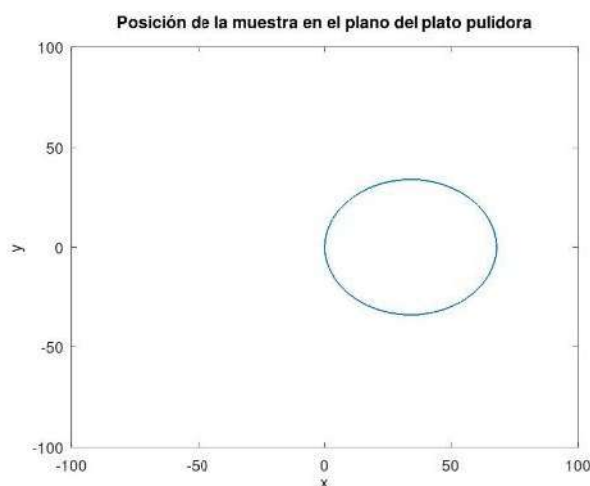


Fig. 30 – Trayectoria de la muestra con $v_1=0$, $v_2=100$ rpm, $R_1=R_2=34$ mm.

- 2) Que el plato de pulido tenga una velocidad absoluta constante $v_1=100$ rpm y el portamuestras permanezca inmóvil con la muestra en la posición inicial. El resultado fue una trayectoria circular concéntrica al plato de radio $R_1+R_2= 68$ mm. (Fig. 31)

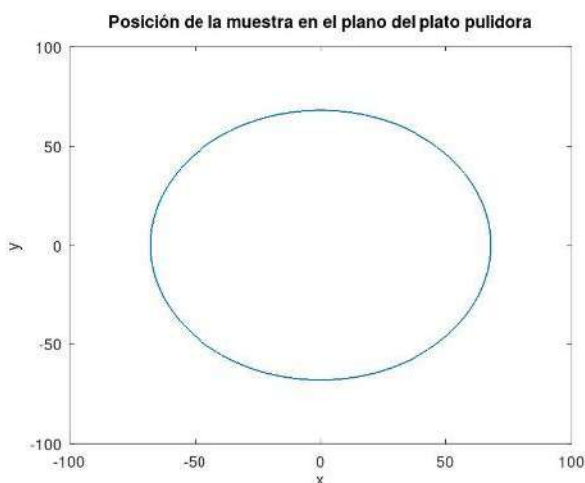


Fig. 31 – Trayectoria de la muestra con $v_1=100$ rpm, $v_2=0$, $R_1=R_2=34$ mm.

El segundo paso fue probar combinaciones de velocidades que sean múltiplos o submúltiplos entre sí, las cuales dieron trayectorias como las de la Fig. 32. Se puede ver en que en todos los gráficos la muestra hace siempre la misma trayectoria, repitiendo el camino recorrido mientras transcurre el tiempo de funcionamiento. En estas condiciones de trabajo la muestra pasaría repetidas veces por el mismo trayecto sobre el plato, provocando un desgaste localizado en el paño.

Como paso siguiente, se simulaban combinaciones de velocidades cuyo cociente resulta en un número irracional (Fig. 33). Con estos resultados se observa que hay más superficie del plato cubierta, por lo tanto, un desgaste del paño más parejo.

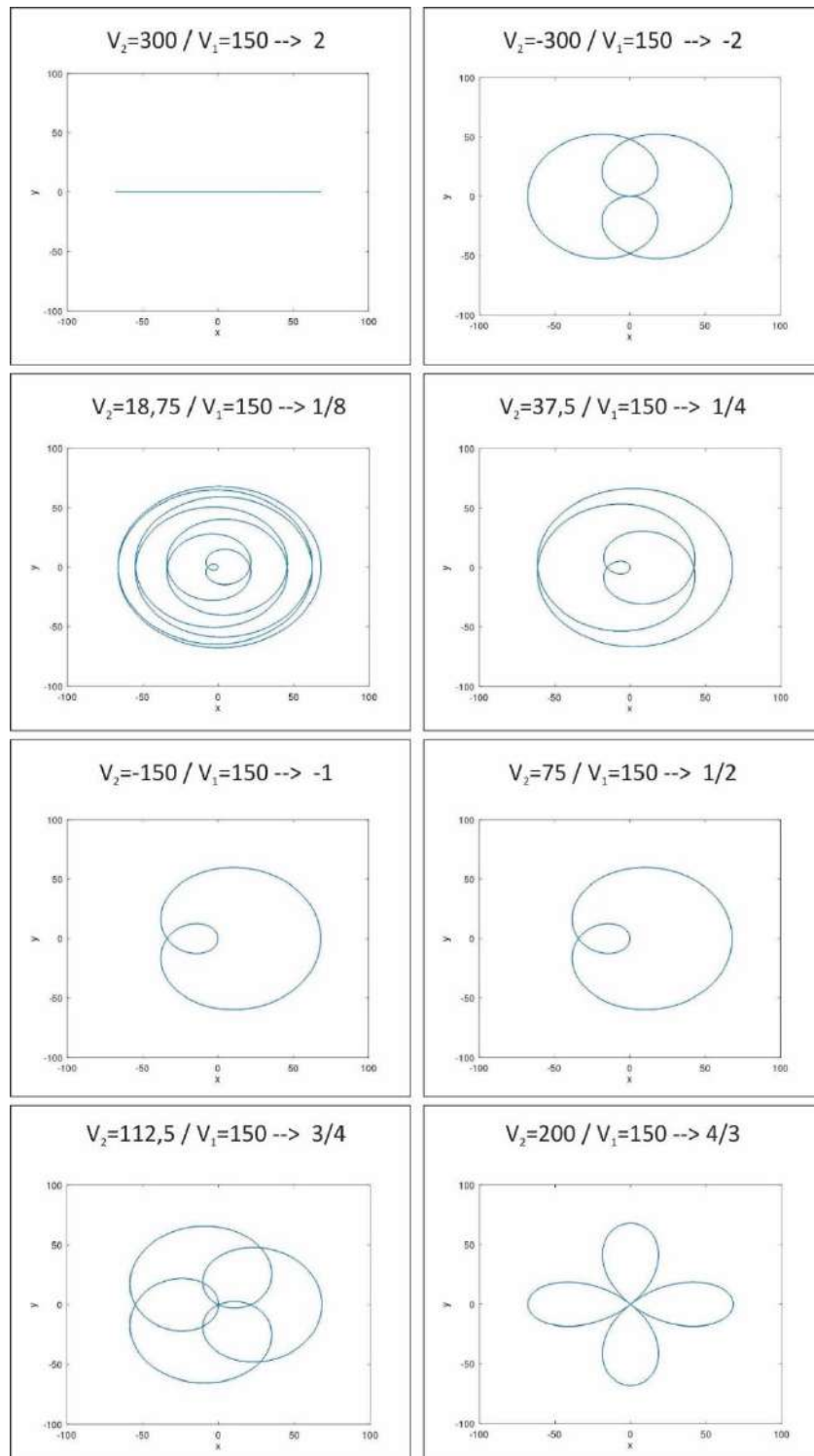


Fig. 32 – Trayectorias de la muestra sobre el plato de pulido, para distintas combinaciones de velocidades V_1 y V_2 , siendo las mismas múltiplos o submúltiplos entre sí.



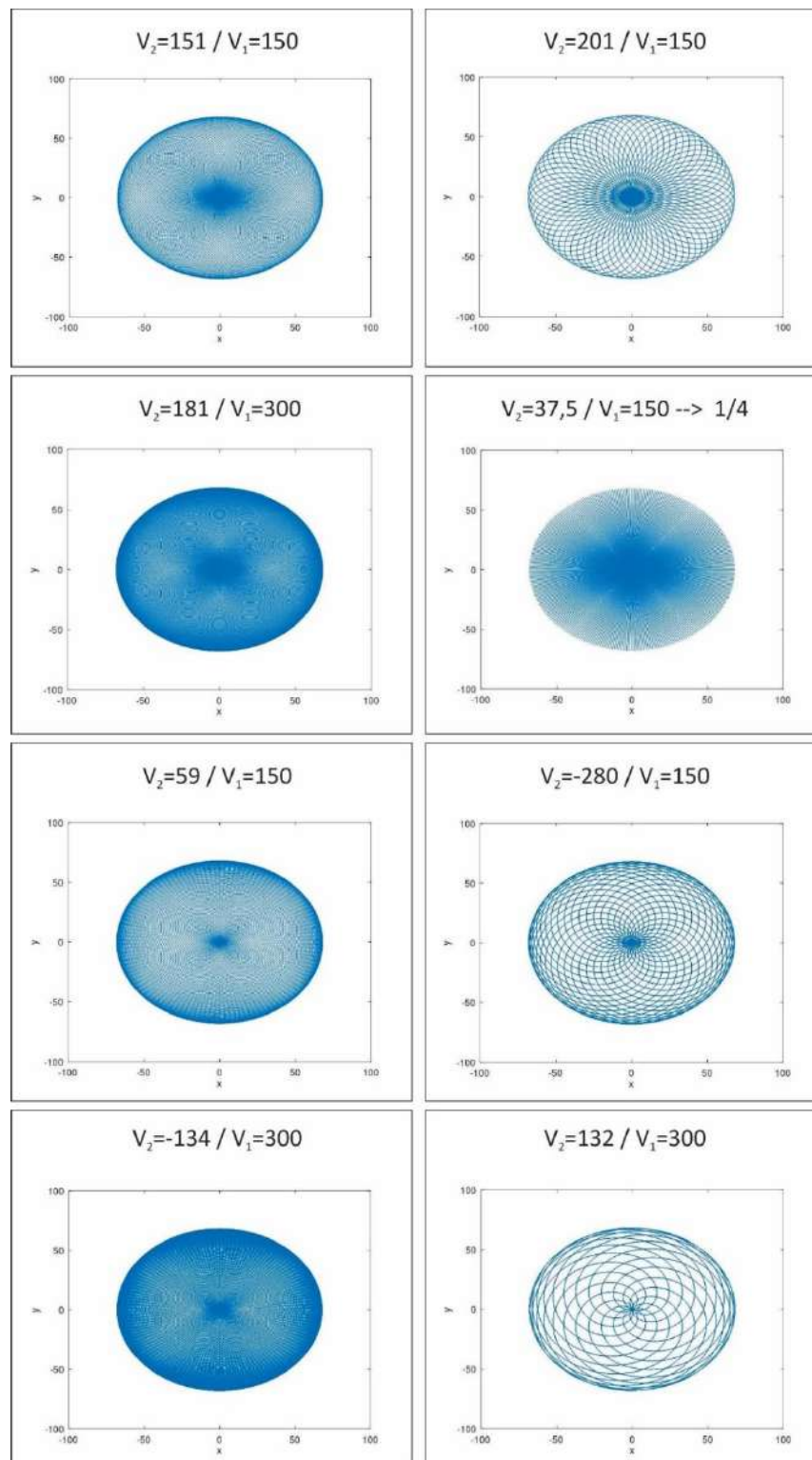


Fig. 33 - Trayectorias de la muestra sobre el plato de pulido, para distintas combinaciones de velocidades V_1 y V_2 , cuyo cociente es un número irracional.





Como resultado del análisis se puede concluir que es conveniente evitar que el cabezal portamuestras rote a velocidades que sean múltiplos o fracciones de la velocidad de rotación del plato de pulido. Cualquier otra combinación de velocidades que resulte en un número irracional es favorable para que el desgaste del paño de pulido sea parejo resultando en una vida útil mayor y en mejor terminación de la superficie pulida.

Dado que muchas de las pulidoras del INTEMA tienen sólo dos velocidades fijas de giro: 150 rpm y 300 rpm, el brazo portamuestras, podría diseñarse con un motor principal de giro de cabezal capaz de regular la velocidad de forma continua. Se deberá agregar un control de velocidad lo suficientemente preciso para que no coincida exactamente con ningún múltiplo de las dos velocidades mencionadas. En el caso de las pulidoras con variación de velocidad debe prestarse especial atención al seleccionar las velocidades de trabajo.

5.2 Aceleración y contacto en el eje Z

En esta sección se analiza la condición de contacto entre la superficie de la muestra y del plato de pulido durante el funcionamiento del equipo cuando se presenta una desalineación entre los componentes. El objetivo es determinar los límites de desviación que hagan que las superficies pierdan contacto entre sí.

Algunas posibles causas de esta situación pueden ser que:

1. La normal del plato se encuentre desviada del eje de rotación del mismo, siendo paralelos entre sí los ejes del plato de pulido, del cabezal portamuestras y de la muestra.
2. Los ejes de rotación de plato, cabezal y muestra no sean paralelos.
3. El plato de pulido no tenga la planitud necesaria.
4. Deformación elástica y aparición de resonancia.

De los casos mencionados se estudia el primero, ya que la planitud del plato es un requisito de pulido metalográfico, mientras que los otros se evitarán dado que son condición de diseño que no se considerarán.

En la Fig. 34 se esquematiza la primera situación. El plato de la pulidora presenta un ángulo de desalineación " θ " respecto al eje de rotación. Se posiciona una muestra a una distancia " a " del centro del plato. El caso más desfavorable se presenta cuando la muestra pasa por el extremo más alejado del centro, o sea cuando la distancia " a " es la máxima, por lo tanto, se analizará sólo la diferencia de altura de desalineación del plato en ese punto en el eje " z ".



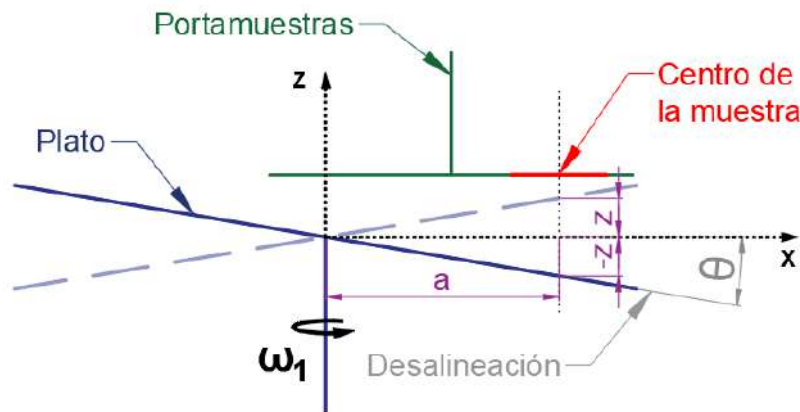


Fig. 34 – Desviación de la normal al plato de pulido con ejes de rotación paralelos.

Cuando el plato comience a rotar sobre su eje con una velocidad angular “ ω_1 ” la altura de la muestra oscilará entre una posición mínima y máxima siguiendo la siguiente función:

$$z = Z_1 \sin \theta$$

Siendo “ Z_1 ” la altura de desalineación y sabiendo que el ángulo de desalineación “ θ ” depende de la velocidad de rotación del plato en el tiempo.

$$\theta = \omega_1 * t$$

Reemplazando esto último en la ecuación anterior, el movimiento de cambio de altura de un punto en el plato en la distancia fija “ a ” se obtiene:

$$z = Z_1 \sin(\omega_1 t)$$

Cuando el punto del plato se encuentra en su posición de máxima desalineación ($z_{\text{máx}}$), se produce un aumento de la carga de contacto entre el plato y la muestra. Cuando el plato está en su posición de desalineación mínima ($z_{\text{mín}}$) se puede llegar a perder el contacto con la muestra. La condición necesaria para que esto ocurra es que la aceleración con la que baja el plato sea mayor a la gravedad. Esto se cumple sólo en el caso en que el actuador que aplica la presión de pulido sobre la muestra no esté ejerciendo carga y lo único lo único que mantiene en contacto la muestra con el plato es su propio peso, es decir la gravedad.

Se procedió, entonces, a buscar la máxima altura de desalineación “ Z_1 ” para la cual la aceleración supere al valor de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). Para esto se utilizó un programa de cálculo en el cual se ingresa manualmente un valor de velocidad angular del plato de pulido conocida “ ω_1 ” y un valor de altura de desalineación “ Z_1 ”. Se toma como velocidad angular la máxima que puede entregar la pulidora, ya que sería la situación más desfavorable. El programa calcula la posición en “ z ” y aceleración del punto en estudio, buscando que el valor máximo coincida con el valor de la gravedad, obteniendo así la altura máxima que se puede desplazar el plato sin que la muestra pierda contacto con la superficie del mismo.



Luego de varias iteraciones se obtuvo el valor de " Z_1 " para el cual la aceleración superó a la de la gravedad. A continuación, en la Fig. 35 se muestra la captura del cálculo desarrollado en el programa.

```
1 v1=input("Velocidad de rotacion de la pulidora v1 [rpm]: ");
2 w1=v1*pi/30;
3 Zm=input("Altura de desalineacion en milímetros: ");
4 Z1=Zm/1000;
5 for dt=0:1;
6 t=0:0.001:dt;
7 t2=0:0.001:(dt-0.001);
8 t3=0:0.001:(dt-0.002);
9 tita=w1*t;
10 z=Z1*sin(tita);
11 dzdt=diff(z)./diff(t);
12 a=diff(dzdt)./diff(t2);
13 endfor
14 figure(1)
15 plot(t,z);
16 title("Desviación en el tiempo");
17 xlabel("Tiempo [s]");
18 ylabel("Posición [m]");
19 figure(2)
20 plot(t3,a,'m');
21 title("Aceleración en el tiempo");
22 xlabel("Tiempo [s]");
23 ylabel("Aceleración [m/s2]");
24 disp("Aceleración máxima en m/s2: ");
25 aM=max(a)
```

Fig. 35 – Programa de cálculo de aceleración del plato en el eje "z" a una distancia "a".

En las primeras tres líneas de la Fig. 36 figuran los datos ingresados y en la última línea el resultado de máxima aceleración. Como resultado se obtuvo que la superficie de la muestra se despegará cuando el plato presente una desviación de 10 mm con respecto a la normal perpendicular a su eje.

```
>> az2
Velocidad de rotacion de la pulidora v1 [rpm]: 300
Altura de desalineacion en milímetros: 10
Aceleración máxima en m/s2:
aM = 9.8688
```

Fig. 36 – Datos ingresados y resultado obtenido.

En los siguientes gráficos (Fig. 37 y Fig. 38) se muestra la posición y aceleración del punto en estudio en el período de 1 segundo.



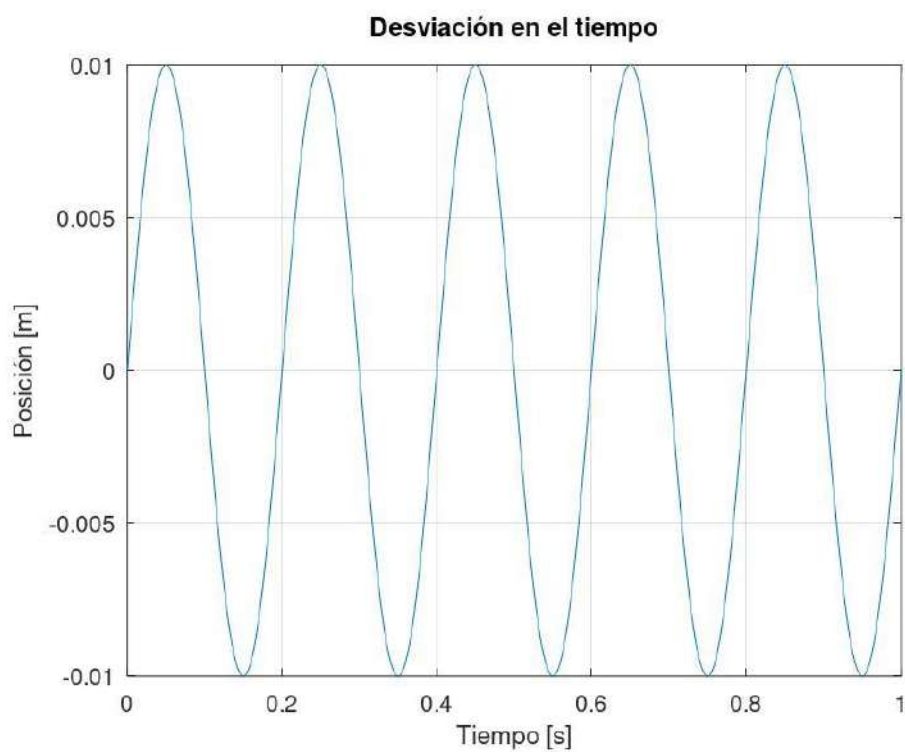


Fig. 37 – Gráfico de $z(t)$.

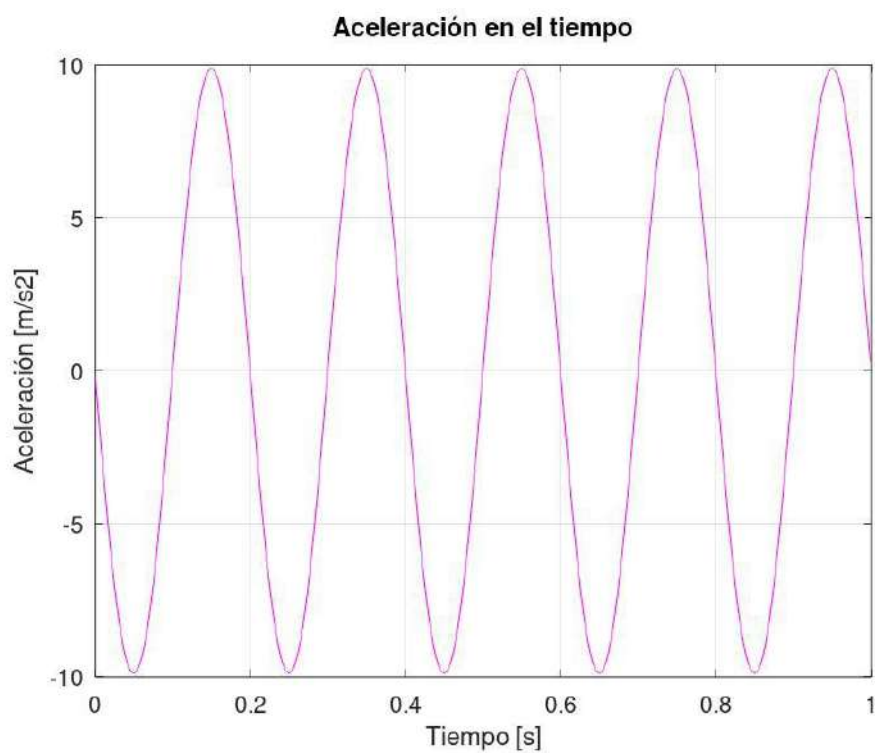


Fig. 38 – Gráfico de $a(t)$.

Como conclusión de este análisis se puede afirmar que para que la muestra se separe del plato hace falta que el mismo presente una desalineación de 10 mm en el punto de contacto. Se considera que éste es un valor sumamente extremo para un proceso de pulido metalográfico. Para los valores normales de desalineación y las condiciones de trabajo planteadas en la introducción, las diferencias de presión causadas por la desalineación del plato se pueden considerar despreciables frente a la presión ejercida por el actuador sobre la muestra. Es probable que el mismo actuador tenga un sistema que absorba estas diferencias.

5.3 Fricción entre la muestra y el plato de pulido

El objetivo de este análisis es buscar el torque que debe vencer el motor principal del equipo para que se produzca el giro del cabezal portamuestras.

Para el ensayo se utilizó una muestra “tipo” de 30 mm de diámetro, un disco rotativo sobre el cual se colocó una lija de 80 granos, pesas calibradas de distintas masas, hilo y una polea sujeta a la mesa de trabajo. La lija de bajo gramaje produce un desbaste muy severo y elevado esfuerzo de corte, por lo que se estaría haciendo una medición conservadora. En las fotos de la Fig. 39 se indican los componentes antes mencionados.

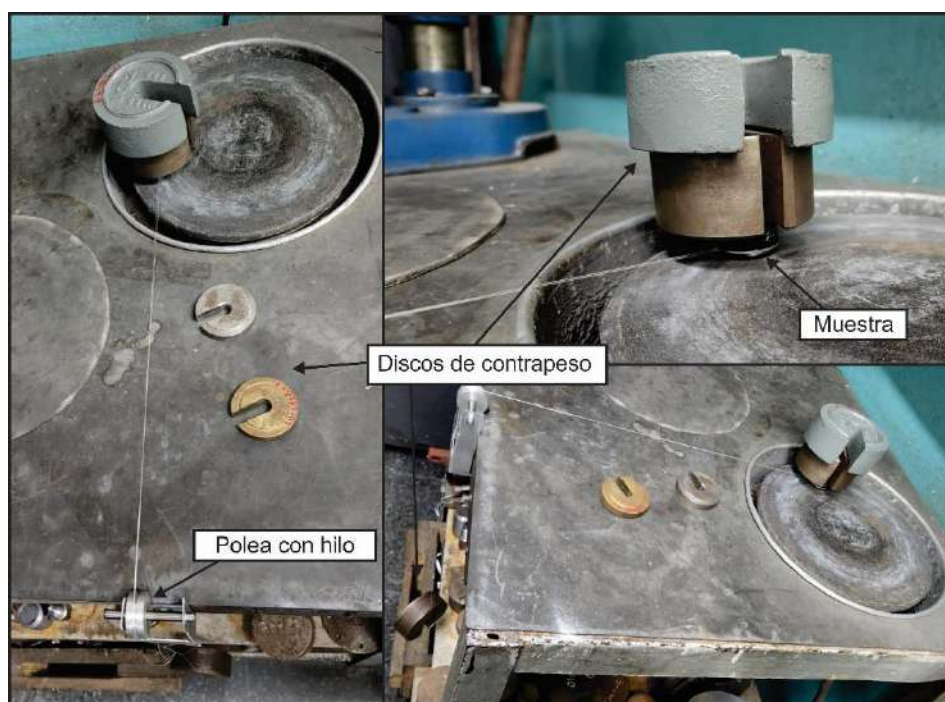


Fig. 39 – Componentes del ensayo de fricción

A continuación, se esquematiza en la Fig. 40 un diagrama de cuerpo aislado donde se representan las fuerzas que actúan sobre la probeta. Haciendo un análisis estático, se obtienen las siguientes igualdades:

$$\begin{cases} N = P \\ Fr = T \end{cases}$$

A fines prácticos, para obtener el peso (P) aplicado sobre la muestra, se toma sólo la masa de las pesas calibradas, sin tener en cuenta la masa de la probeta. Lo mismo para la tensión del hilo (T), se toma la masa total de las pesas calibradas despreciando cualquier pérdida de carga en la polea. Además, se conoce que la fuerza de fricción está dada por el coeficiente de rozamiento estático multiplicado por la fuerza normal. Reemplazando en las igualdades se obtiene:

$$\begin{cases} N = m_P g \\ \mu_e N = m_T g \end{cases}$$

Donde g es la gravedad. Despejando las ecuaciones, se puede deducir que el coeficiente de rozamiento se obtiene con el cociente de los pesos aplicados.

$$\mu_e = \frac{m_T}{m_P}$$

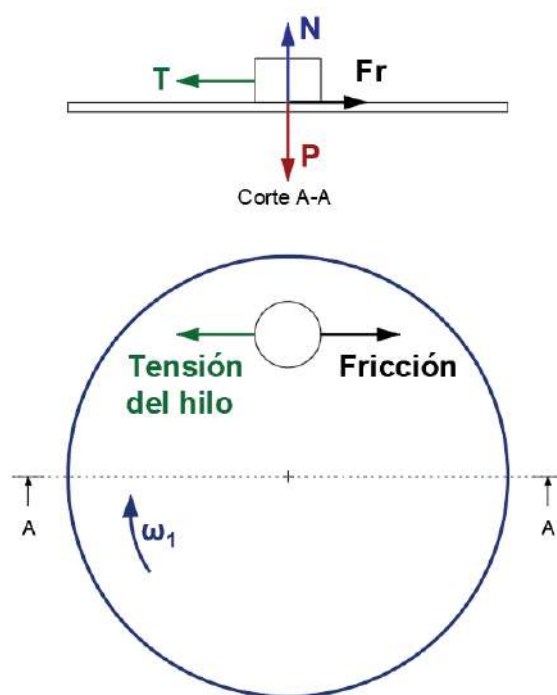


Fig. 40 – Esquema de fuerzas

Procedimiento del ensayo:

- Se colocó la muestra sobre el disco a una distancia de 6 mm del diámetro exterior del plato.
- Se ató la muestra con un hilo y se hizo pasar el hilo por la polea ubicada en el borde de la mesa para que quede colgando.
- Sobre la muestra se colocó un peso inicial de 1 kg.



- Al mismo tiempo, mientras se sostenía la muestra con la mano, se colgó un peso de 200gr del extremo del hilo.
- Por último, se hizo girar el disco y se liberó la sujeción de la muestra con la mano.
- Se observó el comportamiento del sistema. En este primer caso se perdió el equilibrio estático al instante en que se soltó la muestra y la muestra fue arrastrada por el peso colgante.

Se repitió el procedimiento variando los pesos aplicados y se observó el comportamiento del sistema. Si al encender el disco giratorio la muestra caía hacia el lado de la polea, la fuerza tangencial supera a la normal. En caso de que caiga para el lado contrario, la normal supera a la tangencial.

El objetivo fue buscar el equilibrio entre ambas combinaciones de pesos para cumplir con la igualdad anterior y poder calcular el coeficiente de fricción estimado entre la muestra y el disco de lija.

Los resultados de cada ensayo se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4 – Tabla de resultados de ensayo de fricción

Peso aplicado a la muestra (m_p)	Peso colgante (m_r)	Coeficiente de roce estático (μ_e)	Resultado
1.000 gr	200 gr	0,20	T<Fr
1.300 gr	500 gr	0,38	T>Fr
1.500 gr	300 gr	0,20	T<Fr
2.000 gr	700 gr	0,35	T≥Fr
2.000 gr	600 gr	0,30	T≥Fr

En las últimas dos repeticiones, el sistema se mantenía en equilibrio por un tiempo hasta que finalmente cedía hacia el lado del hilo. Con estos resultados se puede concluir que el coeficiente de rozamiento entre la muestra y el plato de pulido será un valor entre 0,3 y 0,35. Este valor obtenido del ensayo se toma como límite máximo, ya que los valores de carga aplicada y de gramaje de lija son muy extremos y poco comunes en las etapas de pulido para las que se desea utilizar el brazo portamuestras.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se procede a calcular el momento inicial que debe vencer el motor principal del equipo para entrar en funcionamiento. El mismo dependerá de la cantidad de muestras que se trabajen en simultáneo, de la fuerza aplicada sobre cada muestra y de la distancia del punto de aplicación de la fuerza al eje de giro del portamuestras.



Para una primera aproximación, se toma el valor de fuerza individual máximo de la columna “Rango común” de la Tabla 3 (50 N), una cantidad máxima de 3 muestras trabajadas en simultáneo (como se determinó en la sección 4.2) y una distancia al eje de giro de 34 mm (la misma que se tomó para el cálculo de trayectoria de la sección 5.1.4). Para simplificar los cálculos se toma que toda la fuerza se aplica en el centro de la muestra, como se muestra en la Fig. 41.

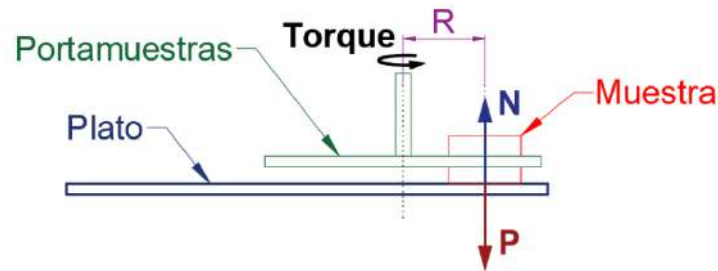


Fig. 41 – Esquema para cálculo de torque inicial.

Con los datos mencionados se calcula el valor de la fricción máxima para 3 muestras trabajando en simultáneo:

$$Fr = \mu_e N$$

$$Fr = 0,35 * 3 * 50N$$

$$Fr = 52,5 N$$

Luego, el torque generado por las muestras en el eje del cabezal portamuestras sería:

$$Torque = Fr * R$$

$$Torque = 52,5 N * 0,034 m$$

$$Torque = 1,785 Nm = 17,5 kgf.cm$$

5.4 Conclusiones

A modo de resumen de esta etapa de cálculos se listan los resultados principales:

- Para evitar el desgaste localizado del paño se deberá evitar el empleo de velocidades de plato y cabezal que sean múltiplos entre sí.
- Para que se produzca una pérdida de contacto entre la muestra y la superficie de pulido, la desalineación del plato debe ser un orden de magnitud mayor a la usual. Con lo cual esto no es una limitación al diseño.
- Se requerirá un actuador para el giro principal del cabezal que pueda vencer un torque inicial de 17,5 kgf.cm, que luego será afectado por la transmisión seleccionada.

6 Prediseño y configuraciones básicas

6.1 Posibles configuraciones del equipo

En principio, se procede a explicar brevemente las diferentes estructuras de brazos manipuladores que pueden tomarse como referencia para el diseño, y sus principales características.

Los brazos manipuladores se caracterizan por la cantidad de grados de libertad (GDL) que tengan, es decir el número de ejes independientes por los cuales el brazo puede moverse. Generalmente los brazos robóticos tienen entre 3 y 6 GDL. Por cada grado de libertad hay una articulación que puede moverse de forma rotativa, lineal o combinada. A continuación, se describe brevemente cada una de las configuraciones típicas utilizadas en la industria.

Modelo Cartesiano: Este modelo posee 3 GDL por los cuales se mueve de forma lineal siguiendo los ejes cartesianos X, Y, Z (Fig. 42). Se utiliza generalmente para tareas como tomar y dejar (pick and place), impresoras 3D o máquinas CNC. Su volumen de trabajo tiene forma cúbica.

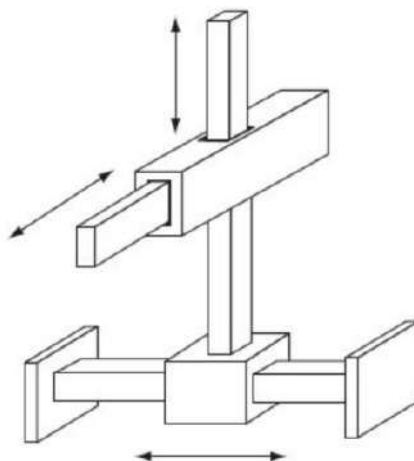


Fig. 42 – Brazo robot cartesiano

Modelo Cilíndrico: Este modelo también posee 3 GDL, pero combina una articulación rotativa en la base y dos articulaciones lineales que permiten movimientos verticales y radiales (Fig. 43). Su espacio de trabajo es un volumen cilíndrico, usualmente incompleto. Generalmente son utilizados para tareas de ensamblaje, soldadura por puntos y manejo de máquinas herramienta.

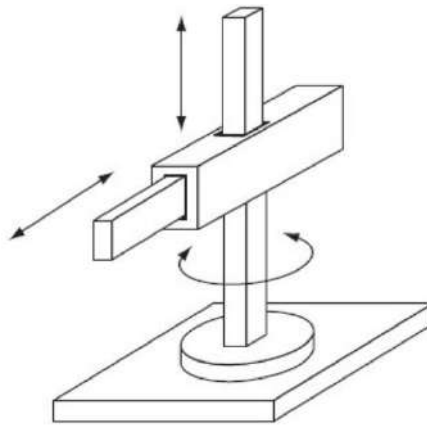


Fig. 43 - Brazo robot cilíndrico.

Modelo Esférico: Es un modelo con 3 GDL. Cuenta con una articulación rotacional en la base, otra rotativa en el medio que genera un movimiento de pivote y al igual que en el cilíndrico, una articulación lineal que permite el movimiento de forma radial (Fig. 44). La combinación de estos tres movimientos hace que el volumen de trabajo sea aproximadamente esférico. Se aplican en operaciones de fundición, soldadura y manipulación de materiales pesados.

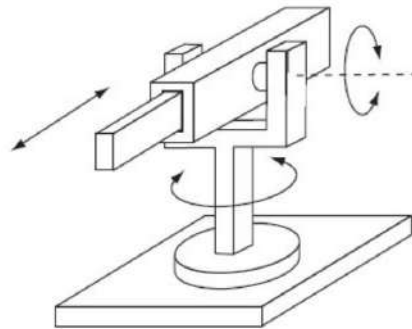


Fig. 44 - Brazo robot esférico

Modelo Articulado: Combina los tres tipos mencionados anteriormente y suelen tener 4 o más grados de libertad (Fig. 45). Usualmente están conformados por múltiples articulaciones rotativas que se asemejan a los movimientos que permite realizar el brazo humano. Es más versátil que los anteriores en tareas de soldadura, pintura y ensamblaje complejo.

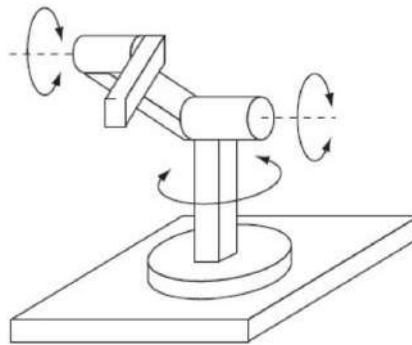


Fig. 45 - Brazo robot articulado

Modelo SCARA: La sigla SCARA es el acrónimo de Selective Compliance Assembly Robot Arm (Brazo Robot de Ensamblaje con Cumplimiento Selectivo). Este tipo de robot industrial fue diseñado principalmente para realizar tareas de ensamblaje de alta velocidad y precisión, para las cuales los robots cartesianos o articulados no eran ideales. Este modelo posee 3 o 4 GDL. Una columna rotativa, dos brazos rotatorios horizontales y un eje vertical en el extremo con movimiento lineal en el eje Z, que también puede tener movimiento rotativo (Fig. 46).

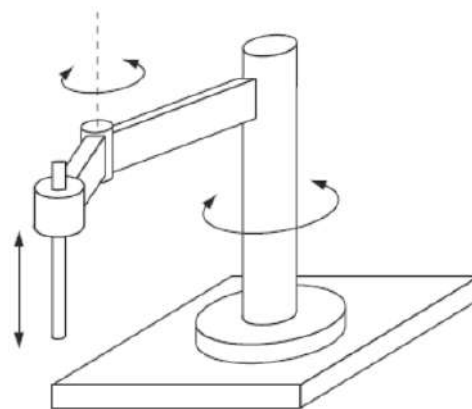


Fig. 46 - Brazo robot tipo SCARA

Algunos de los modelos de brazos manipuladores mencionados anteriormente son utilizados por fabricantes de equipos de pulido metalográfico. A continuación, se analizarán ejemplos de las estructuras de brazos portamuestras comerciales detallados en la sección 3.2 de la introducción.

La mayoría de los cabezales portamuestras de gama media utilizan una configuración parecida a la del brazo cilíndrico, con el agregado de una rotación en el extremo final y la ausencia de movimiento en sentido radial. En la Fig. 47 se representan los cuatro movimientos de estos cabezales. Suelen tener dos movimientos de aproximación automáticos en el eje vertical, uno para regular la altura del cabezal y otro más preciso en el extremo para acercar las

muestras al plato de pulido. La columna principal permite una leve rotación para despejar la zona del plato de pulido para limpieza. En algunos fabricantes este movimiento manual y en otros es automático. Por último, el extremo final rota de forma continua y automática con una velocidad seteada por el usuario.



Fig. 47 – Cabezal modelo cilíndrico con rotación en el extremo final

Existen pocas pulidoras con cabezal de tipo pivotante, que se asemejan más al modelo de brazo esférico. En la Fig. 48 se muestran dos modelos de fabricantes distintos. El despeje de la zona de trabajo se realiza levantando el cabezal y rotándolo manualmente hacia un lateral. El movimiento de rotación continua en el extremo final es igual al mencionado previamente.



Fig. 48 – Cabezales tipo pivotantes

Finalmente, algunos fabricantes ofrecen estaciones de pulido de alta gama, en las cuales el cabezal automático está íntegramente incorporado al gabinete (Fig. 49). En este tipo de pulidoras el cabezal no rota para despejar la zona de trabajo, sino que se mueve linealmente de



manera horizontal. Algunos modelos como el de la segunda imagen, utilizan este movimiento para pasar por distintas instancias de pulido y limpieza de muestras.



Fig. 49 - Configuración de pulidoras de gama alta

Teniendo en cuenta lo visto previamente, se decide que el brazo portamuestras que se está diseñando tendrá una estructura tipo brazo cilíndrico que se asemeje a la de los equipos comerciales de la Fig. 47, con la diferencia de que el mismo será independiente de la pulidora. Asimismo, no se descarta aún la opción del cabezal pivotante de la Fig. 48 para despejar la zona del plato de pulido para limpieza y recambio de especímenes.

6.2 Análisis de actuadores

Un actuador es un dispositivo que recibe energía de una fuente y la convierte en un movimiento mecánico o fuerza. Existen tres tipos principales de actuadores según la fuente de energía que utilizan: neumáticos, hidráulicos y eléctricos.

6.2.1 Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido para generar movimiento. Este tipo de actuador se basa en la inyección de aire dentro de un recinto para generar presión sobre un elemento que produce un movimiento lineal o rotacional. De este modo se pueden clasificar en dos grandes categorías: actuadores neumáticos lineales y actuadores neumáticos rotativos.

Los actuadores lineales (Fig. 50), también conocidos como cilindros o pistones neumáticos, transforman la presión del aire en un movimiento rectilíneo. Están compuestos generalmente por un cilindro con un pistón interno que se desplaza en forma axial debido a la compresión del aire en su interior. El movimiento del pistón puede ser controlado por aire suministrado desde ambos extremos del cilindro, lo que se conoce como actuador lineal de doble efecto. Alternativamente, el pistón puede desplazarse con aire comprimido desde un solo extremo, mientras que en la otra dirección el movimiento se genera mediante un resorte, en lo que se denomina actuador lineal de simple efecto.





Fig. 50 – Actuador neumático lineal de simple efecto

Los actuadores rotativos (Fig. 51) convierten la presión del aire en un movimiento giratorio. Al igual que los lineales, el movimiento se genera por la presión de aire dentro de un recinto que hace desplazar, en este caso, a un mecanismo acoplado a un eje, ya sea una paleta o un sistema de piñón y cremallera. Generalmente estos tipos de actuadores están limitados a rotar un cierto ángulo de giro, pero existen motores neumáticos que pueden ejercer una rotación continua sobre el eje. Estos últimos, sin embargo, carecen de precisión cuando se requiere una rotación controlada.



Fig. 51 – Actuadores neumáticos rotativos

La presión de operación habitual se encuentra entre 4 y 8 bar. La fuerza generada depende directamente de esta presión y del área del pistón. Esta relación permite alcanzar fuerzas considerables, suficientes para tareas de sujeción, empuje o posicionamiento, especialmente en procesos repetitivos.

Se debe tener en cuenta que para el correcto funcionamiento de este tipo de actuadores se requiere contar con espacio suficiente para los elementos auxiliares propios de la instalación. Estos son: compresor de aire, válvulas de control, elementos para tratamiento del aire (filtros, reguladores, lubricadores), mangueras, sensores, unidades de control (opcional PLC), silenciadores.

6.2.2 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos funcionan de manera similar a los neumáticos, pero con una mayor capacidad de fuerza, gracias a la incompresibilidad del fluido hidráulico. Esta característica del fluido permite un control más preciso del movimiento, sin embargo, al ser más viscoso que el aire, tienen una menor velocidad de respuesta con respecto a los neumáticos, ya que se generan mayores pérdidas por fricción.

Los tipos más comunes son los cilindros hidráulicos lineales (de simple o doble efecto) y los actuadores rotativos. Estos últimos se suelen utilizar en aplicaciones que requieren torque elevado.

La presión de trabajo es significativamente más alta que en los sistemas neumáticos, generalmente entre 70 y 210 bar, y en equipos industriales pesados puede superar los 300 bar. Esto permite generar fuerzas elevadas con actuadores relativamente compactos. Sin embargo, la elevada presión puede causar fugas de aceite. Son ideales para aplicaciones donde se requiere mover cargas altas con precisión y donde la velocidad no sea un factor crítico.



Fig. 52 – Cilindros hidráulicos de doble efecto

6.2.3 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos utilizan la energía eléctrica para generar un movimiento mecánico, el cual puede ser de tipo lineal o rotativo. Se categorizan en cuatro tipos principales de motores: motores de corriente continua (DC), motores de corriente alterna (AC), motores paso a paso y servomotores.

Una gran ventaja de los actuadores eléctricos frente a los neumáticos o hidráulicos es que no requieren un sistema externo de generación de energía, lo cual simplifica la instalación y reduce la necesidad de mantenimiento.

6.2.3.1 Motores de corriente continua (DC)

Los motores de corriente continua son simples y económicos, y permiten controlar fácilmente la velocidad variando la tensión aplicada. Trabajan normalmente entre 6 y 24 V, aunque para aplicaciones industriales existen motores de hasta 220 V. Admiten el acople de una caja reductora (motorreductor) pudiendo así trabajar a bajas revoluciones mientras que al mismo tiempo aumenta el torque disponible en el eje de salida. Son utilizados en aplicaciones que requieren un control preciso de velocidad, alto par de arranque, y flexibilidad en la fuente de alimentación, como por ejemplo en robótica, vehículos eléctricos, equipos médicos, etc.



Fig. 53 – Motorreductor de corriente continua

6.2.3.2 Motores de corriente alterna (AC)

Funcionan con corriente alterna monofásica (220 V) o trifásica (380 V). A diferencia de los motores DC, no permiten controlar la velocidad de rotación por sí mismos, requieren de un variador de frecuencia, por lo que son utilizados normalmente en aplicaciones donde se requiera una velocidad constante. Su estructura es robusta y abarcan un amplio rango de potencias dependiendo de la tensión de alimentación.



Fig. 54 – Motor de corriente alterna

6.2.3.3 Motores paso a paso

Estos motores dividen una vuelta completa en un número específico de pasos discretos. Por cada impulso eléctrico, el motor avanza un paso. Esto permite controlar directamente el ángulo de giro sin necesidad de sensores de posición, lo que los hace ideales para aplicaciones de posicionamiento preciso. Estos motores funcionan bien a bajas y medias velocidades (hasta 1000-1500 rpm), mientras que el torque entregado disminuye significativamente a altas velocidades.



Fig. 55 – Motor paso a paso

6.2.3.4 Servomotores

Un servomotor es esencialmente un motor (puede ser DC o AC) que incorpora un sistema de control con retroalimentación, generalmente por medio de encoders. Esto permite controlar de forma precisa la posición, velocidad y torque en tiempo real. El agregado de un sistema de control hace que los servomotores tengan un costo más elevado frente a otros motores más simples.



Fig. 56 – Encoder



6.2.4 Comparación

A continuación, se resumen las características de los tres tipos de actuadores a modo de comparación.

Tabla 5 – Comparación de actuadores

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Suministro de energía	Aire comprimido	Aceite hidráulico a presión	Electricidad (corriente continua o alterna)
Tipos	Lineales (simple/doble efecto), rotativos, diafragma	Lineales, rotativos, telescópicos	Motores paso a paso, servomotores, actuadores lineales
Ventajas	- Alta velocidad - Bajo costo inicial - Seguro en zonas explosivas - Diseño simple	- Alta fuerza - Movimiento suave y constante - Preciso bajo carga	- Alta precisión y control - Fácil integración con sistemas electrónicos - Bajo mantenimiento
Desventajas	- Menor precisión - Limitado en fuerza - Requiere compresor - Menor eficiencia energética	- Sistema complejo y costoso - Posibles fugas contaminantes - Mantenimiento elevado	- Mayor costo inicial - Menos adecuado para entornos explosivos - Puede sobrecalentarse

6.3 Definición del modelo base

Teniendo en cuenta los objetivos generales del proyecto y lo visto en las secciones anteriores, se definen los movimientos básicos que debería tener el brazo portamuestras. Ellos son:

- Movimiento de despeje de la zona de trabajo (desplazamiento del cabezal fuera de la zona sobre el plato de pulido).
- Posicionamiento rápido del cabezal.
- Acercamiento suave de las muestras a la posición de trabajo para aplicación de la fuerza de trabajo (individual o central).
- Rotación del conjunto cabezal.
- Rotación individual de la muestra sobre su propio eje.



A partir de un proceso iterativo se plantea una sucesión de propuestas y análisis de distintos prediseños, de la cual resulta la solución descrita en este trabajo. Se selecciona una estructura de brazo tipo cilíndrica para que cuando se coloque el equipo al lado de cualquier pulidora del INTEMA se pueda regular fácilmente su posición de trabajo y a la vez tenga una base simple y robusta para soportar su propio peso y las fuerzas de trabajo. En la (Fig. 57) se esquematizan los movimientos básicos que dispondrá el brazo propuesto.

En el proceso iterativo se descartaron otras soluciones como la configuración de brazo pivotante, ya que precisaba una estructura mucho más compleja y accionamientos más costosos y complejos.

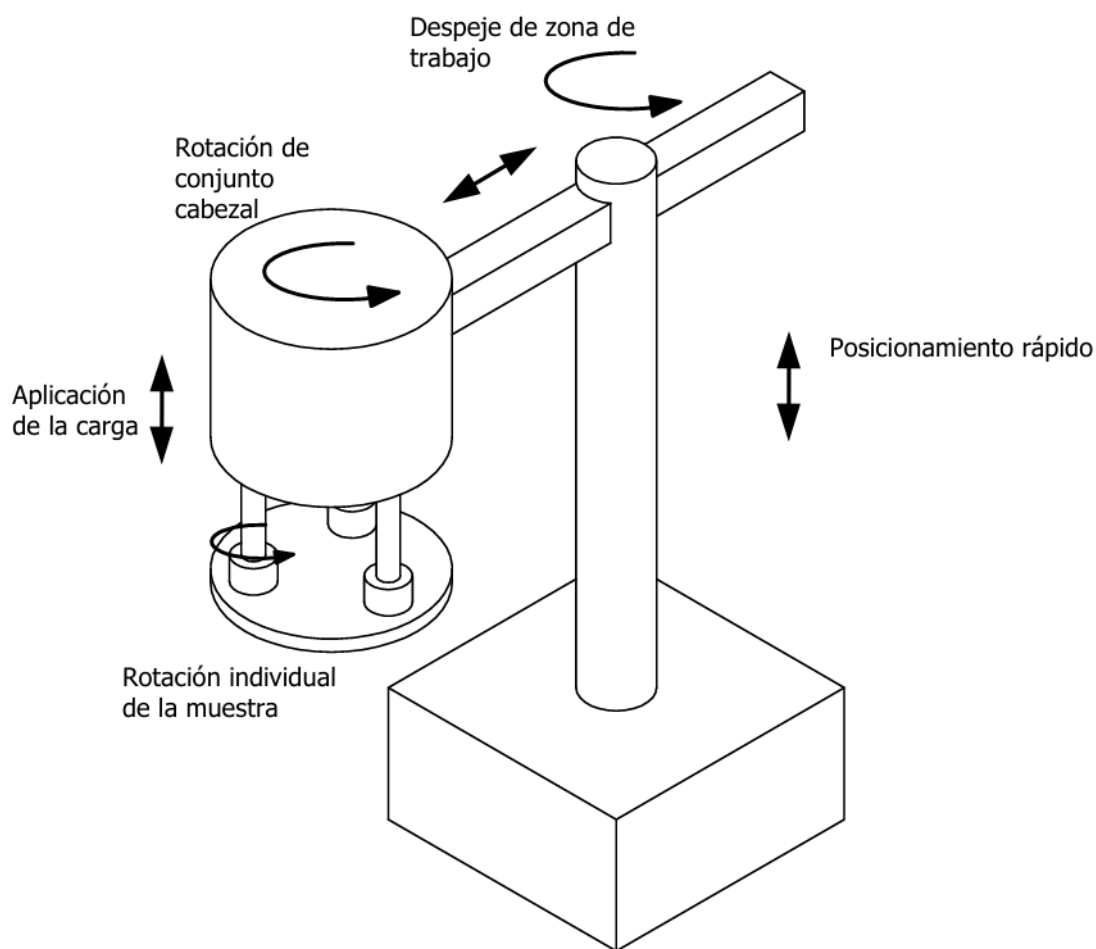


Fig. 57 – Esquema de movimientos básicos del modelo base



7 Selección y dimensionamiento de componentes

Para abordar de manera ordenada la selección y dimensionamiento de los componentes del brazo portamuestras se presenta la versión final del prediseño obtenido luego de varias iteraciones. Esto permite evitar el desarrollo innecesario de todas las etapas de planteo, cálculo, verificación y replanteos realizados, simplificando la presentación de la solución propuesta en este trabajo final.

Para las últimas iteraciones se propuso un modelo básico como el de la Fig. 57, el cual se fue desarrollado teniendo en cuenta las configuraciones estructurales, cinemáticas y funcionales del equipo estudiadas en los capítulos anteriores. En base a éste se diseñaron y seleccionaron los componentes que conforman la solución propuesta. Se detallarán algunos de los componentes o conjuntos y otros quedarán fuera del alcance de este trabajo final.

En la Fig. 58 y Fig. 59 se presenta el modelo CAD final del brazo porta muestras. Como puede observarse el mismo presenta una gran cantidad y variedad de componentes, por lo cual se abordará tomando subconjuntos que responden a los diferentes movimientos principales.



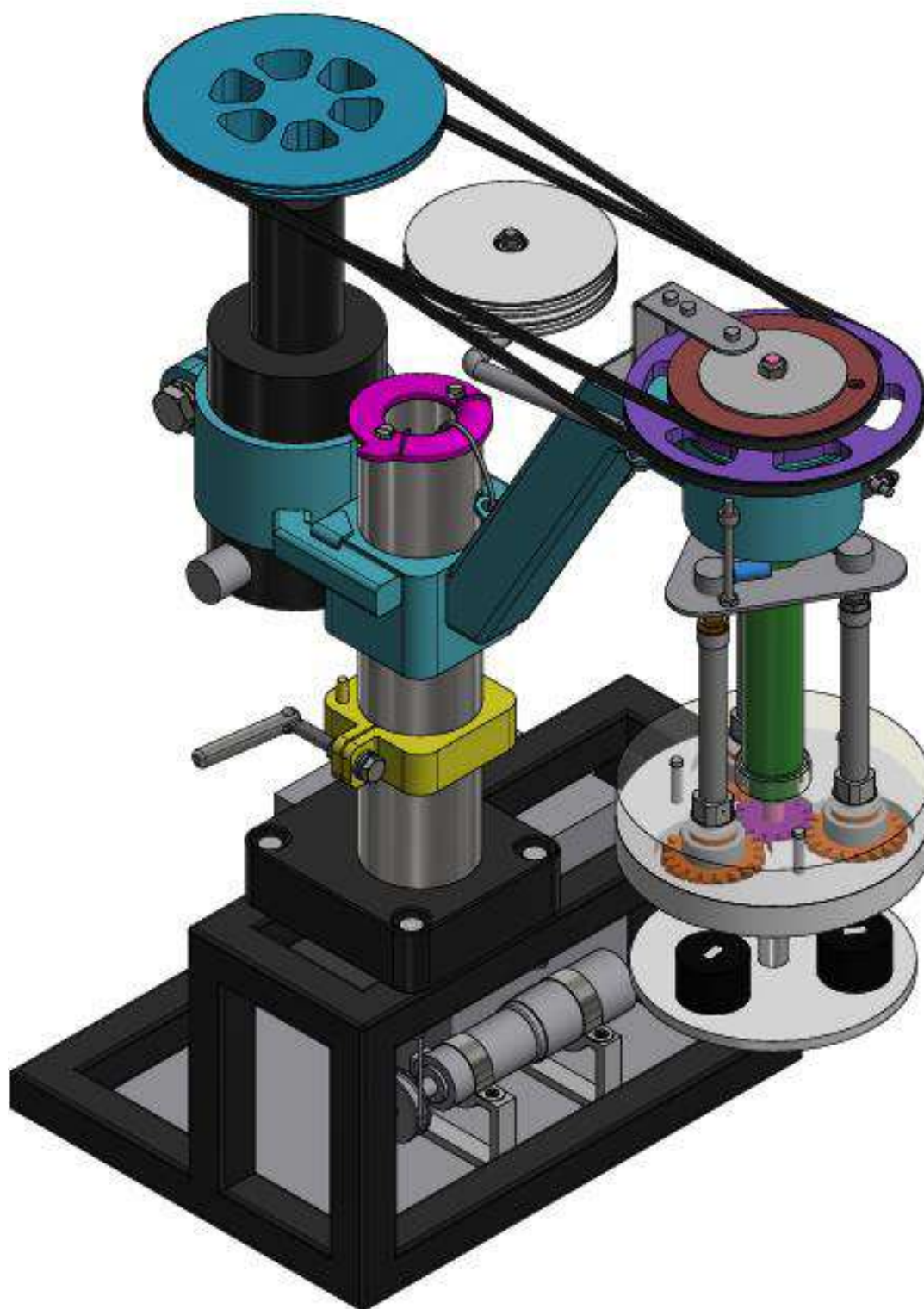


Fig. 58 - Modelo CAD completo, vista A

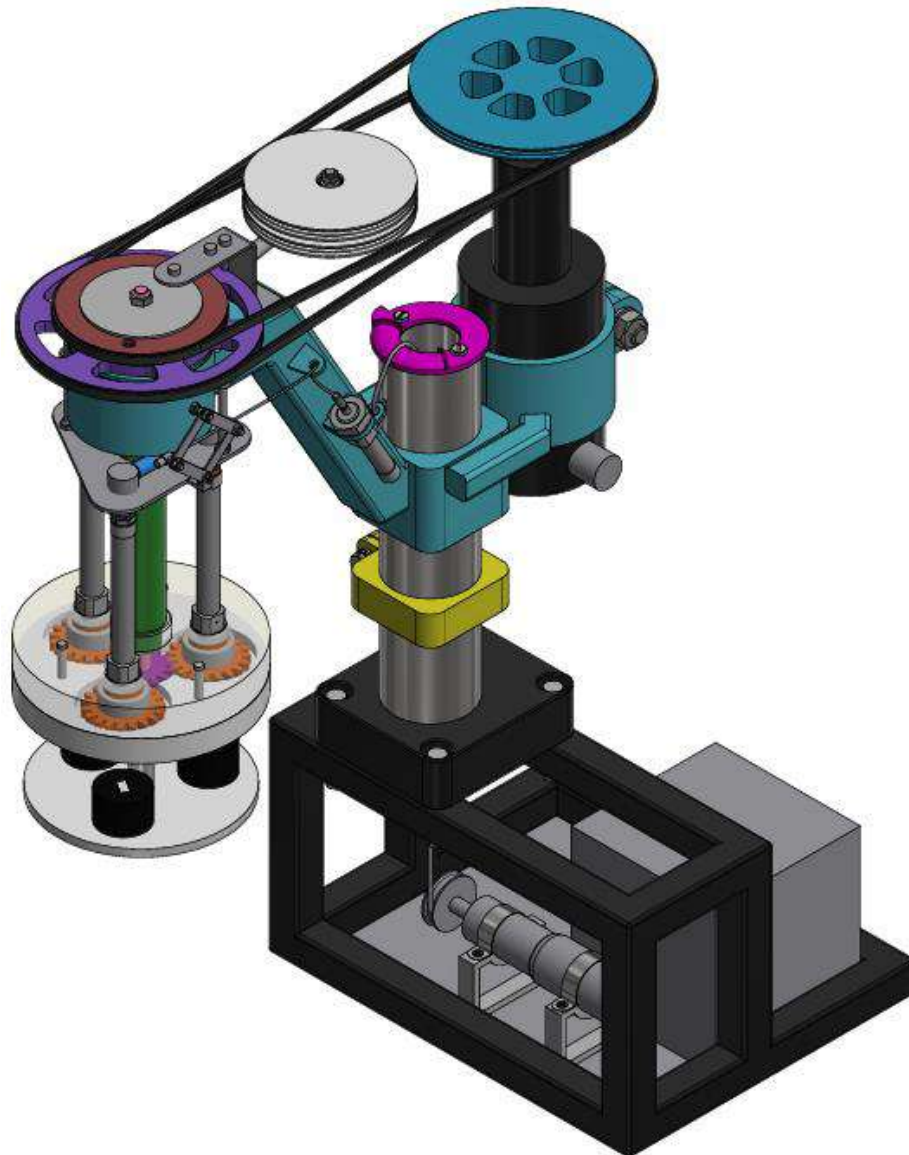


Fig. 59 - Modelo CAD completo, vista B

El brazo portamuestras propuesto tiene un modelo del tipo cilíndrico como el presentado en la sección 6.1, pero de 4 grados de libertad. Se compone de una base con una columna por la cual se desliza y rota un brazo estructural que sujeta al cabezal rotativo, el cual sostiene el plato portamuestras. Éste permite obtener un diseño compacto que puede ser trasladado de una pulidora a otra por una sola persona. Posee una capacidad de carga de hasta tres muestras en simultáneo. El equipo se diseñó para que luego de seleccionar manualmente los parámetros de trabajo (velocidad de giro, fuerza aplicada, tiempo) automáticamente pueda comenzar a funcionar, con mínima intervención del operador.

La zona de trabajo del brazo portamuestras abarca una zona delimitada por un movimiento en el rango de 142 mm de desplazamiento vertical (Fig. 60) y una rotación alrededor de la columna de 60° hacia ambos sentidos desde un eje perpendicular a la base (Fig. 61).

El equipo puede utilizarse de ambos lados de la pulidora, pero se debe tener en cuenta que el despeje del cabezal cuando se coloca del lado izquierdo queda hacia atrás de la pulidora, mientras que cuando se coloca del lado derecho queda hacia adelante (Fig. 62).

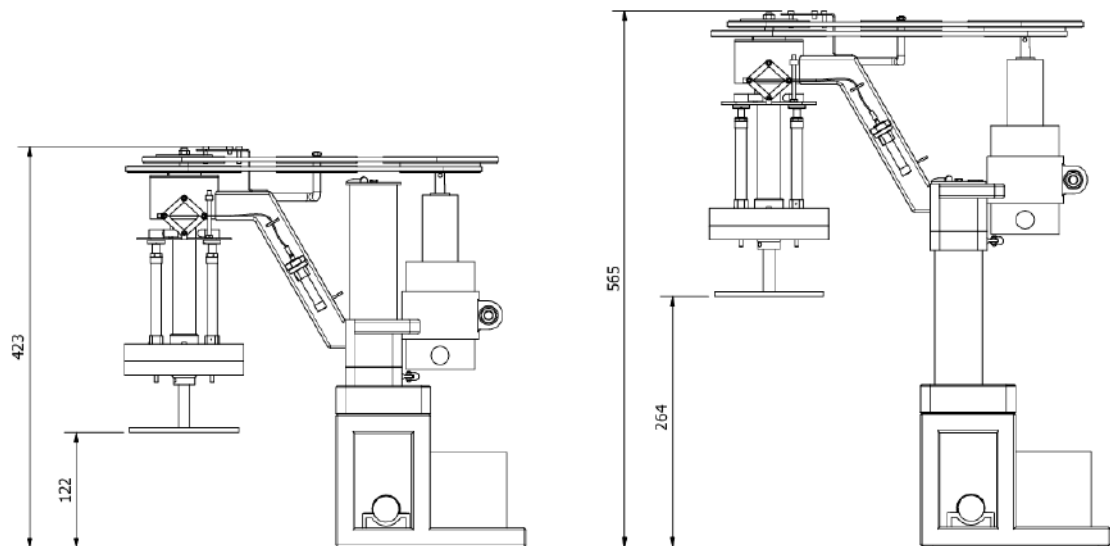


Fig. 60 - Rango de trabajo vertical del equipo

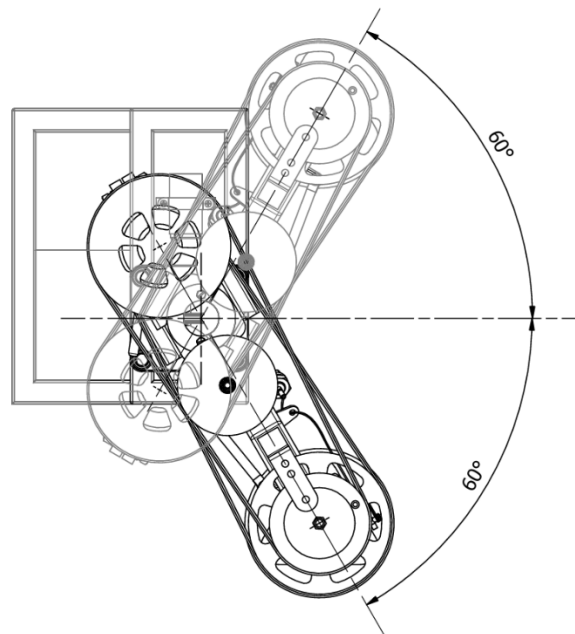


Fig. 61 - Rango de giro del equipo

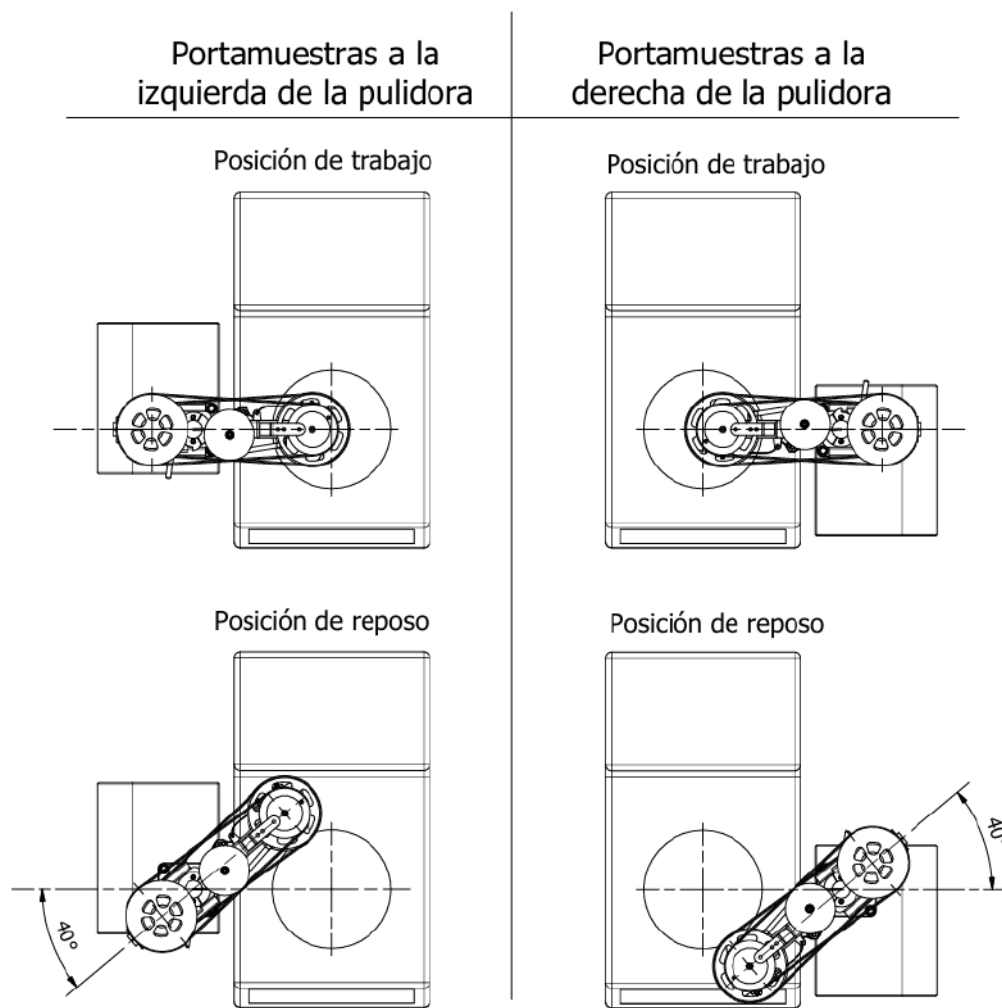


Fig. 62 - Posicionamiento del equipo junto a una pulidora metalográfica

Para facilitar la comprensión de los distintos componentes del brazo portamuestras, se dividió el equipo en cuatro subconjuntos como se muestra en la Fig. 63:

- **Conjunto cabezal**
- **Transmisión del movimiento**
- **Estructura**
- **Sistema de inyección neumático**

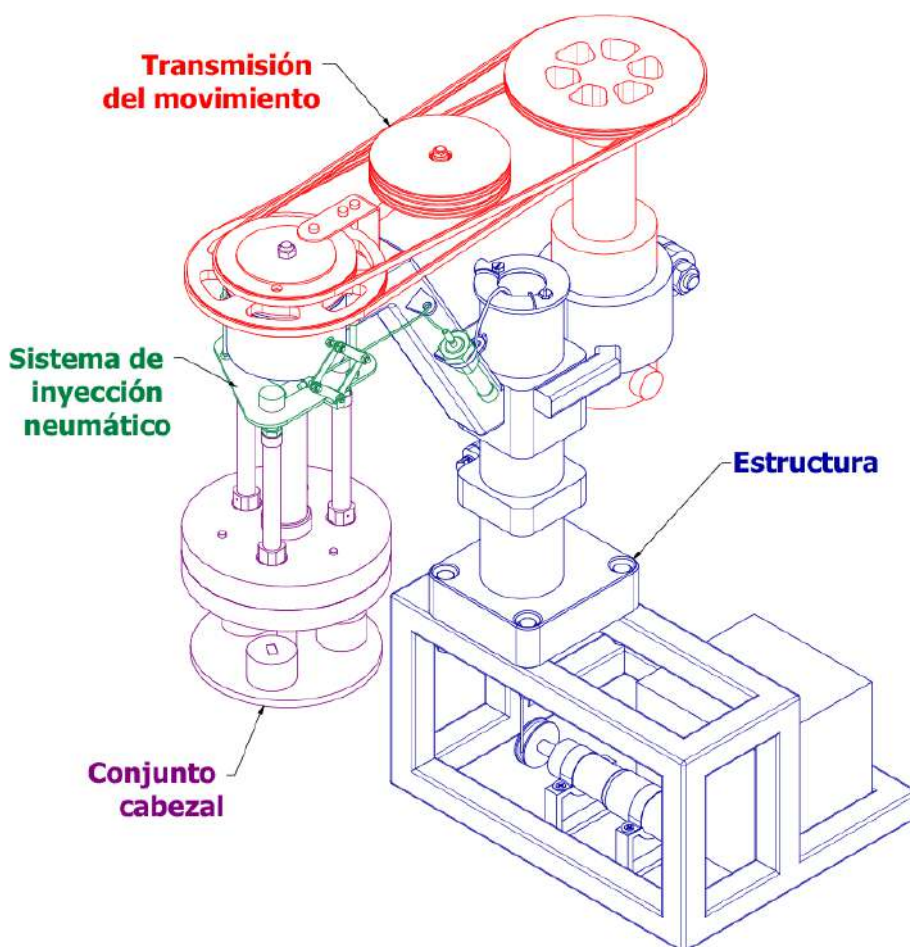


Fig. 63 - Subconjuntos del brazo portamuestras diseñado.

En las secciones siguientes se describe cada subconjunto particular, se detalla el proceso de selección de los componentes comerciales y se describe cómo se diseñaron las partes que requieren fabricarse a medida para esta aplicación. El dimensionamiento preliminar de muchos de los componentes responde a las dimensiones del equipo propuesto, requiriendo en una instancia posterior la verificación según criterios de diseño mecánico. Sin embargo, dadas las cargas involucradas se asume que todos los componentes están sobredimensionados.



7.1 Transmisión del movimiento principal

En la Fig. 64 se resalta a color los elementos involucrados en este sistema. Basándose en el análisis cinemático realizado en la sección 5.1, se propone un sistema que transmita a las muestras velocidades de rotación independientes respecto del cabezal (W_c) y respecto de su centro de masa (W_{mu}).

La fuente de movimiento de todo el conjunto es un motorreductor de corriente continua que transmite el movimiento de rotación al cabezal y a las muestras mediante dos pares de poleas y correas. Durante el proceso de prediseño del equipo se decidió utilizar un solo actuador para controlar simultáneamente la rotación general del cabezal y la rotación individual de cada muestra por medio de cadenas cinemáticas diferentes. Al ser dos sistemas independientes, se diseñaron dos ejes concéntricos que transmitan distintas velocidades al cabezal y a las muestras respectivamente. Las poleas están diseñadas para que haya una reducción en la transmisión hacia el cabezal y una multiplicación para el sistema de rotación de las muestras.

La transmisión de la rotación se realiza mediante dos pares de correas de tipo Poly V de dos costillas, las cuales se diseñaron de la misma longitud para que puedan ser intercambiables y se puedan conseguir repuestos fácilmente. Las correas se mantienen en tensión gracias a unas poleas tensoras internas que se sujetan al brazo estructural mediante un resorte de torsión que aplica la fuerza de contacto.

Por último, aprovechando que el movimiento de rotación individual de las muestras se transmite con un eje independiente, se propone que la polea que se une al mismo se divida en dos secciones, las cuales puedan acoplarse o bloquearse manualmente mediante bulones. Esto deriva en poder contar con tres configuraciones de funcionamiento, las cuales se detallarán en las secciones siguientes.



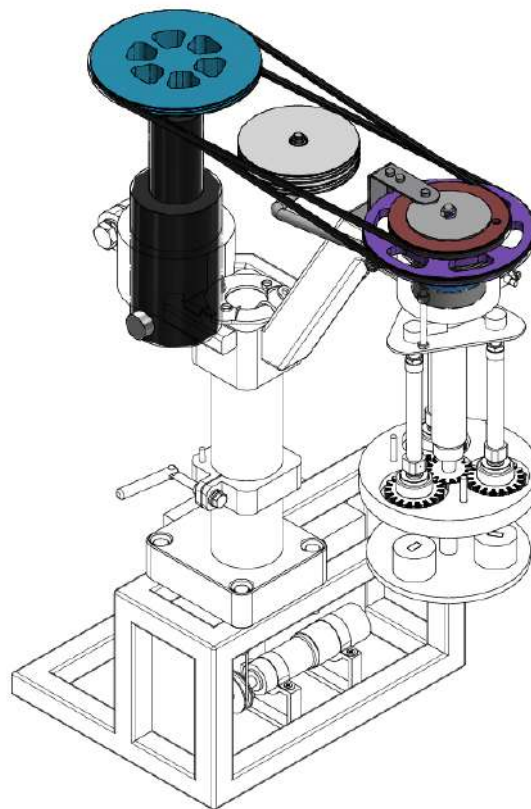


Fig. 64 - Sistema de rotación del conjunto cabezal

7.1.1 Motor principal

El motor principal del brazo porta muestras es el que genera la rotación que luego se transmite al cabezal y a las muestras a través de las poleas y correas mencionadas en la introducción de esta sección. Para poder hacer una selección de un motor comercial, se deben terminar de definir los parámetros necesarios que debe cumplir este actuador.

En la sección 5.3 se determinó que el equipo trabajando a la máxima carga podría requerir un valor de torque de 17,5 kgf.cm. Este valor a su vez se verá afectado por la transmisión de poleas y correas que se utilizará para adecuar la velocidad.

Como resultado del proceso iterativo de selección y diseño se determinó que la relación de transmisión necesaria para lograr que el cabezal tenga una velocidad máxima de 150 rpm con una velocidad de rotación de motor de 212 rpm sea de 0,708.

Entonces el torque requerido para una condición de funcionamiento extrema sería:

$$\text{Torque motor} = \text{Torque calculado} * \text{relación de transmisión}$$

$$\text{Torque motor} = 17,5 \text{ kgf.cm} * 0,708$$

$$\text{Torque motor} = 12,4 \text{ kgf.cm}$$



Según el análisis realizado en el capítulo 5, se requerirá un control estricto de la velocidad de rotación del cabezal para evitar el funcionamiento en condiciones inadecuadas. Según lo visto en el análisis de actuadores, los motores eléctricos de corriente continua son los más indicados para esta tarea gracias a que pueden combinarse con componentes electrónicos que permitan un control preciso de la velocidad de rotación.

En resumen, se busca un actuador que cumpla con las siguientes condiciones:

- Motor eléctrico de corriente continua
- Velocidad de rotación de 0 a 212 rpm
- Par motor a velocidad máxima: 12,4 kgf.cm

Al analizar las especificaciones de distintos fabricantes se observó que los mismos suelen girar a velocidades muy altas en comparación a la velocidad máxima buscada, por lo que se optó por utilizar un motorreductor.

Como resultado de una amplia búsqueda, se encontró un motorreductor de la marca Circusplay (Circusplay Motores, 2025) que cumple con la mayoría de las condiciones especificadas. A continuación, en la Fig. 66 se muestra la selección del **motorreductor MR10C-024050-B** de 50 W de potencia con tensión nominal de 24 V, el cual tiene 2 etapas de reducción con relación 16:1, llevando la velocidad nominal de 3100 rpm a 194 rpm que es lo más aproximado a la velocidad requerida que se pudo encontrar. A esta velocidad el motor puede vencer un par de 24,48 kgf.cm, superando ampliamente el valor buscado. En la Fig. 65 se pueden ver las dimensiones generales del motor seleccionado y en la Fig. 67 se muestra una foto del producto.

Si bien la velocidad nominal a plena carga es de 194 rpm, la velocidad de funcionamiento en las condiciones de diseño del equipo va a ser mayor, teniendo en cuenta que la velocidad en vacío es un 15% mayor a la nominal, resultando 223 rpm. El punto de equilibrio con una carga de 12,4 kgf.cm se establecerá en un valor intermedio entre 194 y 223 rpm según las curvas de funcionamiento de los motores de corriente continua, siendo este valor más cercano a la velocidad buscada.



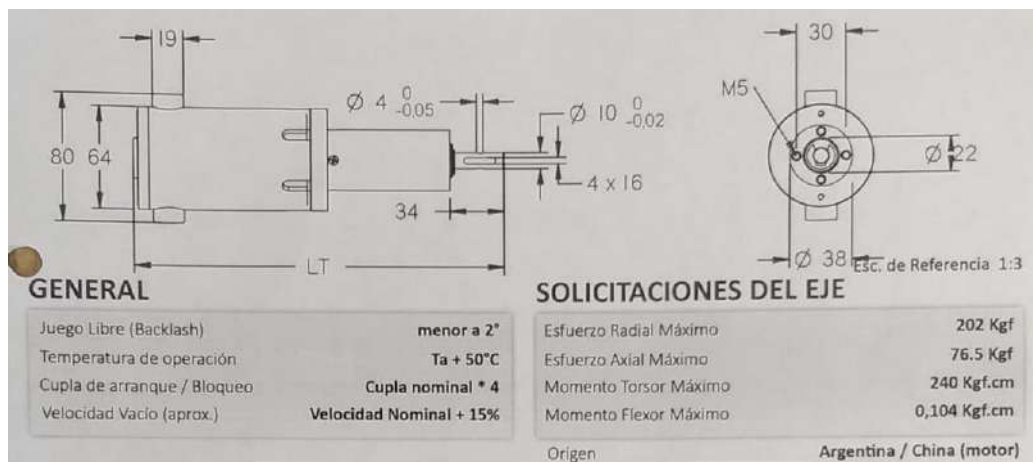


Fig. 65 - Dimensiones y datos generales del motorreductor seleccionado

Modelo			MR10C-024050-B	
Opcional			- L (eje liso)	
Adicional			- BR10	
Material del Reductor			Plas - Metal	
Servicio			Normal	
Potencia [Watt]			50	
Tensión nominal [V]			24 Vcc	
Io . Inom . Is [A]			0,4 , 3,5 - 4,5	
Ruido máx. [DB] (Adicional única etapa 15%)			85	
RPM Nom . RPM Vacío (motor)			3100 - 3800	
Peso . Adicional por etapa [Kg]			1,580 - 0,010	
Largo[LT] . Adicional por etapa . Diámetro Motor [DM]			208 . 7 . 64	
Etapas	Relación	Engranajes	Velocidad [RPM]	Cupla [Kgf.cm]
0	1:1	0	3100	1,53
1	4:1	4	775	6,12
	6:1	6	516	9,18
2	16:1	44	194	24,48
	24:1	64	129	36,72
	36:1	66	86	55,08
3	64:1	444	48	97,92
	96:1	644	32	146,88
	144:1	664	22	180,00
4	256:1	4444	12	"
	384:1	6444	8	"
	864:1	6664	3,5	"
5	1536:1	64444	2,0	"
	3456:1	66644	0,89	"
	7776:1	66666	0,39	"
También disponible en: 5,3 . 0,50 . 0,22 . 0,09 Rpm			* Stock permanente de muestras	

Fig. 66 - Selección de motor principal del catálogo de Circusplay





Fig. 67 - Foto de modelo de motorreductor

7.1.2 Diseño cinemático de la transmisión por correas

En la sección 3.2 se mencionó que en los equipos comerciales la velocidad máxima de rotación del cabezal normalmente es de 150 rpm. En cuanto a las muestras, se busca que las mismas varíen su orientación lenta y constantemente para obtener un rayado homogéneo de la superficie pulida. En la sección 7.2 se explicará con más detalle que para generar la rotación individual en las muestras se adopta finalmente una transmisión planetaria por engranajes impulsada por dos ejes concéntricos.

Entonces, se requiere transmitir velocidades diferentes al cabezal y a las muestras utilizando únicamente el motor seleccionado previamente. Por simplicidad de diseño del equipo y para facilitar su uso, se adoptan dos pares de poleas de diámetros apareados para lograr una multiplicación y reducción iguales. Como se utilizan ejes concéntricos, la distancia al eje del motor es la misma, por lo tanto, las correas resultarán de igual longitud.

Para definir los diámetros de las poleas se tuvieron en cuenta las medidas de las pulidoras del INTEMA mencionadas en el capítulo 3 y el posicionamiento del equipo con respecto a ellas (Fig. 68). Partiendo de un diámetro de plato de pulido de 200 mm, se adopta un plato portamuestras de 115 mm de diámetro que pueda alojar tres muestras simultáneamente, quedando los centros de las muestras a una distancia radial de 34 mm del eje del cabezal. Teniendo en cuenta la posición final del motor respecto a la columna principal que es el eje de pivote del equipo, se propuso un brazo estructural que se despeje 200 mm del eje central. De esta forma, la distancia entre centros de las poleas resulta de 270 mm.

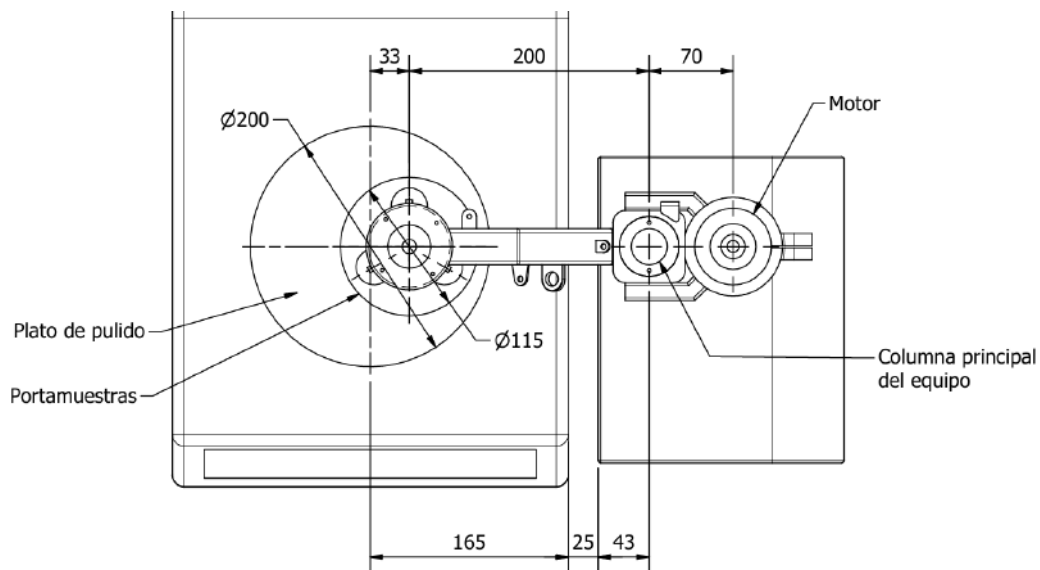


Fig. 68 - Posicionamiento de pulidora para estimación de longitud de correas

En la Fig. 69 se representa esquemáticamente la disposición de los elementos involucrados en la transmisión del movimiento desde el motor hasta la muestra. En ella se identifican los sentidos de giro de cada elemento que se designa con la siguiente nomenclatura:

- **W_{mo}**: velocidad de rotación del motor principal
- **W_{mu}**: velocidad de rotación de cada muestra
- **W_c**: velocidad de rotación del cabezal portamuestras
- **W_s**: velocidad de rotación del eje que sujeta al engranaje central del sistema planetario, que se denominará “sol”
- **ØP_{mc}**: diámetro de la polea acoplada al motor que conduce al cabezal
- **ØP_{ms}**: diámetro de la polea acoplada al motor que conduce al sol
- **ØP_c**: diámetro de la polea acoplada al eje del cabezal
- **ØP_s**: diámetro de la polea acoplada al eje del sol



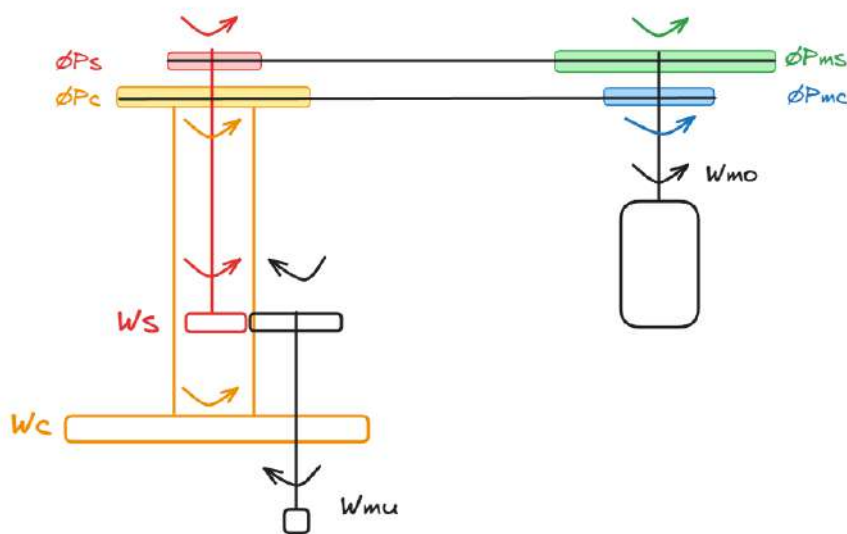


Fig. 69 - Esquema de disposición y sentidos de giro de los elementos que componen la transmisión.

Luego de varias iteraciones, en la Fig. 70 se plantean los diámetros finales de las poleas y sus correspondientes relaciones de transmisión. Las iteraciones se realizaron partiendo de una velocidad deseada en el cabezal de 150 rpm y fijando un valor máximo para la polea de mayor diámetro para que no exceda el tamaño del cabezal. Luego se fue variando el diámetro de la polea menor hasta encontrar una relación donde el eje interno gire al doble de velocidad que el cabezal. Esta característica se buscó para lograr que la muestra, mediante la transmisión por engranajes, gire más lenta y en sentido contrario a la rotación del cabezal.

ØPs [mm]	85	ØPms [mm]	120	i motor/sol	1,4118
ØPc [mm]	120	ØPmc [mm]	85	i motor/cabezal	0,7083
Wc [rpm]	150,2	Wmo [rpm]	212	i sol/cabezal	1,99
Ws [rpm]	299,3				

Fig. 70 – Resultado de iteraciones para el cálculo de la relación de transmisión de las poleas

Para cumplir con la premisa de que el cabezal tenga una velocidad máxima de 150 rpm el motor debe tener una velocidad de giro de 212 rpm. El motor seleccionado en la sección anterior tiene una velocidad nominal de 194 rpm para una cupla nominal de 24,48 kgf.cm. Mientras que la velocidad en vacío es de 237 rpm según las especificaciones listadas en la Fig. 65.

Puede concluirse que, según la curva de funcionamiento típica de los motores de corriente continua, cuando el par resistente es inferior al nominal, la velocidad de giro aumentará acercándose aún más a la velocidad máxima deseada (212 rpm).





7.1.3 Selección de correas

De la sección anterior se obtuvo que la transmisión del movimiento desde el motor principal hacia el cabezal y las muestras se realizará con dos pares de poleas apareadas de diámetros primitivos 120 mm y 85 mm respectivamente, que se ubican en la parte superior del equipo, como se pudo ver en la Fig. 64. Además, se propuso una separación de 270 mm entre las mismas ya que se ubican alineadas a los ejes del motor y del cabezal respectivamente.

En principio, se cuentan con diversas opciones comerciales para transmitir el movimiento entre poleas. La selección del elemento de transmisión depende de la velocidad de giro del conjunto, la distancia entre ejes, la potencia transmitida y el nivel de sincronismo que requiera la aplicación. A continuación, se muestra una breve tabla comparativa de los tipos de transmisión disponibles con sus características principales (Tabla 6).

Tabla 6 – Comparación de tipos de transmisión entre poleas.

Tipo de transmisión		Descripción
Correas	Plana	Transmiten por fricción, adecuada para potencias medias, hay deslizamiento por lo que no asegura sincronismo.
	Trapezoidal (V)	Mejor agarre a la polea gracias a la ranura en V, aunque igualmente se puede perder sincronismo por deslizamiento, ideal para transmitir altas potencias y velocidades.
	Acanalada	Variante de la trapezoidal, con múltiples canales que reparten el esfuerzo, para potencias más bajas, más flexibles que las trapezoidales por lo que permite el uso en configuraciones más compactas.
	Redonda	Usada en transmisiones que requieren alta velocidad y precisión.
	Dentada	Sin deslizamiento, asegura sincronización exacta, funcionamiento silencioso, bajo mantenimiento.
Cadenas	—	Se usan con ruedas dentadas (piñones), asegura el sincronismo ya que no desliza, adecuada para grandes potencias y cargas incluso a gran distancia.

En el caso del equipo diseñado se trabaja a bajas velocidades (300 rpm), con potencias bajas (50 Watts), sin necesidad de sincronismo y con poleas de pequeño tamaño, por lo que se decide





utilizar correas acanaladas de tipo Poly V. Las mismas son ampliamente empleadas en lavarropas, amasadoras, motores de vehículos, por lo cual son de amplia disponibilidad.

El cálculo de las correas se hizo siguiendo el ejemplo de la página 22 del “Manual técnico de transmisiones por correas acanaladas” del fabricante seleccionado (Optibelt). A continuación, se detalla brevemente el procedimiento realizado.

Partiendo de la potencia (P) de 50 Watts del motor seleccionado en la sección 7.1.1, se aplica un factor de servicio (C2) seleccionado de la tabla de la Fig. 71 que tiene en cuenta el tipo de máquina accionada y el periodo de tiempo que será utilizada.

Table 4

Types of Driven Machine		Types of Prime Mover					
		AC and three-phase motors with normal starting load (up to 1.8 times normal running load), e.g. synchronous and single-phase motors with auxiliary phase, three-phase motors with direct on-line start, star delta or commutator starter, DC shunt wound motors, internal combustion engines and turbines n > 600 rpm			AC and three-phase motors with high starting load (more than 1.8 times normal running load), e.g. single-phase motors with high starting torque, DC motors series and compound wound, internal combustion engines and turbines n ≤ 600 rpm		
		Hours per day duty					
		10 and under	over 10 to 16	over 16	10 and under	over 10 to 16	over 16
Consistent duty, only low masses to be accelerated	Agitators for liquids with uniform consistency, generators up to 0.05 kW, small conveyor belts for lightweight material, fans up to 0.05 kW, rotary pumps up to 0.05 kW	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Consistent light duty operation, low masses to be accelerated	Conveyor belts for lightweight material, fans from 0.06 to 0.1 kW, rotary pumps from 0.06 to 0.1 kW	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Inconsistent duty operation, medium-sized masses to be accelerated	Vibrating screens, pit fans, agitators for liquids with fluctuating consistency, compressors, screw presses, woodworking machinery, conveyor belts for heavy material, elevators, conveyor belts, fans above 0.8 kW, drills, milling machines, grinding machines, light lathes, bakery machinery, circular spinning frames, rotary pumps above 0.11 kW, laundry machinery	1.2	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5
Inconsistent medium duty, medium-sized shocks and masses to be accelerated	Kneaders, mills, mixers, pumps, drying drums, general milling equipment, centrifuges, agitators for plastic materials with fluctuating consistency, bucket conveyors, centrifugal fans, parallel planing machines, weaving looms	1.3	1.4	1.5	1.4	1.5	1.6
Inconsistent duty operation, high shocks and masses to be accelerated	Paper making machinery, plate conveyors, slag mills, calenders, drilling rigs, heavy duty lathes, punches, shears, draw benches, piston pumps up to 2 cylinders	1.4	1.5	1.6	1.5	1.7	1.8
Inconsistent duty operation, extra high masses to be accelerated, extra high shocks	Dredgers, heavy duty grinders, rolling mills, mixers, sawmills, calenders	1.6	1.7	1.8	1.6	1.8	2.0

Fig. 71 - Selección de factor de servicio C2

Multiplicando la potencia por el factor de servicio se obtiene la potencia de diseño (PB) cuyo valor es 0,06 kW. Con esta potencia y la velocidad nominal del motor, se ingresa en el diagrama 1 de la Fig. 72 y se obtiene que las correas que se utilicen deberán tener un perfil de tipo PJ. Las características de este tipo de perfil se pueden ver en la Fig. 73.





Diagram 1

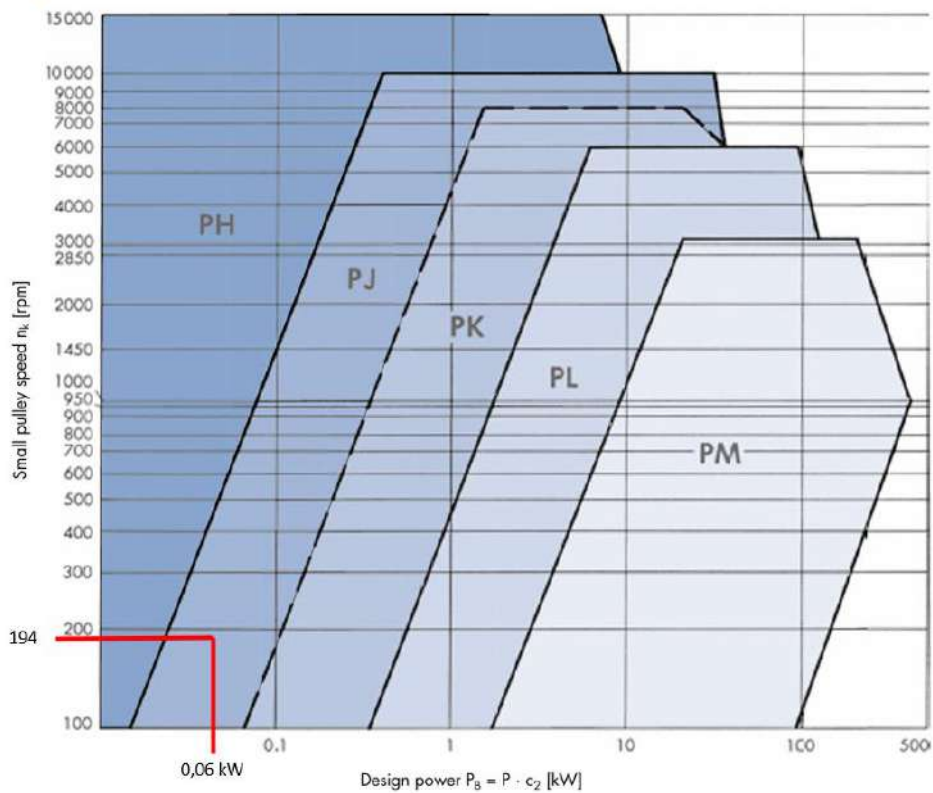


Fig. 72 - Diagrama 1. Selección del tipo de perfil de la correa

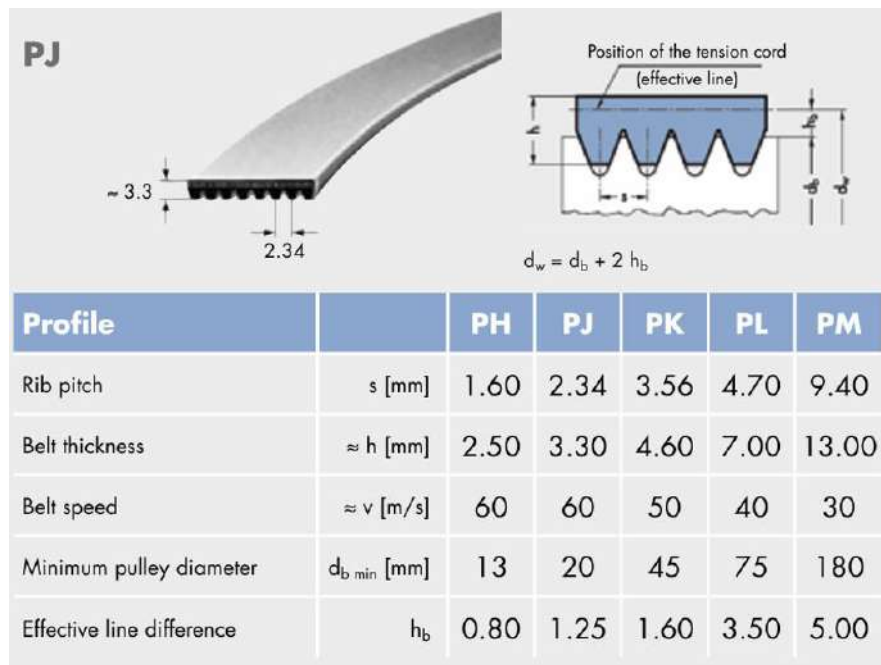


Fig. 73 - Características del tipo de perfil PJ





Para calcular la longitud de la correa se requiere utilizar los diámetros de ambas poleas y la distancia de separación entre sus centros obtenidos en la sección anterior (7.1.2). Con estos datos se comienza calculando un largo efectivo de correa para luego seleccionar el largo estándar más cercano. Según el fabricante, el largo efectivo se puede estimar con la siguiente ecuación (pág. 23 (Optibelt)):

$$L_{bth} \approx 2 a + 1.57 (d_{bg} + d_{bk}) + \frac{(d_{bg} - d_{bk})^2}{4 a}$$

Donde:

- L_{bth} : longitud efectiva de la correa calculada
- a : distancia entre centros de las poleas
- d_{bg} : diámetro efectivo de la polea mayor
- d_{bk} : diámetro efectivo de la polea menor

Reemplazando los valores ya conocidos se obtiene:

$$L_{bth} \approx 2 (270) + 1.57 (120 + 85) + \frac{(120 - 85)^2}{4 (270)}$$

$$L_{bth} \approx 863 \text{ mm}$$

Luego, de la tabla de la página 13 del manual de Optibelt, según el perfil PJ, se elige el **largo estándar** más cercano al valor calculado, que resulta de **864 mm**.





Profile PJ					
Effective length L _e		Effective length L _e		Effective length L _e	
[mm]	[inch]	[mm]	[inch]	[mm]	[inch]
280	11.00	1130	44.50	1915	75.40
330	13.00	1150	45.30	1930	76.00
356	14.00	1168	46.00	1956	77.00
362	14.30	1194	47.00	1965	77.40
381	15.00	1200	47.30	1981	78.00
406	16.00	1222	48.10	1992	78.40
414	16.30	1244	49.00	2083	82.00
432	17.00	1262	49.70	2155	84.80
457	18.00	1270	50.00	2210	87.00
483	19.00	1285	50.60	2337	92.00
508	20.00	1301	51.20	2489	98.00
559	22.00	1309	51.50		
584	23.00	1316	51.80		
610	24.00	1321	52.00		
660	26.00	1333	52.50		
711	28.00	1355	53.40		
723	28.50	1371	54.00		
737	29.00	1397	55.00		
762	30.00	1428	56.20		
813	32.00	1439	56.70		
836	32.90	1475	58.10		
864	34.00	1549	61.00		
914	36.00	1600	63.00		
955	37.60	1651	65.00		
965	38.00	1663	65.50		
1016	40.00	1752	69.00		
1092	43.00	1780	70.00		
1105	43.50	1854	73.00		
1110	43.70	1895	74.60		
1123	44.20	1910	75.20		

Fig. 74 - Tabla de selección de longitud efectiva según perfil de correa, pág. 13 (Optibelt)

Una vez obtenido el tipo de perfil y la longitud de la correa, solo resta calcular la cantidad de costillas que se necesitan para transmitir la potencia del motor, cuya fórmula es la siguiente:

$$z = \frac{P C_2}{P_N C_1 C_3}$$

Donde:

- P: potencia nominal del motor
- P_N: potencia nominal por costilla
- C₁: factor de corrección por arco de contacto
- C₂: factor de servicio
- C₃: factor de corrección por longitud de correa

Hasta ahora sólo se conocen la **potencia nominal del motor (0,05 kW)** y el factor de servicio **C₂ (1,2)** seleccionado en la Fig. 71. La **potencia nominal que puede transmitir cada costilla** de perfil PJ se obtiene de la tabla 6 de la página 27 del manual (Optibelt) donde se ingresa con el diámetro de la polea menor (85 mm) y la velocidad de giro de la polea (aproximadamente 150 rpm), obteniéndose por aproximación, un valor de **0,07 kW** por costilla.





PROFILE PJ

POWER RATING P_N [kW] PER RIP FOR $\beta = 180^\circ$
AND $L_b = 1016$ mm



Table 6

v [m/s]	n_c [rpm]	Effective diameter of small pulley d_{bk} [mm]																Arc of contact correction factor [kW] per rib for speed ratio i		
		20	25	31.5	35.5	40	45	50	63	71	80	90	100	112	125	140	160	1.01 to 1.05	1.06 to 1.26	1.27 > 1.57
700		0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.30	0.33	0.37	0.42			0.01
950		0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.49	0.56		0.01	0.01
1450		0.06	0.09	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.31	0.35	0.40	0.45	0.51	0.57	0.63	0.71	0.81	0.01	0.01	0.01
2850		0.11	0.16	0.23	0.28	0.32	0.38	0.43	0.56	0.64	0.72	0.82	0.91	1.02	1.14	1.27	1.43	0.01	0.02	0.02
100		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07			
300		0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.17	0.20			
500		0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.25	0.27	0.31			
700		0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.30	0.33	0.37	0.42			0.01
900		0.04	0.06	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.23	0.26	0.30	0.33	0.37	0.42	0.46	0.53		0.01	0.01
1100		0.05	0.07	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.24	0.28	0.31	0.36	0.40	0.44	0.50	0.56	0.63		0.01	0.01
1200		0.05	0.08	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.26	0.30	0.34	0.38	0.43	0.48	0.54	0.60	0.68		0.01	0.01
1300		0.06	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22	0.28	0.32	0.36	0.41	0.46	0.52	0.58	0.64	0.73	0.01	0.01	0.01
1400		0.06	0.09	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.30	0.34	0.39	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.78	0.01	0.01	0.01
1500		0.07	0.10	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24	0.32	0.36	0.41	0.47	0.52	0.59	0.65	0.73	0.83	0.01	0.01	0.01
1600		0.07	0.10	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.34	0.38	0.44	0.49	0.55	0.62	0.69	0.77	0.88	0.01	0.01	0.01
1700		0.07	0.11	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.36	0.41	0.46	0.52	0.58	0.65	0.73	0.82	0.93	0.01	0.01	0.01
1800		0.08	0.11	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29	0.37	0.43	0.48	0.55	0.61	0.69	0.77	0.86	0.98	0.01	0.01	0.01
1900		0.08	0.12	0.17	0.20	0.23	0.26	0.30	0.39	0.45	0.51	0.58	0.64	0.72	0.80	0.90	1.02	0.01	0.01	0.01
2000		0.08	0.12	0.17	0.20	0.24	0.28	0.31	0.41	0.47	0.53	0.60	0.67	0.75	0.84	0.94	1.07	0.01	0.01	0.01

Fig. 75 - Extracto de la tabla 6 de la pág. 27 del manual de Optibelt para obtener la potencia nominal por costilla

Para obtener el factor de corrección por arco de contacto primero debe calcularse una relación entre los diámetros de las poleas involucradas y su separación entre centros, que luego se utiliza para ingresar en la tabla 1 de la página 16 del manual (Fig. 76) y obtener el arco de contacto de la polea menor y el factor de corrección C_1 . Utilizando los diámetros de polea (120 mm y 85 mm) y la distancia de 270 mm entre centros, se obtiene un valor de C_1 de **0,99**.

Table 1

$\frac{d_{bg} - d_{bk}}{a_{nom}}$	$\beta \approx$	c_1
0	180°	1.00
0.05	177°	1.00
0.10	174°	1.00
0.15	171°	0.99
0.20	168°	0.99
0.25	165°	0.99
0.30	162°	0.99
0.35	160°	0.99
0.40	156°	0.98
0.45	153°	0.98
0.50	150°	0.98
0.55	147°	0.97
0.60	144°	0.97
0.65	141°	0.97
0.70	139°	0.96

Fig. 76 - Extracto de tabla 1 de pág. 16 del manual de Optibelt para obtener el factor de corrección por arco de contacto (C_1)





Por último, el factor de corrección por longitud de correa C_3 se obtiene de la tabla 2 de la página 17 del manual (Optibelt) ingresando con la longitud estándar de la correa seleccionada (864 mm), obteniendo un valor de C_3 de **0,96**.

Table 2

Profile PH				Profile PJ			
Effective length L_b [mm]	c_3	Effective length L_b [mm]	c_3	Effective length L_b [mm]	c_3	Effective length L_b [mm]	c_3
559	0.96	1956	1.19	280	0.74	1309	1.05
698	0.96	1992	1.20	330	0.76	1316	1.05
735	0.97	2083	1.21	356	0.78	1321	1.05
762	0.98	2155	1.22	362	0.78	1333	1.05
813	1.00			381	0.79	1355	1.06
858	1.01			406	0.80	1371	1.06
864	1.01			414	0.81	1397	1.06
886	1.01			432	0.82	1428	1.07
914	1.02			457	0.83	1439	1.07
955	1.03			483	0.84	1475	1.08
965	1.03			508	0.85	1549	1.09
975	1.03			559	0.87	1600	1.10
990	1.03			584	0.88	1651	1.10
1016	1.04			610	0.89	1663	1.10
1080	1.06			660	0.90	1752	1.12
1092	1.06			711	0.92	1780	1.12
1096	1.06			723	0.92	1854	1.13
1168	1.07			762	0.93	1895	1.13
1194	1.08			813	0.95	1910	1.14
1200	1.08			836	0.95	1915	1.14
1222	1.08			864	0.96	1930	1.14
1230	1.09			914	0.97	1956	1.14
1262	1.09			955	0.98	1965	1.14
1270	1.09			965	0.98	1981	1.14
1285	1.10			1016	1.00	1992	1.14

Fig. 77 - Extracto de tabla 2 de pág. 17 del manual de Optibelt para obtener el factor de corrección por longitud de correa (C_3)

Los valores obtenidos se reemplazan en la ecuación anterior para obtener la cantidad de costillas, resultando:

$$z = \frac{0,05 \text{ kW} * 1,2}{0,07 \text{ kW} * 0,99 * 0,96} = 0,9$$

Con este valor se deduce que con una correa de una sola costilla es suficiente para transmitir la potencia del motor. Sin embargo, como se verá en la sección 7.1.5, para minimizar el peso del conjunto las poleas se fabricarán de polietileno de alto peso molecular (APM), cuyo coeficiente de rozamiento es menor a las que se utilizan como referencia en el manual (fundición de hierro). Por esta razón se decide duplicar el número de costillas para asegurar la transmisión.

De esta forma, se concluye que se utilizarán dos **correas acanaladas de perfil PJ de 2 costillas de 864 mm de longitud** para el sistema de transmisión por poleas.

7.1.4 Tensor de correas

Como se mencionó anteriormente, se cuenta con dos pares de poleas de diámetros apareados de 85 y 120 mm ubicadas a una distancia de 270 mm entre sí generando una multiplicación y reducción de igual magnitud. Como las correas quedan de igual longitud, a la



mitad de la distancia entre ejes se encontrará el punto donde las correas se cruzan. En este punto se desea colocar el tensor de correas (Fig. 78), que consiste en un par de poleas sujetas al brazo estructural que ejercen una presión constante sobre las correas gracias a un resorte de torsión. La incorporación de un tensor permite que las correas sean ligeramente más largas que el perímetro geométrico que recorre las poleas y las une con tangentes. De este modo es posible montarlas y desmontarlas sin necesidad de quitar las poleas, permitiendo a su vez tener mayor tolerancia en la distancia entre centros.

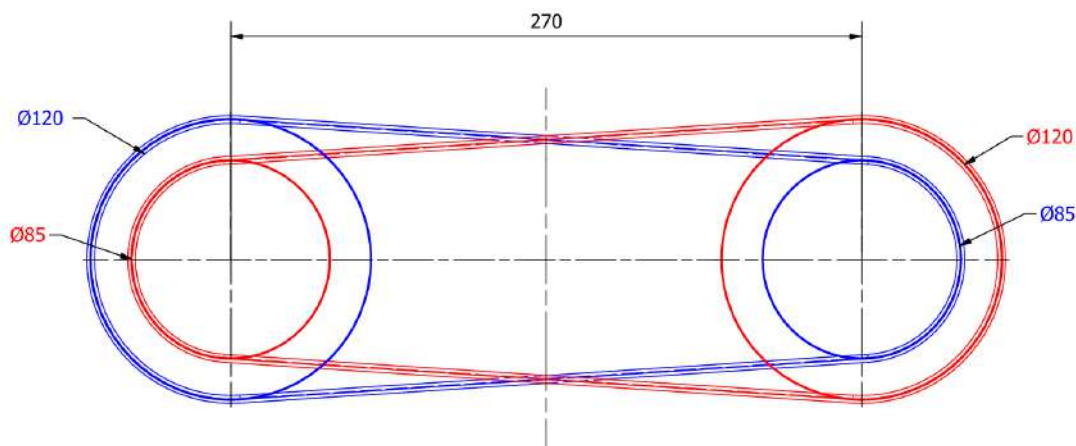
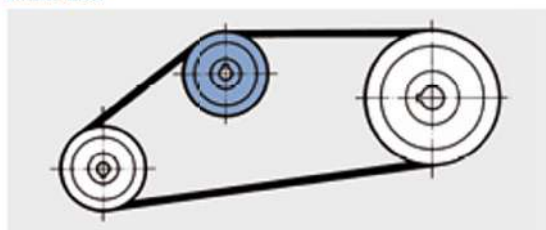


Fig. 78 - Esquema de posicionamiento real de los pares de poleas y correas.

Existen dos formas de tensar las correas, ya sea poniendo una polea desde el interior de la correa que estire la correa hacia afuera (Inside Idler Fig. 79), o una desde el exterior que empuje la correa hacia adentro (Outside Idler Fig. 79). Según el fabricante (Optibelt), se deben cumplir las siguientes condiciones para aplicar una u otra.

- Polea tensora interior $\geq$ la polea conducida más pequeña del sistema
- Polea tensora exterior $\geq 1,2$ veces la polea con carga más pequeña del sistema

Inside Idler



Outside Idler

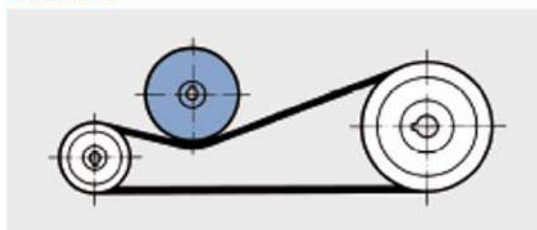


Fig. 79 - Tipos de tensa correa (Optibelt)

Dado que se pretende utilizar el menor espacio posible para hacer un equipo compacto, se decide aplicar la tensión a las correas con una polea tensora interior del mismo diámetro que la polea conducida más pequeña que es de 85 mm de diámetro.

A continuación, en la Fig. 80 se presenta un esquema de las partes que componen el modelo final del conjunto tensa correa. El mismo se compone básicamente de un brazo acodado de 12,7mm de diámetro, un resorte tensor y un par de rodamientos SKF 618002SR. Los mismos tienen una capacidad dinámica de 1.72 KN y pueden trabajar a una velocidad de 48.000 rpm. Las capacidades de trabajo son sobradas, por lo que los mismos se seleccionaron en función de las dimensiones: diámetro interior 10mm y ancho 5mm, como puede observarse en la Fig. 81. Adicionalmente se requerirá de un buje espaciador, tuerca 3/8W-20 y arandela de ajuste para evitar que el conjunto se desarme.

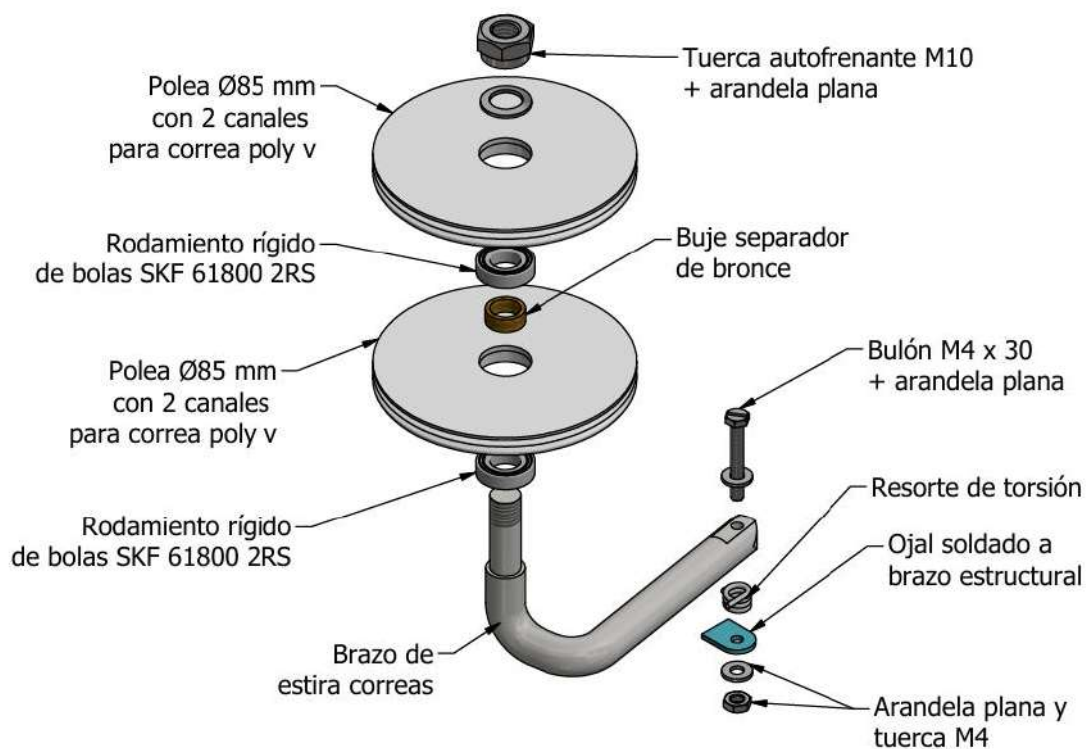


Fig. 80 - Despiece de brazo tensa correa

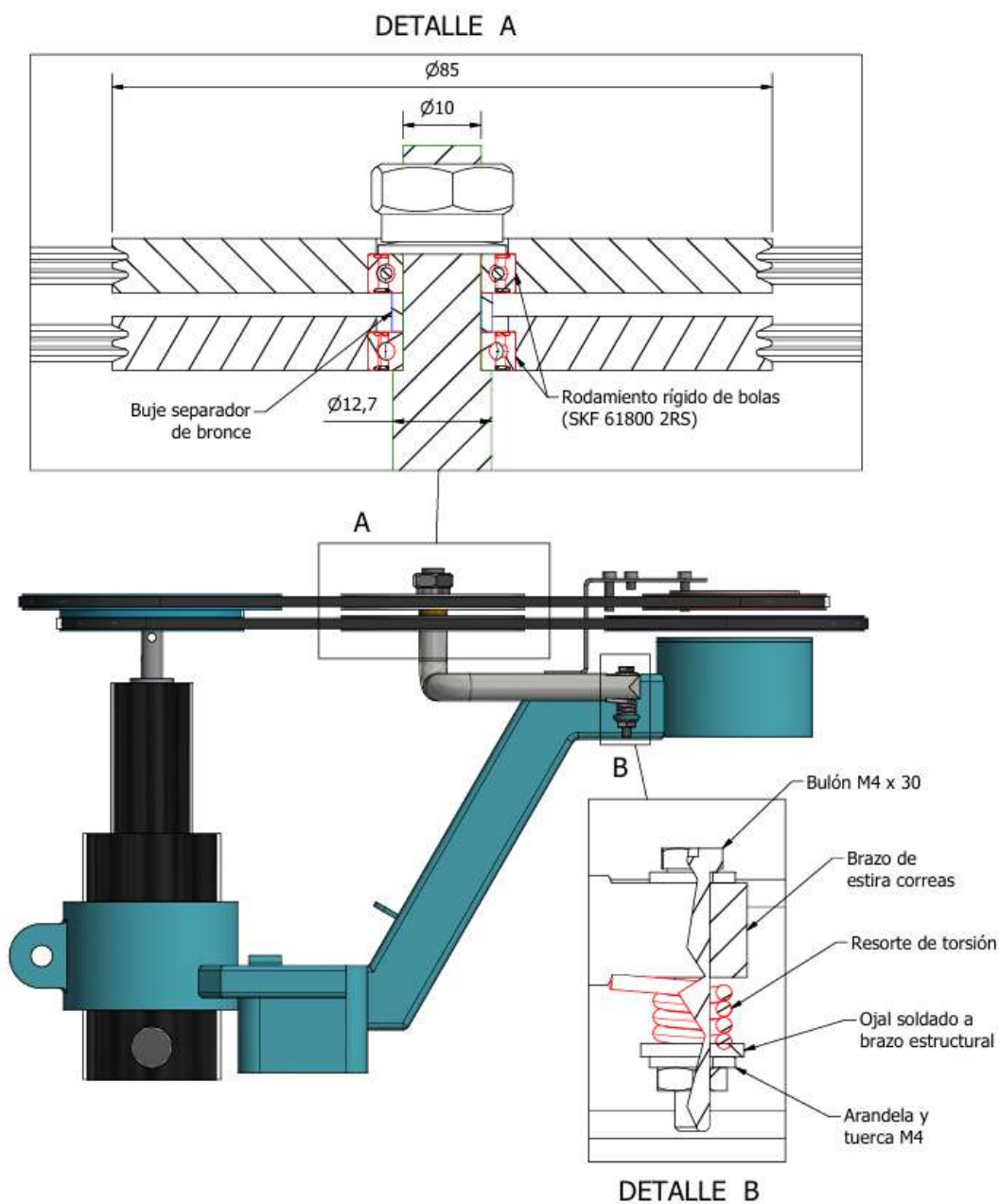


Fig. 81 - Vista en detalle de tensor de correas y sujeción a la estructura

Como elemento tensor se propone emplear un resorte de torsión LeeSpring LTL135T 01 de 25mm de diámetro exterior, 3.4 mm de diámetro del alambre que proporciona un torque máximo de 4.5 Nm, lo que resultará en una fuerza de tensión máxima de 45 N, más que suficiente para la aplicación.



7.1.5 Diseño de poleas y modos de uso

El sistema de transmisión del movimiento de rotación por poleas permite conducir el cabezal con un solo motor. Estos movimientos son rotación del cabezal y orientación de las muestras, siendo este último de magnitud y dirección claramente diferente. Como resultado del análisis cinemático de la sección 5.1 se determinó que la relación entre las velocidades de rotación no puede ser completamente libre, lo cual se asegura con la suma de una transmisión por engranaje a continuación de las poleas obteniendo una transmisión que responde al esquema presentado en la Fig. 69.

El movimiento se transmite desde el motor con una polea maciza doble de diámetros 120 mm y 85 mm, cuyo perfil exterior permite montar correas acanaladas de perfil PJ de 2 costillas.

Del lado conducido se requerían poleas individuales con características similares: diámetros 85 mm y 120 mm respectivamente, con perfil exterior para montar correas acanaladas de perfil PJ de 2 costillas.

Para ampliar las capacidades del conjunto se plantean distintos modos de funcionamiento alternativos, los que permitirán modificar las velocidades de rotación relativas:

Configuración 1: Las poleas conducidas transmiten el movimiento directamente a los ejes concéntricos, esto se logra con poleas macizas independientes.

Configuración 2: Ambos ejes giran a la misma velocidad angular, esto se logra desacoplando la polea conducida de 85 mm y acoplando ambos ejes entre sí.

Configuración 3: El eje central no rota, esto se logra desacoplando la polea conducida de 85 mm y bloqueando el movimiento del eje central.

Para obtener estas funcionalidades se propone independizar el movimiento del eje interno realizando la polea conducida en 2 partes deslizantes que pueden acoplarse mediante pernos. El cambio de configuración lo realizaría el operador, de manera muy simple cambiando de posición los pernos de acople. En la Fig. 82 se presenta un croquis de la solución propuesta. La parte interna de la polea conducida de 85mm se ensambla al eje mediante un alojamiento cónico. Ambas partes de la polea se mantienen en contacto mediante un disco que se ajusta al eje con una tuerca autofrenante. La polea conducida de 120 mm se acopla al eje hueco mediante ajuste prensado 25 H7s6, siguiendo las recomendaciones de la bibliografía.

En cuanto al material de las poleas, se propone utilizar polietileno de alto peso molecular (APM) ya que es un material liviano, resistente para la aplicación y permite un deslizamiento suave entre las dos partes de la polea partida.





En la Fig. 83 se muestra la primera configuración en la que se utiliza el bulón más corto que acopla las dos mitades de la polea partida entre sí. Como se mencionó anteriormente, esta configuración permite que la muestra rote a una velocidad relativa al cabezal más lenta y en sentido contrario a la rotación del cabezal. De este modo, las muestras tendrán una rotación asistida cuya velocidad angular estará dada por la diferencia de transmisión entre ambos pares de poleas y la transmisión de engranajes.

En esta configuración el actuador que aplicará la fuerza sobre la muestra deberá tener en su extremo un elemento de sujeción que permita aplicar la presión de trabajo y a su vez transmitir la rotación hacia la muestra. Esto puede lograrse fácilmente mediante una sopapa. Para esto, el plato portamuestras deberá tener un alojamiento holgado que permita posicionar la muestra en su lugar, pero sin restringir su movimiento de rotación.

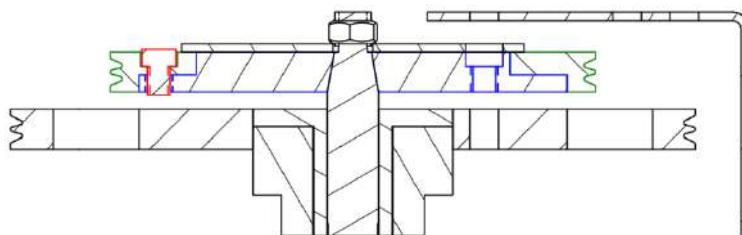


Fig. 83 – Configuración 1 de las poleas conducidas

Configuración 2

En la Fig. 84 se muestra la segunda configuración en la cual se utiliza el bulón largo para conectar el interior de la polea partida con la polea del cabezal. En este caso, ambos ejes rotarán en forma conjunta con una misma velocidad, mientras que la parte exterior de la polea partida deslizará sobre la interior sin transmitir rotación al eje. La velocidad de ambos ejes será la velocidad del motor afectada por la reducción de las poleas que resultó de 0,71 aproximadamente. Al no haber movimiento relativo entre engranajes se reducirá el ruido de funcionamiento. Dependiendo del sistema de sujeción de la muestra la misma podrá rotar libremente al pasar por el centro del plato o mantendrá su orientación, permitiendo lograr un patrón de rayado de 90 grados, que puede ser útil para definir la duración de etapas de desbaste.

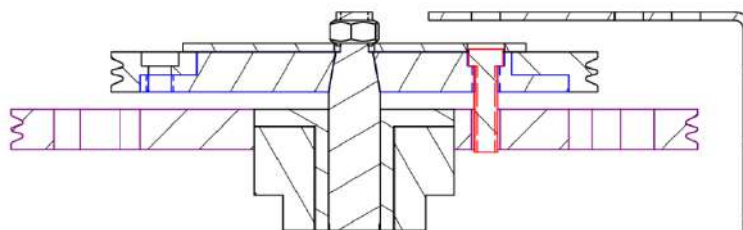


Fig. 84 – Configuración 2 de las poleas conducidas

Configuración 3

En la Fig. 85 se muestra la tercera configuración en la que se utiliza el bulón largo para fijar la parte interior de la polea partida al soporte de los bulones, que se encuentra soldado a la estructura del brazo, para que el eje interior no tenga rotación absoluta. En este caso, al igual que en el anterior, la parte exterior de la polea partida rotará guiada por la transmisión de correas y deslizará sobre la parte interior sin generar rotación sobre el eje.

Esta configuración hace que la rotación de la muestra sólo dependa de la relación de transmisión dada por el sistema de engranajes planetarios.

Al igual que en la primera configuración, el actuador deberá tener en su extremo un elemento que transmita la rotación forzada hacia la muestra, como es el caso de una sopapa.

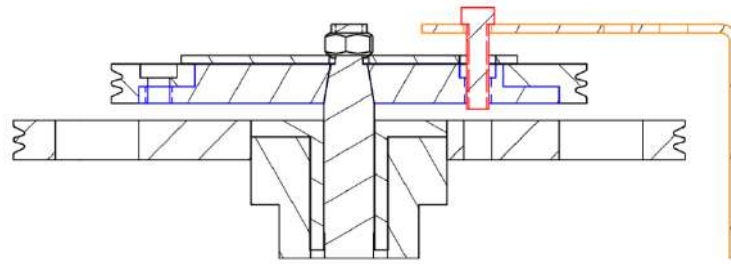


Fig. 85 – Configuración 3 de las poleas conducidas

7.2 Conjunto cabezal

En la Fig. 86 se destacan en color las distintas partes del conjunto cabezal. Para el mismo se propone un prediseño basado en la funcionalidad y las dimensiones buscadas, quedando pendiente la verificación mecánica del mismo.

El cabezal está compuesto por dos ejes concéntricos, uno que transmite la rotación general al conjunto y otro que permite la rotación controlada de las muestras sobre su propio eje, mediante un sistema de engranajes planetarios. Ambos ejes son independientes entre sí y rotan impulsados por el conjunto de poleas explicado en el capítulo 7.1. En el extremo inferior de los ejes se ubican dos discos de aluminio que alojan los engranajes, rodamientos y actuadores que transmiten el movimiento y la presión necesaria para trabajar sobre tres muestras en simultáneo. Estos discos transmiten el giro a todo el conjunto y están sujetos al eje externo. El disco inferior se acopla al eje del plato portamuestras mediante un cubo inferior y prisionero.

Cabe destacar que todo el peso del conjunto está soportado por dos rodamientos ubicados en la estructura que sujetan al eje hueco externo.



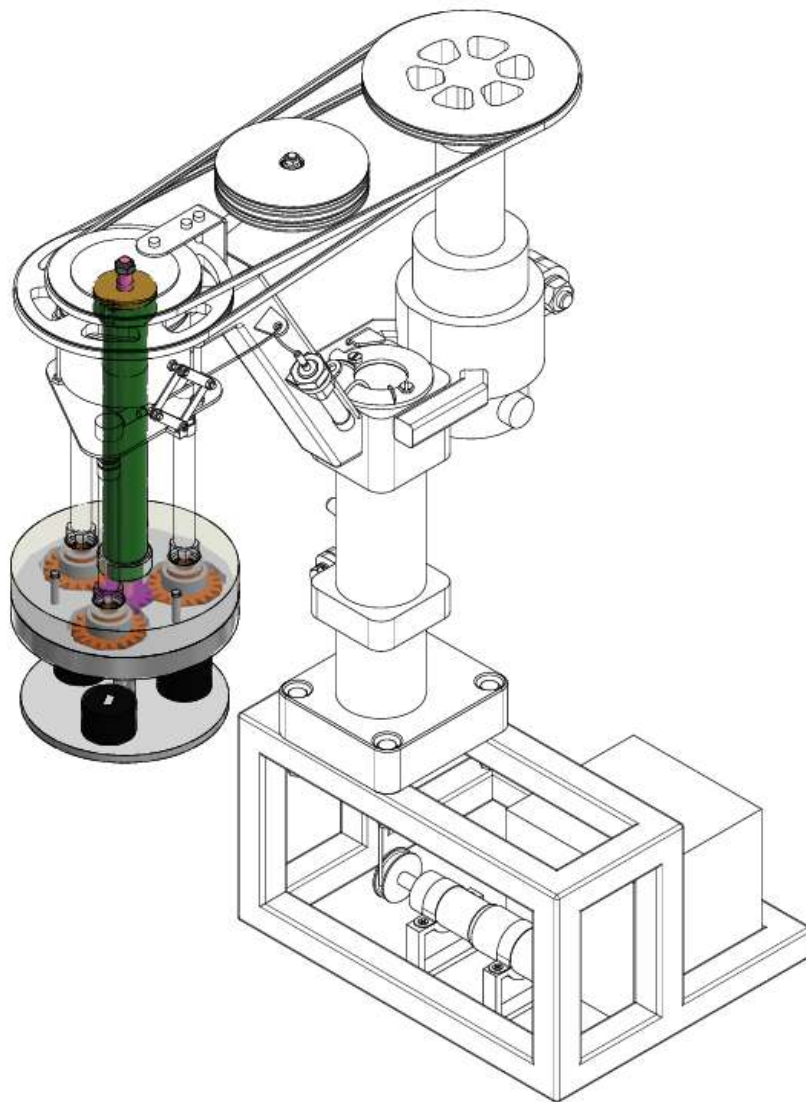


Fig. 86 – Conjunto cabezal

Como se vio en el capítulo de cinemática, la rotación de las muestras sobre sí mismas puede hacerse de forma controlada sujetando la muestra de manera que se pueda aplicar un torque constante o dejando que la muestra pueda girar libremente cuando pase por el centro del plato de pulido. En este último caso, el posicionamiento del portamuestras sobre el plato de pulido es importante ya que se debe asegurar que el centro de la muestra coincida con el centro del plato de pulido.

En cuanto a la rotación controlada de cada muestra, de la sección 5.1.1 se dedujo que cuando la muestra complete una vuelta alrededor del plato, debería tener una orientación distinta a la inicial para que la superficie de pulido tenga un rayado homogéneo.

Se pensó en la posibilidad de que cada muestra se pueda controlar manera independiente y giren a distintas velocidades, pero la solución involucraba un mecanismo complejo y muchos

componentes, lo cual resultaba en un equipo más voluminoso. Esta opción se descartó por ser innecesariamente compleja y hacer que el diseño se aleje del objetivo de que el equipo pueda ser portátil.

Se propuso entonces, utilizar un solo actuador que pueda generar una rotación general a todo el conjunto y a su vez, una rotación controlada para las tres muestras en simultáneo combinando distintos elementos de transmisión. Esto implica que la velocidad y sentido de rotación de las muestras sobre sí mismas queda asociado a la velocidad y sentido de rotación del cabezal completo.

Considerando que los diámetros estándar de los platos de pulido son de 200 mm, y que el tamaño estándar de muestras es de 30 mm de diámetro, se consideró hacer un plato portamuestras de 115 mm de diámetro, en el cual se pueden posicionar tres muestras a un radio de 34 mm del centro del cabezal (Fig. 87).

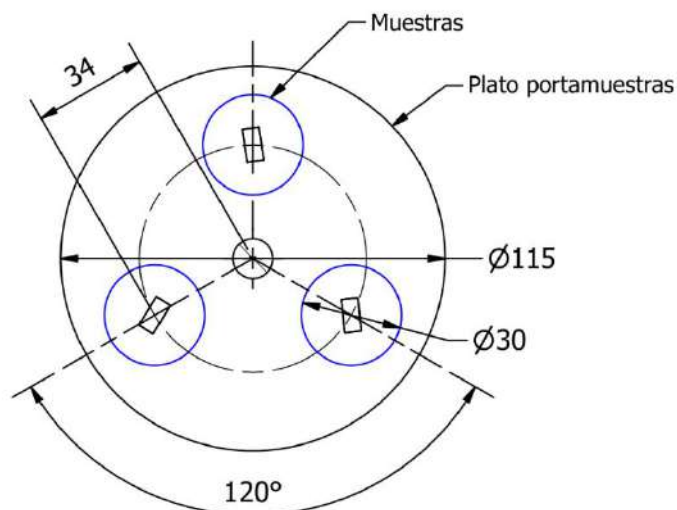


Fig. 87 - Esquema de ubicación de muestras sobre el plato portamuestras

Se analizaron distintas opciones de elementos para la transmisión de la rotación hacia las muestras y se concluyó que la mejor opción era utilizar un sistema de engranajes planetarios ya que el conjunto ocupa poco espacio, asegura una relación de transmisión constante y es posible fabricarlo en los talleres de la facultad.

Para independizar los movimientos de rotación del cabezal con respecto al de las muestras, se planteó utilizar dos ejes que giren a distintas velocidades. Luego de varias propuestas, se decidió que un eje pase por el interior del otro y estén separados por un buje de bronce que minimice la fricción entre ellos. El eje externo es el encargado de soportar el peso de todo el conjunto y transmitir la rotación de todo el cabezal, mientras que el eje interno posee en su

extremo final un engranaje que conduce el movimiento hacia otros tres ubicados equidistantemente por sobre cada muestra.

Para garantizar que el giro de la muestra cree un patrón de trayectorias adecuado, se buscó una relación de transmisión de los engranajes cuya fracción resulte un número irracional. Teniendo en cuenta la distancia de 34 mm del centro de la muestra al eje de giro, se planteó emplear engranajes rectos de módulo 2 con diámetros primitivos de 30 mm para el engranaje central y 38 mm para los planetarios. Esto hace que el piñón tenga 15 dientes, mientras que las coronas tienen 19 dientes, lo que da una relación de transmisión de 0,789 (Fig. 88).

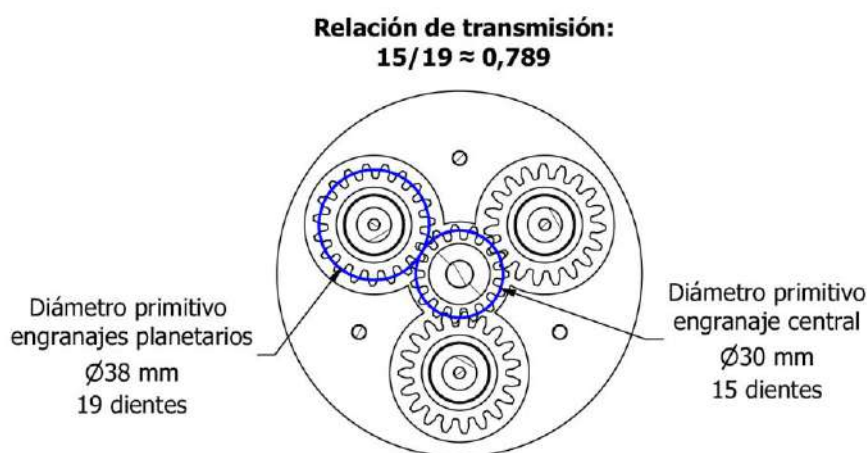


Fig. 88 – Esquema de transmisión planetaria

Los engranajes contendrán un alojamiento roscado para montar los actuadores que aplicarán la carga axial a las muestras. El posicionamiento y soporte se realizará con coronas de agujas y rodamientos de agujas, las cuales deberán soportar una carga de trabajo de 5 N. Para minimizar el espacio requerido las superficies del cubo de los engranajes actúan como pistas de rodadura, por lo cual los engranajes deberán fabricarse en acero SAE 52100 y tener terminación rectificada. En la Fig. 90 se observa vistas del conjunto propuesto. Para realizar este prediseño se tuvieron en cuenta las dimensiones nominales de los componentes disponibles en el catálogo online de SKF.

La carcasa porta engranajes se realizará en aluminio, cuenta con alojamientos para los engranajes, agujeros pasantes para los ejes de los actuadores y un alojamiento con prisionero para montar el plato portamuestras. La carcasa porta actuadores es similar (del mismo diámetro exterior) y en conjunto tienen un espesor de 33 mm, lo que permite alojar a los engranajes, rodamientos y pistas de rodadura.

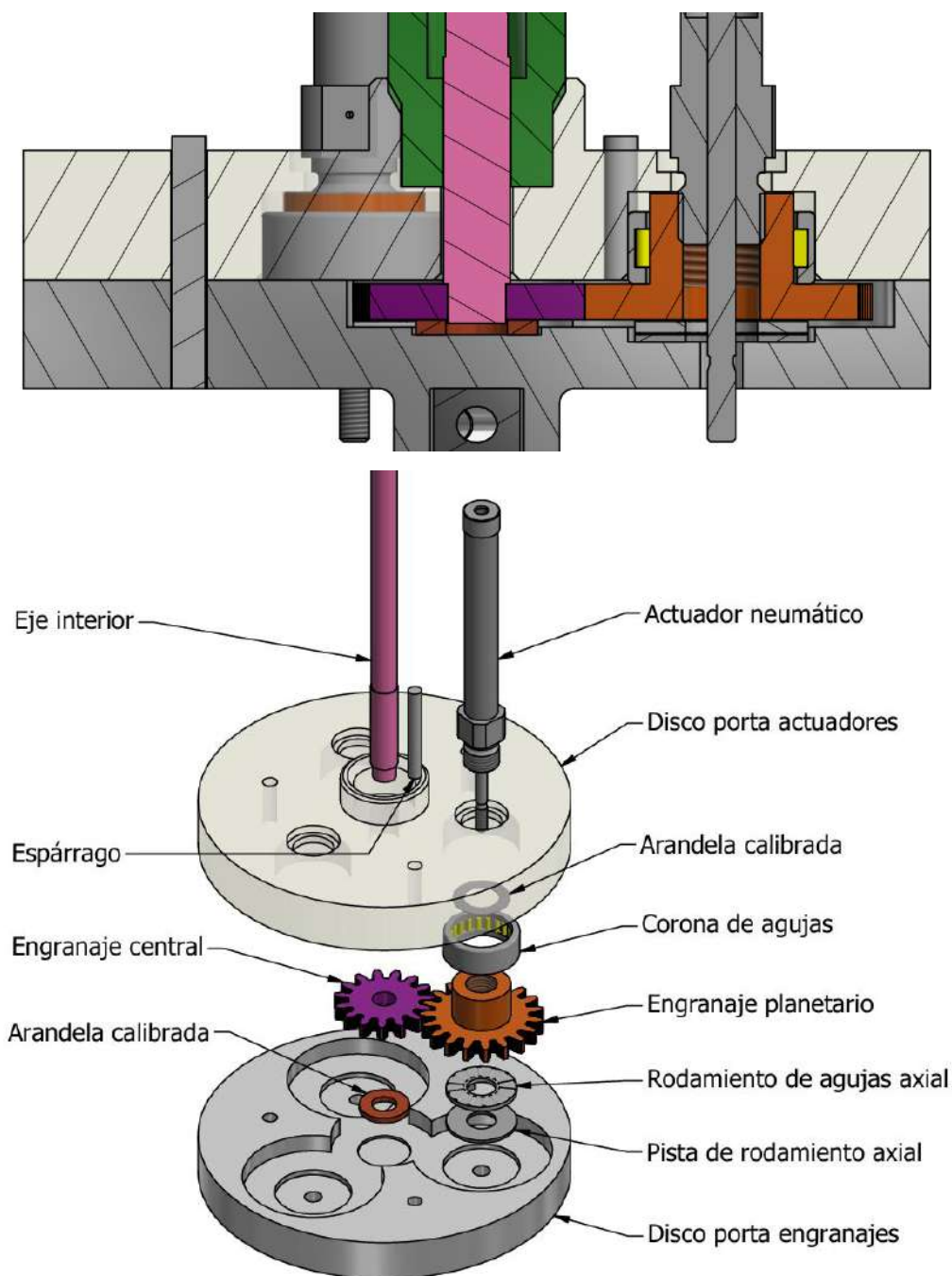


Fig. 89 - Vista explotada y en corte del conjunto cabezal

El plato portamuestras está pensado para que pueda ser intercambiable para distintos tamaños y formas de muestras. Pueden fabricarse platos de la medida de probeta deseada siempre y cuando se mantenga la distancia del centro de la muestra al eje del cabezal, dado que es en este punto donde se aplica la fuerza con el actuador que se encuentra en una posición fija dentro del cabezal. El plato propuesto se diseñó para soportar un máximo de tres muestras en simultáneo por las razones descritas previamente. El plato esquematizado en el modelo es sólo



una opción a modo de ejemplo y está diseñado para muestras embutidas en un cilindro de resina de 30 mm de diámetro.

Los ejes se realizarán en acero al carbono de fácil mecanizado con resistencia a la fluencia de 310 MPa, por ejemplo, SAE 1045. Un redondo de 1 mm de diámetro podrá soportar 10 veces el peso de todo el conjunto por lo que la selección propuesta responde a las características dimensionales del conjunto. Se propone emplear un eje macizo de 9 mm y un eje hueco de 25 mm de diámetro y 6 mm de pared.

Se plantea como trabajo futuro la revisión e ingeniería de detalle de los componentes que incluyen al conjunto cabezal.



7.3 Estructura

En la Fig. 90 se resaltan en color los componentes de la estructura principal del equipo. La misma se compone de una base con una columna principal que sostienen un brazo móvil que puede desplazarse verticalmente sobre la misma y a la vez rotar alrededor de su eje.

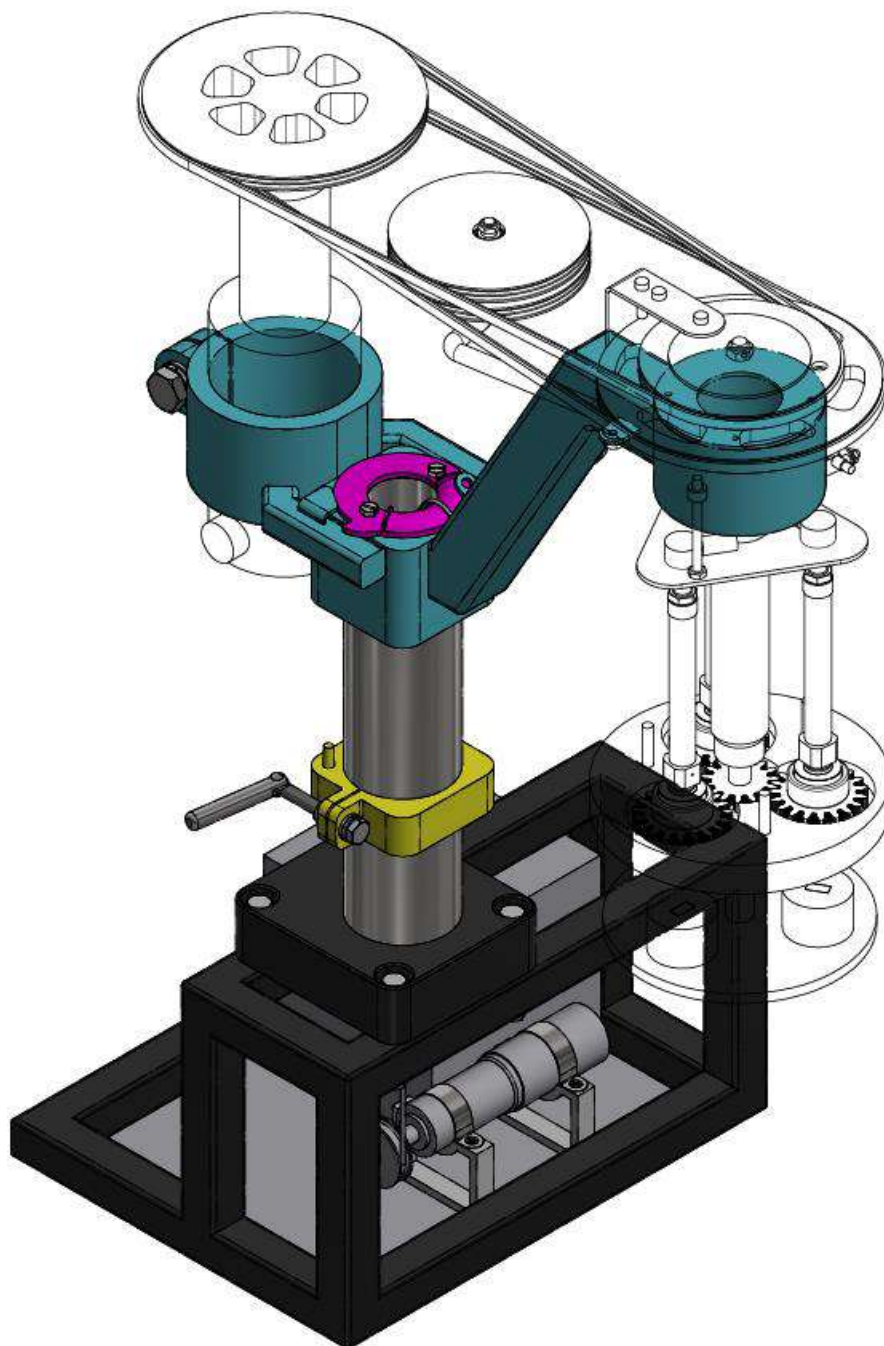


Fig. 90 - Estructura y sistema de posicionamiento



Cabe destacar que el diseño de los componentes de la estructura se hizo de manera sobredimensionada para generar una base robusta que asegure mínimas deformaciones y vibraciones. Se diseñó una base con caños estructurales comerciales de acero al carbono de sección cuadrada 20x20 soldados entre sí. El objetivo fue generar una estructura sólida y robusta, pero a la vez liviana, que permita alojar componentes eléctricos y automatismos de control. La misma luego puede ser recubierta con una carcasa de plástico con una compuerta de acceso posterior para mantenimiento. Las dimensiones generales de la base son 200 mm x 250 mm x 140 mm (ancho x largo x alto) (Fig. 91).

Sobre la base estructural se sitúa un cilindro hueco, de 10 mm de espesor de pared, de material acero AISI 1045, soldado a un bloque macizo rectangular del mismo material. Este conjunto se acopla a la base mediante bulones, arandelas y tuercas métrica 6. El cilindro tiene un diámetro exterior de 50 mm, cuya superficie requiere un proceso de cilindrado y rectificado para que el conjunto cabezal pueda deslizarse sobre ella.

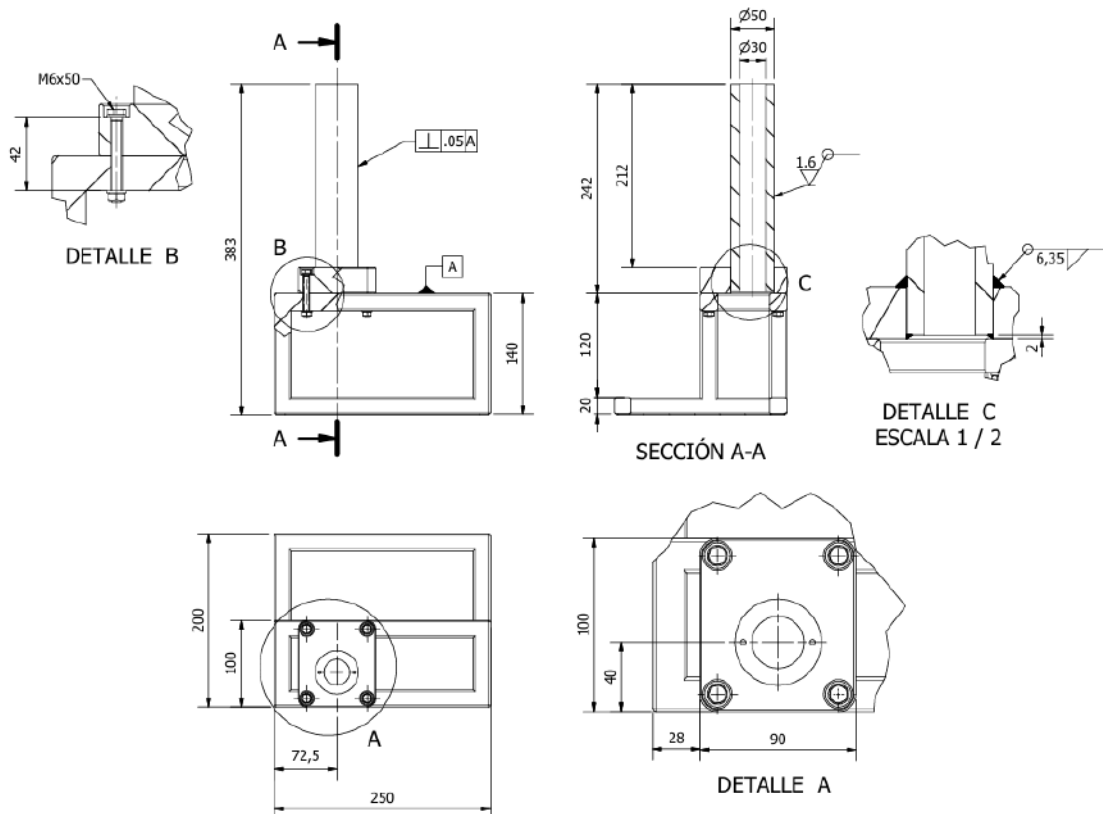


Fig. 91 - Croquis detallado de conjunto base estructural

Se decide realizar un breve análisis de fuerzas de la columna para verificar rápidamente su integridad estructural a la flexión.



Previamente, se definió el material de todos los elementos no comerciales que componen el cabezal móvil y se obtuvo el peso del conjunto brazo estructural / transmisión / cabezal en estado de reposo, que resultó de 10 kg.

Con ayuda del software de dibujo se restringió la pieza desde la base a modo de simular una soldadura y se aplicó una fuerza de 100 N en el extremo final de la columna, que equivale al peso calculado de todo el conjunto móvil (aproximadamente 10 kg). El resultado de la simulación puede verse en la Fig. 92, donde se observa que la tensión máxima obtenida se encuentra cerca de la sujeción y tiene un valor máximo de 2 MPa, la cual es insignificante para tensión de fluencia del material SAE 1045 que es de 310 MPa. Por lo tanto, la columna verifica a la flexión generada por el brazo en su punto más alto.

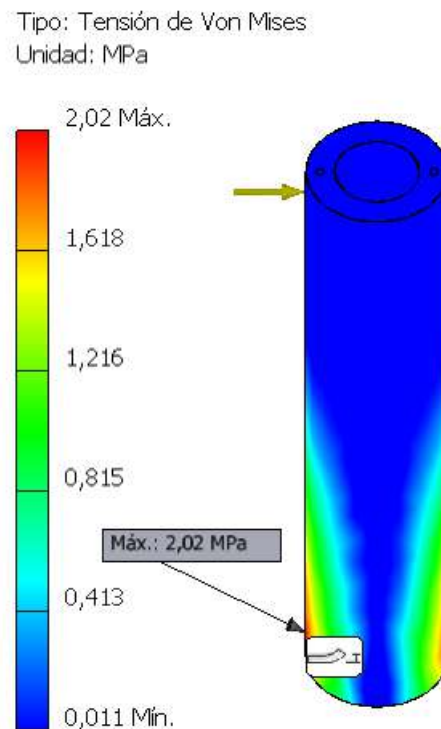


Fig. 92 - Simulación de tensiones de la columna con software de dibujo

7.3.1 Desplazamiento vertical asistido y rotación manual

En un principio, para desplazar verticalmente el conjunto se pensó en poner una masa a forma de contrapeso sujetado a un cable que se agarre al brazo principal del cabezal para poder levantarlo y rotarlo de forma manual. Esta idea se descartó ya que no se contaba con suficiente espacio en el diseño de la base para el volumen que debía ocupar el contrapeso y que pueda desplazarse de manera vertical.

Para optimizar el espacio y facilitar la tarea de izaje, se decidió seleccionar un actuador que mediante una polea y un cable de poliamida que pase por el interior de la columna principal, haga desplazar verticalmente de manera automática el conjunto cabezal (Fig. 93). El giro del

mismo, igualmente, sería controlado de manera manual y puede rotar en un ángulo de 120° dado por la superficie donde desliza el cable (Fig. 94).

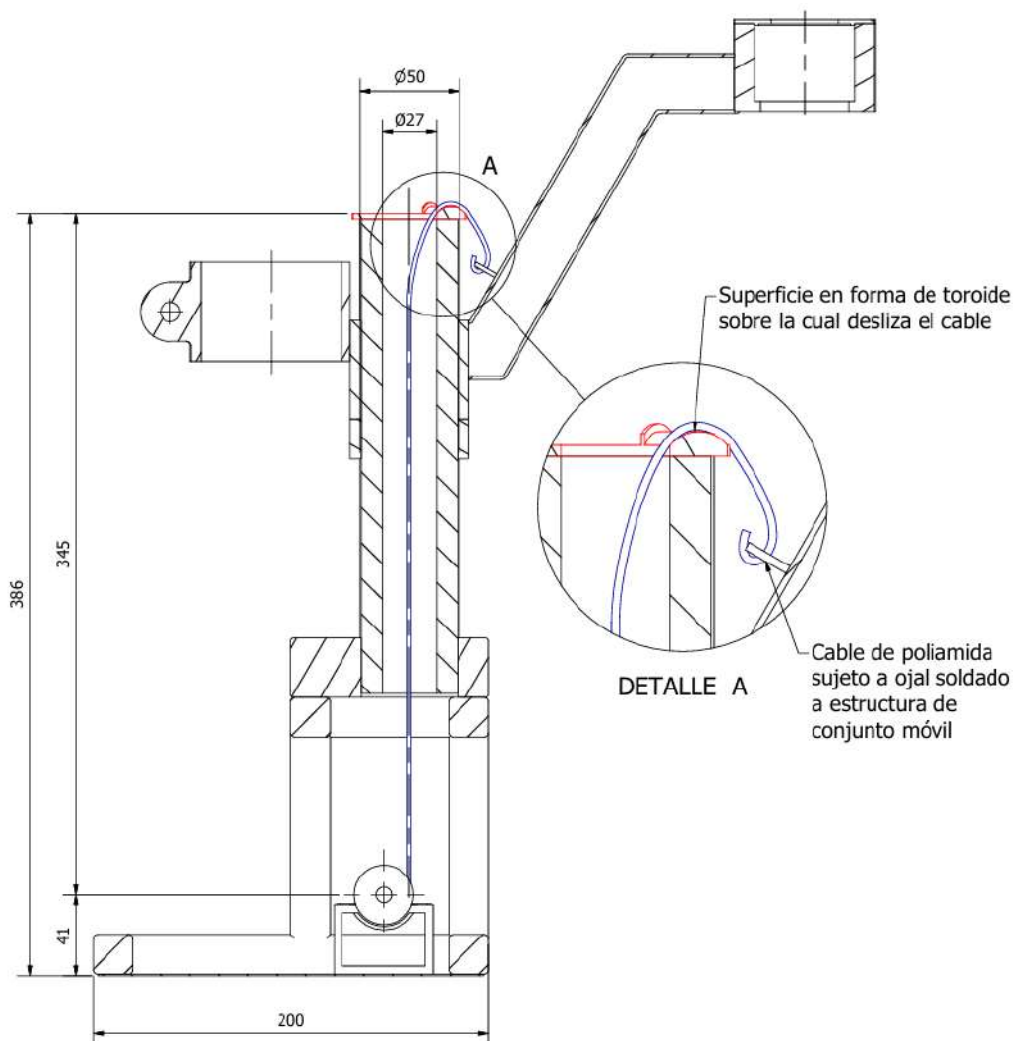


Fig. 93 - Sistema de izaje de conjunto cabezal

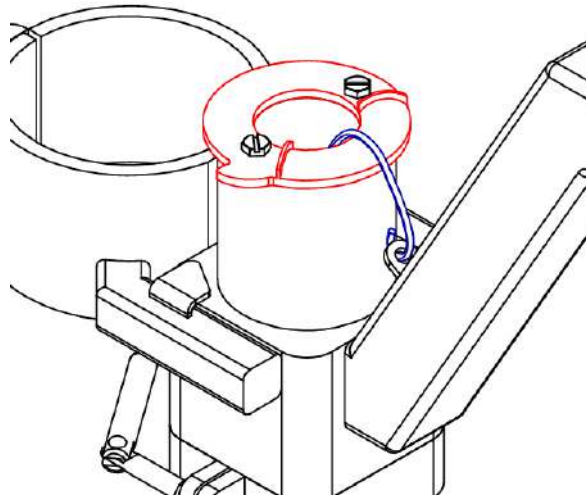


Fig. 94 - Detalle de ángulo de giro del cable

La selección del actuador se hizo calculando el par motor que genera el peso del conjunto. Para esto, en el extremo del eje del mismo se dimensiona una polea de 30 mm de diámetro. Con estos datos el par motor se calcula como:

$$M_t = m_c \cdot r$$

$$M_t = (10kg \cdot 9,81 m/s^2) \cdot 0,015m$$

$$M_t = 98,1 N \cdot 0,015m$$

$$M_t = 1,475 N \cdot m \sim \mathbf{15\ kgf \cdot cm}$$

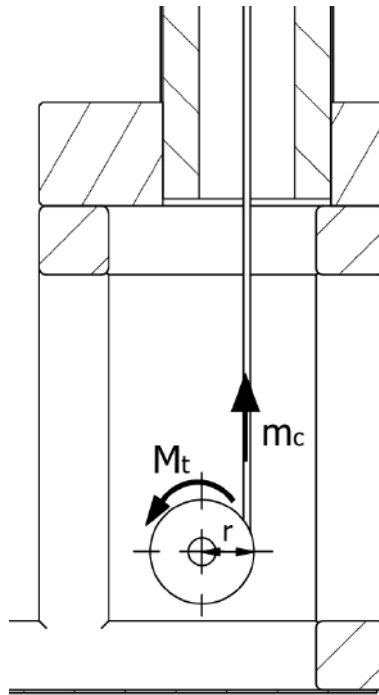


Fig. 95 - Momento torsor generado por el peso del conjunto cabezal en el actuador

Dada la simplicidad del movimiento, la baja velocidad requerida para el giro y el valor del torque obtenido, se elige un motor eléctrico de corriente continua que cumple con todos los requerimientos. Luego de investigar, se encontró un comerciante nacional llamado “Circusplay” que cuenta con motorreductores eléctricos, del cual se obtuvo el catálogo de la Tabla 7. En la tabla se buscó una cupla que supere los 15 kgf.cm calculados anteriormente y a la vez trabaje a una velocidad lo suficientemente baja como para que el movimiento sea suave. Se seleccionó el motorreductor modelo MR08D-012004 que tiene una tensión nominal de 12 Vcc, potencia de 4,84 W, y a la velocidad de 25 rpm alcanza un torque de 18,3 kgf.cm.



Tabla 7 - Selección de motorreductor eléctrico para desplazamiento vertical del conjunto cabezal

Modelo				MR08D-012004	MR08D-024022	MR08D-024022-H
Opcional				- L(eje liso) - P(eje plano) - H(hibrido)		
Adicional				- BR08		
Material del Reductor				Plastico		Plas - Metal
Servicio				Normal		
Potencia [Watt]				4,84	22,7	
Tensión nominal [V]				12 Vcc	24Vcc	
Io . Inom . Is [A]				0,15 . 0,63 . 5,60	0,21 . 1,27 . 7,0	
Ruido máx. [DB] (Adicional única etapa 15%)				95		
RPM Nom . RPM Vacío (motor)				6140 . 7600	7810 . 9100	
Peso . Adicional por etapa [Kg]				0,235 . 0,005	0,350 . 0,005	0,370 . 0,005
Largo[LT] . Adicional por etapa . Diámetro Motor [DM]				106 . 5,5 . 27,5	127 . 5,5 . 37	132,5 . 5,5 . 37
Etapas	Relación	Engranajes	Velocidad [RPM]	Cupla [Kgf.cm]	Cupla [Kgf.cm]	Cupla [Kgf.cm]
0	1:1	0	6400	0,08	0,28	--
1	4:1	4	1600	0,23	1,27	--
	6:1	6	1066	0,34	1,90	--
2	16:1	44	400	0,92*	5,08*	--
	24:1	64	266	1,39*	7,65*	--
	36:1	66	177	2,09*	11,40*	--
3	64:1	444	100	3,70*	20,30*	20,30
	96:1	644	66	5,60*	30,80*	30,80
	144:1	664	44	8,40*	46,20*	46,20
	216:1	666	30	14,80*	50,00*	67,80
4	256:1	4444	25	18,30*	**	88,00
	384:1	6444	17	21,70*	**	"
	864:1	6664	7,5	49,30*	**	"
5	1536:1	64444	4,0	50,00*	**	--
	3456:1	66644	1,8	"	"	--
	7776:1	66666	0,8	"	"	--
También disponible en: 11 . 6,0 . 2,7 . 1,2 Rpm				* Stock permanente		

7.3.2 Fijación de la posición de trabajo

Para ubicar el cabezal en la posición de trabajo, se tomó como modelo la abrazadera de sujeción utilizada en la agujereadora de banco que se encuentra en el taller de mecanizado de la Facultad de Ingeniería (Fig. 96), cuya función es fijar la mesa de trabajo a la columna de la máquina. Esta pieza de fundición envuelve parcialmente la columna cilíndrica y cuenta con una ranura longitudinal que permite su ajuste mediante un tornillo de apriete lateral. Al aflojar este tornillo, la mesa puede deslizarse verticalmente para posicionarse a la altura deseada. Una vez posicionada, el tornillo se aprieta nuevamente para inmovilizar el conjunto.





Fig. 96 - Agujereadora de banco del taller de mecanizado de la Facultad de Ingeniería de la UNMDP

En este proyecto se propone una abrazadera (pieza amarilla en Fig. 97) fabricada con un macizo cuadrado de fundición de 60 mm por lado y 20 mm de altura, con un agujero de 50 mm de diámetro en el centro por el cual pasa la columna principal. En uno de los laterales posee un saliente en forma de ojal por donde pasa un bulón de métrica 6 y una tuerca. El extremo final del bulón se mecaniza para alojar un redondo macizo con una ranura en la punta, los cuales se unen mediante un perno pasante. De esta forma, el macizo sirve de palanca para ajustar y aflojar fácilmente la abrazadera contra la columna.

En la parte superior de la abrazadera, en la cara que hace contacto con el conjunto cabezal móvil, se diseñó un saliente de forma cónica de 10 mm de altura. Asimismo, en el conjunto cabezal se hizo un alojamiento del mismo tamaño para que se acople el cono de la abrazadera (Fig. 98).

La abrazadera planteada puede desplazarse axialmente por la columna principal y ser rotada manualmente en cualquier altura y ángulo deseado. Luego de ser ajustado en su posición, el conjunto cabezal puede descansar sobre la abrazadera, quedando fija la posición de trabajo sobre cualquier pulidora independientemente de su forma.

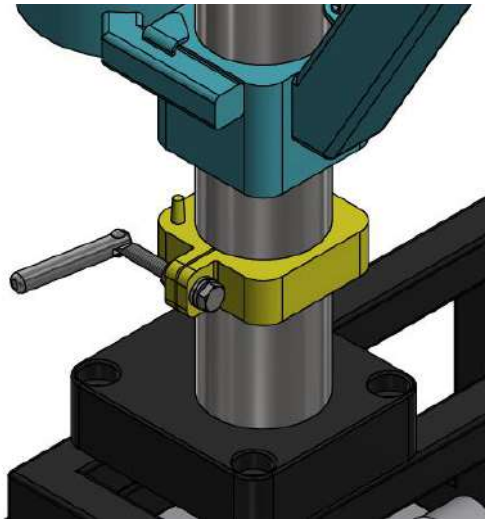


Fig. 97 - Abrazadera para fijación de posición de trabajo.

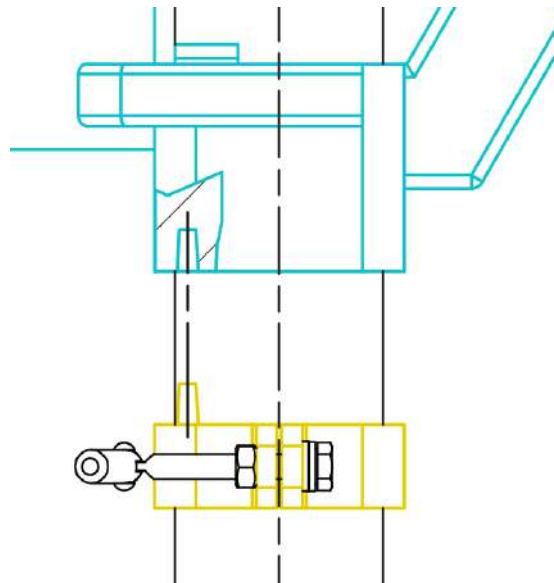


Fig. 98 - Detalle de unión de abrazadera con conjunto cabezal.



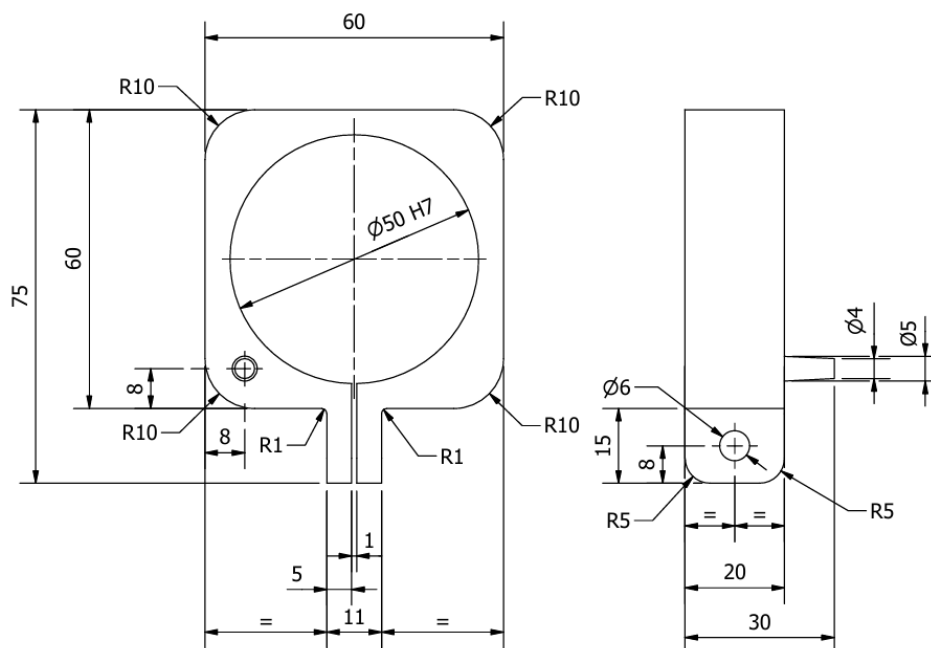


Fig. 99 - Croquis detallado de abrazadera.

7.3.3 Fin de carrera

En el extremo superior de la columna principal se propone colocar una arandela con un diseño particular que tiene múltiples funciones. La arandela se sujeta mediante dos bulones que enroscan en unos agujeros roscados mecanizados en la parte superior de la columna.

Una de las funciones de esta pieza es hacer de fin de carrera y evitar que conjunto cabezal se desacople de la columna principal. Esto se logra ya que la arandela es de mayor diámetro que la columna, sobresale 4 mm en radio, suficiente para hacer de tope.

En la parte superior de la arandela se diseña una superficie en forma semicircular con topes más altos en ambos extremos que abarca un ángulo de 120°. Esto sirve para que deslice el cable de poliamida mencionado en la sección anterior, el cual soporta el peso del conjunto cabezal y produce el desplazamiento vertical. Esta superficie debería tener una rugosidad media de 1,6 según la norma ISO 1302, la cual es alcanzable con la práctica normal del taller por torneado y fresado.

Por último, se diseña una pestaña que sobresale de la arandela para generar un apoyo sobre el cual descansa el conjunto cuando se requiera despejar la zona de trabajo para realizar una limpieza. El conjunto cabezal tiene soldada en su estructura una chapa de calibre 16 (espesor 1,65 mm) plegada en ángulo de 90° con una terminación diseñada para facilitar el montaje sobre la pestaña de la arandela.



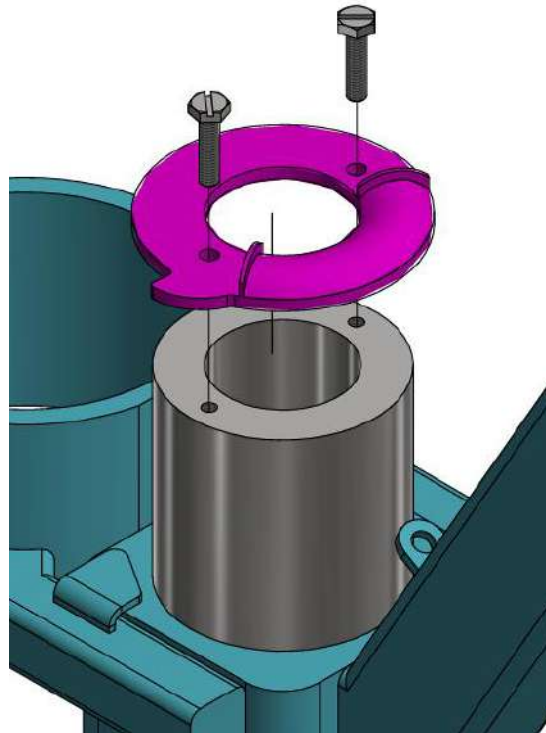


Fig. 100 – Vista de arandela fin de carrera

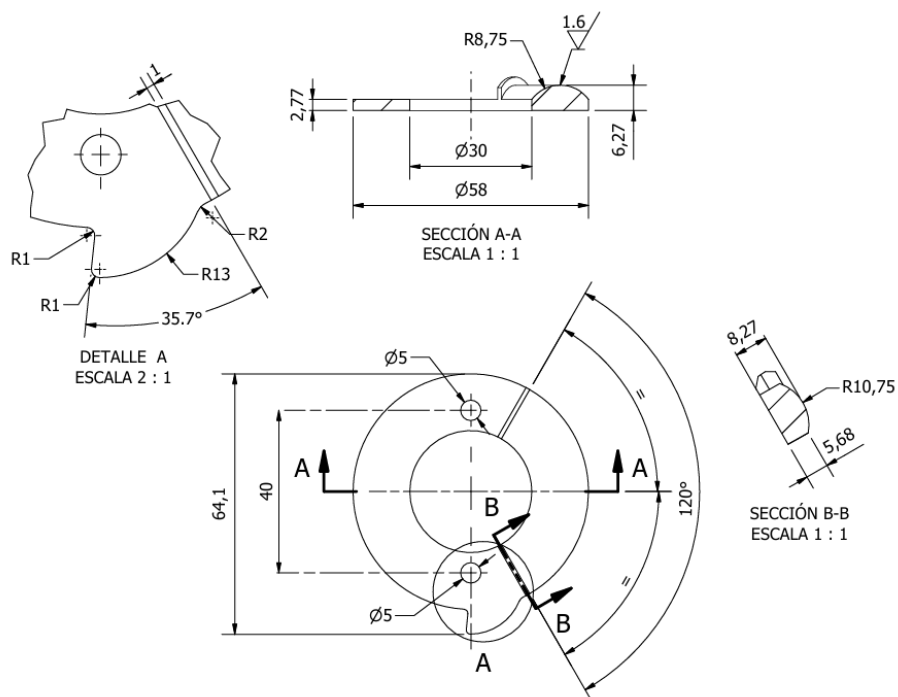


Fig. 101 - Croquis de arandela de fin de carrera

7.3.4 Brazo estructural para sujeción de motor principal y cabezal rotativo

El diseño del brazo soporte se fue modificando según la necesidad de sujeción de los distintos componentes del sistema de rotación y transmisión de movimiento del cabezal. En la siguiente imagen se presenta un croquis enumerando cada parte del mismo. A continuación, se describe brevemente cada una de ellas.

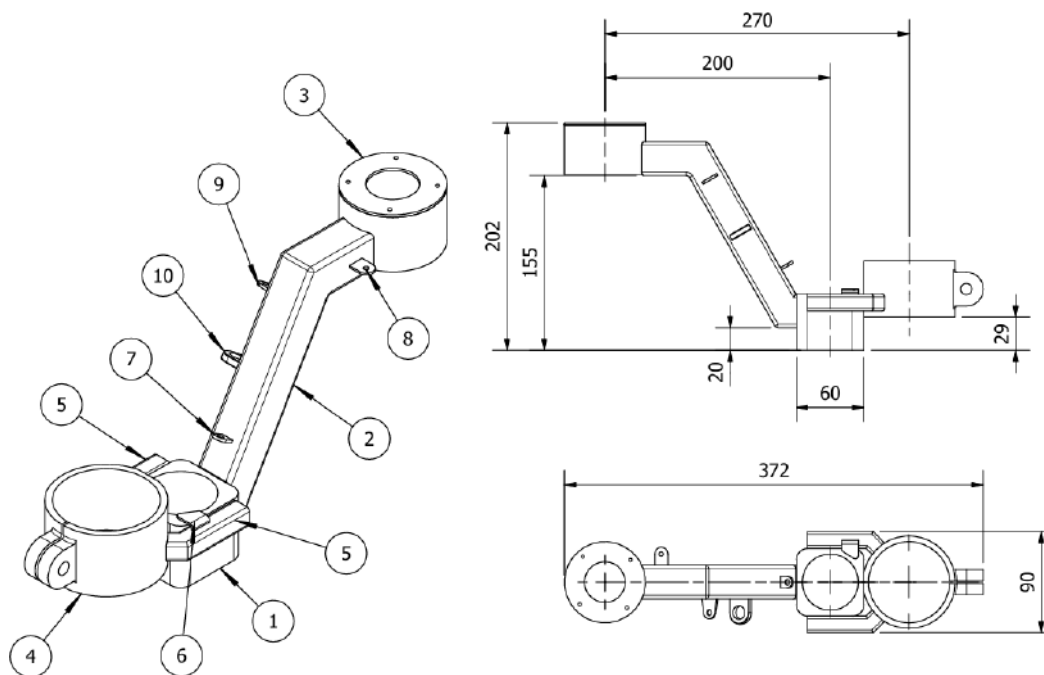


Fig. 102 - Croquis de ensamble de brazo estructural

En la Fig. 102 se presenta el brazo soporte, que se compone de un cubo macizo de 60mm x 60 mm y 50 mm de altura (pieza 1), al cual se le mecaniza un agujero del diámetro de la columna principal (50 mm) con una tolerancia de 1 mm de holgura para que deslice sin problemas sobre la misma. En un lateral del cubo se une un conjunto soldado de caños estructurales cuadrados de 30 x 30 mm para elevar y sujetar el cabezal rotativo (pieza 2). En el extremo superior del brazo se suelda una caja que sirve para soportar los rodamientos desde los cuales quedará apoyado el eje principal del cabezal rotativo (pieza 3). En el lateral opuesto de la pieza 1 se diseña una abrazadera para sujetar al motor principal (pieza 4), la cual se suelda al cubo y se refuerza con dos soportes también fabricados con caños estructurales cuadrados de 15 x 15 mm (pieza 5). La pieza 6 de la figura, como se mencionó en el inciso anterior de Fin de carrera, es una chapa calibre 16 plegada a un ángulo de 90° para soportar el conjunto cuando se encuentra en posición de descanso. Luego, las piezas enumeradas de 7 a 10 son oiales que cumplen distintas funciones; la pieza 7, que se mencionó en el apartado 7.3.1, actúa como punto de sujeción para el movimiento vertical del conjunto; la pieza 8 sirve de punto de pivote para el estira correa y se nombrará en el apartado 7.1.4; las piezas 9 y 10 sirven para sujetar el actuador utilizado en el sistema neumático de aplicación de fuerza de trabajo que se ampliará en el apartado 0.



En las siguientes figuras se presentan croquis detallados de las piezas mencionadas anteriormente.

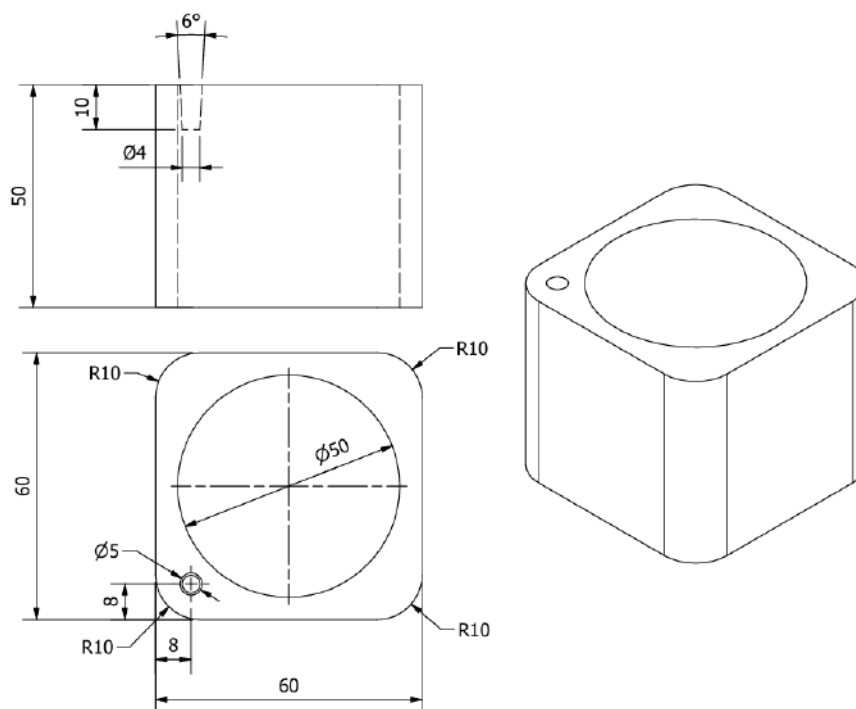


Fig. 103 - Pieza 1

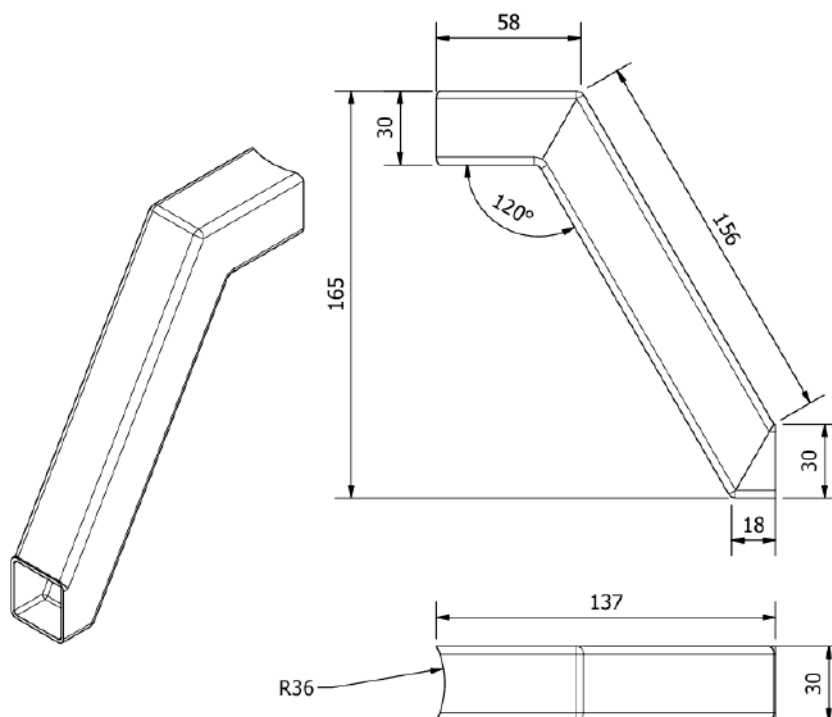


Fig. 104 - Pieza 2



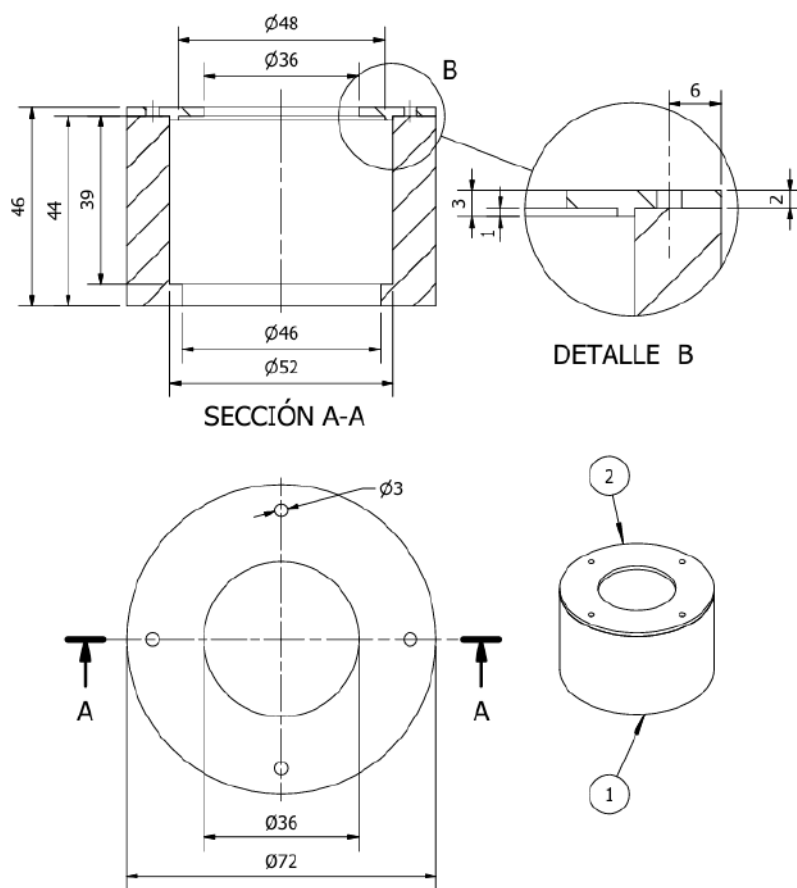


Fig. 105 - Pieza 3

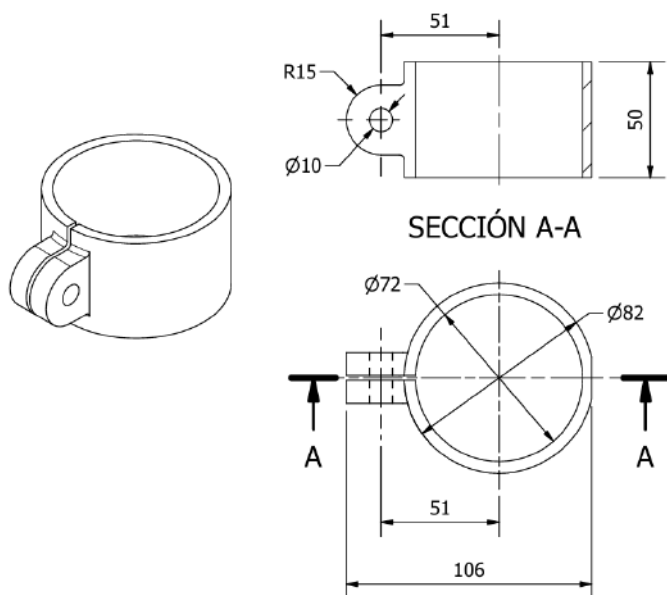


Fig. 106 - Pieza 4



Gracias a la experiencia laboral que adquirí en los últimos años, considero que, de todas las piezas presentadas anteriormente, la más crítica en cuanto a sollicitación estructural es el brazo soldado de caño estructural de 30x30 mm (pieza 2). En consecuencia, se procede a hacer un breve análisis estructural de la pieza para verificar la resistencia de la estructura con ayuda del software de dibujo. Al igual que con la columna principal del equipo, se establecieron los parámetros de material, fijación y sollicitación de fuerza (tomada nuevamente como de 100 N, equivalente al peso de 10 kg del conjunto) y se obtuvo el resultado de la Fig. 107.

La tensión máxima alcanzada resulta de 45 MPa y se ubica en la base que se encuentra soldada contra el cubo (pieza 1). Se puede concluir que el brazo está sobredimensionado para el peso que va a sostener ya que el valor de tensión obtenido es mucho menor a la tensión de fluencia del material AISI 1010 (210 MPa).

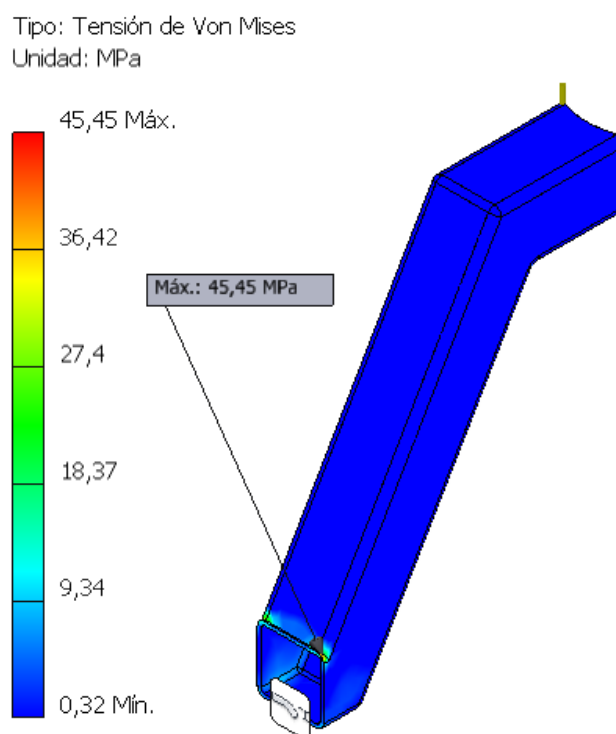


Fig. 107 - Ensayo estructural de brazo soporte

7.3.5 Sujeción del eje principal del cabezal

En el apartado 7.2 se explicaron brevemente los dos ejes concéntricos del conjunto cabezal y en el capítulo de transmisión del movimiento principal (7.1) se mencionó la sujeción de los mismos a las respectivas poleas. En esta sección se muestra cómo se sujetan los ejes a la estructura del brazo portamuestras y la secuencia de armado del conjunto.

En las Fig. 108 y Fig. 109 se muestran los componentes involucrados. Todo el peso del conjunto cabezal se sujeta mediante un par de rodamientos ubicados en un compartimiento en el extremo del brazo estructural. Se decidió colocar un rodamiento de rodillos cónicos para soportar el peso y un rodamiento de bolas para alinear el conjunto y minimizar vibraciones. La selección de los rodamientos se hizo con ayuda del catálogo del fabricante SKF buscando dentro de los dos tipos mencionados, el que más se adecúe al diámetro exterior del eje hueco.

Posteriormente, la caja que soporta al conjunto se dimensionó en base al diámetro exterior de los rodamientos seleccionados. La misma se diseñó en dos partes, un macizo mecanizado internamente con las tolerancias necesarias para colocar los rodamientos que se suelda al brazo estructural y una tapa superior para que el conjunto pueda ensamblarse.

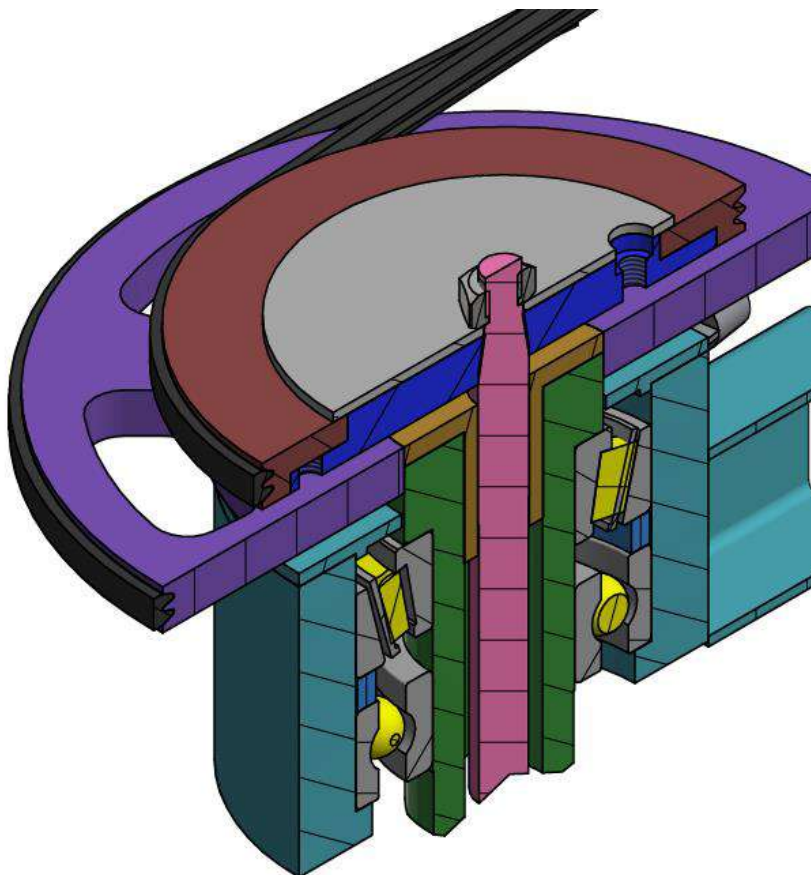


Fig. 108 – Vista en 3D de la sujeción de los ejes

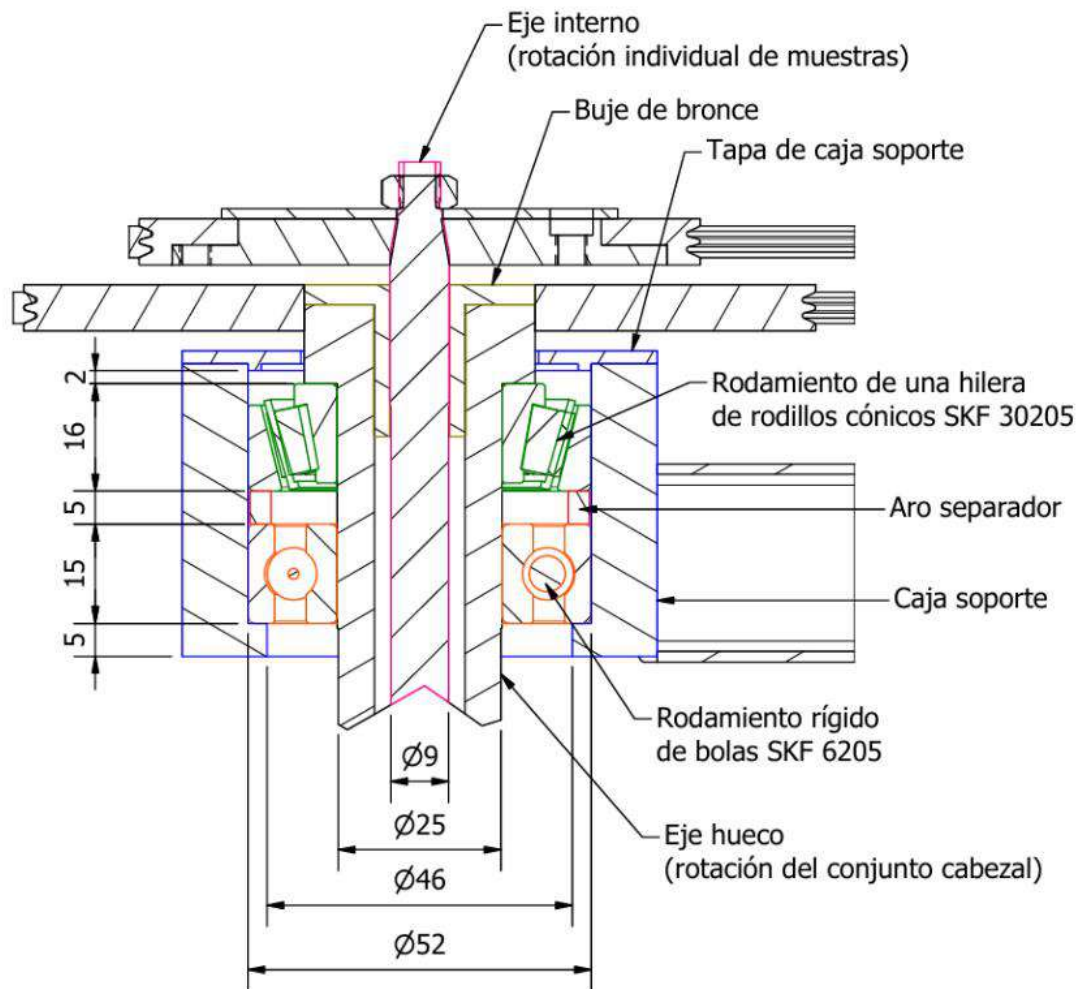


Fig. 109 - Detalle de sujeción del conjunto cabezal

Considerando todos los elementos de la Fig. 109, el conjunto cabezal fue pensado para ser ensamblado según la siguiente secuencia:

1. Teniendo la estructura del brazo portamuestras fabricada, se inserta el rodamiento rígido de bolas en el alojamiento, asegurando su correcta posición y apoyo sobre el asiento mecanizado.
2. A continuación, se coloca la arandela separadora entre rodamientos, la cual mantiene la distancia adecuada entre ambos elementos y garantiza el correcto alineamiento.
3. Luego, se instala el rodamiento de rodillos cónicos, cuidando la orientación de las pistas para permitir el apoyo axial del conjunto.
4. Seguidamente, se introduce el eje hueco desde la parte superior hasta que el resalte inferior haga tope sobre la pista interna del rodamiento cónico.
5. Una vez posicionado el eje hueco, se coloca el buje de bronce, encargado de centrar el eje macizo interno dentro del eje hueco.



6. A continuación, se inserta el eje interno hasta su posición final, asegurando su libre giro y correcta alineación con los rodamientos.
7. Posteriormente, se monta la tapa del alojamiento y se fija mediante tornillos, completando el cierre del conjunto y reteniendo los rodamientos en su posición.
8. La polea inferior se instala acoplándola al eje hueco mediante una unión con chaveta, y a continuación se monta la polea superior sobre el eje interno, utilizando el asiento cónico mecanizado en el eje y asegurándola firmemente con una tuerca y una arandela especial de ala ancha.
9. Por último, la carcasa superior porta actuadores se enrosca en el extremo inferior del eje hueco.

En este prediseño no se definieron las tolerancias dimensionales entre las pistas exteriores e interiores de los rodamientos y las correspondientes superficies de los ejes y caja soporte. Sin embargo, en el manual de rodamientos se puede obtener el ajuste recomendado teniendo en cuenta principalmente la secuencia de montaje.





7.4 Sistema de aplicación de fuerza individual

En la Fig. 110 se resaltan a color los elementos involucrados en la aplicación de la fuerza de trabajo en cada muestra.

Inicialmente se pensó en utilizar un actuador eléctrico lineal para la aplicación de la fuerza individual a las muestras debido a que ya se estaban utilizando componentes eléctricos en otras partes del equipo. Sin embargo, esta opción se descartó en cuanto se comenzaron a buscar las características generales de las opciones comerciales disponibles. A pesar de que los actuadores eléctricos comerciales que se investigaron cumplen con el requerimiento de fuerza a aplicar de 50 N, no se encontraron opciones que tengan un recorrido de pistón suficiente para despejar la zona de trabajo para retirar las muestras una vez terminado el proceso de pulido. Otras razones para descartar estos actuadores son el recalentamiento del motor por uso en tiempos prolongados, y la complejidad de proporcionar energía de manera continua para que se ejerza la fuerza mientras rota el cabezal.

Otra alternativa evaluada para aplicar la fuerza individual sobre cada muestra fue el uso de un sistema mecánico compuesto por resortes de compresión y un mecanismo de pivote que transmitiera la carga mediante un vástago. Sin embargo, esta solución fue descartada porque la fuerza aplicada dependía directamente de la altura de cada muestra; incluso pequeñas variaciones podrían producir cambios significativos en la carga ejercida, generando oscilaciones no deseadas. Este comportamiento resulta inadecuado para el proceso de pulido, donde es fundamental mantener una presión estable y controlada.

Finalmente, se propuso utilizar un sistema neumático combinado con elementos mecánicos para comandar todos los accionamientos del subconjunto.

El funcionamiento del sistema neumático propuesto consiste en precargar los actuadores lineales con unas válvulas con obus ubicadas en un soporte independiente del cabezal, que dejan pasar el aire en un solo sentido cuando el cabezal se encuentra en posición de iniciar el trabajo (cuando las muestras ya están colocadas en el portamuestras y apoyadas en el plato de pulido). Una vez precargados los actuadores que ya están ejerciendo presión sobre las muestras, el soporte que contiene las válvulas y mangueras de aire se desacopla de los mismos desplazándose hacia arriba gracias a un mecanismo de tijeras accionado por un actuador neumático y un cable de acero. De esta manera, el cabezal queda liberado para rotar aplicando la fuerza precargada sobre las muestras, mientras que las válvulas y mangueras de aire quedan estáticas fijas al brazo estructural.

Esta parte del prediseño fue una de las últimas en proponerse y requiere un análisis más detallado que involucre el sistema de control de dichos actuadores y la selección y ubicación de los accesorios neumáticos adecuados para la aplicación.



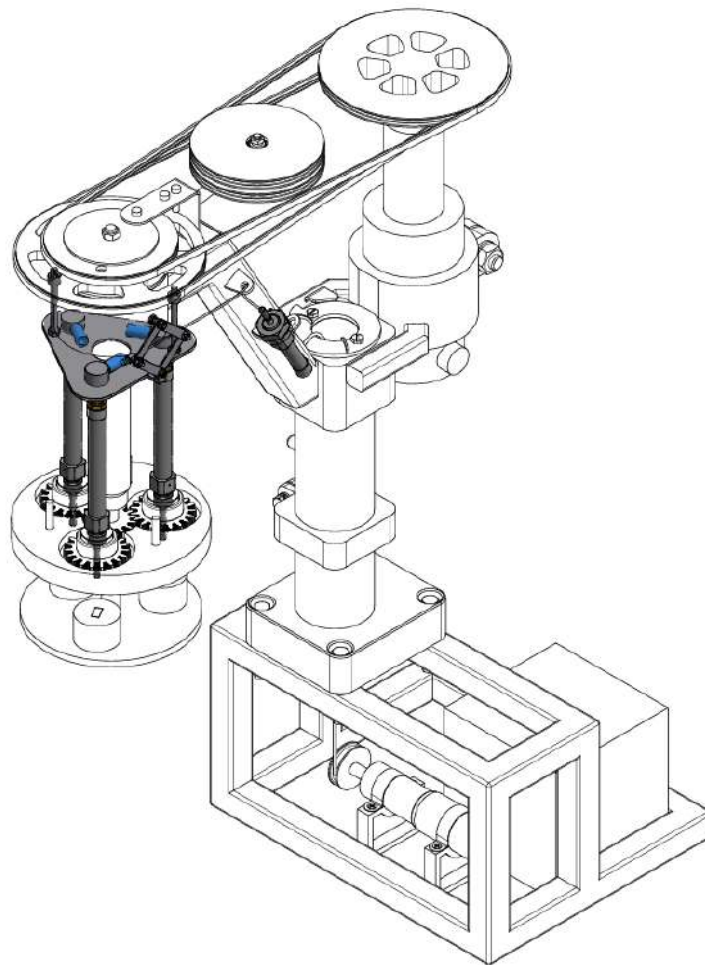


Fig. 110 - Sistema de aplicación de fuerza

7.4.1 Selección de actuador para aplicación de la fuerza individual a las muestras

Se tiene como punto de partida de la Tabla 3 que la fuerza individual a aplicar sobre cada muestra abarque un rango entre 5 N y 50 N. Como se determinó en los capítulos anteriores, no se trabajará con más de tres muestras en simultáneo, por lo tanto, la fuerza máxima que se aplicaría al conjunto sería de 150 N repartida en tres muestras.

El espacio disponible en el cabezal para ubicar cada actuador es un factor clave para su selección. La unión al cabezal será mediante una rosca hembra mecanizada en el engranaje interno encargado del giro individual. El movimiento que debe realizar el actuador es netamente lineal, ya que se posiciona alineado a cada muestra.

El fabricante de mayor prestigio en componentes neumáticos del país es FESTO, que cuenta con un amplio catálogo digital y un sistema de selección de producto accesible para cualquier aplicación que se desee.



Fig. 111 - Actuador neumático lineal marca FESTO modelo ESNU

En los catálogos de la página de FESTO se busca un actuador cilíndrico con vástago (Fig. 111), con un amplio recorrido para que pueda atravesar los componentes del sistema de rotación individual de cada muestra y llegar a aplicar la fuerza independientemente del alto de la muestra (Fig. 112), del menor tamaño posible, de carga superior y que entregue una fuerza máxima de 50 N. Se seleccionó el modelo ESNU 10-50-P-A-MA que cumple con todos los requisitos. Para mayor información acerca del actuador se puede consultar la página web del fabricante, citada en la bibliografía (Festo Inc., 2025).

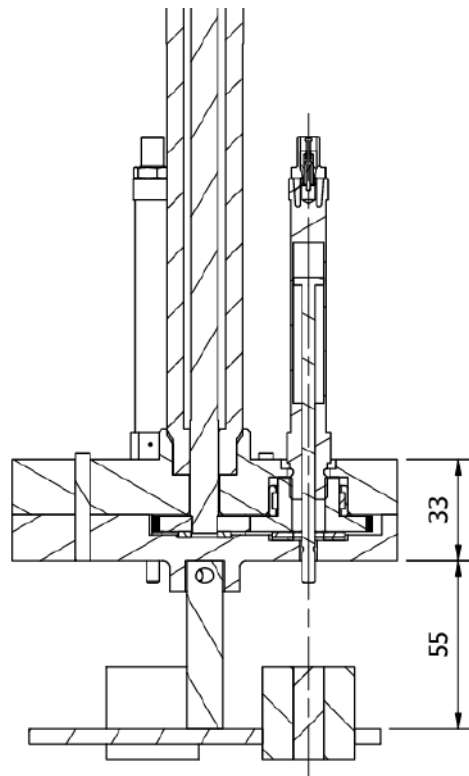


Fig. 112 - Posicionamiento de actuador sobre la muestra y distancias de recorrido necesarias

7.4.2 Sistema de precarga neumática

El principal desafío en el diseño del sistema de aplicación de fuerza individual sobre las muestras consistió en encontrar una configuración —o componentes comerciales adecuados— que permitieran aplicar una fuerza constante sobre cada muestra, considerando que estas giran simultáneamente sobre su propio eje y junto con el cabezal portamuestras. En este contexto, los actuadores involucrados debían ser capaces de transmitir la fuerza de manera continua, a la vez que permitieran el libre giro del conjunto sin generar restricciones en el movimiento.

Para el ingreso de aire al actuador, inicialmente se pensó en un sistema que pudiera rotar junto con los actuadores y el cabezal para que se mantenga una presión constante en la muestra en todo el período de trabajo. Esta opción se analizó y se descartó, dado que involucraba componentes de difícil adquisición que complejizaban el diseño. Se propuso una opción más simple, que involucre componentes mecánicos para lograr precargar el actuador neumático seleccionado anteriormente y luego liberarlo para que pueda rotar con el conjunto cabezal y a la vez sobre sí mismo, guiado por el sistema de engranajes planetarios visto en los capítulos anteriores.

En la Fig. 113 se observan los distintos elementos que componen el sistema propuesto en este proyecto. Se emplea una placa porta válvulas de geometría triangular, equipada con tres picos infladores neumáticos, y un mecanismo de accionamiento vertical basado en una tijera articulada.

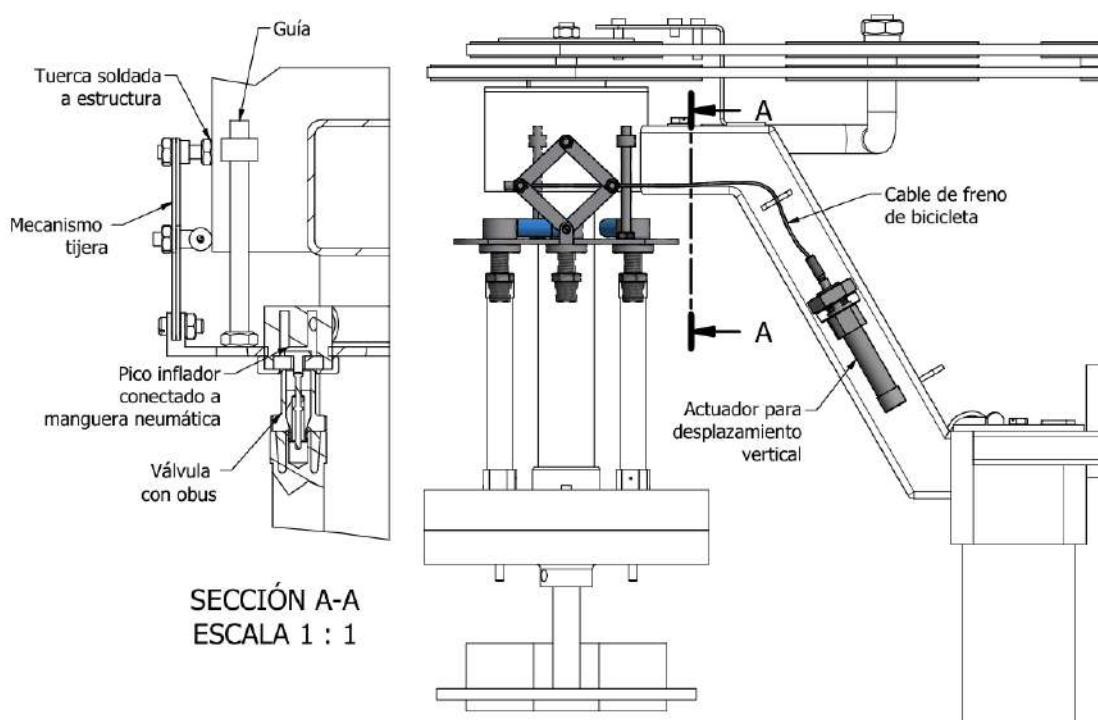


Fig. 113 - Sistema de precarga de actuadores para aplicación de fuerza individual de la muestra

La placa triangular integra tres picos infladores (Fig. 114), cada uno conectado a una manguera neumática mediante un acople lateral. Cada pico inflador incorpora un casquillo móvil, un sello de goma y una tapa de asiento, conformando una válvula normalmente cerrada. Mientras el casquillo se encuentra en reposo, la presión interna de la línea neumática lo mantiene apoyado contra el sello, impidiendo el paso de aire.

Cuando la placa desciende, cada uno de los picos entra en contacto directo con la válvula tipo obús (Fig. 115) ubicada en la parte superior de cada actuador neumático lineal del cabezal. Al presionar el obús, el casquillo del pico inflador se desplaza hacia arriba, separándose del sello e inmediatamente habilitando el paso de aire comprimido hacia el actuador correspondiente.

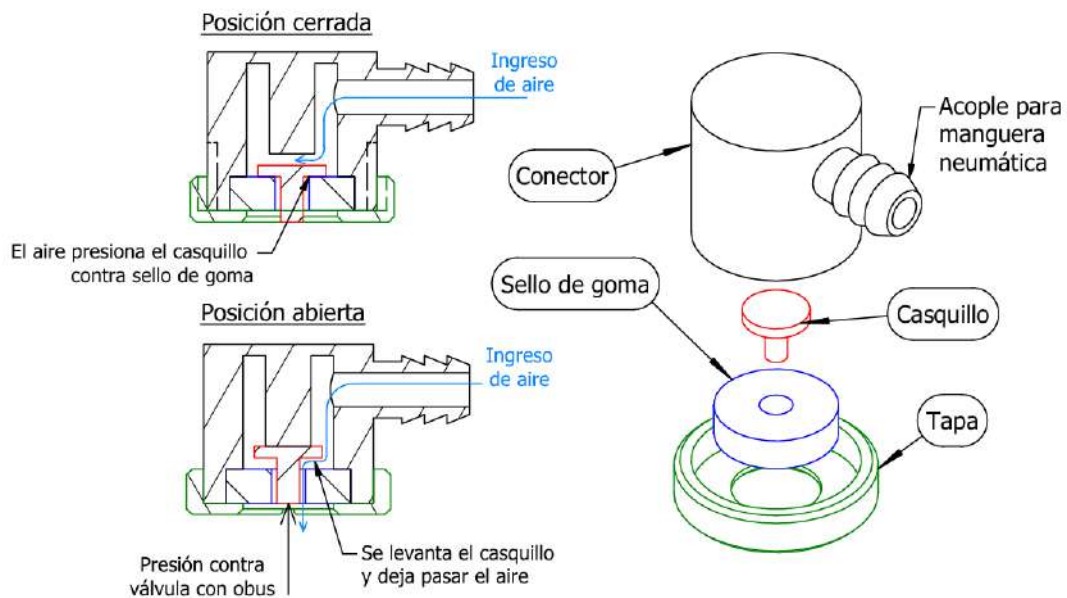


Fig. 114 - Detalle de pico inflador



Fig. 115 – Válvula con obús

El movimiento vertical de la placa se logra mediante un mecanismo tipo tijera configurado como un paralelogramo articulado, el cual guía a la placa en un recorrido estrictamente lineal. El accionamiento se realiza a través de un cilindro neumático auxiliar montado lateralmente en



el brazo estructural. El cilindro transmite el movimiento por medio de un cable de accionamiento tipo freno de bicicleta (Fig. 116), el cual empuja un conjunto de topes integrados en la tijera. De esta manera, la tijera se comprime y provoca el descenso de la placa porta válvulas.



Fig. 116 - Cable de freno de bicicleta

Una vez retirada la acción del cilindro, el mecanismo se extiende automáticamente, recuperando la posición elevada del plato, ya sea mediante la propia geometría del sistema o mediante elementos elásticos incorporados.

Por último, cabe destacar que se requiere un control de posición angular preciso en el cabezal luego de su detención para que los picos infladores del sistema de precarga queden perfectamente alineados con los actuadores lineales del cabezal. Este punto excede el alcance de este proyecto, pero puede ampliarse en trabajos futuros.





8 Conclusiones

En función de los objetivos planteados y del desarrollo realizado, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

- Se analizaron las distintas etapas, parámetros, métodos de preparación y defectos del proceso de pulido y se identificaron las variables fundamentales —velocidad, fuerza de contacto y tiempo— como aquellas que deben controlarse para garantizar resultados repetitivos. Se estableció una velocidad máxima de rotación del cabezal portamuestras de 150 rpm y una fuerza de contacto de 10–50 N por muestra, destacando la necesidad de mantener una presión uniforme sobre la probeta y evitar o absorber posibles vibraciones del sistema.
- Se realizó un análisis cinemático del proceso de pulido cuando se utiliza un cabezal portamuestras, obteniendo la ecuación de movimiento de la trayectoria de la muestra y determinando patrones de desplazamiento sobre el paño. Se concluyó que deben evitarse relaciones de velocidad plato–cabezal que sean múltiplos entre sí, ya que generan desgaste localizado. Un análisis dinámico de desalineación del plato de pulido mostró además que solo una desviación extrema (≈ 10 mm) podría ocasionar el desprendimiento de la muestra del plato, por lo que los efectos de desalineaciones típicas pueden considerarse despreciables frente a la presión aplicada.
- Se evaluaron distintas configuraciones de brazos manipuladores, concluyendo que la estructura cilíndrica fue la más adecuada para utilizar en este proyecto por su simplicidad, robustez y facilidad de integración con las pulidoras del INTEMA.
- Se obtuvo un prediseño que cumple con las características requeridas, contempla las necesidades y capacidades de fabricación y ensamblaje de los talleres de la facultad.
- Se seleccionaron un conjunto de actuadores, mecanismos y transmisiones, que combinando elementos mecánicos, eléctricos y neumáticos permiten generar los distintos movimientos principales del cabezal portamuestras. Un proceso de diseño iterativo permitió descartar opciones más complejas o costosas sin comprometer funcionalidad.
- Se desarrolló un modelo virtual integral en un software de diseño, mediante el cual se validó la adaptabilidad del brazo a las distintas pulidoras del INTEMA, se realizó el dimensionamiento de los distintos componentes y se verificaron a grandes rasgos interferencias y despejes entre los mismos. El modelo permitió visualizar el prototipo con claridad y generar esquemas explicativos que facilitan la comprensión del prediseño presentado en el trabajo.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el prediseño desarrollado constituye una solución técnicamente factible y adaptable a los equipos existentes, capaz de mejorar la repetibilidad y estandarización del proceso de pulido en los laboratorios del INTEMA. El trabajo sienta además las bases para etapas futuras de optimización, fabricación y validación experimental del prototipo propuesto.





9 Trabajos futuros

A partir del prediseño desarrollado, se identifican diversas líneas de trabajo que permitirían avanzar hacia la construcción de un prototipo funcional.

- **Verificación estructural detallada.**

Aunque los componentes se seleccionaron con criterios conservadores, resulta conveniente realizar una verificación mecánica sobre los elementos más exigidos —eje hueco, brazo, columna y base— para optimizar espesores y geometrías. En particular, podría verificarse la columna a compresión y flexión, considerando que la sección adoptada probablemente se encuentre sobredimensionada.

- **Optimización mecánica de componentes.**

Se propone completar el cálculo y dimensionamiento de engranajes, ejes y rodamientos, a fin de ajustar los elementos comerciales y evitar sobredimensionamientos innecesarios. Esto incluye revisar tolerancias, modos de falla y factores de seguridad adecuados para la operación continua.

- **Diseño de protección y mejoras estéticas.**

Incorporar carcasas para el cabezal y la base que brinden protección frente a líquidos y abrasivos, además de mejorar la apariencia general del equipo. También se sugiere integrar apoyos o patas con tacos antivibratorios o sistemas de fijación que aseguren estabilidad sobre la mesa de trabajo.

- **Planos e ingeniería de detalle.**

Elaborar los planos de fabricación del brazo, sus subconjuntos y componentes individuales, contemplando cotas, ajustes, materiales y especificaciones de montaje.

- **Automatización y control.**

Desarrollar el sistema eléctrico y neumático definitivo, incluyendo la selección de sensores, electroválvulas, controladores de velocidad y lógica de operación. Esta etapa permitirá garantizar una regulación precisa de cargas, velocidades y secuencias de trabajo.

- **Estimación de costos y análisis de factibilidad.**

Realizar un presupuesto preliminar del prototipo, integrando costos de materiales, mecanizado, actuadores, electrónica y montaje. Este análisis permitirá evaluar la factibilidad económica del desarrollo y su posterior fabricación.

En conjunto, estos trabajos futuros permitirán transformar el prediseño de este trabajo final, concebido como una solución preliminar y abierta a modificaciones, en un prototipo completamente definido, optimizado y listo para su fabricación, validación y eventual implementación en los laboratorios del INTEMA.





Referencias bibliográficas

Buehler. (2023). Obtenido de <https://www.buehler.com/>

Circusplay Motores. (s.f.). Obtenido de <https://shre.ink/Circusplay>

Metkon. (2023). Obtenido de <https://www.metkon.com/es/>

Niku, S. B. (2020). *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*.

Optibelt. (s.f.). *Technical Manual - Ribbed belt drives*. Germany. Obtenido de www.optibelt.com

QATM. (2023). Obtenido de <https://www.qatm.es/es/productos/lijado-pulido-ataque-quimico/>

SKF. (s.f.). Obtenido de <https://www.skf.com/ar/products/rolling-bearings>

Struers. (2023). Obtenido de <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge>

