

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño del sistema de trituración de una máquina para procesar vidrio laminado en
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Daniel Andrés Díaz Colindres para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

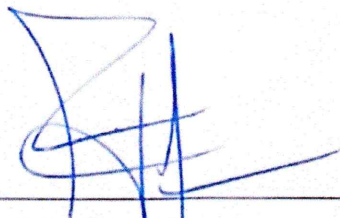


Diseño del sistema de trituración de una máquina para procesar vidrio laminado en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Daniel Andrés Díaz Colindres para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

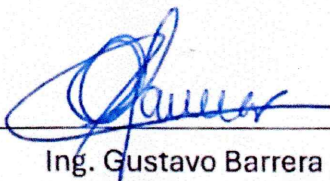
Guatemala,
2025

Asesor



Ing. Rony Herrarte

Vo.Bo. Director



Ing. Gustavo Barrera
Ingeniería Mecánica

Fecha de presentación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025.

Prefacio

Este trabajo surge del deseo por aportar una solución técnica y sostenible al desperdicio de vidrio laminado en Guatemala. Durante mis años de estudios, en ingeniería mecánica en la Universidad del Valle de Guatemala, pude observar que, a pesar de los avances en el reciclaje de materiales, el vidrio laminado continúa representando un desafío debido a su composición mixta de capas de vidrio y polímero, tanto en Guatemala como a nivel mundial.

El proyecto que se presenta fue el resultado de meses de investigación, diseño y experimentación en laboratorio. Su desarrollo implicó no solo la aplicación de conocimientos técnicos, sino también trabajo en equipo, creatividad y resiliencia frente a los constantes ajustes de diseño y las dificultades encontradas durante las pruebas iniciales.

Agradezco profundamente al Departamento de Ingeniería Mecánica por el apoyo técnico y el acceso a los laboratorios de máquinas-herramientas. Todas las personas del departamento mostraron siempre una excelente disposición; sin sus conocimientos, recomendaciones y orientación, no habría sido posible alcanzar el nivel de calidad que caracteriza este trabajo. Extiendo también mi gratitud a mis compañeros de grupo, quienes con compromiso y dedicación lograron trabajar en sinergia, desarrollando por completo el sistema estructural, la transmisión de potencia y el sistema eléctrico de la máquina.

Este trabajo representa un esfuerzo por combinar ingeniería, sostenibilidad y compromiso ambiental. Espero que sirva como base para futuros desarrollos enfocados en la reutilización de materiales compuestos dentro de la industria guatemalteca.

Prefacio	V
Lista de figuras	IX
Listado de cuadros	X
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general.....	6
4.2. Objetivos específicos.....	6
5. Identificación de requisitos	7
5.1. Entrevista con experto del sector ambiental	7
5.2. Cotización de materiales metálicos con proveedor.....	8
5.3. Entrevista técnica con proveedor de tratamientos térmicos	8
5.4. Resultados generales de la identificación	8
6. Revisión del estado del arte	9
6.1. Circularidad del vidrio	9
6.2. Tecnologías para reciclar vidrio laminado	9
6.3. Tecnologías de caracterización de <i>interlayers</i> en vidrio laminado	10
6.4. Selección del sistema de trituración	10
6.5. Innovaciones en diseño y análisis de fuerzas para equipos de trituración.....	11
6.6. Aplicaciones de modelos de simulación en el diseño de trituradoras de vidrio laminado	11

6.7. Innovaciones en tecnología de reciclaje de vidrio laminado.....	12
6.8. Optimización del reciclaje de vidrio a través de tecnología avanzada de trituración	12
6.9. Desafíos operativos y tendencias en el mercado de trituradoras	13
6.10. Avances en trituradoras de rodillo excéntrico para el reciclaje de vidrio	13
6.11. Innovación en trituradoras de rodillos dobles para el reciclaje de vidrio	14
6.12. Desarrollo de nuevos grados de rodillos de acero de alta velocidad (HSS) para mejorar la trituración de materiales duros	14
6.13. Aplicación de tecnología de reciclaje de polvos de pulido en la trituración de vidrio laminado	14
6.14. Contribución de la patente JP2018001234A al diseño de la trituradora de vidrio laminado	15
6.15. Contribución de la patente CN107639767B al diseño de la trituradora de vidrio laminado	15
7. Metodología	16
7.1. Descripción general de la metodología	16
7.2. Requisitos.....	17
7.3. Selección de materiales	18
7.4. Cálculos de diseño y fundamentos teóricos de los rodillos.....	20
7.5. Selección de rodamientos y chumaceras.....	29
7.5.1. Cálculo de la vida básica del rodamiento individual	29
7.5.2. Ajuste por régimen de trabajo intermitente.....	30
7.5.3. Ajuste por nivel de confianza al 95%.....	31
7.5.4. Análisis de sistema rodillo – 2 rodamientos	31
7.5.5. Análisis de sistema completo 2 rodillos – 4 rodamientos.....	31
7.6. Selección y verificación del sistema de resortes de compresión	32
7.7. Diseño del prototipo.....	36
7.8. Fabricación del prototipo.....	37
8. Resultados	42
8.1. Cuadro de cumplimiento de requisitos	42
8.2. Resultados de los rodillos de trituración (funcionalidad y dimensionamiento)	43
8.3. Resultados del sistema de compresión.....	47
8.4. Resultados de vida de rodamientos	48
8.5. Resultados del prototipo.....	49
9. Análisis de resultados	51
9.1. Discusión sobre requisitos del sistema de trituración	51
9.2. Discusión sobre requisitos de diseño y maquinabilidad	52
9.3. Discusión sobre requisitos operativos	53
9.4. Discusión sobre requisitos de mantenimiento	53
9.5. Discusión sobre requisitos de fabricación y materiales	54
10. Conclusiones	55
11. Recomendaciones	57
12. Referencias	58

13. Anexos	60
13.1. Planos de construcción.....	60
13.2. Planos de construcción (prototipo).....	66
13.3. Protocolo de pruebas.....	72
14. Glosario	85

Lista de figuras

1.	Geometría de los dientes	20
2.	Diagrama de fuerza cortante para rodillo inferior.....	22
3.	Diagrama de momento flector para rodillo inferior	22
4.	Variación de potencia según tamaño de partícula	25
5.	Vista frontal de rodillo superior	27
6.	Vista frontal de rodillo inferior	28
7.	Vista frontal de ambos rodillos (superior e inferior)	28
8.	Vista isométrica del resorte LHP 437U 04S	33
9.	Vista isométrica del resorte LHL 2000D 01	33
10.	Vista isométrica de barra roscada 1” – 8 UNC.....	35
11.	Vista isométrica de platina.....	35
12.	Configuración de rodillos (prototipo).....	37
13.	Diseño del prototipo del sistema de trituración completo.....	37
14.	Montaje de barra circular en torno CNC Haas TL-1.....	38
15.	Proceso de soldadura en estructura metálica	39
16.	Corte de platina hecho con segueta	40
17.	Maquinado de la platina con fresadora vertical	40
18.	Resultado de la elaboración del prototipo funcional	41
19.	Medición del peso del vidrio antes de ser triturado.....	43
20.	Medición del <i>cullet</i> desprendido de la película de PVB.....	43
21.	Estado de la película de PVB después de la trituración.....	44
22.	<i>Cullet</i> obtenido	44
23.	Vista frontal y lateral del sistema de trituración.....	45
24.	Geometría final de los dientes.....	46
25.	Prototipo funcional	50

Lista de cuadros

1.	Identificación de códigos	17
2.	Requisitos.....	18
3.	Propiedades del acero Böhler K110	18
4.	Propiedades del acero 1045.....	19
5.	Propiedades del acero 1018.....	19
6.	Propiedades del vidrio laminado	19
7.	Propiedades de chumaceras SKF UCP 208-24.....	19
8.	Dimensiones finales de los rodillos de trituración.....	27
9.	Resumen de resultados.....	32
10.	Cumplimiento de requisitos	42
11.	Propiedades de los rodillos de trituración.....	45
12.	Valores de la geometría final de los dientes	46
13.	Propiedades de resorte LHP 437U 04S	47
14.	Propiedades de resorte LHL 2000D 01	47
15.	Resumen de vida de los rodamientos	48
16.	Costos de fabricación del prototipo.....	49

Resumen

Este trabajo de graduación tuvo como objetivo el diseño y la validación de un sistema de trituración de una trituradora de rodillos para vidrio laminado, capaz de transformar láminas de $0.75 \text{ m} \times 1.00 \text{ m} \times 10 \text{ mm}$ en partículas reciclables (*cullet*) de aproximadamente $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$.

Se desarrolló un modelo mecánico de trituración basado en dos rodillos dentados con un sistema de resortes de compresión ajustables, diseñado para mantener una presión constante entre los ejes y facilitar la fractura controlada del vidrio. Este sistema permite trabajar con diferentes espesores de vidrio laminado, desde 5 mm hasta 10 mm, enfocado en el procesamiento de vidrio laminado arquitectónico.

Para el diseño de los rodillos, se aplicó la metodología de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, mientras que la selección y el cálculo de la vida útil de los rodamientos se realizaron con base en el catálogo del fabricante SKF, con lo que se obtuvo un diseño que resiste sin fallas hasta una carga distribuida de 33,373 N/m por rodillo. Se desarrollaron dos sistemas de trituración: uno final, correspondiente a la máquina completa, y un prototipo a escala reducida con el propósito de validar la funcionalidad del diseño. Este prototipo fue construido con una estructura de acero estructural $3" \times 3" \times 3/16"$ y rodillos de acero AISI 1045, lo que se verificó mediante un análisis para ver que cumpliera con los factores de seguridad establecidos según el criterio de Ullman. El prototipo tuvo como finalidad comprobar que los rodillos fueran capaces de triturar el vidrio laminado y alcanzar el tamaño de partícula deseado.

Las pruebas experimentales demostraron una eficiencia de trituración del 55 %, con lo que se obtuvieron partículas de tamaño uniforme de $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, sin desprendimiento excesivo del polímero intermedio (PVB). Los resultados confirman que el diseño propuesto es técnica y económicamente viable para pequeñas y medianas empresas recicladoras en Guatemala, lo que ofrece una alternativa local, eficiente y sostenible para el aprovechamiento del vidrio laminado.

Palabras clave: vidrio laminado, reciclaje de vidrio, separación vidrio-PVB, trituración mecánica, sistema de trituración de rodillos.

Abstract

This graduation project aimed to design and validate a crushing system based on a roller crusher for laminated glass, capable of transforming sheets measuring $0.75\text{ m} \times 1.00\text{ m} \times 10\text{ mm}$ into recyclable particles (cullet) of approximately $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$.

A mechanical crushing model was developed using two toothed rollers with an adjustable compression spring system, designed to maintain constant pressure between the shafts and enable controlled fracture of the glass. This system allows processing of different laminated glass thicknesses, ranging from 5 mm to 10 mm, with a focus on architectural laminated glass.

For the roller design, Shigley's Mechanical Engineering Design methodology was applied, while bearing selection and life calculations were based on the SKF manufacturer catalog. The resulting design can withstand a distributed load of up to 33,373 N/m per roller without failure. Two crushing systems were developed: a final system corresponding to the complete machine, and a scaled prototype intended to validate the design's functionality. The prototype was constructed using a $3'' \times 3'' \times 3/16''$ structural steel frame and AISI 1045 steel rollers, which were verified through analysis to meet safety factors according to Ullman's criteria. The prototype's purpose was to confirm that the rollers could effectively crush laminated glass and achieve the desired particle size.

Experimental tests demonstrated a crushing efficiency of 55%, producing uniform particles of approximately $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, without excessive detachment of the interlayer polymer (PVB). The results confirm that the proposed design is technically and economically viable for small and medium-sized recycling companies in Guatemala, offering a local, efficient, and sustainable alternative for laminated glass recycling.

Keywords: laminated glass, glass recycling, glass-PVB separation, mechanical crushing, roll crushing system.

El reciclaje del vidrio laminado representa un desafío para la industria de materiales debido a su estructura compuesta por capas de vidrio unidas mediante películas de polímero, principalmente polivinil butiral (PVB). Este tipo de vidrio, utilizado en parabrisas y fachadas arquitectónicas, pierde gran parte de su valor reciclable al no poder separar sus componentes. Como resultado, diversos estudios científicos han demostrado que, a nivel mundial, toneladas de vidrio laminado terminan en vertederos, lo que contribuye a la acumulación de residuos sólidos no degradables.

Ante esta problemática, este trabajo plantea el diseño de los rodillos y sus componentes para un sistema de trituración destinado al procesamiento de vidrio laminado, así como la construcción de un prototipo funcional que permita validar la efectividad del sistema. El objetivo es producir *cullet* apto para su reutilización industrial, promoviendo así una alternativa técnica y sostenible al manejo de este tipo de desechos.

Para alcanzar este propósito, se abordó el problema desde un enfoque mecánico y experimental, que inició con el estudio de las propiedades del material, la caracterización del esfuerzo de fractura del vidrio y el diseño del sistema de rodillos.

El desarrollo del proyecto se estructuró en tres fases:

- Diseño conceptual y análisis estructural del sistema, empleando software CAD (Autodesk Inventor) y metodologías de diseño basadas en el libro *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.
- Fabricación y ensamble del prototipo utilizando componentes disponibles en el mercado guatemalteco para optimizar costos y adaptar el proyecto a la realidad industrial del país.
- Validación experimental mediante pruebas de trituración controladas que evaluaron la eficiencia, la uniformidad del tamaño de partícula y el comportamiento estructural bajo carga.

El proyecto no solo busca una solución técnica, sino también un aporte ambiental y económico, para fomentar la reutilización de materiales difíciles de reciclar. Los resultados permitieron concluir que la propuesta puede adaptarse a diferentes escalas productivas y abre el camino hacia desarrollos orientados a la automatización del proceso y la separación del polímero PVB.

Antecedentes

El aprovechamiento eficiente de los recursos naturales constituye un eje fundamental para la sostenibilidad ambiental y el desarrollo responsable. En este contexto, la reutilización y el reciclaje representan estrategias esenciales para la preservación de los recursos que la naturaleza ofrece. La Universidad del Valle de Guatemala (UVG), consciente de esta responsabilidad, ha promovido la formación de ingenieros con una visión ambientalmente comprometida. Esta orientación se refleja en numerosos trabajos de graduación orientados al diseño de tecnologías para el aprovechamiento de residuos sólidos y materiales reciclables.

En el trabajo de Uribe et al. (2018) se desarrolló el diseño y manufactura de una trituradora de vidrio destinada a un centro de acopio en Sololá, Guatemala. El sistema, basado en un mecanismo de martillos, logró procesar 222 lb/h de vidrio, alcanzando un 83 % de partículas dentro del tamaño mínimo requerido (2 pulgadas). El proyecto demostró la factibilidad técnica de fabricar localmente un equipo funcional con un costo total de Q8,545.51. Estos resultados representan una alternativa viable para pequeños centros de reciclaje.

Posteriormente, Jo (2021) propuso el diseño del sistema eléctrico y del módulo de desetiquetado para un equipo de reciclaje de envases de vidrio destinado a la empresa VICAL (Vidriera Centroamericana). Este trabajo abordó la problemática de la contaminación provocada por adhesivos y etiquetas durante el proceso de reciclaje. Para ello, desarrolló un sistema capaz de remover dichos contaminantes de forma automatizada. El costo de implementación reportado fue de Q1,740.20. Por lo que la propuesta constituyó una solución económica y aplicable a entornos industriales.

Por su parte, Lima (2022) diseñó y fabricó un prototipo de triturador de desechos domésticos para compostaje, con el propósito de valorizar residuos orgánicos mediante un proceso de reducción de tamaño. Aunque el material procesado difiere del vidrio, el principio de diseño comparte el objetivo de transformar residuos en materia útil. El sistema, compuesto por doble eje y cuchillas impresas en 3D, alcanzó una eficiencia del 65 % y produjo partículas de entre 3 y 5 cm, con un costo de Q827.44. Estos resultados demostraron la aplicabilidad de la manufactura aditiva en proyectos sostenibles.

De manera complementaria, García (2022) desarrolló el diseño de una máquina trituradora

de neumáticos, enfocada en el procesamiento de piezas de hasta 70 kg mediante un sistema de doble eje con cuchillas de doble filo. El equipo generó residuos en forma de fibras rectangulares con áreas comprendidas entre 150 y 350 cm². Este proyecto incluyó el diseño del módulo de potencia y de transmisión. El costo total de materiales fue de Q114,529.54 en materiales. Su aporte radicó en la aplicación de principios de ingeniería mecánica para el reciclaje de materiales derivados del petróleo.

En la línea de los polímeros, Chinchilla (2023) desarrolló un sistema de trituración para plástico de alta densidad (HDPE), con una capacidad de 150 kg/h. El diseño incluyó un sistema de doble eje con cuchillas fijas y móviles, fabricadas en acero D2 por sus propiedades mecánicas y resistencia al desgaste. El costo total ascendió a Q66,663.00, superando el presupuesto inicial de Q31,200.00 debido al alto precio de los materiales requeridos para cumplir con las especificaciones de diseño.

Finalmente, Echeverría (2024) presentó el diseño y construcción de una desetiquetadora para botellas de polietileno tereftalato (PET), orientada a mejorar los procesos de reciclaje de envases plásticos. El sistema, basado en un rotor de cuchillas fabricadas en acero AISI D2, logró procesar un flujo de 150 kg/h, con un costo total de Q129,827.44, incluidos los gastos de mano de obra. Este proyecto constituye uno de los desarrollos más recientes dentro de la universidad relacionados con el reciclaje de plásticos y la optimización de líneas de recuperación de materiales.

En conjunto, los trabajos mencionados evidencian el compromiso institucional y académico de la Universidad del Valle de Guatemala con la investigación aplicada al reciclaje y la sostenibilidad. El presente proyecto se inscribe dentro de esa misma línea, contribuyendo al desarrollo de tecnologías locales mediante el diseño y validación de un sistema de trituración mecánica para vidrio laminado, un material con gran potencial de reutilización, pero cuya gestión sigue siendo limitada en el contexto guatemalteco.

Justificación

Existen varios tipos de vidrio que pueden ser reciclados prácticamente sin restricciones; sin embargo, el vidrio laminado requiere procesos adicionales para su reciclaje. El vidrio laminado tiene potencial para ser un elemento valioso de la cadena de valor del reciclaje del vidrio; sin embargo, su aprovechamiento requiere separar el vidrio de la lámina polimérica que lo compone (National Glass Association y Glass Association of North America, 2021). Tras la investigación, se identificó que en Guatemala existen empresas como Grupo VICAL que se dedican al reciclaje de vidrio. No obstante, su operación se enfoca exclusivamente en vidrio blanco, verde y ámbar de uso alimenticio. No se encontró evidencia de reciclaje de vidrio laminado en el país. Según Moeyersons (2023), el reciclaje de vidrio laminado es una industria en crecimiento y de gran relevancia debido a la escasez de materias primas vírgenes.

Un problema derivado de la falta de reciclaje de vidrio laminado en Guatemala es que este material se convierte en un residuo sólido que ocupa una cantidad significativa de espacio y no puede ser reutilizado en otras aplicaciones. Esto genera un desafío para los vertederos municipales, que deben manejar un volumen considerable de desechos sin una solución sostenible para su disposición. Esta situación no solo desaprovecha un nicho de mercado que podría generar beneficios económicos, sino que también impide un impacto social positivo al contribuir al reciclaje y al cuidado del medio ambiente.

Se espera desarrollar una solución que cumpla con todas las especificaciones de diseño y permita reciclar el vidrio laminado de manera efectiva y sostenible. Además, el proyecto no solo resuelva el problema inmediato de la disposición del vidrio, sino que también contribuya al avance del conocimiento en el campo del diseño y la manufactura de máquinas trituradoras. A largo plazo, este proyecto podría establecer nuevas pautas para el reciclaje de vidrio laminado en Guatemala y fomentar una industria más responsable y ecológica.

4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de trituración para vidrio lamiado capaz de procesar planchas de hasta 0.750 m x 1 m x 0.01 m con una capacidad de trituración de 65 kg/h.

4.2. Objetivos específicos

- Implementar los requisitos técnicos y de seguridad necesarios para la máquina trituradora de vidrio laminado.
- Establecer las dimensiones del sistema de trituración para que esta pueda ser instalada en un área de 10 metros x 3 metros.
- Diseñar el mecanismo de trituración para que este sea capaz de procesar 65 kg/h de vidrio laminado.
- Seleccionar los materiales necesarios en base a los cálculos del diseño disponibles en el mercado de Guatemala.
- Realizar pruebas en el prototipo para evaluar su desempeño en la trituración de vidrio laminado.
- Documentar el proceso de diseño, fabricación y prototipado para analizar los resultados y verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño.

Identificación de requisitos

La identificación de los requisitos del sistema de trituración incluyó la recopilación de información en campo, entrevistas con expertos y consultas técnicas con proveedores nacionales. El objetivo de este proceso fue obtener datos reales y verificables que permitieran establecer parámetros de diseño válidos para el desarrollo de una trituradora de vidrio laminado.

5.1 Entrevista con experto del sector ambiental

El 8 de agosto de 2024 se llevó a cabo una entrevista con el licenciado Jonathan Zepeda, representante de la organización Save The World Guatemala, mediante videoconferencia. El propósito de esta entrevista fue comprender las necesidades reales del reciclaje de vidrio laminado en Guatemala y los requisitos técnicos que una máquina trituradora debe cumplir para ser funcional en ese contexto.

Durante la conversación, el entrevistado indicó que el vidrio laminado representa un desafío importante debido a la presencia de la película intermedia, la cual impide su procesamiento convencional. Zepeda señaló la necesidad de desarrollar una máquina capaz de separar mecánicamente el vidrio y el PVB, como alternativa sostenible y de bajo costo. Asimismo, recomendó que la máquina fuera capaz de procesar planchas de vidrio de hasta $0.75 \text{ m} \times 1, \text{ m}$ con espesores comprendidos entre 5 mm y 10 mm, formatos comunes en el sector de la construcción y la arquitectura. Finalmente, el experto indicó que el *cullet* (vidrio triturado) debía tener dimensiones promedio de $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ para facilitar su reutilización.

Estas observaciones fueron fundamentales para definir los requisitos técnicos iniciales del proyecto, especialmente en lo relativo a las dimensiones de trabajo, el tipo de material y la calidad del producto final.

5.2 Cotización de materiales metálicos con proveedor

Para determinar la disponibilidad local de materiales adecuados para la fabricación de los rodillos, se realizó una cotización telefónica con el proveedor Proventsa S.A., empresa nacional dedicada a la comercialización de aceros e insumos industriales. Durante la llamada, se consultaron precios y disponibilidad de barras redondas de distintos materiales, entre ellos aluminio AL6061, acero AISI 1045, acero 705 y acero AISI D2. A partir de esta cotización se identificó que el acero D2 (equivalente al Böhler K110) se encuentra disponible localmente y presenta propiedades mecánicas adecuadas para resistir el desgaste y la abrasión generados durante la trituración del vidrio laminado. Esta información fue esencial para delimitar los materiales de diseño, según la viabilidad técnica como la accesibilidad económica del entorno guatemalteco.

5.3 Entrevista técnica con proveedor de tratamientos térmicos

Finalmente, se llevó a cabo una entrevista telefónica con un representante técnico de la empresa Austenit, dedicada a la prestación de servicios de tratamientos térmicos para aceros industriales. El propósito fue determinar las limitaciones dimensionales y las condiciones de procesamiento térmico aplicables a los rodillos del sistema de trituración. Durante la conversación, el proveedor explicó que, aunque el diámetro de los rodillos no representa una restricción significativa para los hornos de la empresa, la longitud sí constituye un factor limitante. Específicamente, mencionó que los hornos disponibles permiten el tratamiento de piezas de hasta 1 m de longitud, por lo que los rodillos diseñados debían mantenerse dentro de ese rango. Esta observación se incorporó como requisito de diseño crítico, ya que un exceso en la longitud del componente impediría realizar el tratamiento térmico y reducir la vida útil de la superficie de trabajo debido a la abrasión del vidrio.

5.4 Resultados generales de la identificación

Las actividades descritas permitieron consolidar los requisitos técnicos iniciales del proyecto de trituración de vidrio laminado, los cuales sirvieron como base para el desarrollo del diseño conceptual y la fase de análisis estructural. Entre los hallazgos más relevantes se destacan:

- El rango de dimensiones de vidrio a procesar (0.75×1 m, 5 – 10 mm de espesor).
- La granulometría objetivo del *cullet* (2 cm \times 2 cm).
- La disponibilidad del acero AISI D2 (Böhler K110).
- La limitación dimensional de 1 m de longitud máxima para los rodillos, impuesta por la capacidad de los hornos de temple nacionales.

En conjunto, estas fuentes de información garantizan que los requisitos del sistema de trituración estén alineados con las condiciones reales del entorno industrial guatemalteco.

6.1. Circularidad del vidrio

El vidrio, aunque es 100 % reciclable en teoría, presenta varios desafíos en su reciclaje en la práctica, particularmente cuando contiene impurezas. Esto es especialmente relevante en el caso del vidrio laminado, que incorpora una capa de polivinil butiral (PVB) que puede actuar como contaminante durante el proceso de reciclaje. Según Oikonomopoulou et al. (2023), uno de los principales obstáculos para el reciclaje del vidrio es la presencia de estas impurezas y la dificultad de separar materiales integrados como el PVB. Esta separación es crucial, ya que las impurezas pueden afectar la calidad del vidrio reciclado y limitar su reutilización en aplicaciones de alto valor.

El enfoque en una trituradora de vidrio laminado adquiere importancia precisamente porque permitiría la separación del vidrio de su capa intermedia. Esto es clave para asegurar que el vidrio reciclado esté libre de impurezas y pueda ser reutilizado en la fabricación de nuevos productos. Por lo tanto, al desarrollar una trituradora de vidrio laminado, se contribuiría a superar una de las barreras más importantes del reciclaje efectivo de este material: la necesidad de un vidrio limpio y sin contaminantes para que pueda entrar nuevamente en el ciclo productivo (Oikonomopoulou et al., 2023).

6.2. Tecnologías para reciclar vidrio laminado

Para el reciclaje de vidrio laminado, existen diversas tecnologías de separación que permiten recuperar el vidrio de forma eficiente. Según Sooš et al. (2021), las tecnologías de separación se agrupan en cuatro métodos principales: mecánico, termodinámico, químico y combinados. El método más frecuentemente utilizado es el mecánico, el cual se basa en ciclos repetidos de trituración y separación de partículas de vidrio y de la película de PVB. Un ejemplo es el sistema descrito en la patente EP0249094, que utiliza múltiples ciclos de desintegración y separación con el fin de lograr una recuperación óptima del vidrio.

Por otro lado, las tecnologías de separación también se dividen en métodos secos (como la separación mecánica o termodinámica) y húmedos (como los métodos químicos). Un ejemplo de este último es la línea de reciclaje de Xinology Co. Ltd., que combina la tecnología de flotación con métodos mecánicos para mejorar la separación y la limpieza del vidrio.

6.3. Tecnologías de caracterización de *interlayers* en vidrio laminado

El vidrio laminado ha cobrado importancia en la construcción debido a su resistencia y capacidad para mantener los fragmentos de vidrio unidos en caso de ruptura. La investigación se ha centrado en la caracterización mecánica de las capas intermedias (*interlayers*), como el PVB, para mejorar su rendimiento estructural y asegurar un diseño más seguro. Zhou et al. (2023) revisan los principales métodos de ensayo mecánico para evaluar estas propiedades y destacan el ensayo de tracción uniaxial y el de cizallamiento de doble solape como los más efectivos para determinar el módulo de cizallamiento de las capas intermedias.

El estudio enfatiza la importancia de las pruebas bajo diferentes condiciones de carga y temperatura, ya que los *interlayers* muestran un comportamiento viscoelástico, sensible tanto a la duración de la carga como a las variaciones de temperatura. Los autores también señalan que el proceso de laminación a altas temperaturas y presiones altera las propiedades originales del *interlayer*, por lo que es necesario evaluarlo bajo las condiciones en que será utilizado. Esta caracterización es esencial para mejorar el rendimiento del vidrio laminado en aplicaciones estructurales (Zhou et al., 2023).

6.4. Selección del sistema de trituración

El reciclaje de vidrio laminado presenta desafíos específicos debido a la complejidad de separar sus componentes, principalmente el vidrio y la capa de PVB. Según Moeyersons (2020), el método más efectivo para reciclarlo implica procesos de trituración, donde los fragmentos de vidrio son separados de la película de PVB a través de técnicas mecánicas, térmicas o químicas. Uno de los mayores obstáculos en este proceso es que la película intermedia de PVB puede contener impurezas, lo que limita la calidad del vidrio reciclado.

Moeyersons (2020) señala que, para lograr un reciclaje efectivo y de alta calidad, es crucial evitar la contaminación del vidrio durante su procesamiento. Esto implica remover el PVB, que puede dejar residuos si no se gestiona adecuadamente. El artículo también resalta la importancia del reciclaje del vidrio limpio para su reutilización en ciclos cerrados, lo que maximiza sus beneficios ambientales y económicos (Moeyersons, 2020).

6.5. Innovaciones en diseño y análisis de fuerzas para equipos de trituración

La optimización del diseño de componentes clave en equipos de trituración es crucial para mejorar la eficiencia y la durabilidad de los componentes mecánicos. Wei et al. (2020) exploran en profundidad el análisis de las fuerzas operativas en un molino vertical de rodillos, lo que proporciona una base valiosa para aplicaciones de ingeniería relacionadas con la trituración de materiales, incluido el vidrio laminado. Los autores destacan la importancia de seleccionar adecuadamente parámetros generales como el ángulo de sujeción y el tamaño de la piedra de molino, que son determinantes en la capacidad del molino para procesar materiales de manera efectiva sin exceder los costos operativos o energéticos.

Además, el estudio detalla cómo la configuración de los rodillos y la presión aplicada son fundamentales para asegurar una trituración efectiva sin comprometer la integridad estructural del equipo. Estos conceptos son directamente transferibles al diseño de una trituradora de vidrio laminado, donde la precisión en la fuerza de trituración y la configuración mecánica pueden influir significativamente en la eficacia del proceso de separación del vidrio y PVB (Wei et al., 2020).

6.6. Aplicaciones de modelos de simulación en el diseño de trituradoras de vidrio laminado

El desarrollo de trituradoras de vidrio laminado puede beneficiarse significativamente de los avances en simulación de fracturas. El estudio de Xia, Yue y Zang (2023) destaca cómo el uso de modelos de elementos cohesivos y carcasa gruesa (Tshell) facilita la predicción precisa del comportamiento del vidrio bajo impactos severos. Esta metodología es crucial para diseñar equipos capaces de manejar eficazmente las particularidades del vidrio laminado, especialmente en términos de resistencia y fragmentación.

La simulación detallada de la fractura permite optimizar el diseño de la trituradora para asegurar que el vidrio se fragmente de manera controlada, lo que reduce el riesgo de daño a las máquinas y mejora la separación del vidrio y PVB. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del proceso de reciclaje, sino que también asegura que el vidrio procesado sea de alta calidad y libre de impurezas, lo que facilita su reutilización en nuevos productos.

Al integrar estas técnicas de simulación avanzada, los diseñadores pueden evaluar diversas configuraciones y condiciones operativas para encontrar la solución más efectiva y eficiente. Esto es esencial para enfrentar los desafíos del reciclaje de vidrio laminado, donde la precisión en la separación y la reducción de la energía consumida son objetivos clave (Xia, Yue y Zang, 2023).

6.7. Innovaciones en tecnología de reciclaje de vidrio laminado

La tecnología descrita en UNIDO (2020) propone un sistema avanzado para el reciclaje de vidrio laminado, que combina trituración mecánica, separación magnética y cribado para mejorar la recuperación de materiales. Este enfoque permite una separación más eficiente del vidrio y el polivinil butiral (PVB), lo que reduce la contaminación cruzada, lo cual es un factor determinante para garantizar la pureza del vidrio reciclado.

Uno de los aspectos más relevantes de esta tecnología es la incorporación de la separación magnética, que facilita la eliminación de fragmentos de metal y otros contaminantes presentes en el material procesado. Esto mejora la calidad del vidrio reciclado y lo hace más adecuado para su reutilización en la producción de nuevos productos de vidrio. Además, la capacidad de procesar grandes volúmenes de material de manera eficiente optimiza el rendimiento del proceso y reduce la pérdida de material reciclable. Estas características hacen que este tipo de tecnologías sean una referencia importante para el desarrollo de sistemas de trituración de vidrio laminado (UNIDO, 2020).

6.8. Optimización del reciclaje de vidrio a través de tecnología avanzada de trituración

En el ámbito del reciclaje de vidrio, la innovación tecnológica juega un papel fundamental en la mejora de los procesos y la eficiencia. Un ejemplo destacado de esta innovación es la trituradora de rodillos dobles de Forglass, diseñada específicamente para enfrentar los desafíos del reciclaje de vidrio. Esta máquina incorpora un sistema de ajuste de tamaño de grano de precisión que permite un control exacto sobre el tamaño del material de salida, una característica esencial para adaptarse a las diversas necesidades de las operaciones de reciclaje de vidrio. Además, este sistema minimiza los finos en el material de salida, reduce las emisiones de polvo y genera un entorno de trabajo más limpio y seguro (GlassOnline, 2024).

El diseño de la trituradora de Forglass también se centra en la seguridad y la funcionalidad, con componentes especializados que están adaptados para manejar específicamente los desafíos de los materiales de vidrio. Esta atención a la adaptabilidad y la seguridad no solo mejora la eficacia del proceso de reciclaje, sino que también promueve un enfoque más sostenible y ecológico a la producción y el consumo (GlassOnline, 2024).

6.9. Desafíos operativos y tendencias en el mercado de trituradoras

El mercado de trituradoras está experimentando una evolución significativa debido a los avances tecnológicos y los desafíos operativos asociados. Según AT Minerals (2024), la industria de trituración está incorporando tecnologías más avanzadas para mejorar la eficiencia y adaptabilidad de las máquinas a diversos entornos operativos. Un aspecto destacado de esta evolución es el desarrollo de trituradoras de rodillos que se adaptan mejor a las necesidades del reciclaje de vidrio y ofrecen soluciones más eficientes y sostenibles.

Las trituradoras modernas, como se menciona en el artículo, están diseñadas para manejar una variedad de materiales con alta eficiencia y menor impacto ambiental. Estos sistemas avanzan hacia una mayor automatización y digitalización, lo que no solo mejora la eficiencia operativa sino también la seguridad y la confiabilidad en entornos de trabajo exigentes. Los fabricantes están haciendo esfuerzos significativos para superar los desafíos como el desgaste de la máquina, la necesidad de mantenimiento frecuente y la adaptación a regulaciones ambientales más estrictas (AT Minerals, 2024).

6.10. Avances en trituradoras de rodillo excéntrico para el reciclaje de vidrio

La trituradora de rodillo excéntrico (ERC) de FLSmidth representa un avance en la tecnología de trituración, diseñada para optimizar el proceso de reciclaje de vidrio. Esta innovadora trituradora destaca por su capacidad para procesar materiales duros y abrasivos, como el vidrio, de manera más eficiente y con menor generación de finos en comparación con las tecnologías tradicionales de trituración.

Según FLSmidth (2024), la ERC utiliza un diseño único que combina la eficiencia de las trituradoras de mandíbulas con la capacidad de trituración de rodillos, lo que permite una mejor distribución del tamaño de partícula y una reducción significativa en la producción de polvo. Esta característica es crucial para minimizar el impacto ambiental durante el proceso de reciclaje de vidrio. Además, la ERC está diseñada con un perfil bajo que facilita su integración en plantas de reciclaje existentes y proporciona una solución eficiente tanto en términos de espacio como de energía (FLSmidth, 2024).

6.11. Innovación en trituradoras de rodillos dobles para el reciclaje de vidrio

La trituradora de rodillos dobles de Binder+Co es un ejemplo destacado de cómo la innovación en el diseño de trituradoras puede facilitar y mejorar el reciclaje de vidrio. Este sistema está especialmente diseñado para procesar materiales difíciles como el vidrio laminado y otros tipos de vidrio que requieren una manipulación cuidadosa. Según Binder+Co (2024), esta trituradora de rodillos ofrece una operación eficiente que no solo reduce el tamaño del material, sino que también asegura una granularidad uniforme del producto final, un factor crucial para el reciclaje de alta calidad.

La capacidad de ajustar la distancia entre los rodillos permite un control preciso del tamaño del material triturado, lo cual es esencial para adaptar el proceso a diferentes tipos de entrada de vidrio. Además, su diseño robusto garantiza una larga vida útil con un mantenimiento mínimo, reduce los costos operativos y aumenta la eficiencia de producción (Binder+Co, 2024).

6.12. Desarrollo de nuevos grados de rodillos de acero de alta velocidad (HSS) para mejorar la trituración de materiales duros

En la búsqueda constante de mejoras en la resistencia al desgaste y optimización de la calidad superficial en las aplicaciones de trituración, el desarrollo de nuevos grados de rodillos de acero de alta velocidad (HSS) ha marcado un hito significativo. Según Brandner et al. (2020), estos rodillos se han diseñado para superar los desafíos operativos en las etapas finales de los molinos de tira caliente, mediante la combinación de máxima resistencia al desgaste con buenas condiciones de superficie y operación.

El estudio de Brandner et al. (2020) destaca la introducción de los grados VANIS y VANIMO, que incorporan conceptos de aleación mejorados para reforzar la microestructura con carburos ricos en niobio y/o vanadio. Esta innovación no solo mejora la resistencia al desgaste de los rodillos, sino que también asegura una mejor calidad de superficie, esencial para la producción de materiales que demandan altos estándares de acabado superficial.

6.13. Aplicación de tecnología de reciclaje de polvos de pulido en la trituración de vidrio laminado

El proceso de reciclaje de polvos de pulido de vidrio, como se describe en el enlace de UNIDO, presenta un método innovador para el tratamiento de residuos generados durante la fabricación y reciclaje de vidrio. Esta tecnología implica el reciclaje de polvos finos derivados de procesos de pulido, que a menudo contienen silicio y otros materiales valiosos. La implementación de esta tecnología en el diseño de trituradoras de vidrio laminado podría contribuir para mejorar la eficiencia de recuperación de materiales y reducir el impacto ambiental.

El uso de esta tecnología no solo facilita la gestión de residuos, sino que también permite la recuperación de materiales que de otro modo serían desechados. Esta aproximación es especialmente relevante en la industria del vidrio, donde la precisión en la separación de materiales y la minimización de desechos son esenciales para la sostenibilidad operativa y ambiental (UNIDO, 2020).

6.14. Contribución de la patente JP2018001234A al diseño de la trituradora de vidrio laminado

La patente japonesa JP2018001234A presenta un diseño innovador para un sistema de trituración de vidrio laminado, que se ha convertido en una referencia clave para el desarrollo de este proyecto de graduación. Este sistema incorpora rodillos especialmente diseñados para fragmentar el vidrio, junto con dispositivos de calentamiento que permiten la separación eficiente de la capa de polivinil butiral (PVB), un material esencialmente adherente que complica el reciclaje. Además, la patente detalla un mecanismo optimizado para reducir impurezas durante la separación, garantizando la recuperación de vidrio de alta calidad, lo que resulta fundamental para aplicaciones industriales que demandan altos estándares de pureza. Estos hallazgos proporcionan un marco técnico que mejora tanto la eficiencia operativa como el impacto ambiental del reciclaje de vidrio laminado. Aplicar este conocimiento al diseño propuesto permite que la máquina alcance niveles óptimos de separación y recuperación de materiales y se alinee con las mejores prácticas industriales actuales (Oficina Japonesa de Patentes, 2018).

6.15. Contribución de la patente CN107639767B al diseño de la trituradora de vidrio laminado

La patente CN107639767B propone un sistema tecnológico avanzado orientado a la separación eficiente y al reciclaje del vidrio laminado. Este sistema incorpora rodillos superiores e inferiores equipados con estructuras dentadas circulares, diseñadas específicamente para fragmentar el vidrio de manera uniforme y efectiva. La disposición estratégica de los dientes en los rodillos evita interferencias durante la trituración, optimiza el contacto y facilita el proceso.

Adicionalmente, la patente describe un método complementario basado en un sistema de calefacción mediante vapor de agua a alta temperatura, lo que permite separar eficientemente el vidrio de la película adhesiva de polivinil butiral (PVB). Este método térmico mejora significativamente la eficacia del proceso de separación y reduce notablemente la generación de impurezas, lo que incrementa la calidad del vidrio reciclado obtenido.

La aplicación de estas características técnicas en el diseño de una trituradora de vidrio laminado proporciona un marco de referencia valioso para alcanzar altos estándares de rendimiento, eficiencia operativa y calidad del material recuperado, y favorece la alineación con los estándares industriales actuales para el reciclaje de vidrio laminado (Oficina Estatal de Patentes de China, 2019).

7.1. Descripción general de la metodología

El desarrollo del proyecto inició con la evaluación de distintas alternativas para triturar el vidrio laminado. Una de las opciones consideradas fue la trituración por compresión, mediante la aplicación de una fuerza igual o superior al esfuerzo de compresión del vidrio, estimado en aproximadamente 1,000 MPa (Structural Glass, 2016). Sin embargo, se optó por una estrategia basada en generar un momento flector que indujera fallas por flexión, ya que la resistencia del vidrio a la tracción se encuentra en el rango de 19.3 a 28.4 MPa (National Glass, s. f.), valor significativamente menor que su resistencia a la compresión. Esta elección permitió un diseño más eficiente y con menor demanda energética.

Para orientar el diseño del sistema de trituración, se tomó como referencia la patente JP6892095B1 (Oficina de Patentes de Japón, 2021), la cual presenta una configuración de rodillos cilíndricos con dientes trapezoidales para triturar vidrio laminado y paneles fotovoltaicos. Del análisis de esta patente se extrajeron los siguientes parámetros de diseño recomendados:

- Paso entre dientes: 12 mm a 16 mm
- Altura de los dientes: 6 mm a 8 mm
- Inclinación de los lados del diente: 12° a 20°
- Separación entre rodillos: 6 mm a 7 mm

Según estos valores, se desarrolló un diseño propio adaptado a las condiciones específicas del proyecto. El proceso comenzó con el análisis de un modelo simplificado a pequeña escala, compuesto por tres dientes. A partir de un diagrama de cuerpo libre (DCL), se determinó la fuerza necesaria para provocar la falla por flexión en una plancha de vidrio de 10 mm de espesor. Este análisis sirvió como fundamento teórico para escalar el diseño completo.

Posteriormente, se construyó un modelo CAD en Autodesk Inventor 2024, definiendo un área efectiva de trituración de 750 mm. Según en las dimensiones geométricas del diente, se determinó la cantidad total de dientes por rodillo y la fuerza distribuida equivalente, a partir de una carga de 471 N por diente. Tras varias iteraciones, se seleccionó el acero AISI D2 (Böhler K110), suministrado por Proventsa S.A. Guatemala, debido a su alta resistencia al desgaste y estabilidad dimensional tras tratamiento térmico. Este material alcanza una dureza entre 55 y 64 HRC, superior a los 51 HRC estimados para la dureza del vidrio (National Glass, s. f.).

Con la geometría definida, se procedió a calcular el diámetro necesario del rodillo mediante un nuevo diagrama de cuerpo libre (DCL), aplicando la ecuación de diseño ED-ASME elíptica. Este cálculo aseguró que el rodillo fuese capaz de resistir las cargas durante la operación y mantener su integridad estructural bajo las condiciones de trabajo esperadas.

Además del análisis teórico, se decidió complementar el estudio mediante pruebas físicas. El objetivo fue validar el funcionamiento del diseño más allá de cálculos y estimaciones. Se fabricó un prototipo funcional a escala reducida con dos rodillos de 250 mm de largo cada uno, los cuales replicaron exactamente la geometría propuesta para los rodillos de tamaño real. Sin realizar escalamiento; solo se redujo la longitud de trituración de 748 mm a 118 mm. Para ello, se utilizó acero AISI 1045 adquirido en Proventsa S.A. y se emplearon cuatro chumaceras de la marca New KLM, compradas en Incaprosa S.A. La fabricación se llevó a cabo en el taller de máquinas herramientas de la Universidad del Valle.

Este prototipo permitió verificar el comportamiento real del sistema de trituración y contrastar los resultados obtenidos teóricamente con pruebas físicas, lo que fortaleció la validez del diseño propuesto.

7.2. Requisitos

Cuadro 1. Identificación de códigos

Tipo	
ST	Requisitos del sistema de trituración
DM	Requisitos de diseño y maquinabilidad
OP	Requisitos operativos
MT	Requisitos de mantenimiento
FA	Requisitos de fabricación y materiales

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 2. Requisitos

Código	Descripción
ST01	El sistema debe permitir la separación mecánica del vidrio y la película de PVB con una eficiencia superior al 40%.
ST02	El sistema debe tener capacidad de procesamiento igual o mayor a 65 kg de vidrio por hora.
ST03	El sistema debe trabajar con vidrios de espesor entre 5 mm y 10 mm.
ST04	El sistema de resortes debe generar la fuerza necesaria para asegurar la trituración efectiva del vidrio laminado.
DM01	La geometría de los rodillos debe ser menor a 14" de diámetro por 40" de largo.
DM02	La separación entre dientes debe permitir la trituración sin dañar los componentes mecánicos.
OP01	El sistema de trituración debe poder ensamblarse en un espacio no mayor a 3 m de frente por 10 m de largo.
OP02	El diseño debe permitir desmontar los rodillos fácilmente para facilitar el mantenimiento.
MT01	Los rodamientos seleccionados deben tener una vida útil mínima de 12000 horas.
FA01	Todos los componentes deben poder ser fabricados con procesos disponibles en Guatemala.
FA02	Al menos el 70% de los componentes deben poder adquirirse localmente sin necesidad de importación.
FA03	El precio de fabricación del prototipo no debe exceder los Q5000.00

Nota. Elaboración propia

7.3. Selección de materiales

Cuadro 3. Propiedades del acero Böhler K110

Dureza	Hasta 64 HRC
Resistencia última a la tensión	1.999 GPa
Resistencia última a la fluencia	1.517 GPa
Módulo de Poisson	0.29
Densidad	7695 kg/m ³
Módulo de elasticidad	207 GPa

Nota. Online Metals (s. f.)

Cuadro 4. Propiedades del acero 1045

Dureza	190 HB
Resistencia última a la tensión	620 MPa
Resistencia última a la fluencia	415 MPa
Módulo de Poisson	0.29
Densidad	7,850 kg/m ³
Módulo de elasticidad	205 GPa

Nota. Adaptada de Proventsa (2025)

Cuadro 5. Propiedades del acero 1018

Resistencia última a la tracción	440 MPa
Resistencia última a la fluencia	370 MPa
Módulo de Poisson	0.29
Densidad	7,850 kg/m ³
Módulo de elasticidad (E)	200 GPa

Nota. Adaptada de Proventsa (2025)

Cuadro 6. Propiedades del vidrio laminado

Resistencia a la tensión	33 MPa
Módulo de elasticidad	70 GPa
Módulo de Poisson	0.22
Dureza en la escala de Mohs	5

Nota. Adaptada de Structural Glass (2016)

Cuadro 7. Propiedades de chumacera SKF UCP 208-24

Diámetro interno (eje) d	38,1 mm
Carga dinámica básica C	32,5 kN
Carga estática básica C ₀	20 kN
Límite de fatiga P _u	0,85 kN
Velocidad límite	3 750 r/min
Altura del centro (soporte de pie)	49,2 mm
Distancia del centro entre los agujeros para tornillos	137 mm
Ancho total del soporte	49 mm

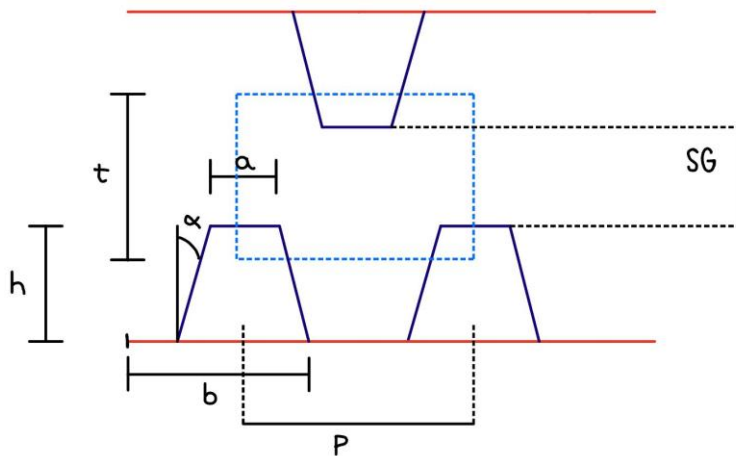
Nota. Adaptada de ficha técnica SKF (s. f.)

7.4. Cálculos de diseño y fundamentos teóricos de los rodillos

Partiendo de las recomendaciones de la patente JP6892095B1 (Oficina de Patentes de Japón, 2021) se seleccionaron los siguientes valores para los dientes del rodillo:

- Paso (p) = 14 mm
- Base (b) = 8 mm
- Altura del diente (h) = 7 mm
- Ángulo (α) = 15°
- Separación entre dientes (SG) = 6 mm
- Espesor del vidrio (t) = 10 mm

Figura 1. Geometría de los dientes



Nota. Elaboración propia.

Con esta geometría se analizó la plancha de vidrio como una viga con apoyos simples y una carga central ejercida por el diente superior, en la cual el largo de la “viga” está determinado por el paso. Para este caso las fórmulas de momento y esfuerzo máximos son las siguientes:

$$M_{max} = \frac{F * L_{viga}}{4}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * C}{I}$$

Combinando ambas ecuaciones y despejando para la fuerza se obtiene lo siguiente:

$$F = \frac{4 * \sigma_{max} * I}{L_{viga} * C}$$

Dado que la sección transversal del vidrio es rectangular, el momento de inercia en el centroide y la distancia del centroide hasta la parte externa de la viga se calcularon de la siguiente manera:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$c = \frac{t}{2}$$

En el caso del momento de inercia se estimó un ancho del área en contacto de 3 mm y la altura de la sección transversal corresponde al espesor del vidrio de 10 mm. Asimismo, en el caso del cálculo de la distancia del centroide hasta la parte externa de la viga, t corresponde de igual manera al espesor del vidrio, por lo que se obtiene:

$$I = \frac{0.003 * 0.01^3}{12} = 2.5 * 10^{-10} m^4$$

$$c = \frac{0.01}{2} = 0.005 m$$

$$F = \frac{4 * 33 * 10^6 * 2.5 * 10^{-10}}{0.014 * 0.005} = 471 N$$

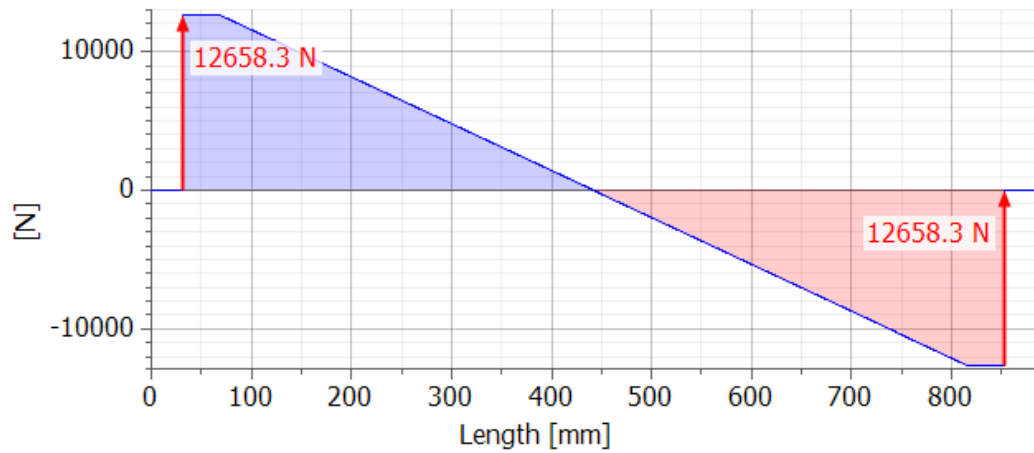
Dado que el área efectiva de trituración es de 750 mm y con los valores de la geometría de los dientes, se determinó que es posible colocar un total de 53 dientes en este espacio, lo que da como resultado una longitud efectiva de 748 mm. Posteriormente, se calculó la fuerza distribuida que ejercen los 53 dientes a lo largo de los 748 mm de la siguiente manera:

$$q = \frac{53 * 471}{0.748} = 33,373 \frac{N}{m}$$

Para el análisis inicial se estimó la distancia entre la sección del rodillo destinada a la trituración y la zona de alojamiento de los rodamientos. Se seleccionó un valor preliminar de 30.82 mm, medido desde el extremo de la superficie activa de trituración hasta el centro del rodamiento. Este valor se determinó a partir de las dimensiones de rodamientos comerciales de 1 pulgada de diámetro.

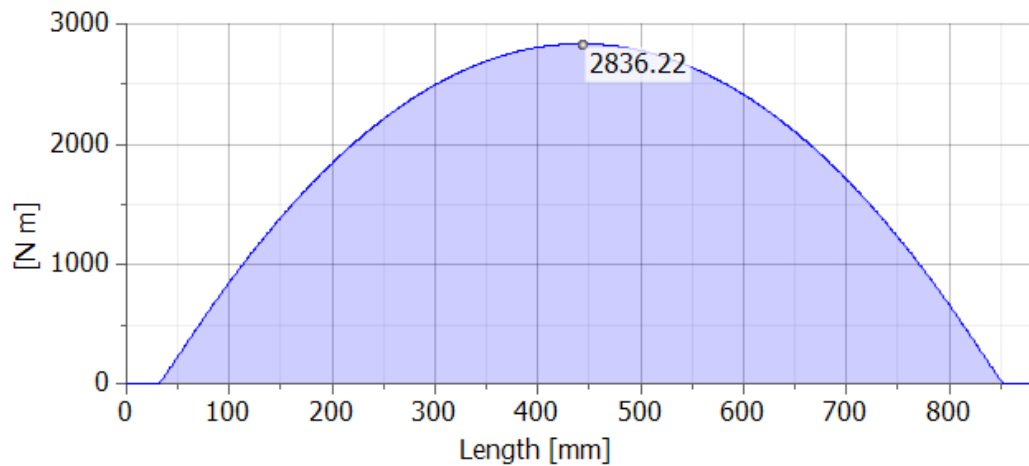
La distancia se definió de manera arbitraria en esta etapa con el propósito de realizar una primera aproximación, y posteriormente se ajustó con las dimensiones reales de los cojinetes y chumaceras utilizados para mejorar la precisión de los cálculos estructurales. Con esta configuración inicial, se elaboró en Autodesk Inventor 2024 el diagrama de fuerza cortante correspondiente al rodillo inferior, cuyos resultados se presentan a continuación.

Figura 2. Diagrama de fuerza cortante para rodillo inferior



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

Figura 3. Diagrama de momento flector para rodillo inferior



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

Los parámetros relevantes de estos diagramas de corte y momento es el valor del momento flector máximo y las reacciones en los puntos de apoyo de los rodamientos. El momento flector máximo será introducido posteriormente en la ecuación ED-ASME elíptica para determinar el diámetro mínimo del rodillo para que este sea capaz de soportar las cargas cumpliendo con el factor de seguridad de diseño.

Para determinar el factor de seguridad de diseño se siguió el criterio de Ullman (2010) que establece lo siguiente:

$$n = n_{material} * n_{esfuerzo} * n_{geometría} * n_{análisis de falla} * n_{confiabilidad}$$

El factor del material es 1.2 ya que las propiedades del material son obtenidas de un texto o un catálogo del proveedor.

$$n_{material} = 1.2$$

El factor de esfuerzo es 1.5 ya que la carga se estima con sobrecargas de 20% a 50%. El método de análisis del esfuerzo puede incurrir en errores menores al 50%.

$$n_{esfuerzo} = 1.5$$

El factor de geometría es 1 ya que la a tolerancia de manufactura es estricta.

$$n_{geometría} = 1$$

El factor de análisis de falla es 1.2 debido a esfuerzos repetidos de fatiga uniaxial.

$$n_{análisis de falla} = 1.2$$

El factor de confiabilidad es 1.2 ya que corresponde a una confiabilidad promedio de 92 % a 98 %.

$$n_{confiabilidad} = 1.2$$

$$n = 1.2 * 1.5 * 1 * 1.2 * 1.2 = 2.6$$

Para poder utilizar la formula ED-ASME elíptica hay una serie de parámetros que se necesitan conocer. La fórmula es la siguiente:

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[4 \left(\frac{k_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Para los valores de los concentradores de esfuerzos, en la primera iteración se emplearon las recomendaciones de Shigley et al. (2012), con un factor de 2.7 para flexión y 2.2 para torsión. El cálculo del límite de resistencia a la fatiga se realizó según los factores establecidos en Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (Shigley et al., 2012), mediante la ecuación de Marín, presentada a continuación:

$$S_e = S'_e k_a k_b k_c k_d k_e k_f$$

El factor de superficie se calculó de la siguiente manera:

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Debido a la naturaleza de la construcción del rodillo, los valores de a y b se determinaron de 4.51 y -0.265 respectivamente, ya que estos corresponden a un acabado superficial maquinado. Esto dio como resultado:

$$k_a = 0.60$$

Para la primera iteración, el factor de tamaño asumió un valor de 1.

$$k_b = 1$$

El factor de modificación por la carga debido a que hay una combinación de flexión y torsión es 1.

$$k_c = 1$$

El factor de temperatura de igual manera es 1, ya que la máquina operará en condiciones de temperatura ambiente.

$$k_d = 1$$

Para el factor de confiabilidad, se decidió trabajar con un 95% de confiabilidad, ya que esto reduce el error esperado y mantiene un buen balance entre costo y beneficio.

$$k_e = 0.868$$

Finalmente, el factor de efectos varios es 1, ya que no se está tomando en cuenta la corrosión, un recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersion ni corrosión por frotamiento, ya que el eje es completamente nuevo.

$$k_f = 1$$

El límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria es de 700 MPa, ya que el límite de resistencia última a la tensión del material es mayor a 1400 MPa:

$$S'_e = 700 \text{ MPa}$$

Con todo lo mencionado anteriormente se obtiene:

$$S_e = 365,661,231 \text{ Pa}$$

El cálculo del momento alternante y momento medio se realiza de la siguiente manera:

$$M_a = \left| \frac{M_{max} - M_{min}}{2} \right| = \left| \frac{2836.22 - (-2836.22)}{2} \right| = 2836.22 \text{ Nm}$$

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2} = \frac{2836.22 + (-2836.22)}{2} = 0 \text{ Nm}$$

El par de torsión medio y alternante se calculó de la siguiente manera:

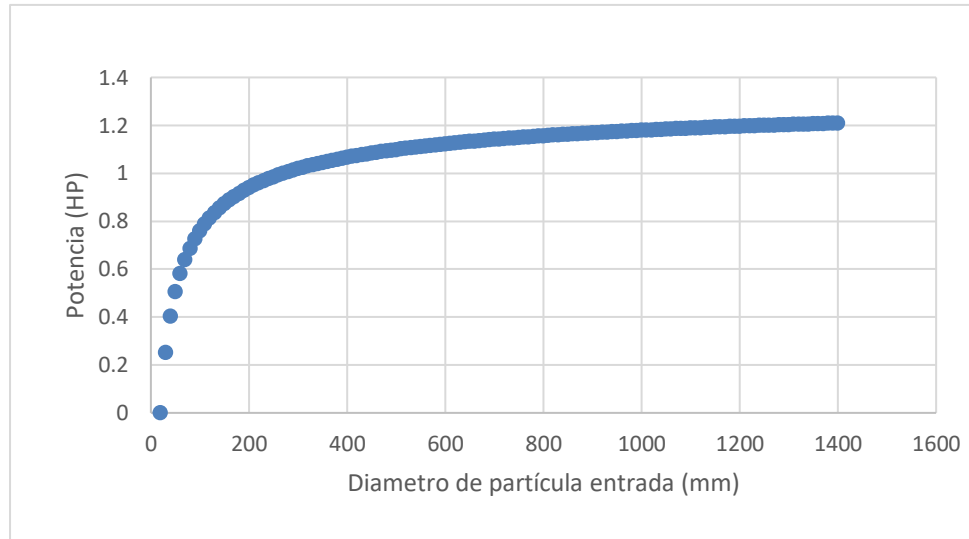
$$T_{max} = \frac{P}{\omega} = \frac{2208.5 \text{ W}}{30 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60}} = 702.5 \text{ Nm}$$

$$T_a = \left| \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right| = \left| \frac{702.35 - 702.35}{2} \right| = 0 \text{ Nm}$$

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{702.35 + 702.35}{2} = 702.35 \text{ Nm}$$

La selección de la potencia se basó en el trabajo de Cristian Ramírez Cristales (2024) encargado del desarrollo del módulo de transmisión de potencia para la trituradora.

Figura 4. Variación de potencia según tamaño de partícula



Nota. Adaptada de Ramírez Cristales (2025)

Con todo lo anterior se determinó para la primera iteración que el rodillo debe de tener un diámetro de 73.10 milímetros en la parte baja de los dientes, tomando en cuenta que la altura de los dientes es de 7mm (Figura 1). El diámetro mayor del rodillo (el diámetro del material que se compraría para fabricarlo) es de 87.1 mm. Debido a la disponibilidad de materiales en Guatemala y por criterio de diseño, el material a trabajar es de 101.6 mm (4 in). A continuación, se presentan los cálculos de diseño para los rodillos con estas dimensiones.

Como ahora se conoce el diámetro del rodillo y este es mayor que 51 mm, pero menor a 254 mm, el factor de tamaño cambia a:

$$k_b = 1.51 * d^{-0.157} = 1.51(101.4\text{mm})^{-0.157} = 0.73$$

Esto tiene un efecto en el límite a la resistencia a la fatiga y cambia el valor de 366 MPa a 267 MPa. Los valores de momento alternante y momento medio no cambian. El par de torsión medio y alternante tampoco cambia debido a que estos no dependen de la geometría. Los concentradores de esfuerzos K_f y K_{fs} con un redondeo de 2 mm cambian a 1.9 y 1.5 respectivamente según las tablas A-15-8 y A-15-9 de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (Shigley et al., 2012).

Con todo lo mencionado anteriormente se tienen los siguientes datos para el rodillo final:

$$S_e = 267,284,363 \text{ Pa}$$

$$M_a = 2836.22 \text{ Nm}$$

$$M_m = 0 \text{ Nm}$$

$$T_a = 0 \text{ Nm}$$

$$T_m = 702.35 \text{ Nm}$$

$$k_f = 1.9$$

$$k_{fs} = 1.5$$

$$d = 87.6 \text{ mm}$$

Ahora se calcula el factor de seguridad:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{k_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$n = 3.27$$

Este dato es el factor de seguridad obtenido en el centro del rodillo inferior y corresponde al punto crítico del sistema de rodillos. Aunque en los puntos de apoyo se presenta la mayor fuerza cortante, el momento flector en esas zonas es nulo. Tras analizar la posibilidad de falla en estas regiones, se determinó que el factor de seguridad en los apoyos es superior al obtenido en el punto crítico. Además, en el rodillo superior se presenta una geometría casi idéntica al inferior, con la diferencia de que cuenta con un diente menos, lo que reduce la magnitud de la carga distribuida. Por lo tanto, debido a la similitud geométrica y la menor carga aplicada, se concluye que el eje superior también presentará un factor de seguridad superior al requerido por el diseño.

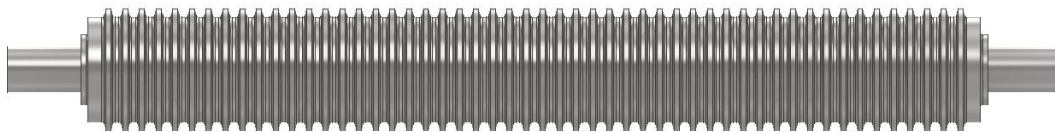
Según los cálculos de diseño mecánico se definió la geometría final de los rodillos superior e inferior, mostrada en las figuras 5 y 6. Ambos elementos fueron diseñados considerando los requerimientos de resistencia y compatibilidad con los rodamientos comerciales. Los rodillos presentan un diámetro exterior de 101.6 mm, dientes de 7 mm de altura y una longitud efectiva de trituración de 748 mm. Asimismo, se definió un diámetro de hombro de 58.42 mm destinado al apoyo de los rodamientos y una sección de 38.1 mm (1.5 in) de diámetro para el montaje de las chumaceras con sus respectivos rodamientos. Estas dimensiones se definieron mediante un factor de 1.5 entre cambios de sección. El rodillo superior cuenta con una longitud total de 884 mm, mientras que el rodillo inferior alcanza 960 mm, debido a la extensión adicional requerida para el montaje del sistema de acople y transmisión de potencia.

Cuadro 8. Dimensiones finales de los rodillos de trituración

Parámetro	Rodillo superior	Rodillo inferior
Diámetro exterior	101.6 mm	101.6 mm
Altura de diente	7 mm	7 mm
Longitud efectiva de trituración	748 mm	748 mm
Diámetro de hombro para apoyo de rodamientos	58.42 mm	58.42 mm
Diámetro de sección para chumacera y rodamiento	38.1 mm (1.5 in)	38.1 mm (1.5 in)
Longitud total del rodillo	884 mm	960 mm

Nota. Elaboración propia.

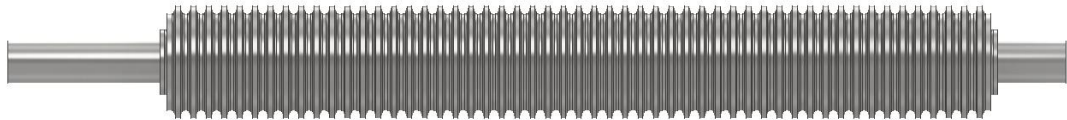
Figura 5. Vista frontal del rodillo superior



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

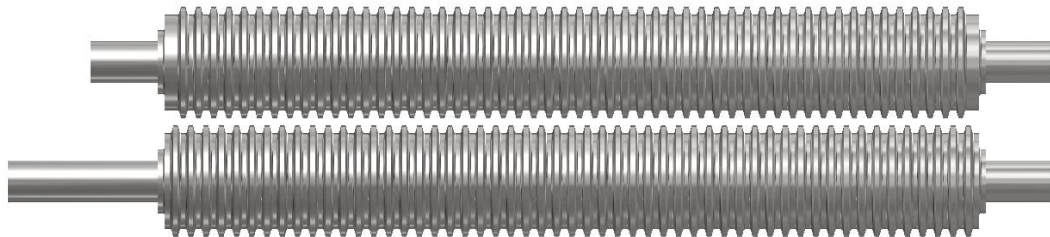
El rodillo inferior (Figura 6), a diferencia del superior, presenta uno de sus apoyos con una extensión mayor. Esta configuración se implementó con el propósito de permitir el montaje del acople del sistema de transmisión de potencia, responsable de generar el movimiento rotacional del rodillo. Gracias a esta disposición, el sistema puede transmitir el par necesario para accionar el mecanismo de trituración, facilita el desplazamiento continuo de las planchas de vidrio laminado a través de los rodillos y favorece la eficiencia del proceso de alimentación.

Figura 6. *Vista frontal del rodillo inferior*



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

Figura 7. *Vista frontal de ambos rodillos (superior e inferior)*



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

7.5. Selección de rodamientos y chumaceras

Durante el proceso de diseño de los rodillos, se estableció una sección de diámetro de 1.5 pulgadas (38.1 mm) destinada al montaje de los rodamientos y chumaceras. Esta decisión permitió asegurar la compatibilidad con componentes comerciales disponibles localmente, lo que facilitó la adquisición y la sustitución de piezas en caso de mantenimiento o reposición.

En el mercado nacional, se identificaron diversas opciones de fabricantes que ofrecían rodamientos compatibles con dicho diámetro, entre ellos SKF, NTN, Koyo y KLM. Tras comparar las especificaciones técnicas y el soporte ofrecido por cada marca, se seleccionó el modelo SKF UCP 208-24, una unidad de rodamiento de bolas con soporte de pie, fabricada en fundición y normalizada bajo estándares japoneses (JIS). La selección se fundamentó en la reputación internacional de SKF, la disponibilidad inmediata de información técnica y las facilidades de documentación en línea que ofrece el fabricante, lo que favorece la trazabilidad y confiabilidad en el diseño.

Para estimar la durabilidad de los rodamientos seleccionados, se calculó la vida útil conforme el catálogo SKF Rolling Bearings (2018) y la norma ISO 281. El modelo utilizado fue el SKF UCP 208-24, una unidad de rodamiento rígido de bolas con soporte de pie y aro interior prolongado, fijado mediante tornillos prisioneros.

Los parámetros relevantes para el análisis fueron los siguientes:

- Capacidad de carga dinámica básica: $C = 32.5$ kN
- Capacidad de carga estática básica: $C_0 = 20$ kN
- Límite de velocidad: $n_\ell = 3750$ rpm
- Tipo de rodamiento: rígido de bolas $\rightarrow p = 3$
- Carga radial aplicada: $F_r = 12.6583$ kN
- Velocidad de operación: $n = 30$ rpm
- Ciclo de trabajo: $f = 0.5$ (50 % del tiempo en carga)
- Fiabilidad requerida: 95 %

7.5.1. Cálculo de la vida básica del rodamiento individual

El primer paso fue realizar el cálculo de la vida básica del rodamiento individual. El partió de la ecuación de vida básica L_{10} , que expresa el número de revoluciones que puede soportar el rodamiento antes de que falle el 10 % de una población de unidades idénticas.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \times 10^6 \text{ [rev]}$$

C es la capacidad de carga dinámica básica y P , la carga equivalente.

Sustituyendo los valores:

$$\frac{C}{P} = \frac{32.5}{12.6583} = 2.57 \Rightarrow \left(\frac{C}{P}\right)^3 = 16.97$$

$$L_{10} = 16.97 \times 10^6 \text{ rev}$$

Para convertir este resultado a horas de operación se aplica:

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 n} = \frac{16.97 \times 10^6}{60 \times 30} = 9430 \text{ h}$$

Este valor representa la vida esperada del rodamiento con una fiabilidad del 90 % y operación continua, es decir, sin interrupciones ni pausas en el proceso de trituración.

7.5.2. Ajuste por régimen de trabajo intermitente

El siguiente paso para calcular la vida de cada rodamiento consiste en aplicar un ajuste por régimen de trabajo intermitente. El sistema de trituración no trabaja de forma continua, ya que durante la operación existen periodos de alimentación manual del vidrio. Se estimó que, dentro de un ciclo horario de trabajo, el 50 % del tiempo corresponde a trituración activa y el otro 50 % al tiempo empleado por los operadores en colocar las planchas de vidrio.

En estos casos, la carga sobre el rodamiento aparece y desaparece de forma alternada. Para cargas pulsantes, el catálogo SKF establece que puede aplicarse una corrección mediante la fracción de tiempo cargado f , de acuerdo con:

$$P_{eq} = F_r \cdot f^{1/3}$$

Como la vida útil es inversamente proporcional a la carga equivalente elevada al exponente $p = 3$, se obtiene:

$$L_{10h}(f) = \frac{L_{10h}(1)}{f}$$

Por tanto, al considerar un ciclo de trabajo del 50 % ($f = 0.5$):

$$L_{10h}(0.5) = \frac{9430}{0.5} = 18,860 \text{ h}$$

Este ajuste refleja que los periodos sin carga reducen el daño y duplican la vida teórica del rodamiento individual respecto a una operación continua.

7.5.3. Ajuste de nivel de confianza al 95 %

El valor del apartado anterior corresponde a una fiabilidad del 90 %. Se decidió elevar el nivel de confianza al 95% para ser consistente con el nivel de confianza utilizado a lo largo de todo el trabajo. Para ello, se aplicó el factor de fiabilidad $a_1 = 0.62$ (según la tabla de la norma ISO 281).

$$L_{95\%,\text{rodamiento}} = a_1 \cdot L_{10h}(f) = 0.62 \times 18,860 = 11,700 \text{ h}$$

Así, cada rodamiento tiene una vida esperada de aproximadamente 11,700 horas a una fiabilidad del 95 %, bajo las condiciones operativas de la trituradora.

7.5.4. Análisis de sistema rodillo - 2 rodamientos

Cuando se analiza un conjunto de rodamientos que conforman una máquina se debe tomar en cuenta que la vida del sistema no es igual a la vida individual de cada rodamiento. Cada rodillo de trituración está sostenido por dos rodamientos. En términos de fiabilidad, el fallo de cualquiera de ellos provoca la detención del rodillo, por lo que se consideran en serie funcional. La fiabilidad del conjunto se obtiene mediante:

$$R_{\text{rodillo}} = R_b^2$$

Si la fiabilidad deseada del rodillo es 95 %, la fiabilidad de cada rodamiento individual debe ser:

$$R_b = \sqrt{0.95} = 0.9747 \text{ (97.47 \%)}$$

Del catálogo SKF (2018), para una fiabilidad del 97.5 % el factor correspondiente es $a_1 = 0.39$. Aplicando este ajuste:

$$L_{95\%,\text{rodillo}} = a_1 \cdot L_{10h}(f) = 0.39 \times 18,860 \text{ h} = 7,360 \text{ h}$$

Por lo tanto, la vida esperada del conjunto de dos rodamientos que soporta un rodillo es de aproximadamente 7,360 horas con una fiabilidad del 95 %.

7.5.5. Análisis de sistema completo 2 rodillos - 4 rodamientos

Finalmente, al analizar el sistema completo de rodamientos, se cuenta con dos rodillos, cada uno con sus respectivos rodamientos. La falla de cualquiera de los rodillos implica la detención completa del sistema, por lo que ambos rodillos deben considerarse en serie funcional.

Se aplica nuevamente la relación de fiabilidad:

$$R_{\text{sistema}} = R_{\text{rodillo}}^2 = 0.95 \Rightarrow R_b = \sqrt[4]{0.95} = 0.9873$$

Interpolando el valor en la tabla de fiabilidad de SKF (2018) (98 % $\rightarrow a_1 = 0.33$; 99 % $\rightarrow a_1 = 0.21$), se obtiene $a_1 \approx 0.25$.

$$L_{95\%,\text{sistema}} = a_1 \cdot L_{10h}(f) = 0.25 \times 18,860 \text{ h} = 4,700 \text{ h}$$

Cuadro 9. Resumen de resultados

Nivel del sistema	Condición	Fiabilidad	Vida estimada (h)
Rodamiento individual	Ciclo de trabajo = 0.5	95 %	11,700
Rodillo (2 rodamientos)	Serie funcional	95 %	7,360
Sistema completo (4 rodamientos)	Serie funcional	95 %	4,700

Nota. Elaboración propia.

7.6. Selección y verificación del sistema de resortes de compresión

Para continuar con esta sección, es importante recalcar que en este trabajo no se dimensionó la estructura portante del sistema de compresión. No obstante, según la recomendación de Ramírez Cristales (2025) se adoptó un perfil 3" \times 3" \times 3/16" para el bastidor, junto con los criterios de soldadura acordes con dicha guía. En esta configuración, un rodillo permanece fijo sobre el bastidor y el rodillo opuesto es móvil, montado sobre dos platinas deslizantes que se guían mediante barras roscadas.

Antes de detallar guías, platinas y anclajes, se determinó la fuerza de compresión requerida y se seleccionaron los resortes comerciales que la suministran.

Del diagrama de cortante (Figura 2) se obtuvo la carga radial por rodamiento:

$$F_{\text{req}} = 12,658.3 \text{ N (por rodamiento)}$$

Esta es la fuerza mínima que debe poder suministrar el conjunto de resortes asociado a cada chumacera para inducir la fractura del vidrio y la liberación del PVB.

Para ello se evaluaron dos opciones de resortes de compresión del fabricante Lee Spring:

Modelo 1 (Figura 8): LHP 437U 04S

- $k = 729.03 \text{ N/mm}$
- F a la altura comprimida $\approx 10,481 \text{ N}$
- altura libre 76.20 mm
- altura a compresión 61.83 mm
- \varnothing externo $\approx 49.2 \text{ mm}$
- precio USD 54.35 .

Figura 8. Vista isométrica del resorte LHP 437U 04S



Nota. Adaptada de Lee Spring® (2025)

Modelo 2 (Figura 9): LHL 2000D 01

- $k = 437.82 \text{ N/mm}$
- F a la altura comprimida $\approx 7,006.9 \text{ N}$
- altura libre 63.50 mm
- altura a compresión 47.50 mm
- \varnothing externo $\approx 49.28 \text{ mm}$
- precio USD 27.93 .

Figura 9. Vista isométrica del resorte LHL 2000D 01



Nota. Adaptada de Lee Spring® (2025)

Ambos modelos exigen guía interna mínima de 1" de diámetro (requisito del fabricante).

Para cada chumacera se colocaron dos resortes en paralelo (por razones de estabilidad), de modo que la fuerza disponible por apoyo es:

$$F_{\text{par}} = 2 F_{\text{resorte}}$$

$$\text{Con LHL 2000D 01: } F_{\text{par}} \approx 2 \times 7,006.9 = 14,013.8 \text{ N} \geq F_{\text{req.}}$$

$$\text{Con LHP 437U 04S: } F_{\text{par}} \approx 2 \times 10,481 = 20,962 \text{ N} \geq F_{\text{req.}}$$

Ambas alternativas satisfacen la fuerza mínima por apoyo.

Se verificó que la deflexión requerida para alcanzar F_{req} por resorte no exceda la compresión útil de catálogo. Puesto que se usan dos resortes por apoyo, la fuerza que debe proporcionar cada resorte en servicio es:

$$F_{\text{req, resorte}} = \frac{F_{\text{req}}}{2} = \frac{12,658.3}{2} \approx 6,329 \text{ N}$$

Con la fórmula de las deflexiones de un resorte que se muestra a continuación fue posible calcular la distancia que cada uno de los resortes debía comprimirse para generar la fuerza deseada:

$$\delta = \frac{F_{\text{req, resorte}}}{k}$$

$$\text{LHL 2000D 01: } \delta \approx \frac{6,329}{437.82} \approx 14.46 \text{ mm.}$$

$$\text{LHP 437U 04S: } \delta \approx \frac{6,329}{729.03} \approx 8.68 \text{ mm.}$$

Como se mencionó anteriormente, los resortes deben llevar una guía interna de $\varnothing \geq 1"$. Para cumplir el requisito se seleccionaron barras roscadas 1" – 8 UNC, Grado 2 (Figura 10) como poste guía y se verificó su integridad a la carga máxima más desfavorable (modelo LHP):

Figura 10. Vista isométrica de barra roscada 1" – 8 UNC



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

$$F_{\max} = 20,962 \text{ N} \approx 4,714 \text{ lbf}$$

Al realizar la verificación al esfuerzo axial generado en el área resistente roscada, el área de esfuerzo para 1"-8 UNC es: $A_s \approx 0.606 \text{ in}^2$. Por consiguiente:

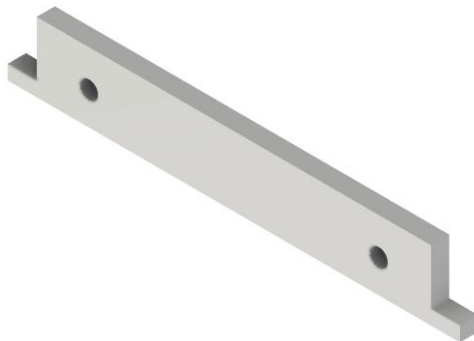
$$\sigma = \frac{F}{A_s} = \frac{4,714}{0.606} \approx 7,778, \text{ psi } (\approx 53.6 \text{ MPa})$$

De acuerdo con la norma SAE J429 (2019), los pernos de acero Grado 2 presentan un límite de prueba de 55 ksi. Por tanto:

$$n_{\text{estático}} \approx \frac{55,000}{7,778} \approx 7.07$$

Con el requisito de fuerza y guiado satisfechos, se diseñaron platinas en acero AISI 1018 de 1" de espesor con los agujeros guía para las varillas roscadas. La geometría final de dichas platinas se presenta en la Figura 11.

Figura 11. Vista isométrica de platina



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

7.7. Diseño del prototipo

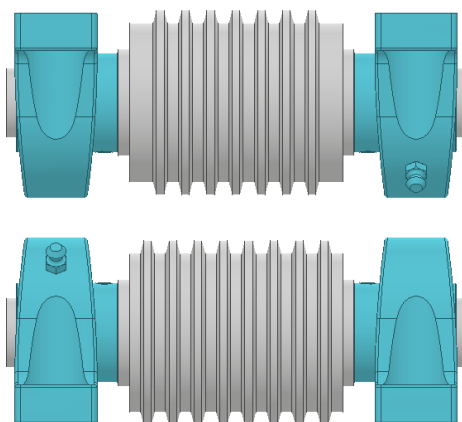
Con el propósito de validar experimentalmente el diseño presentado en los cálculos anteriores, se fabricó un prototipo funcional a escala reducida. A diferencia de un modelo escalado convencional, este prototipo conservó exactamente las mismas dimensiones transversales especificadas en la sección previa y redujo únicamente la longitud efectiva de trituración de 748 mm a 118 mm por cada eje.

Para la fabricación del prototipo se seleccionó acero AISI 1045 en lugar del acero Böehler K110 utilizado en el diseño final. Esta elección se fundamentó en dos criterios clave: primero, por su menor costo y, segundo, por su facilidad de maquinado. Dado que los ejes del prototipo poseen una longitud considerablemente menor (250 mm cada uno) en comparación con los ejes del modelo original, el uso de acero AISI 1045 mantuvo un factor de seguridad suficientemente alto, pese a ser un material de menor resistencia mecánica.

No obstante, para asegurar la validez estructural del prototipo, se realizaron nuevamente los cálculos aplicando exactamente el mismo procedimiento descrito en la sección 7.4, con las dimensiones reducidas y las propiedades mecánicas del acero 1045. Los resultados confirmaron que el prototipo satisface todos los requisitos de resistencia y funcionalidad bajo las condiciones esperadas de carga con un factor de seguridad de 19.9 en la sección crítica.

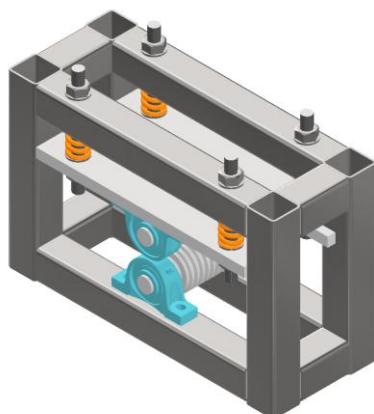
En cuanto al montaje del sistema, se seleccionaron cuatro chumaceras tipo UCP208-24 con rodamientos marca KML, dos para cada eje, debido a su adecuada capacidad de carga y disponibilidad local. El uso de estas chumaceras permitió montar y alinear los rodillos con precisión, aseguró una correcta operación y facilitó la inspección y mantenimiento periódico del sistema.

Figura 12. *Configuración de rodillos (prototipo)*



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

Figura 13. *Diseño del prototipo del sistema de trituración completo*



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

7.8. Fabricación del prototipo

La fabricación del prototipo de la trituradora de rodillos para vidrio laminado se realizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, con los talleres mecánicos y el equipo de manufactura disponibles en la institución. El proceso abarcó operaciones de torneado, fresado, corte, soldadura, perforado y ensamble, siguiendo la secuencia de manufactura establecida en los planos de diseño.

La primera etapa correspondió al maquinado de los rodillos. Estos fueron fabricados a partir de barras macizas de acero AISI 1045 de 4 pulgadas de diámetro y 20 pulgadas de longitud. Las piezas fueron mecanizadas en el torno CNC Haas TL-1, lo que permitió un maquinado veloz y con unas dimensiones y tolerancias finales que permitieron un ajuste preciso con los rodamientos (Figura 14).

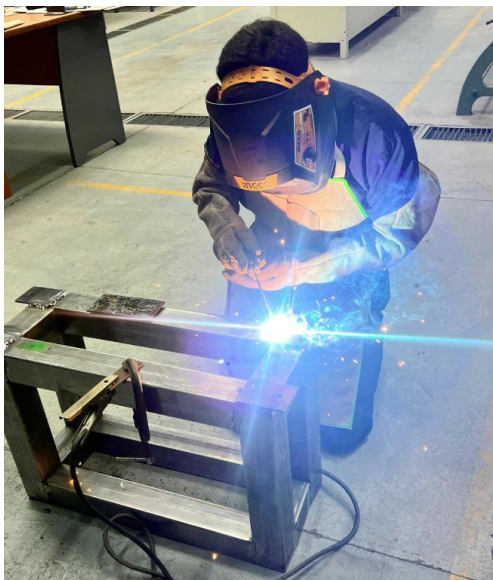
Figura 14. Montaje de barra circular en torno CNC Haas TL-1



Nota. Elaboración propia.

La segunda etapa consistió en la fabricación de la estructura metálica. Esta se construyó con tubo estructural de acero de 3" x 3" x 3/16", que en su estado de suministro era una sola pieza de 6 metros de longitud. Este tubo fue cortado según las medidas de los planos del prototipo y las uniones se realizaron mediante el proceso de soldadura por arco metálico con electrodo revestido. Durante esta fase se presentaron pequeñas desviaciones dimensionales ocasionadas por la acumulación de tolerancias y la contracción térmica del material, las cuales fueron corregidas mediante ajustes locales y verificación constante con escuadras y niveles.

Figura 15. *Proceso de soldadura en estructura metálica*



Nota. Elaboración propia.

En la tercera etapa, se fabricaron las platinas de soporte. Debido a la indisponibilidad de la sierra de cinta eléctrica, algunos cortes se efectuaron manualmente con una sierra de mano para mantener la continuidad del trabajo (Figura 16). Estas piezas fueron elaboradas en acero 1018 y fueron maquinadas y perforadas en la fresadora vertical (Figura 17) con el fin de garantizar la posición exacta de las guías y las chumaceras. Luego, se realizaron los orificios correspondientes en la estructura principal para permitir el montaje de los conjuntos. La secuencia de perforado se planificó de modo que cada pieza fuera verificada en sus dimensiones antes de proceder con el ensamble final, lo que aseguró la alineación de los ejes y el paralelismo entre los rodillos.

Figura 16. Corte de la platina hecho con segueta



Nota. Elaboración propia.

Figura 17. Maquinado de la platina con fresadora vertical



Nota. Elaboración propia.

Finalmente, se llevó a cabo el proceso de ensamble del prototipo. Todos los componentes fueron ajustados individualmente mediante el uso de calibradores vernier, escuadras y niveles. Esto permitió obtener el prototipo que se puede apreciar en la Figura 18

Figura 18. *Resultado de la elaboración del prototipo funcional*



Nota. Elaboración propia.

Todos los materiales metálicos, con excepción de los resortes de compresión, fueron adquiridos en distribuidores locales y entregados directamente a las instalaciones universitarias. Los resortes fueron importados del fabricante Lee Spring (Estados Unidos). El proceso de manufactura fue ejecutado siguiendo los protocolos de seguridad de la universidad. El registro fotográfico presentado en las figuras 14 a 18 proporciona evidencia visual del proceso de fabricación y favorece la trazabilidad del trabajo realizado, por lo que constituye una referencia para futuras investigaciones y proyectos desarrollados bajo condiciones académicas similares.

8.1. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 10. *Cumplimiento de requisitos*

Código	Descripción	Cumplimiento
ST01	El sistema debe permitir la separación mecánica del vidrio y la película de PVB con una eficiencia superior al 40%.	Cumplido
ST02	El sistema debe tener capacidad de procesamiento igual o mayor a 65 kg de vidrio por hora.	Cumplido
ST03	El sistema debe trabajar con vidrios de espesor entre 5 mm y 10 mm.	Cumplido
ST04	El sistema de resortes debe generar la fuerza necesaria para asegurar la trituración efectiva del vidrio laminado.	Cumplido
DM01	La geometría de los rodillos debe ser menor a 14" de diámetro por 40" de largo.	Cumplido
DM02	La separación entre dientes debe permitir la trituración sin dañar los componentes mecánicos.	Cumplido
OP01	El sistema de trituración debe poder ensamblarse en un espacio no mayor a 3 m de frente por 10 m de largo.	Cumplido
OP02	El diseño debe permitir desmontar los rodillos fácilmente para facilitar el mantenimiento.	Cumplido
MT01	Los rodamientos seleccionados deben tener una vida útil mínima de 12000 horas.	Cumplido
FA01	Todos los componentes deben poder ser fabricados con procesos disponibles en Guatemala.	Cumplido
FA02	Al menos el 70% de los componentes deben poder adquirirse localmente sin necesidad de importación.	Cumplido
FA03	El precio de fabricación del prototipo no debe exceder los Q5000.00	Cumplido

8.2. Resultados de los rodillos de trituración (funcionalidad y dimensionamiento)

Tras la realización de las pruebas con el prototipo, en referencia al requisito ST01 se determinó que el sistema logró una eficiencia de separación del 55% entre el vidrio y la película de PVB. Para medir esta eficiencia se pesó la muestra de vidrio laminado como se puede observar en la Figura 19 con un peso de 402 gramos, después de triturar el vidrio se pesó nuevamente el vidrio que si se separó de la película (Figura 20) con un peso de 223 gramos. Tal como se observa en la Figura 22, el proceso de trituración permitió obtener un material fragmentado con características uniformes y una adecuada liberación del polímero intermedio. El *cullet* resultante presentó dimensiones promedio de aproximadamente 2×2 cm, tamaño considerado óptimo para su posterior manejo, clasificación y reciclaje en procesos industriales de aprovechamiento del vidrio.

Figura 19. *Medición del peso del vidrio antes de ser triturado*



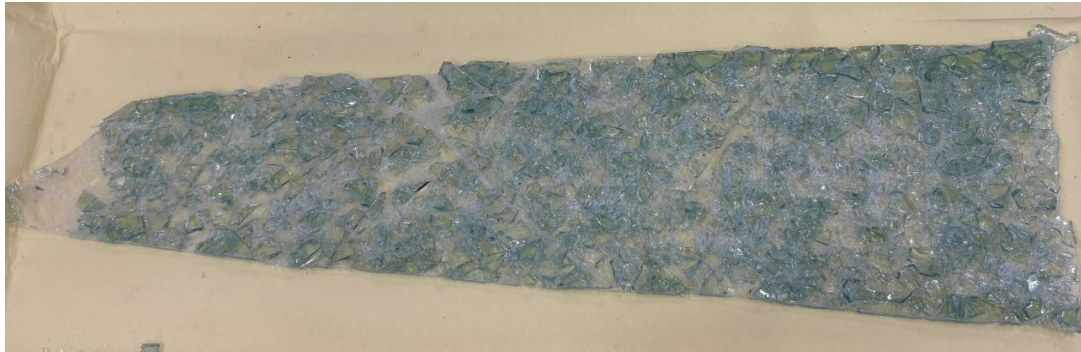
Nota. Elaboración propia.

Figura 20. *Medición del cullet desprendido de la película de PVB*



Nota. Elaboración propia.

Figura 21. Estado de la película de PVB después de la trituración



Nota. Elaboración propia.

Figura 22. Cullet obtenido

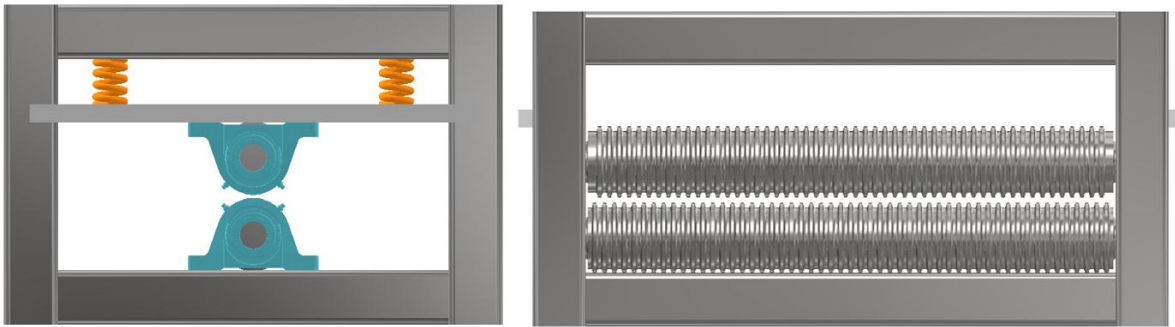


Nota. Elaboración propia.

Al traducir la eficiencia de separación del 55% a términos operativos, se estima que el sistema, con los rodillos girando a una velocidad constante de 30 rpm (equivalente a 1,800 revoluciones por hora) y procesando planchas de vidrio de 0.75 m de longitud y 10 mm de espesor, alcanza una capacidad teórica de 4.32 m³ de vidrio por hora bajo condiciones de alimentación continua. Este volumen corresponde a aproximadamente 31,147 kg de vidrio procesado por hora. Al considerar la eficiencia efectiva del sistema (55 %), la capacidad neta se reduce a 17,130.85 kg/h. Suponiendo de manera conservadora que, por cada hora de operación, la máquina dedica 30 minutos a la trituración y los 30 minutos restantes a la alimentación manual del material por parte de los operarios, se obtiene una capacidad operativa neta de 8,565.42 kg/h. Este resultado supera ampliamente el valor objetivo del requisito ST02 igual a 65 kg/h, evidenciando un rendimiento significativamente superior al esperado.

Como es posible observar en la Figura 20, el diseño obtenido del sistema de trituración cuenta con una separación entre el rodillo superior e inferior. Esta distancia puede ser graduada para trabajar con virios desde 5 mm de grosor hasta 10 mm de grosor mediante el apriete de las barras roscadas.

Figura 23. Vista frontal y lateral del sistema de trituración



Nota. Adaptada de Autodesk, Inc. (2025).

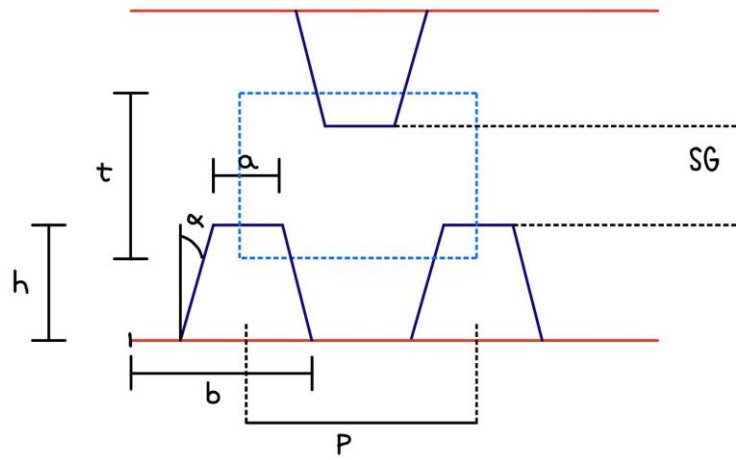
El material para los rodillos del sistema de trituración es un acero AISI D2 distribuido por Proventsa S.A. equivalente al acero K110 Böhler. Con este material se obtiene un factor de seguridad de al menos 3.27 para ambos rodillos, con vida infinita. Además, la selección de este material le da un peso a cada rodillo de 39 kg. Las demás propiedades y dimensiones geométricas están listadas en el Cuadro 11 que se presenta a continuación.

Cuadro 11. Propiedades de los rodillos de trituración

Material	Acero D2 (Böhler K110)
Dureza	Hasta 64 HRC
Resistencia última a la tensión	1.999 GPa
Resistencia última a la fluencia	1.517 GPa
Módulo de Poisson	0.29
Densidad	7695 kg/m ³
Módulo de elasticidad	207 GPa
Factor de seguridad	3.27
Peso	39 kg
Diámetro exterior	101.6 mm
Longitud	884 mm (rodillo superior) 960 mm (rodillo inferior)

Nota. Elaboración propia.

Figura 24. Geometría final de los dientes



Nota. Elaboración propia.

Cuadro 12. Valores de la geometría final de los dientes

Dimensión	Variable	Medida (mm)
Altura de diente	h	7
Base menor de diente	a	4.24
Base mayor de diente	b	8
Paso	P	14
Espesor del vidrio	t	10*
Separación entre rodillos	SG	7*
Ángulo	α	15°

* El espesor del vidrio y la separación entre rodillos se puede modificar para poder triturar vidrio desde 5mm hasta 10mm

8.3. Resultados del sistema de compresión

Acorde al requisito ST04, se determinó que el sistema de compresión puede ser construido con 2 tipos de resorte fabricados por Lee Spring. A continuación, en el Cuadro 13 y 14, se presentan las especificaciones para cada uno de estos modelos.

Cuadro 13. Propiedades de resorte LHP 437U 04S

Altura de resorte	76.20 ± 0.99 mm
Altura de resorte comprimido	61.83 mm + 5%
Constante de resorte	729.03 ± 72.9 N/mm
Fuerza a altura comprimida	10,481.2 N
Diámetro exterior	49.20 ± 1.40 mm
Precio	\$54.35 (USD)

Nota. Lee Spring® (2025).

Cuadro 14. Propiedades de resorte LHL 2000D 01

Altura de resorte	63.50± 2.24 mm
Altura de resorte comprimido	47.50 mm + 5%
Constante de resorte	437.82 ± 43.78 N/mm
Fuerza a altura comprimida	7,006.9 N
Diámetro exterior	49.28 mm
Precio	\$27.93 (USD)

Nota. Lee Spring® (2025).

8.4. Resultados de vida de rodamientos

Utilizando rodamientos y chumaceras de la marca SKF, La vida útil de cada rodamiento es de calculada del sistema es de 11,700 horas, lo cual representa un 2.5 % menos respecto al requisito establecido de 12,000 horas. En el caso del sistema (1 rodillo, 2 rodamientos) la vida es de 7,360 horas y del sistema completo (2 rodillos, 4 rodamientos) es de 4,700 horas.

Cuadro 15. *Resumen de vida de los rodamientos*

Nivel del sistema	Condición	Fiabilidad	Vida estimada (h)
Rodamiento individual	Ciclo de trabajo = 0.5	95%	11,700
Rodillo (2 rodamientos)	Serie funcional	95%	7,360
Sistema completo (4 rodamientos)	Serie funcional	95%	4,700

Nota. Elaboración propia.

8.5. Resultados del prototipo

Como se puede observar en el Cuadro 16, los costos de fabricación del prototipo utilizan el 99 % de los recursos destinados originalmente a este rubro. Con base en los componentes listados fue posible construir un prototipo funcional del sistema de trituración completo, incluyendo rodillos y resortes (Figura 22).

De todos los componentes enlistados en el Cuadro 16, solo los resortes de compresión fueron comprados por medio de importación, lo que significa que el 89 % de los componentes tienen disponibilidad en el mercado local de Guatemala.

Cuadro 16. *Costos de fabricación del prototipo*

Componente	Proveedor	Unidades	Precio por unidad
Rodillos de trituración (acero 1045)	Proventsa S. A.	2	Q516.00 c/u
Resortes de compresión LHL 2000D 01	Lee Spring USA	4	Q213.66 c/u
Planchas de acero para soporte de chumaceras (acero 1018)	Proventsa S.A.	2	Q610.00
Chumaceras UCP 208-24 marca New KLN	Incaprosa	4	Q150.00
Tubo cuadrado 3" x 3" x 3/16" 6 m de largo	Proventsa S.A.	1	Q850.00
Barra roscada 1" x 1 m de largo	Novex	1	Q135.00
Tuerca hexagonal 1" UNC, grado 2	Novex	8	Q12.43
Roldana plana 1" USS	Novex	16	Q3.50
Tornillo hexagonal 1/2" x 2 1/2" GR8	Novex	8	Q9.0
Roldana plana 1/2" USS	Novex	8	Q1.50
Tuerca hexagonal, rosca ordinaria 1/2"	Novex	4	Q1.30
Total			Q4,936.28

Nota. Elaboración propia.

Figura 25. *Prototipo funcional*



Nota. Elaboración propia.

9.1. Discusión sobre requisitos del sistema de trituración

Mediante a la fabricación del prototipo del sistema de trituración y las pruebas realizadas, se comprobó que el equipo alcanzó una eficiencia de separación del 55 %, resultado atribuible a la combinación del esfuerzo de compresión ejercido por los rodillos y la fricción generada durante el contacto con el vidrio laminado. La configuración intercalada de los dientes permitió que las capas de vidrio y PVB se fragmentaran de forma controlada, mantuvo la película polimérica unida en una sola pieza y separó los fragmentos de vidrio. Este comportamiento confirmó que la interacción entre presión, fricción y geometría del dentado fue suficiente para promover la deslaminación mecánica del vidrio laminado.

La capacidad de procesamiento del sistema está sujeta a la velocidad de rotación de los rodillos, la tasa de alimentación del material y la longitud efectiva de la zona de trituración. A una velocidad de 30 rpm, el sistema alcanza teóricamente una capacidad de hasta 31,147 kg/h de vidrio, bajo condiciones de alimentación continua y eficiencia ideal del 100 %.

En condiciones operativas reales, donde la carga de las planchas se realiza manualmente por uno o dos operadores, la tasa de alimentación se ve limitada por factores humanos y logísticos. Al considerar estas restricciones, y asumiendo un rendimiento operativo efectivo del 50%, combinado con la eficiencia real de trituración con un valor del 55%, se obtiene una capacidad de procesamiento de 8,565.42 kg/h.

Este valor supera en un 13,074 % (equivalente a 132.54 veces) la capacidad mínima de diseño establecida en 65 kg/h (requisito ST02), lo que evidencia un margen operativo amplio y confirma la eficiencia del sistema incluso bajo condiciones manuales de alimentación. Todo lo mencionado anteriormente fue validado mediante las pruebas correspondientes del prototipo. Los resultados demuestran la viabilidad técnica de la máquina, así como su potencial de escalabilidad y aplicación en entornos industriales.

El diseño ajustable entre los rodillos permite trabajar con vidrios de entre 5 mm y 10 mm de espesor. Esta versatilidad se logró gracias al diseño del sistema de resortes. Durante la fabricación del prototipo, pequeñas desviaciones en la estructura fueron compensadas mediante roldanas utilizadas como espaciadores, una solución práctica que permitió conservar la funcionalidad sin alterar la configuración general del equipo.

El sistema de compresión se comportó de manera predecible gracias a la selección de resortes con constantes elásticas apropiadas para las cargas calculadas. La rigidez de estos elementos permitió distribuir uniformemente la presión durante la trituración, lo que favoreció una trituración uniforme.

9.2. Discusión sobre requisitos de diseño y maquinabilidad

Las dimensiones finales proyectadas para los rodillos son de 101.6 mm de diámetro, 884 mm y 960 mm de longitud para los rodillos superior e inferior, respectivamente, cumplieron con las condiciones necesarias para que las piezas pudieran ser maquinadas con los tornos disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). Además, dichos valores permitieron establecer que, en un escenario de fabricación real, los componentes pudieran ser sometidos a tratamientos térmicos sin exceder las capacidades de los hornos industriales disponibles localmente.

Aunque los rodillos de la máquina final no fueron fabricados, la elaboración del prototipo permitió validar el cumplimiento de los requisitos de diseño DM01 y DM02. Esto permitió verificar tanto la factibilidad de manufactura como la viabilidad de tratamiento térmico en caso de que se decidiera construir el sistema a escala real. Esta correspondencia entre geometría y capacidad de manufactura local demuestra un diseño correctamente adaptado al contexto productivo.

Durante las pruebas del prototipo se observó una relación directa entre el tamaño y la separación de los dientes con las características del cullet obtenido. Se determinó que, a medida que disminuye la distancia entre los rodillos, se obtiene una mayor eficiencia de separación entre las capas de vidrio y PVB, lo que favorece la deslaminación mecánica. La geometría de los dientes se comportó de forma óptima, ya que la separación entre perfiles permitió la fragmentación del vidrio sin generar daños estructurales ni esfuerzos excesivos sobre los componentes del sistema.

No obstante, se identificó que una fracción del material procesado se transformó en polvo fino, lo cual constituye una limitación relevante. Este polvo, debido a su naturaleza altamente abrasiva, puede generar desgaste prematuro en la superficie de los rodillos por efecto del roce continuo entre el vidrio, el polvillo y las planchas procesadas. Por esta razón, se estableció que en una implementación real del sistema sería necesario emplear acero AISI D2 (Böhler K110) con su tratamiento térmico correspondiente, a fin de reducir la abrasión y preservar la geometría del rodillo. De no hacerlo, la pérdida progresiva de material en la superficie de los rodillos podría incrementar la separación entre ellos y provocar una disminución en la eficiencia del proceso de trituración y deslaminación.

9.3. Discusión sobre requisitos operativos

El sistema mantuvo un tamaño compacto y una distribución de componentes que facilitan su instalación en espacios industriales con dimensionamientos similares a los de la restricción planteada de 3 metros de frente y 10 de largo. Su configuración, con una base metálica robusta y rodillos alineados longitudinalmente, permitió un montaje estable en el proceso de prototipado sin necesidad de anclajes adicionales.

El diseño favoreció también el mantenimiento preventivo. El peso individual de los rodillos (39 kg) se mantuvo dentro del rango manejable para su desmontaje mediante dos operarios o con el uso de apoyos mecánicos simples, como gatos o soportes de rodillos. Este valor se encuentra dentro de los límites establecidos por las recomendaciones del NIOSH (1994), lo que favorece una manipulación segura y ergonómica durante las labores de mantenimiento.

9.4. Discusión sobre requisitos de mantenimiento

La vida útil estimada de los rodamientos del sistema de trituración fue de aproximadamente 11,700 horas con una fiabilidad del 95 %. Este valor, aunque ligeramente inferior al valor de referencia recomendado por el catálogo NTN 2202- /S para equipos de trituración, establecido en 12,000 horas, representa una diferencia del 2.5 %, considerada marginal y técnicamente aceptable dentro del rango de tolerancia para aplicaciones de este tipo.

La recomendación de NTN se basa en tablas de referencia que orientan la selección de rodamientos según el tipo de carga, condiciones de operación y categoría de maquinaria. Dichas tablas sirven como guía para estimar una vida útil esperada en función del nivel de severidad del trabajo. En este contexto, la ligera desviación respecto al valor ideal se atribuye principalmente al uso de rodamientos rígidos de bolas, los cuales poseen una capacidad de carga dinámica inferior frente a los rodamientos de rodillos esféricos, recomendados para cargas más pesadas o con impacto.

A pesar de esta diferencia, el desempeño de los rodamientos seleccionados fue adecuado para el nivel de exigencia del prototipo, ya que las cargas predominantes fueron radiales, intermitentes y de magnitud controlada. Además, la decisión de emplear este tipo de rodamientos respondió a criterios de viabilidad económica, mantenibilidad y disponibilidad local, con prioridad en la funcionalidad y la reposición rápida frente a la durabilidad prolongada. Esta estrategia es coherente con el enfoque experimental y de validación técnica del proyecto, donde se busca demostrar la factibilidad del sistema antes de su optimización industrial.

Un aspecto particularmente relevante es la reducción progresiva de la vida útil al analizar el sistema en sus diferentes niveles:

- Para un rodamiento individual, la vida útil estimada fue de 11,700 horas.
- Al considerar un rodillo completo (dos rodamientos en serie funcional), la vida se redujo a 7,360 horas.
- Finalmente, para el sistema total de cuatro rodamientos, la vida equivalente se estimó en 4,700 horas.

Estos resultados demuestran que, incluso bajo operación continua de tres turnos diarios, los rodamientos tendrían una vida útil superior a medio año, lo que es aceptable para un sistema prototipo. En términos específicos, si el sistema opera en un turno de 8 horas diarias, los rodamientos deberían reemplazarse aproximadamente cada 19.6 meses; en dos turnos (16 horas), el intervalo de sustitución se reduciría a 9.8 meses; y en operación continua de tres turnos (24 horas), el reemplazo sería necesario cada 6.5 meses. Estos valores evidencian que, aun en condiciones de trabajo intensivo, la durabilidad del sistema es suficiente para validar la selección de componentes y consolidan esta configuración como una alternativa viable, rentable y técnicamente coherente para el proyecto.

9.5. Discusión sobre requisitos de fabricación y materiales

Todas las piezas del sistema fueron fabricadas con procesos de manufactura convencionales como torneado, fresado, perforado y soldadura, con equipos disponibles en los talleres de la Universidad del Valle de Guatemala. Esto confirmó la capacidad local para reproducir el prototipo sin requerir tecnología especializada.

De los nueve componentes principales, solo uno fue importado, con un peso inferior a tres libras, lo que demuestra un alto grado de independencia de la cadena de suministro internacional. Esta condición es favorable para el mantenimiento del sistema y su replicabilidad en entornos industriales locales.

El costo total de fabricación fue de Q4 936.28, valor que evidencia una gestión eficiente de los recursos materiales y financieros. Sin embargo, se identificó que los costos indirectos asociados al uso de maquinaria, herramientas y consumibles podrían aumentar el valor final hasta en 2.5 veces si el sistema se fabricara externamente. Este hallazgo resalta la necesidad de considerar un margen presupuestario adicional para futuras implementaciones industriales.

Conclusiones

- El sistema de trituración desarrollado cumplió con el requisito ST01, alcanzando una eficiencia de separación del 55 % entre el vidrio y la película de PVB, lo que superó el valor mínimo planteado (40 %). Esto demuestra la efectividad del diseño mecánico en la disgregación del vidrio laminado sin necesidad de procesos térmicos o químicos.
- La capacidad de procesamiento del sistema fue significativamente superior a la planteada (65 kg/h), con una capacidad real de 8,565.42 kg/h. Se verifica así tanto el cumplimiento del requisito ST02 como la validación del potencial del equipo para llevarse a nivel industrial y posicionarlo como una alternativa para el reciclaje de vidrio laminado en Guatemala.
- En cuanto al espesor del vidrio procesado, el sistema cumplió con el rango operativo de 5 mm a 10 mm (ST03), lo que aseguró su compatibilidad con los formatos comerciales del vidrio arquitectónico nacional y confirmó la pertinencia del diseño frente al mercado local.
- El sistema de resortes cumplió con el requisito ST04, generando la fuerza necesaria para garantizar la trituración efectiva del vidrio. La selección de resortes importados permitió obtener una respuesta mecánica precisa, lo que optimizó el desempeño general del prototipo.
- En cuanto al dimensionamiento, los rodillos cumplen con los límites geométricos establecidos (DM01), con un diámetro de 101.6 mm en ambos casos y longitudes de 884 mm y 960 mm para el rodillo superior e inferior, respectivamente. Estas dimensiones garantizan su maquinabilidad en torno y su aptitud para el tratamiento térmico local. Asimismo, la separación entre dientes (DM02) permitió una trituración eficiente sin comprometer la integridad de los componentes estructurales.
- Aunque el requisito MT01 de vida útil mínima de 12,000 h no se alcanzó (11,700 h obtenidas por rodamiento), la selección de rodamientos rígidos de bolas se justifica por su bajo costo, disponibilidad local y facilidad de sustitución, factores que reducen el impacto económico del mantenimiento y aseguran la operatividad continua del sistema.

- En los requisitos de fabricación y materiales (FA01, FA02 y FA03), el prototipo demostró ser completamente fabricable con procesos locales, utilizando materiales nacionales en un 89 %, con un costo total de Q 4 936.28, dentro del presupuesto máximo establecido. Esto confirma la viabilidad técnica y económica del proyecto en el contexto guatemalteco.

Recomendaciones

- Se recomienda desarrollar un sistema automatizado o semiautomatizado de alimentación de vidrio, con el fin de mantener un flujo constante de material hacia los rodillos. Esto permitiría acercar la capacidad de procesamiento real a la teórica calculada y reducir la dependencia de la manipulación manual por parte de los operadores.
- Se recomienda establecer un protocolo de control dimensional más riguroso para reducir desviaciones durante el proceso de manufactura. Un ajuste más preciso de las tolerancias permitiría eliminar la necesidad de espaciadores y mejorar la alineación de los rodillos, lo que garantiza una distribución uniforme de esfuerzos.
- Para estimar la durabilidad de los rodillos, se sugiere evaluar el comportamiento del acero del prototipo (1045) frente a la abrasión del vidrio mediante pruebas prolongadas. También se podrían elaborar rodillos de acero D2 y analizar con aplicación de recubrimientos duros (como nitruración o cromado) los efectos que el vidrio genera en las superficies de los rodillos con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso a largo plazo.
- Se recomienda realizar pruebas continuas bajo condiciones de operación industrial para validar el rendimiento sostenido del sistema por medio del prototipo construido y evaluar su comportamiento ante vibraciones y ciclos prolongados de trabajo. Estos ensayos permitirían establecer curvas de desempeño más precisas y definir un plan de mantenimiento óptimo.
- Con el fin de proyectar la viabilidad de producción a nivel comercial, se sugiere desarrollar un estudio económico detallado que contemple costos indirectos (energía, mano de obra, mantenimiento y consumo de herramientas) y compare diferentes escenarios de fabricación, tanto local como tercerizada.
- Se propone extender las pruebas a diferentes configuraciones de vidrio laminado (como vidrios automotrices o con películas EVA y TPU), para determinar la versatilidad del sistema y su posible aplicación en otras industrias del reciclaje.

Referencias

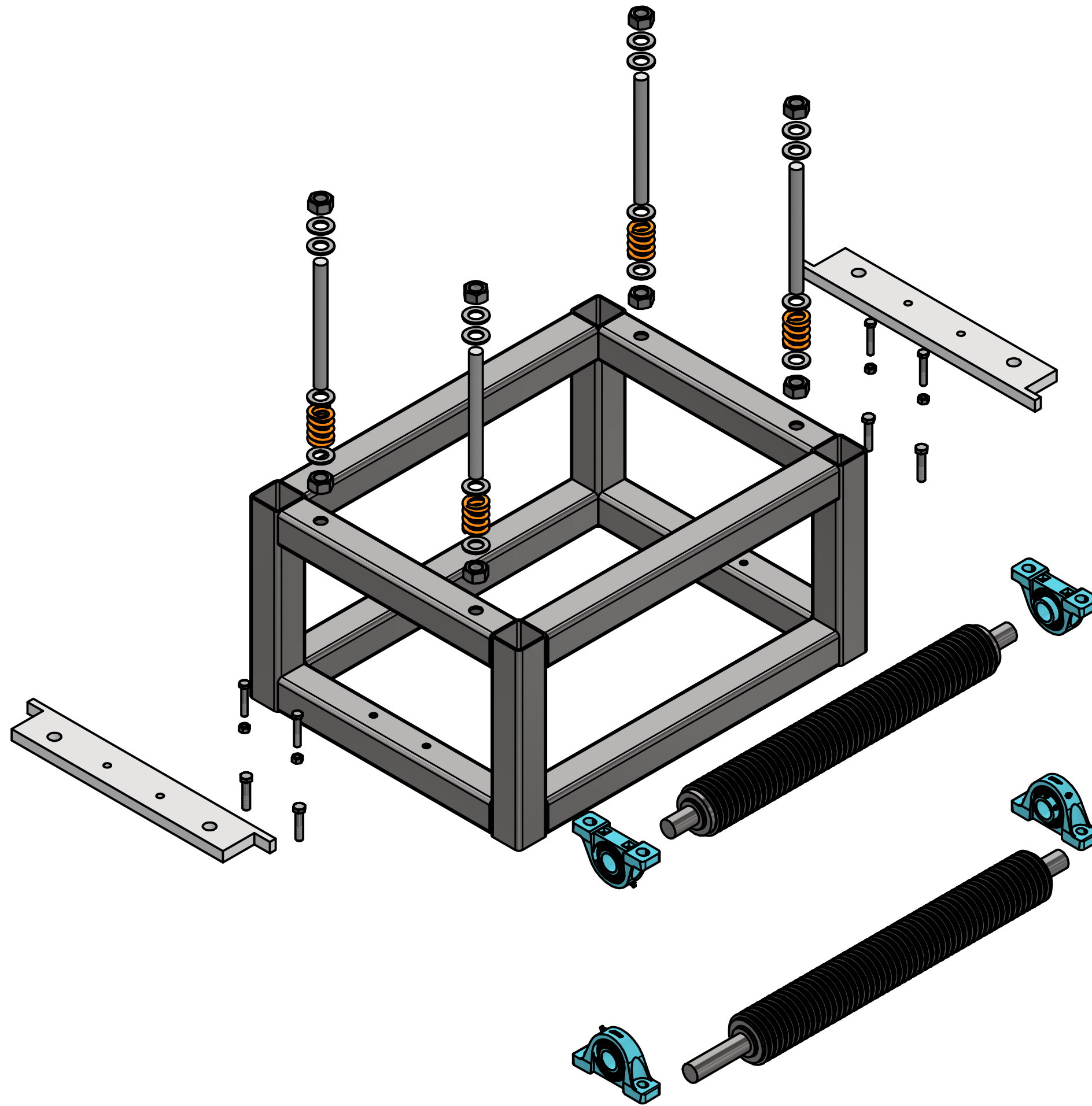
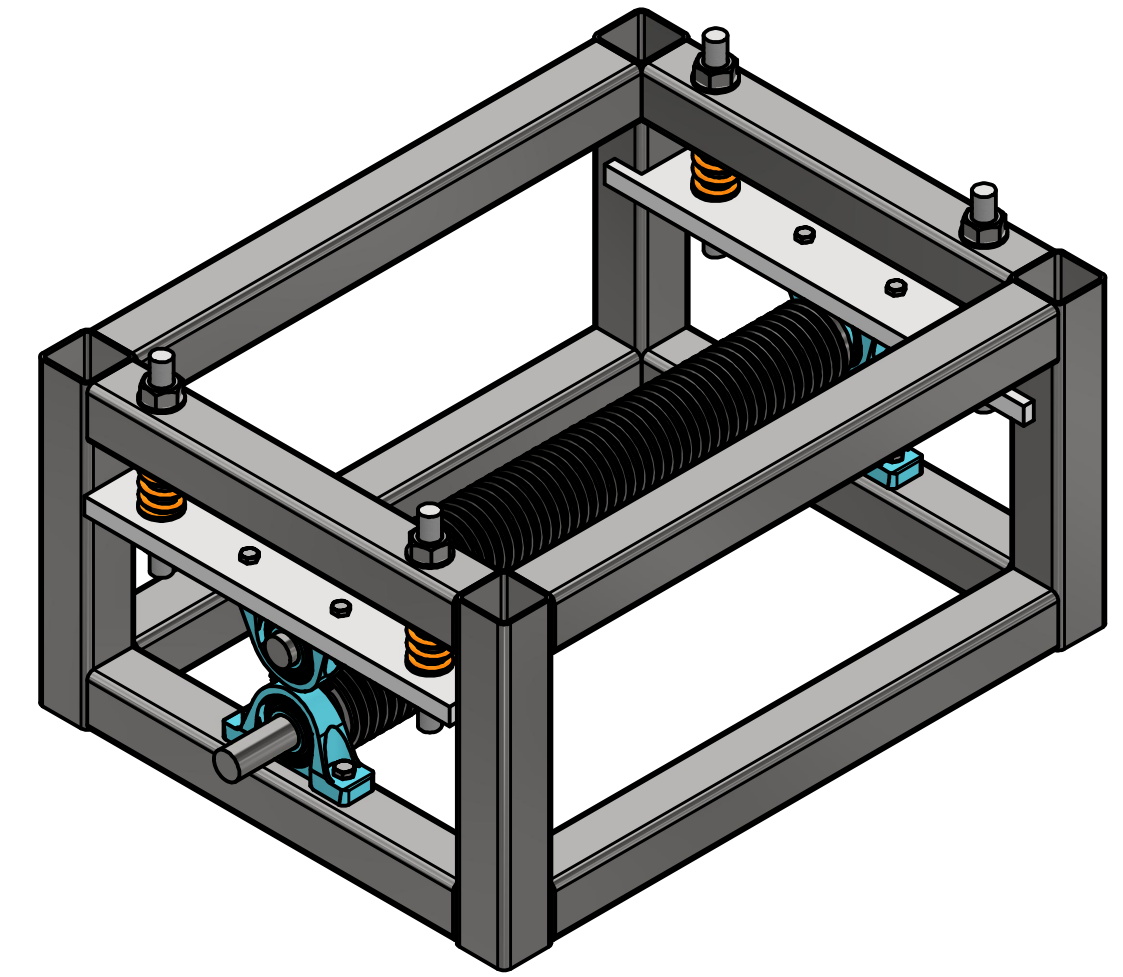
- AT Minerals. (2024). *Trends in the crusher market and operational challenges*. <https://www.atminerals.com/en/artikel/at-Trends-in-the-crusher-market-and-operational-challenges-3672765.html>
- Binder+Co. (2024). *Double roll crusher*. <https://www.binder-co.com/en/products/crushing/double-roll-crusher/>
- Brandner, M., Paar, A., Mul, S., y Weinberger, R. (2020). New alloying concept for finishing mill rolls including results in application and surface tests. *Tecnologia Metalúrgica, Materiais e Mineração*, 17(2), 137–148. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20202277>
- DeBrincat, G., y Babic, E. (2019). Rethinking the life-cycle of architectural glass. *Glass Performance Days*. <https://www.glassonweb.com/article/rethinking-life-cycle-architectural-glass>
- FLSmidth. (2024). *ERC Eccentric Roll Crusher*. <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/crushing-and-sizing/erc-eccentric-roll-crusher>
- GlassOnline. (2024). *Forglass Double Roll Crusher – the key to effective glass recycling*. <https://www.glassonline.com/forglass-double-roll-crusher-the-key-to-effective-glass-recycling/>
- Infinite Recycled Technologies. (13 de junio de 2023). Infinite Recycled Technologies minimizes glass waste through laminated glass recycling. *USGlass Magazine*. <https://www.usglassmag.com/infinite-recycled-technologies-minimizes-glass-waste-through-laminated-glass-recycling/>
- Moeyersons, L. (11 de abril de 2023). *Recycling laminated glass*. GlassOnWeb. <https://www.glassonweb.com/article/recycling-laminated-glass-luc-moeyersons>
- NASA. (mayo de 2023). *Construir, lanzar, recuperar: Cómo la NASA desarrolla y gestiona sus misiones espaciales* <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/05/construir-lanzar-recuperar-508-1.pdf>
- National Glass Association y Glass Association of North America. (2021). *FB40-14: Guidelines for the use of laminated glass in buildings*.

- Oficina Estatal de Patentes de China. (2019). CN107639767B - *Línea de producción para la separación automática de vidrio laminado*. Google Patents. <https://patents.google.com/patent/CN107639767B>
- Oficina Japonesa de Patentes. (2018). *Sistema de trituración de vidrio laminado (JP2018001234A)*. Qizhidao. <https://patents.qizhidao.com/zhuanli/e284d4c510c6a8f0bdd693fcdef1f4f.html>
- Oikonomopoulou, F., DeBrincat, G., y Fuhrmann, S. (2023). Glass and circularity. *Glass Structures & Engineering*, 8, 165–166. <https://doi.org/10.1007/s40940-023-00230-3>
- Sooš, L., Matúš, M., Pokusová, M., Čačko, V., y Bábics, J. (2021). The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies. *Recycling*, 6(2), 26. <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>
- UNIDO. (2020). *Glass polishing powder recycling technology*. UNIDO Technology Database.
- UNIDO. (2020). *Laminated glass recycling technology*. UNIDO Technology Database.
- Weihua, W., Haipeng, Y., Hongwei, Z., y Yaning, C. (2020). Optimal design and force analysis for key components of vertical roller mill. *International Journal of Performability Engineering*, 16(11), 1698–1707. <https://doi.org/10.23940/ijpe.20.11.p2.16981707>
- Xia, W., Yue, Z., y Zang, M. (2023). Impact fracture simulation of laminated glass based on thick shell elements and a cohesive zone model. *Materials*, 16(21), 6966. <https://doi.org/10.3390/ma16216966>
- Zhou, S., Cattaneo, S., y Biolzi, L. (2023). Review of the main mechanical testing methods for interlayer characterization in laminated glass. *Applied Sciences*, 13(15), 8733. <https://doi.org/10.3390/app13158733>

13.1. Planos de construcción

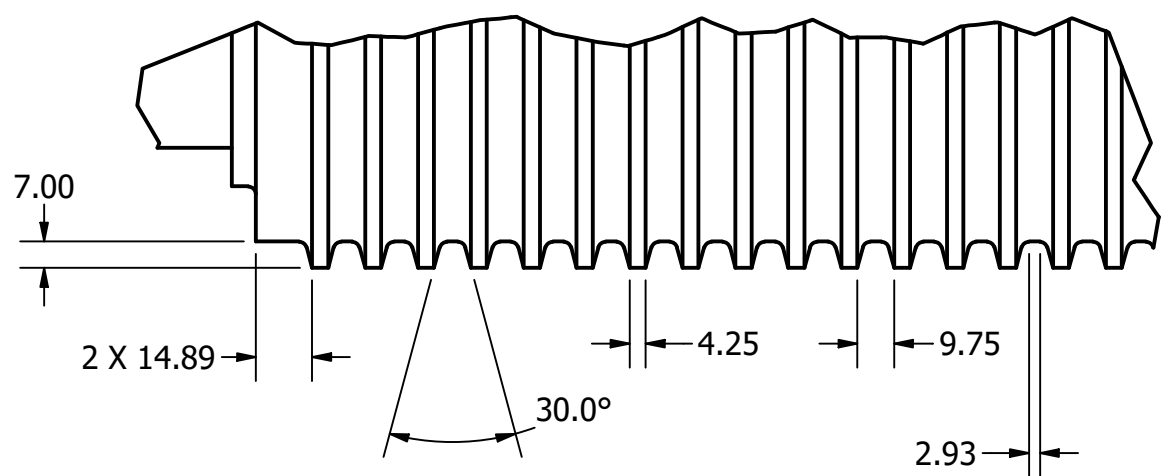
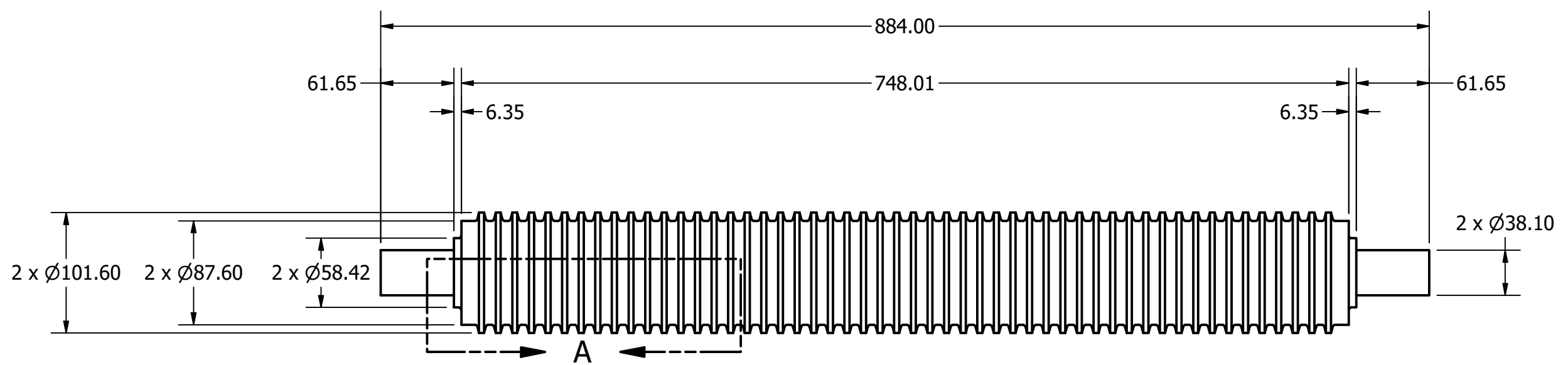
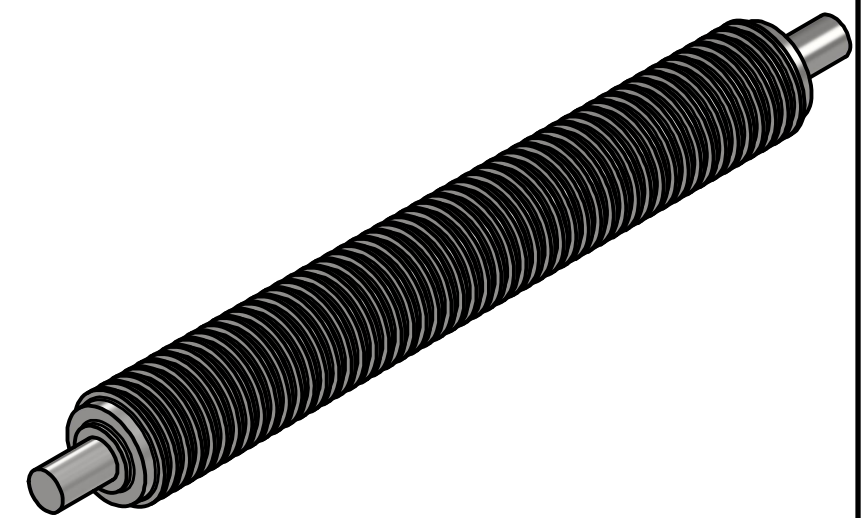
A continuación, se presenta el juego de planos del diseño de una trituradora de vidrio laminado. En primer lugar, se muestra el plano general de la máquina junto con una vista explosionada, con el propósito de identificar sus componentes principales y la forma en que se integran dentro del conjunto. Posteriormente, se detallan los planos del rodillo superior e inferior, con sus respectivas dimensiones para su correcta fabricación. Luego, se presenta la estructura metálica que sirve como soporte de los rodillos, fabricada con tubo estructural de $3" \times 3" \times 3/16"$. Por último, se incluyen las platinas metálicas destinadas al montaje de las chumaceras, las cuales permiten la sujeción y alineación adecuada de los rodillos dentro del sistema.

LISTADO DE PARTES				
PARTE	CANT	NOMBRE DE PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	RODILLO SUPERIOR	RODILLO DE TRITURACIÓN MÓVIL	ACERO BOHLER K110
2	1	RODILLO INFERIOR	RODILLO DE TRITURACIÓN FIJO	ACERO BOHLER K110
3	1	ESTRUCTURA	TUBO CUADRADO 3" x 3" x 3/16	ACERO AL CARBONO
4	1	PLATINA	SOPORTE PARA EL RODILLO SUPERIOR MÓVIL	ACERO 1018
5	4	BARRA ROSCADA 1"	1"-8 UNC x 280 mm	ACERO GALVANIZADO
6	8	TUERCA HEXAGONAL 1"	1"-8 UNC, GRADO 2	ACERO GALVANIZADO
7	4	LEE SPRING LHL 2000D 01	RESORTE DE COMPRESIÓN	ACERO SILÍCIO-CROMO TEMPLADO EN ACEITE
8	4	SKF UCP 208-24	CHUMACERA CON RODAMIENTO RÍGIDO DE BOLAS	VARIOS
9	16	ROLDANA 1"	1" USS	ACERO AL CARBONO
10	8	TORNILLO HEXAGONAL 1/2"	TORNILLO HEXAGONAL 1/2" X 2 1/2" GR8	ACERO GALVANIZADO
11	4	TUERCA HEXAGONAL 1/2"	TUERCA HEXAGONAL ROSCA ORDINARIA 1/2"	ACERO GALVANIZADO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009. TOLERANCIAS GENERALES LINAL .X ± 0.5 .XX ± 0.10 .XXX ± 0.050 ANGULAR ± 1° FRACCIONES ± 1/32" RUGOSIDAD SUPERFICIAL N/A	DIBUJADO POR DANIEL DIAZ	FECHA 04/01/2025	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 dia21133@uvvg.edu.gt
	DISEÑADO POR DANIEL DIAZ	FECHA 04/01/2025	
	REVISADO POR RONY HERRARTE	FECHA 13/10/2025	
	APROBADO POR RONY HERRARTE	FECHA 28/10/2025	
MATERIAL VER LISTADO TRATAMIENTO N/A MASA: N/A	TÍTULO: SISTEMA TRITURACION PARA VIDRIO LAMINADO		NÚMERO DE DIBUJO: 1
 TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO TRITURADORA DE VIDRIO LAMINADO		ESCALA: 1:8
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.			UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 5

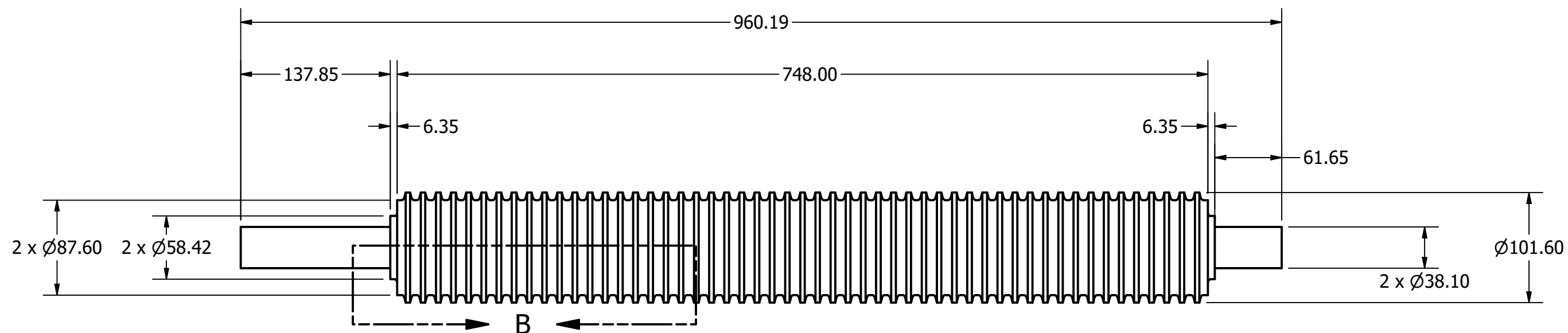
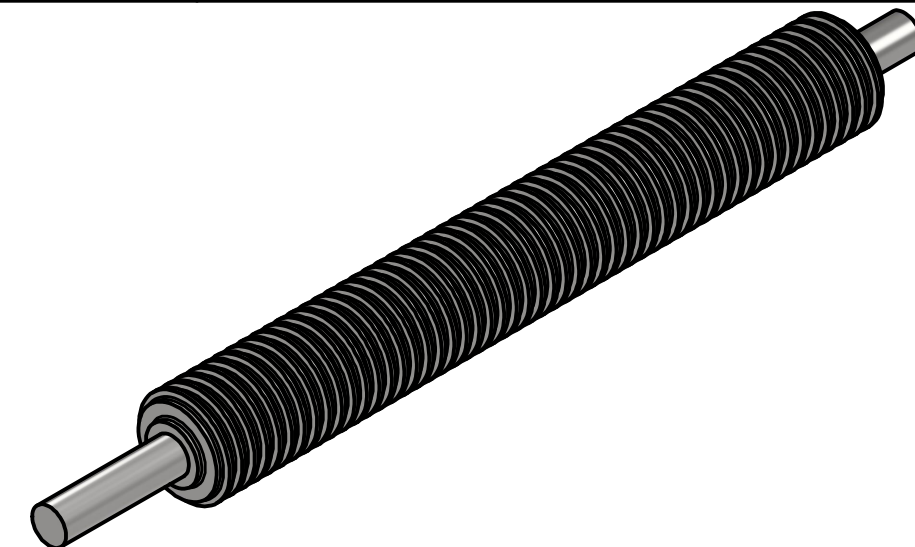
NOTA #1
 TODOS LOS REDONDEOS SON DE 2 MM
 REMOVER FILOS VIVOS



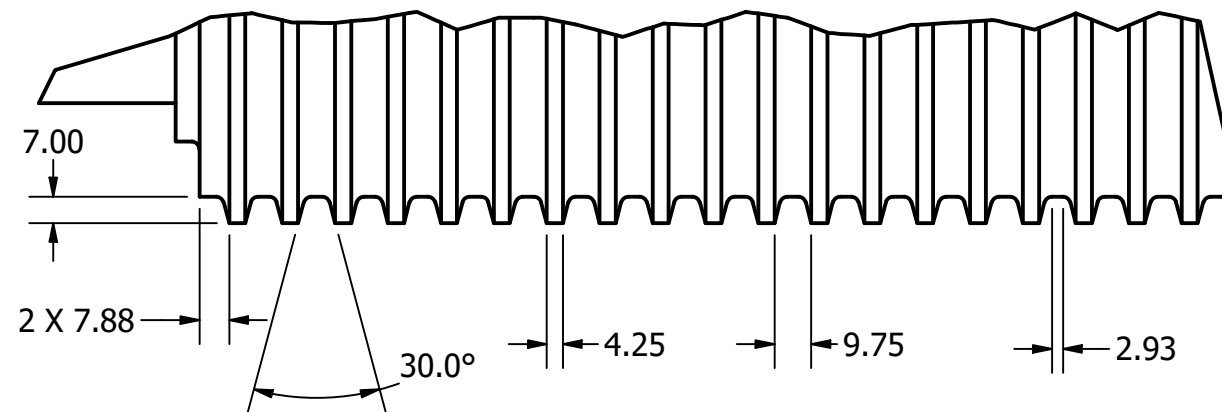
DETALLE A
 ESCALA 1 / 2

TÍTULO: RODILLO SUPERIOR		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 2 DE 5	REV 0

NOTA #2
 TODOS LOS REDONDEOS SON DE 2 MM
 REMOVER FILOS VIVOS



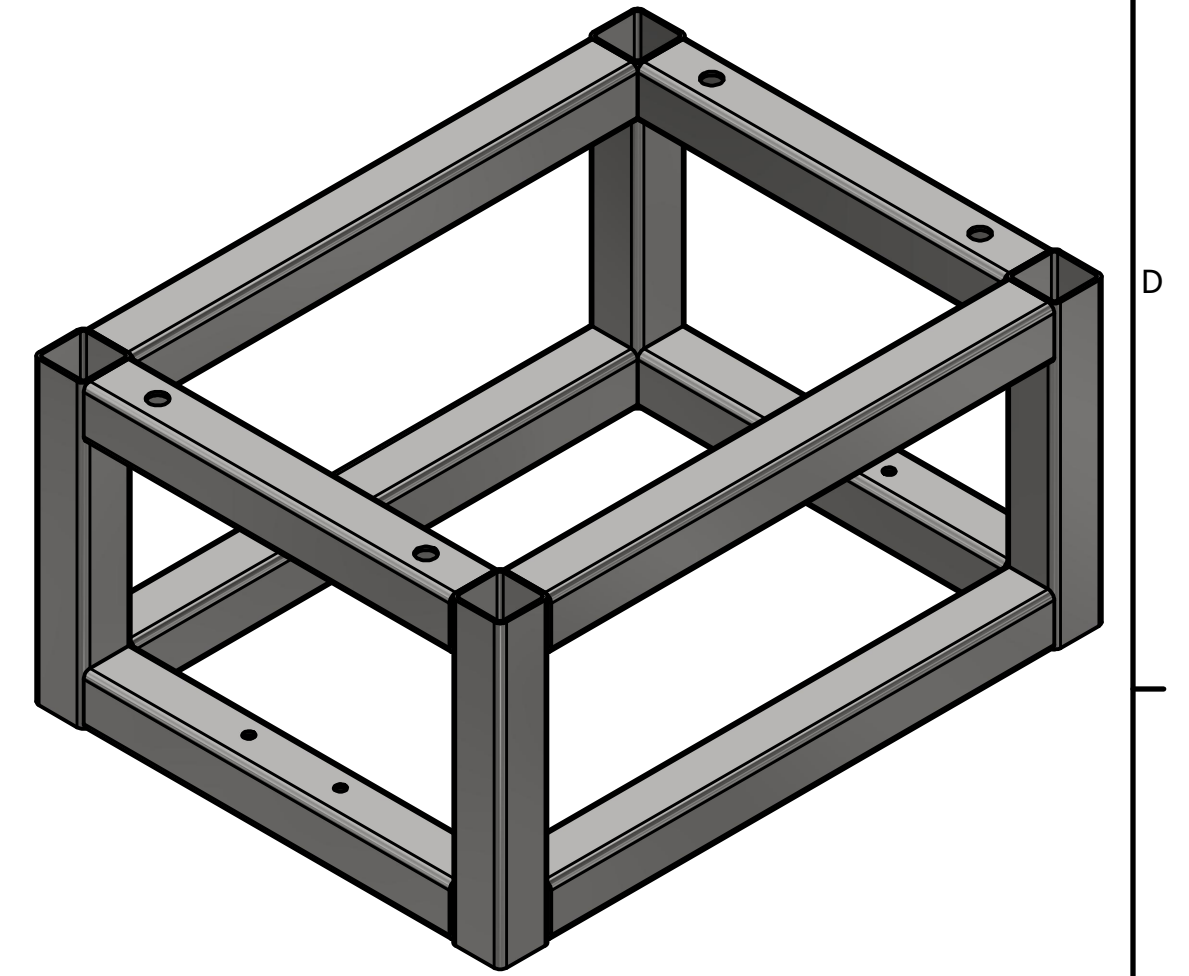
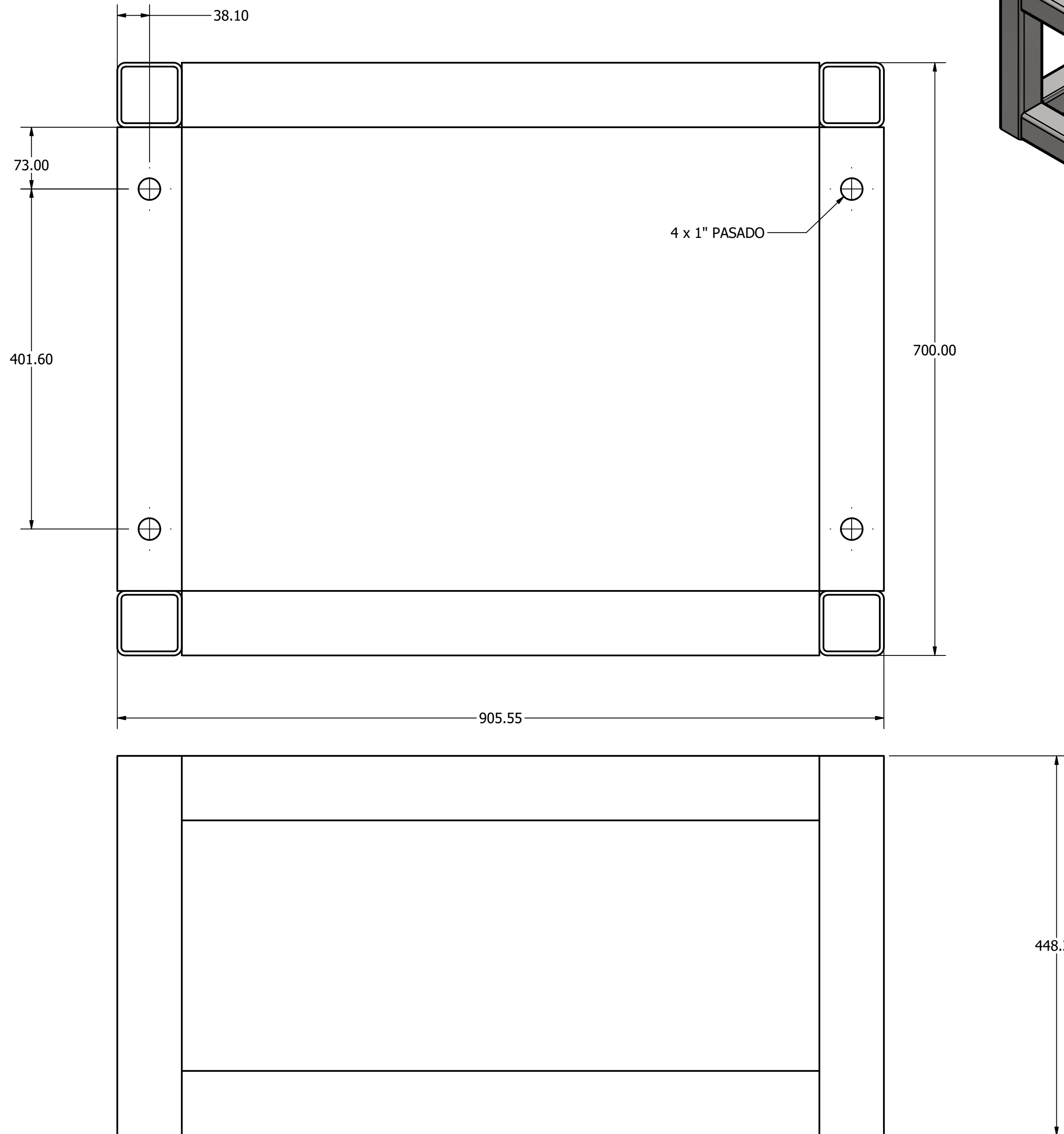
DETALLE B
 ESCALA 1 / 2



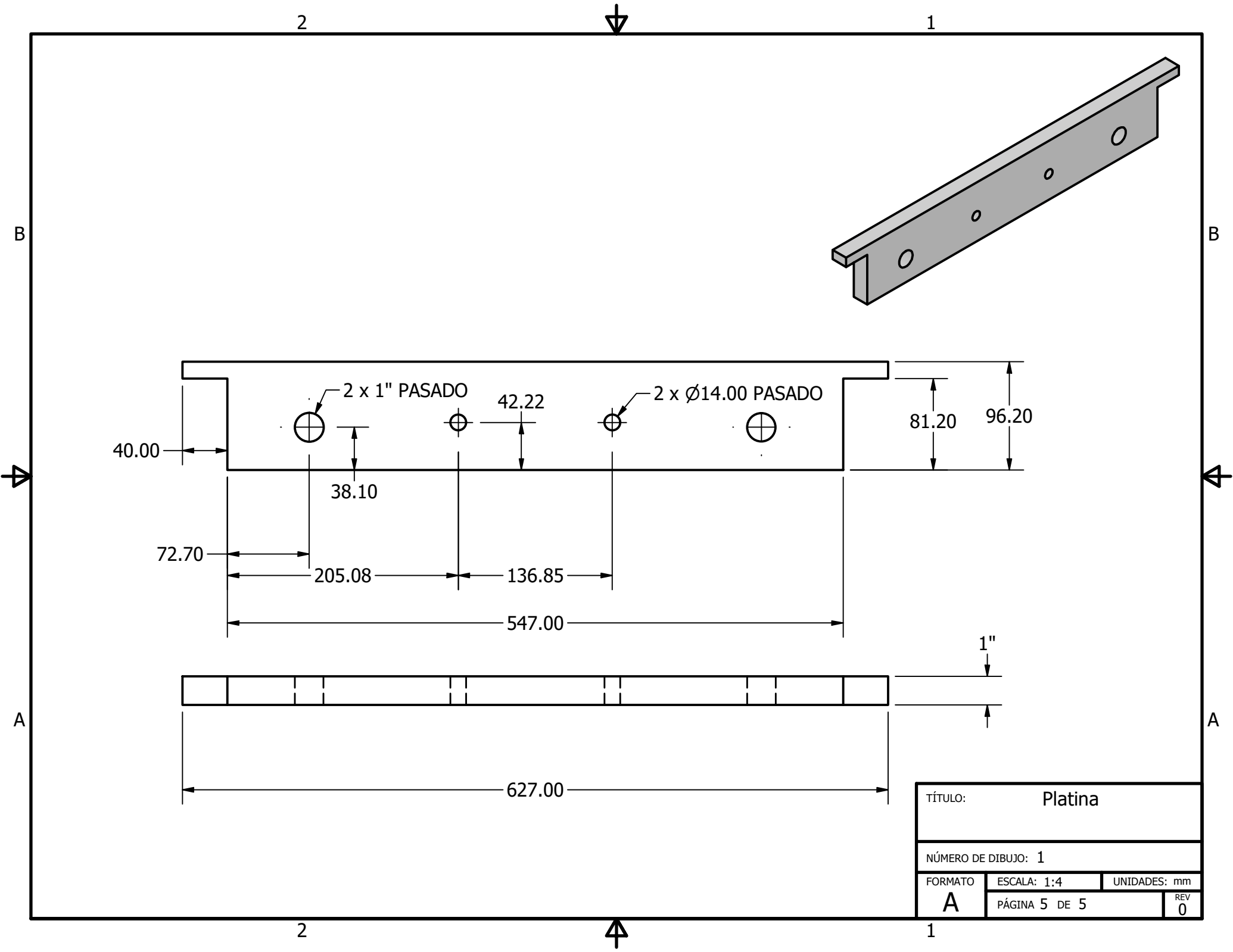
TÍTULO: Rodillo Inferior		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO: B	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
PÁGINA 3 DE 5		REV 0

NOTA #3

TODAS LAS UNIONES ENTRE PERFILES SE SOLDARÁN CON CORDÓN CONTINUO EN TODO EL CONTORNO, UTILIZANDO ELECTRODO ECA 7018 Ø 1/8" CONFORME A NORMA AWS D1.1.



TÍTULO: Estructura		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO: C	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
PÁGINA 4 DE 5		REV 0

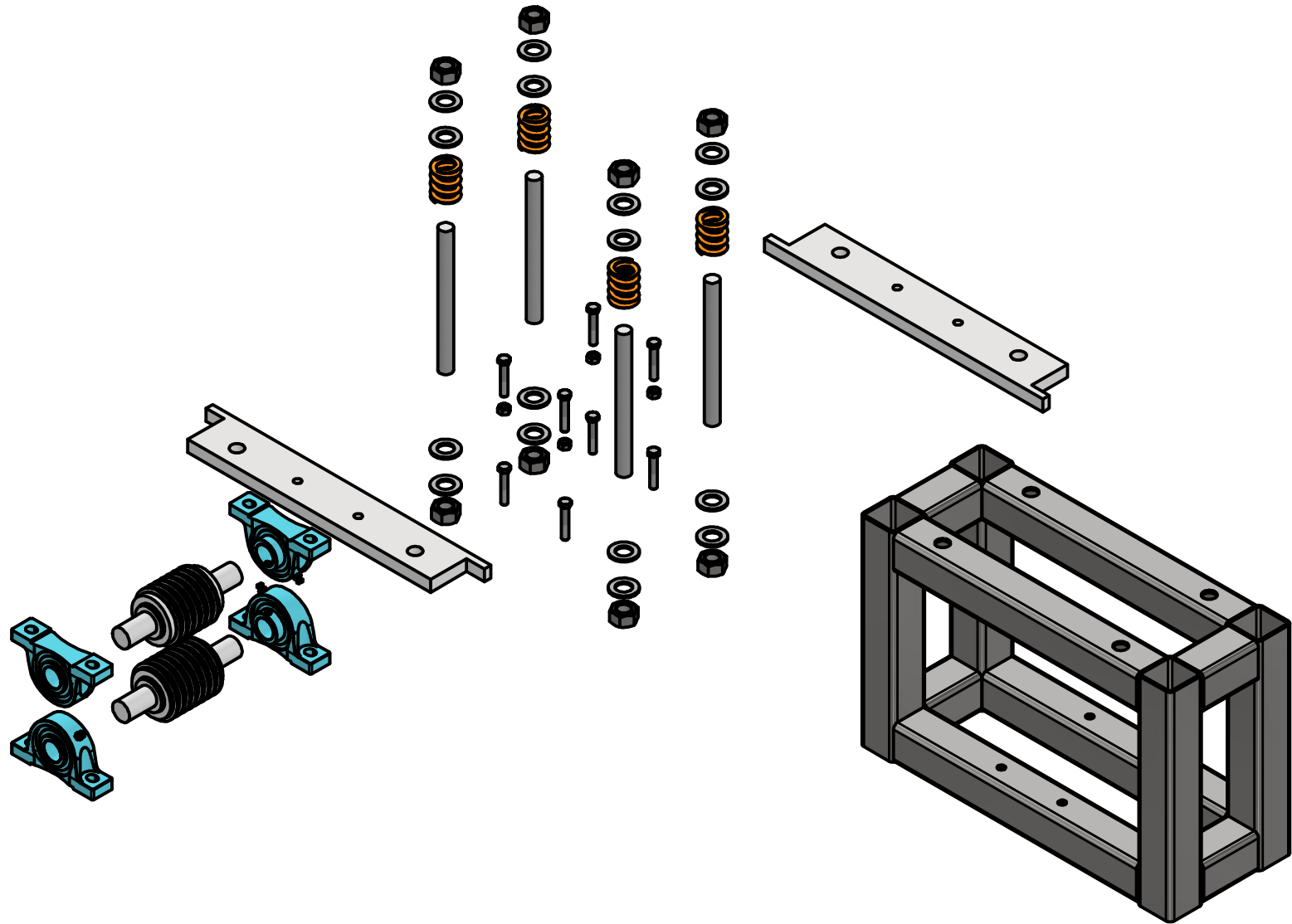
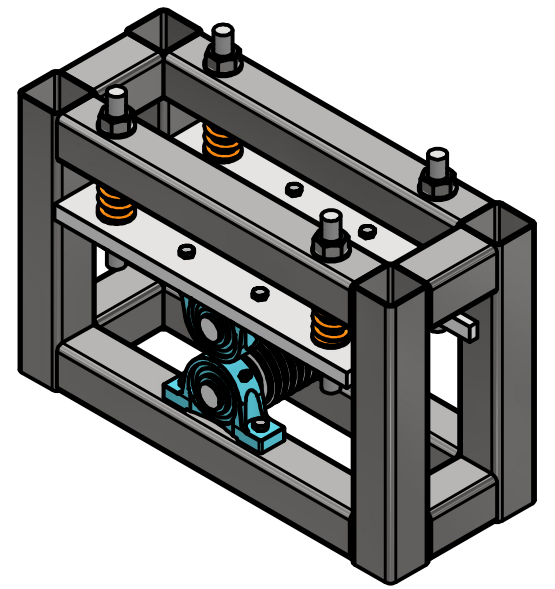


TÍTULO: Platina		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 5	REV 0

13.2. Planos de construcción (prototipo)

A continuación, se presenta el juego de planos correspondiente al prototipo de la trituradora de vidrio laminado, con el mismo orden utilizado en los planos del diseño original. En primer lugar, se muestra la vista general del ensamble y la vista explosionada, con el propósito de identificar los componentes principales del prototipo y su disposición dentro del conjunto. Posteriormente, se detallan los planos del rodillo superior e inferior, los cuales conservan el mismo diámetro planteado en el diseño original; sin embargo, presentan una reducción en su longitud para adecuarse a las dimensiones del prototipo. Luego, se presenta la estructura metálica, que también posee una menor longitud debido a la reducción dimensional de los rodillos. Por último, se incluyen las platinas metálicas destinadas al montaje de las chumaceras, las cuales mantienen la misma geometría tanto en el prototipo como en el diseño original, lo que permite conservar el sistema de sujeción y alineación de los rodillos.

LISTADO DE PARTES				
PARTE	CANT	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	RODILLO SUPERIOR	RODILLO DE TRITURACIÓN MÓVIL	ACERO 1045
2	1	RODILLO INFERIOR	RODILLO DE TRITURACIÓN FIJO	ACERO 1045
3	1	ESTRUCTURA	TUBO CUADRADO 3" x 3" x 3/16	ACERO AL CARBONO
4	1	PLATINA	SOPORTE PARA EL RODILLO SUPERIOR MÓVIL	ACERO 1018
5	4	BARRA ROSCADA 1"	1"-8 UNC x 280 mm	ACERO GALVANIZADO
6	8	TUERCA HEXAGONAL 1"	PIEZA ESTANDÁR	ACERO GALVANIZADO
7	4	LEE SPRING LHL 2000D 01	1"-8 UNC, GRADO 2	ACERO SILÍCIO-CROMO TEMPLADO EN ACEITE
8	4	SKF UCP 208-24	CHUMACERA CON RODAMIENTO RÍGIDO DE BOLAS	VARIOS
9	16	ROLDANA 1"	1" USS	ACERO AL CARBONO
10	8	TORNILLO HEXAGONAL 1/2"	TORNILLO HEXAGONAL 1/2" X 2 1/2" GR8	ACERO GALVANIZADO
11	4	TUERCA HEXAGONAL 1/2"	TUERCA HEXAGONAL ROSCA ORDINARIA 1/2"	ACERO GALVANIZADO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS
SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO.
INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
LINEAL .X ± 0.5
.XX ± 0.10
.XXX ± 0.050
ANGULAR ± 1°
FRACCIONES ± 1/32"
RUGOSIDAD SUPERFICIAL N/A

DIBUJADO POR
DANIEL DIAZ

FECHA
04/01/2025

DISEÑADO POR
DANIEL DIAZ

FECHA
04/01/2025

REVISADO POR
RONY HERRARTE

FECHA
13/10/2025

APROBADO POR
RONY HERRARTE

FECHA
28/10/2025

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
TRITURADORA DE VIDRIO LAMINADO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
PBX: (502) 2634-0336 / 40
dia21133@uvg.edu.gt

TÍTULO: **TRITURADORA VIDRIO
LAMINADO PROTOTIPO**

NÚMERO DE DIBUJO: **1**

MATERIAL
VER LISTADO
TRATAMIENTO
VER LISTADO
MASA: N/A



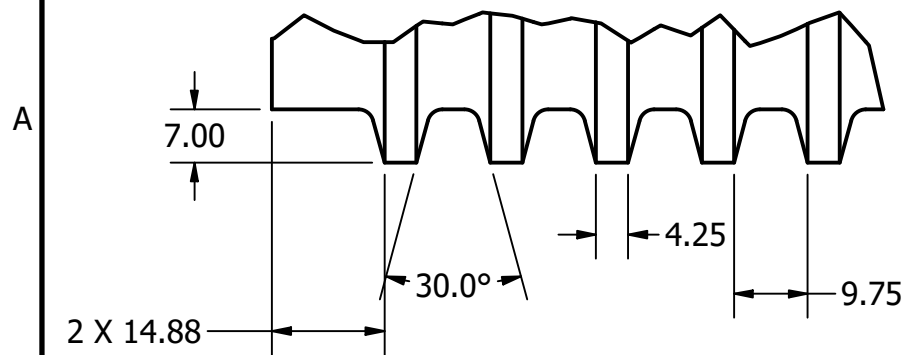
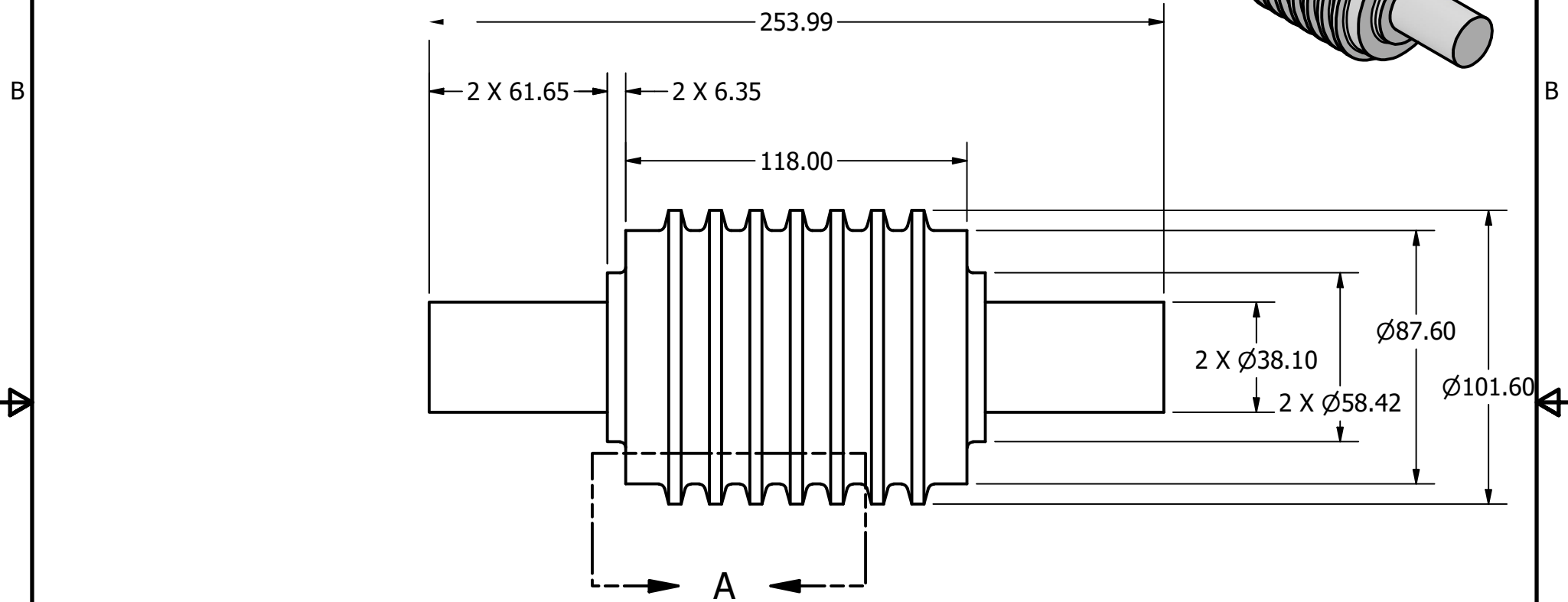
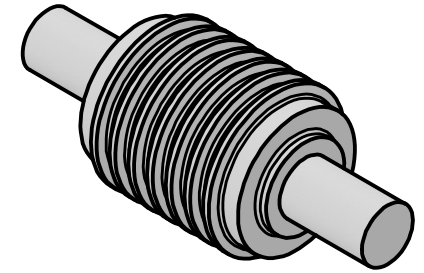
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES
PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU
REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO
PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

FORMATO **B** ESCALA: **1:10** UNIDADES: mm
PÁGINA 1 DE 5 REV **0**

NOTA #1

TODOS LOS REDONDEOS SON DE 2 MM

REMOVER FILOS VIVOS



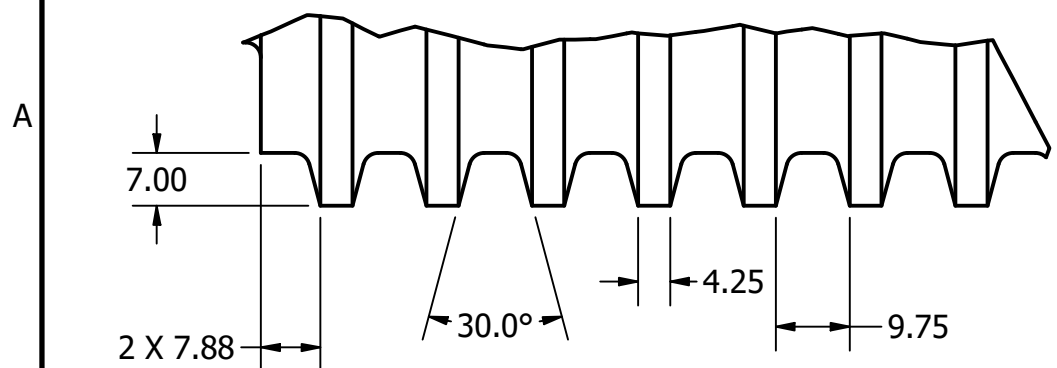
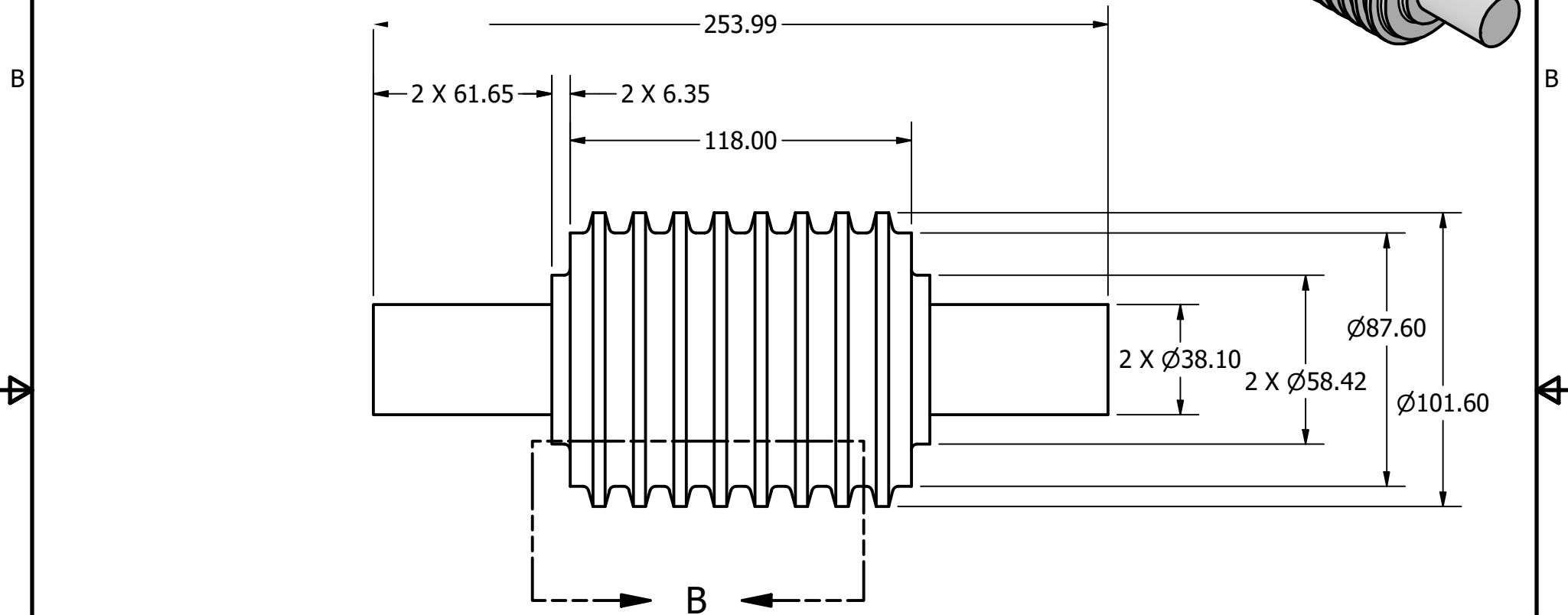
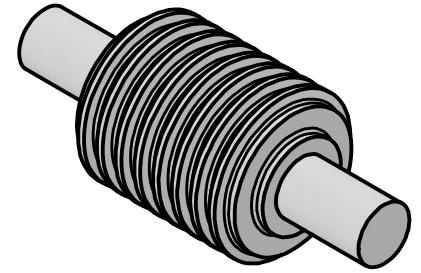
DETALLE A
ESCALA 1 : 1

TÍTULO: RODILLO SUPERIOR		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 2 DE 5	REV 0

NOTA #2

TODOS LOS REDONDEOS SON DE 2 MM

REMOVER FILOS VIVOS

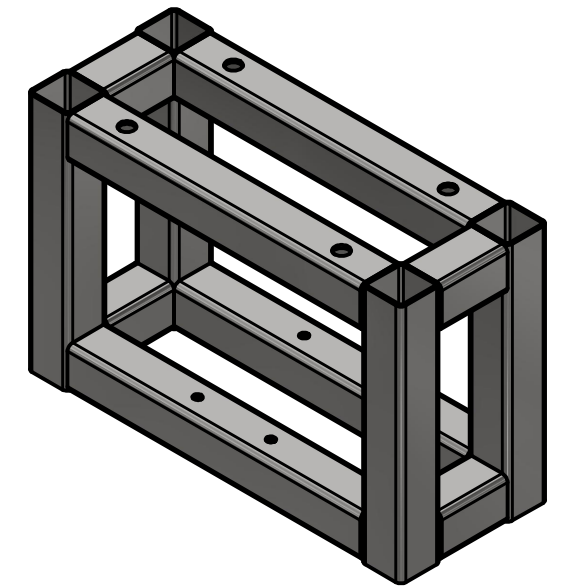
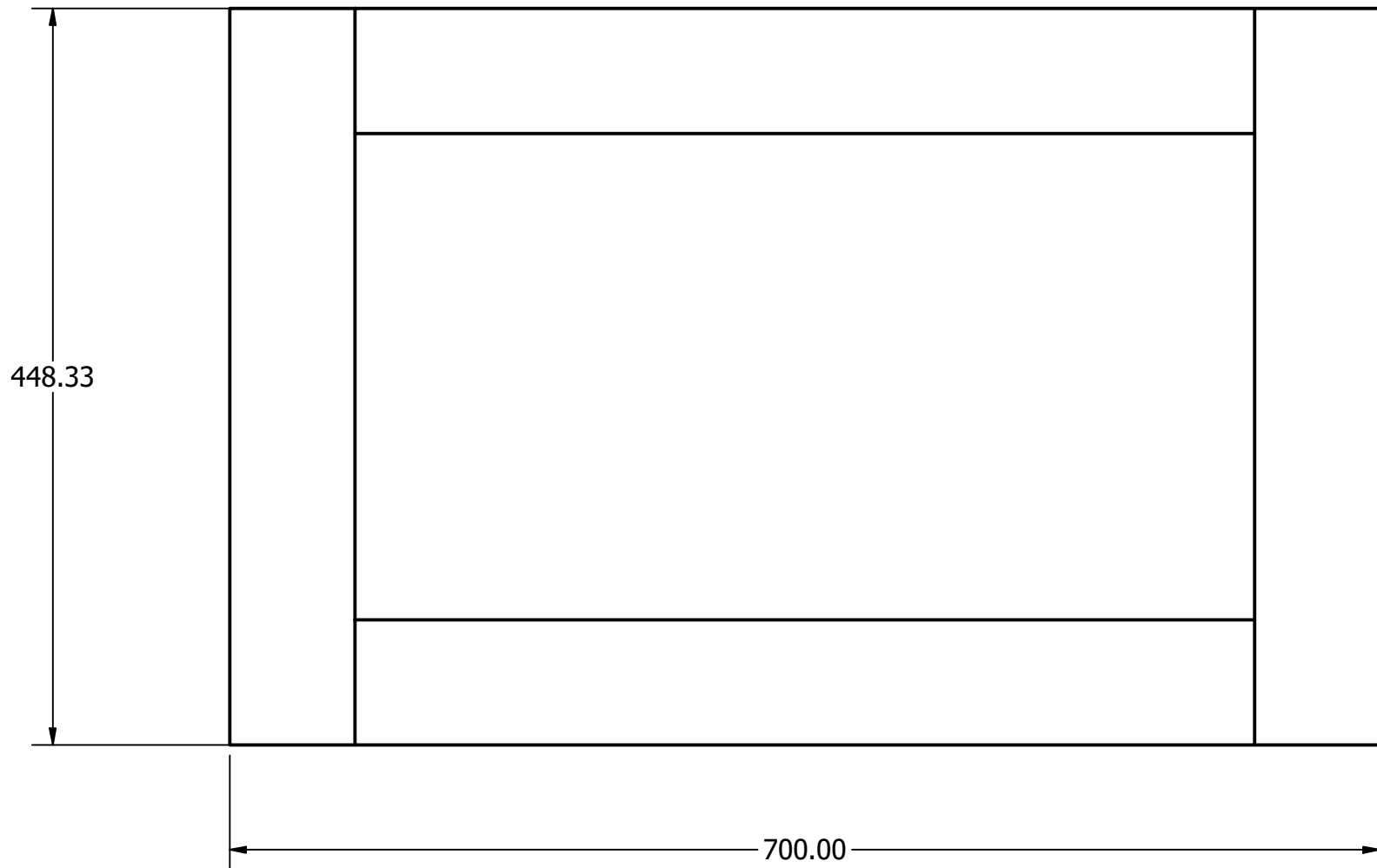
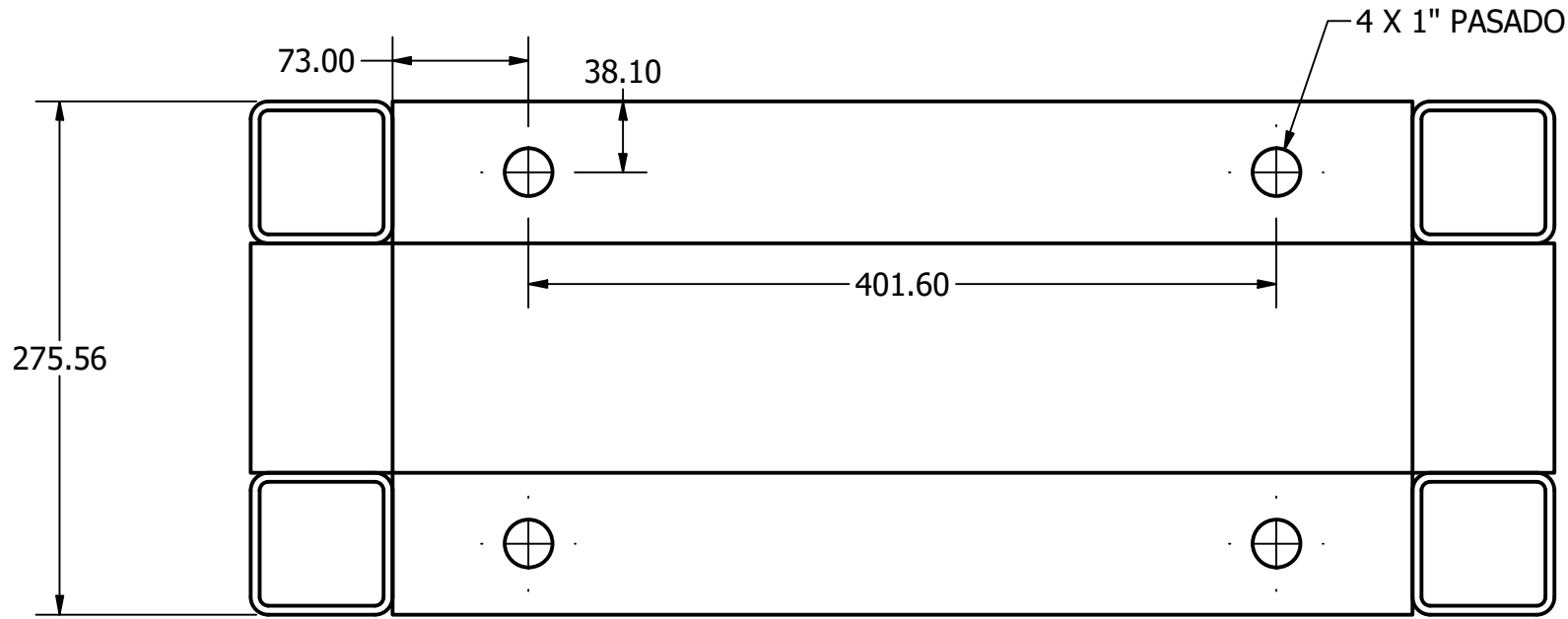


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

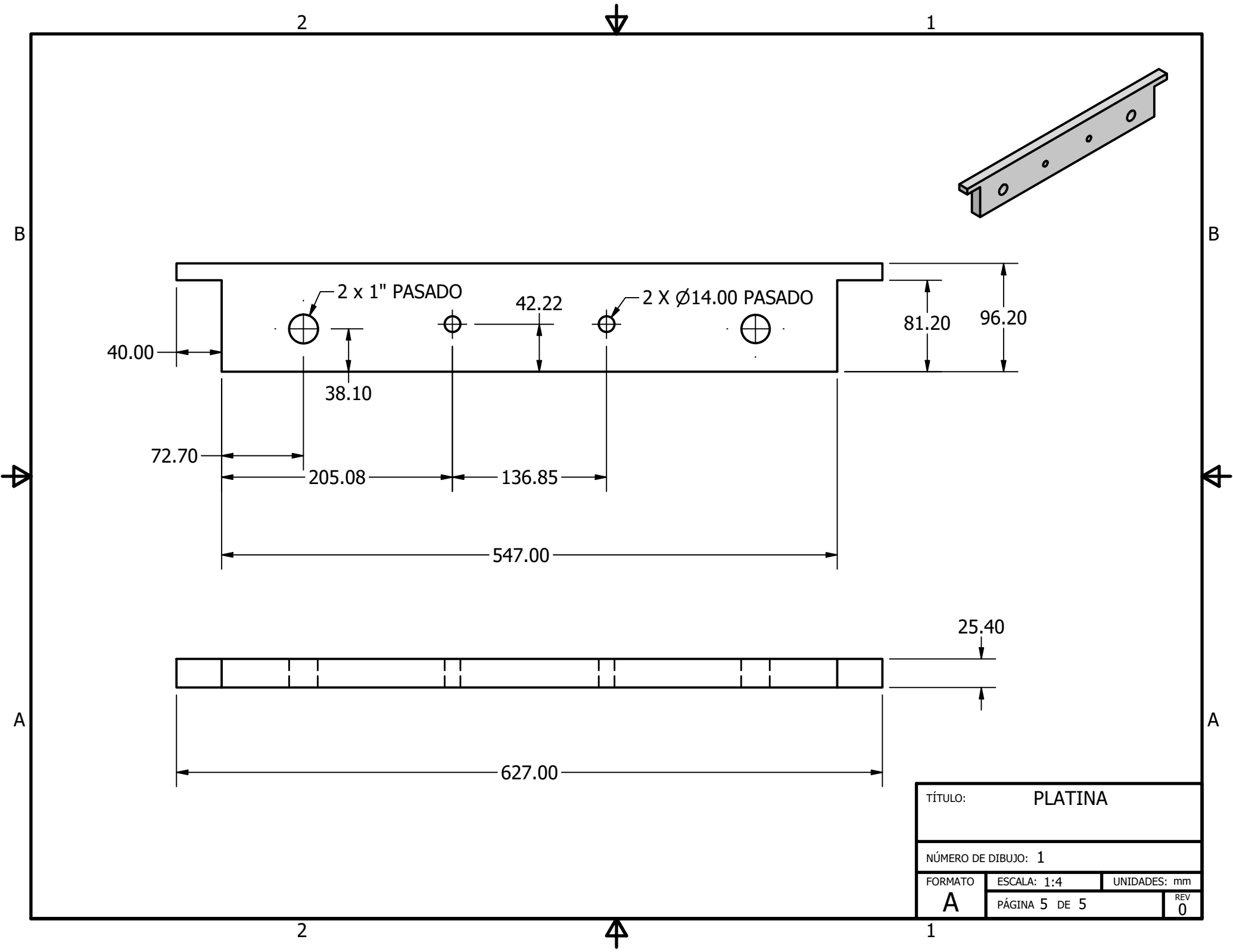
TÍTULO: RODILLO INFERIOR		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 3 DE 5	REV 0

NOTA #3

TODAS LAS UNIONES ENTRE PERFILES SE SOLDARÁN CON CORDÓN CONTINUO EN TODO EL CONTORNO, UTILIZANDO ELECTRODO ECA 7018 Ø 1/8" CONFORME A NORMA AWS D1.1.



TÍTULO: ESTRUCTURA		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 4 DE 5	REV 0



TÍTULO: PLATINA		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 5	REV 0

13.3. Protocolo de pruebas

El documento a continuación presenta un protocolo de pruebas para validar el desempeño de un prototipo de sistema de trituración de vidrio laminado, desarrollado como parte del diseño de una máquina para procesar este material en Guatemala. Su propósito principal es comprobar que el sistema de rodillos puede triturar vidrio laminado con una eficiencia mínima del 40 %, mediante la evaluación del desprendimiento del vidrio, el funcionamiento del mecanismo de resortes, la calidad del material triturado, el tamaño del residuo generado y el comportamiento estructural del prototipo bajo condiciones controladas. Además, el protocolo define el equipo de medición requerido, los peligros asociados a la operación, el equipo de protección personal obligatorio, las especificaciones técnicas del prototipo y de la muestra, así como los anexos necesarios para verificar la seguridad de los participantes, el cumplimiento del proceso y la respuesta ante emergencias. También, incluye una secuencia detallada de preparación, verificación, ejecución, medición, recolección y limpieza, lo que permite realizar las pruebas de forma segura, ordenada y documentada.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Protocolo de pruebas

Diseño del sistema de trituración de una máquina para procesar
vidrio laminado en Guatemala

Elaborado por:
Daniel Andrés Díaz Colindres

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala, mayo 2025

1. Introducción

El objetivo principal de las pruebas es demostrar que el prototipo del sistema de rodillos es capaz de triturar vidrio laminado, asegurando una eficiencia mínima de trituración del 40%, conforme a los requisitos establecidos en el proyecto. Se evaluará que el sistema funcione correctamente, que logre desprender más del 40% del vidrio laminado y que el mecanismo de resortes proporcione la fuerza necesaria para garantizar el proceso de trituración. La prueba se realizará utilizando un modelo construido en acero AISI 1045, seleccionado por razones económicas, aunque el diseño final de la máquina empleará acero K110; esta decisión fue previamente calculada y validada para asegurar el cumplimiento de los requisitos operativos.

El prototipo forma parte del módulo de trituración dentro de una máquina de mayor escala, orientada al procesamiento de vidrio laminado. Los resultados obtenidos permitirán evaluar la calidad del producto triturado, la eficiencia del proceso, el tamaño del residuo generado, así como la facilidad de operación y el desempeño estructural bajo las condiciones de carga previstas. Con base en estos resultados, se tomarán decisiones para ajustes de diseño, selección de materiales o mejoras en los parámetros operativos. Además, se busca generar aprendizaje integral sobre los procesos de fabricación, ensamblaje y puesta en marcha del sistema.

2. Equipo de medición

Equipo de medición				
No.	Descripción	Especificaciones	Certificado/Estándar	Observaciones
1	Balanza	Triple Beam TJ2611	N/A	Ver procedimiento de operación
2	Calibrador Vernier	0 – 150 mm 0.02 mm 0.001”	DIN 682	Ver procedimiento de operación

3. Identificación de peligros

Identificación de peligros				
No.	Tipo	Descripción	Control(es)	Instrumento/equipo
1	Físico	Posible presencia de astillas de vidrio en el área de trabajo (riesgo de corte o proyección).	EPP	Guantes anticorte, mangas anticorte, lentes de seguridad.
2	Físico	Vibraciones leves durante la operación manual sobre la superficie de trabajo.	Administrativo	Asegurar la máquina a una mesa firme y estable mediante abrazaderas.
3	Ergonómico	Trabajo prolongado en posición agachada o incómoda debido a la baja altura de la máquina.	Administrativo	Colocar la máquina sobre una mesa a una altura adecuada para el operario.
4	De seguridad	Riesgo de cortes por contacto directo con bordes de vidrio o con los rodillos.	EPP	Uso obligatorio de guantes y mangas anticorte.
			Administrativo	Señalización de precaución en la zona de alimentación y descarga del vidrio.
5	De seguridad	Riesgo de caída del material triturado.	Administrativo	Colocar bandejas recolectoras bien ajustadas debajo de los rodillos.
6	Químico	Posible presencia de polvo de vidrio o PVB en suspensión.	EPP	Uso obligatorio de mascarilla KN95.

4. Equipo de protección personal (EPP) y equipo de mitigación

Cant.	Descripción
2	Guantes anticorte ANSI 5 / EN 5
1	Gafas de seguridad tipo ANSI Z87.1+
2	Zapatos de cuero tipo bota con punta de acero
1	Pantalón de Lona sin rasgaduras
2	Manga anticorte ANSI 5 / EN 5
1	Mascarilla N95
1	Camiseta tipo T-shirt manga corta

5. Especificaciones técnicas

- Dimensiones:
 - Altura: 462 mm
 - Ancho 275 mm
 - Profundidad 700 mm

Figura 1. Vista isométrica del prototipo

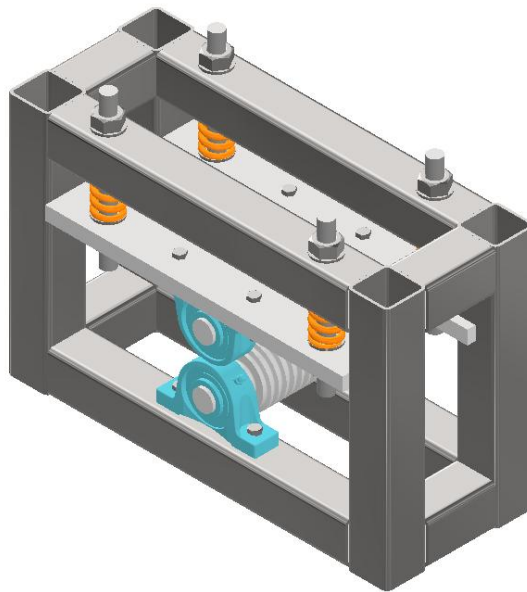


Imagen utilizada por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia

- Dimensiones de la muestra de vidrio laminado
 - Ancho 120 mm
 - Largo 420 mm
 - Espesor 10 mm

Figura 2. *Muestra de Vidrio Laminado*



- Materiales
 - Vidrio Laminado
 - Prototipo de trituradora de vidrio laminado

6. Documentación requerida previo a iniciar una prueba

ANEXO 1

CONOCIMIENTO Y CUMPLIMIENTO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Instrucciones:

El presente documento deberá ser llenado por todas las personas que participarán de las pruebas del prototipo elaborado en el trabajo de graduación o proyecto “Nombre del trabajo/proyecto” y su firma implica su conformidad con el siguiente enunciado:

“Como firmante del presente documento declaro que he tenido a la vista el protocolo de pruebas del trabajo arriba nombrado; que soy consciente de los peligros identificados y plenamente detallados en el protocolo en cuestión, asociados a las pruebas a realizarse en la fecha indicada en este documento y que conozco los procedimientos y acciones a tomar para mitigar dichos peligros. Así mismo declaro tener conocimiento del procedimiento de pruebas y medición, y del protocolo de emergencia en caso de incidentes, anexo 2 y que los mismos se encuentra en formato impreso en el lugar de las pruebas. Declaro también que la información proporcionada por mi parte en los anexos 1 y 2 son verídicos y que he tomado el tiempo de verificar la información contenida en el anexo 2 por lo que he firmado los mismos. Habiendo declarado lo anterior, asumo la responsabilidad de mis actos y cualquier consecuencia o implicación que se desprenda de ellos.”

Listado de personas		
Carné	Nombre	Firma

Guatemala, _____ de _____ de 20____

DECLARACIÓN DE ESTADO Y DISPONIBILIDAD

Instrucciones:

Evalúe su estado y disponibilidad para participar de las pruebas teniendo conciencia de que su indisponibilidad en uno solo de las condiciones evaluadas inhabilitará en su participación ya que las mismas influyen en su seguridad personal y la de los demás participantes. Llenar una copia por cada participante.

Marque con una X la casilla correspondiente sin salirse del espacio.

No.	Condición evaluada	SI	NO
1	He ingerido bebidas alcohólicas o sustancias alucinógenas que alteran mi estado de percepción durante las últimas 72 hrs.		
2	Me siento agotado física o mentalmente por lo que mi concentración o habilidades físicas pueden verse comprometidas.		
3	Tengo un problema personal/laboral que altera mi estado de ánimo.		
4	Me siento incómodo con, o indispueto hacia alguno de los otros participantes de las pruebas por cualquier circunstancia.		
5	Mi estado de ánimo y mi disposición son positivos por lo que considero que mi participación será de aporte para las pruebas.		
6	Puedo proporcionar el nombre y número telefónico de una persona a la que contactar en caso de emergencia por cualquier incidente que se presente durante las pruebas.		

Declaro que las respuestas a los aspectos evaluados en la tabla anterior son verdaderas por lo que me declaro _____ para participar en las pruebas de la presente fecha. (habilitado/inhabilitado)

Fecha: _____

Nombre: _____ Firma: _____

Contacto para caso de emergencia:

Nombre: _____

Número(s) telefónico(s): _____

Correo electrónico: _____

ANEXO 2

VERIFICACIÓN DE EPP Y EQUIPO DE MITIGACIÓN REQUERIDO

Instrucciones:

El estudiante a cargo de las pruebas marcará con una X la casilla de verificación para cada uno de los equipos listados. La necesidad de la disponibilidad de este equipo fue determinada durante el proceso de identificación de peligros por lo que es de carácter obligatorio. No se permite el uso de equipo que no cumpla con las especificaciones declaradas en el listado.

Los demás participantes deberán declarar su visto bueno mediante su firma en el listado mostrado abajo.

Equipo de protección personal (EPP)		
Cant.	Descripción	Verificado (✓/X)
2	Guantes anticorte ANSI 5 / EN 5	
1	Gafas de seguridad tipo ANSI Z87.1+	
2	Zapatos de cuero tipo bota con punta de acero	
1	Pantalón de Lona sin rasgaduras	
2	Manga anticorte ANSI 5 / EN 5	
1	Mascarilla N95	
1	Camiseta tipo T-shirt manga corta	

Fecha: _____

Estudiante a cargo: _____ Firma: _____

PROTOCOLO DE EMERGENCIA

1. En caso de un accidente:

- i. Conservar la calma en todo momento.
- ii. Apague la máquina si la misma aún se encuentra encendida.
- iii. Asegure que las necesidades físicas y emocionales de la persona son atendidas.
- iv. No intente brindar primeros auxilios para los que no cuenta con formación previa.
- v. Coordine con los demás participantes de las pruebas la atención médica necesaria para la persona accidentada contactando a las instituciones correspondientes.
- vi. Si las pruebas se están realizando dentro de las instalaciones de la universidad comuníquese a los números y personas indicadas en la siguiente sección.
- vii. Informe al contacto proporcionado para casos de emergencia.
- viii. Informe al asesor del trabajo de graduación o proyecto una vez la situación se encuentre controlada.

2. Contactos de emergencia.

- i. Bomberos voluntarios: 122
- ii. Bomberos municipales (ciudad capital): 123
- iii. Bomberos municipales departamentales: 1554

Dentro de la UVG tome en cuenta los siguientes contactos:

- i. Alerta Médica: 1711
- ii. Clínica Médica UVG: extensión 21312, edificio F, oficina F119-F120 (debajo de la plaza Paiz Riera)
- iii. Jefe de seguridad UVG, Lic. Nelson Aldana: 59781736, Sótano 1 CIT, oficina 8S1, según lo amerite el accidente.
- iv. Secretaría General: 2369-8333, oficina F-205, según lo amerite el accidente.

Visto bueno de participantes		
Carné	Nombre	Firma

PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS Y MEDICIONES

Incluir el procedimiento detallado de las pruebas y mediciones a realizar. Incluir:

1. Las **verificaciones técnicas** necesarias antes de utilizar la máquina, como la comprobación del estado de las partes móviles, la verificación del suministro eléctrico y la comprobación del nivel de lubricante.
2. **Procedimiento detallado de las pruebas.** Esto incluye la operación de la máquina, incluyendo los pasos necesarios para iniciar y detenerla, así como cualquier precaución que deba tomarse durante el proceso.
3. **Las mediciones** que realizar y la forma en que las mismas se deben ejecutar para que sean precisas y seguras, así como los instrumentos a utilizar. Número de veces que se deben realizar y la manera en que se procesarán los datos.

Procedimiento de pruebas		
Paso	Descripción	Verificado (✓/X)
1.	<p>Preparación del área de trabajo y montaje de la máquina</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar la trituradora sobre la mesa de trabajo. 2. Fijar la máquina utilizando abrazaderas. 3. Colocar bandejas recolectoras debajo del área de salida de los rodillos para capturar el vidrio triturado. 4. Verificar que el área de trabajo este limpia para evitar tropiezos o interferencias. 	
Desviación del procedimiento:		
2.	<p>Verificación del estado del prototipo</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Inspeccionar visualmente soldaduras, uniones atornilladas, deformaciones o grietas. 2. Verificar el nivelado de las placas con un nivel de burbuja. 3. Girar manualmente rodillos para comprobar que giran sin roces ni bloqueos. 4. Verificar el estado de los dientes y la ausencia de fisuras. 5. Verificar apriete de todas las tuercas. 6. Verificar que los rodamientos estén lubricados. 7. Limpiar residuos de polvo o vidrio en partes móviles. 	

Desviación del procedimiento:		
3.	Preparación del material de prueba 1. Tomar la muestra de vidrio laminado. 2. Pesarla utilizando una balanza y registrar el valor como peso inicial.	
	Peso inicial:	
Desviación del procedimiento:		
4.	Ejecución de la prueba de trituración 1. Posicionar cuidadosamente la placa de vidrio laminado frente a la entrada de los rodillos. 2. Insertar manualmente y con precaución el vidrio, manteniendo un avance uniforme hasta que pueda ser jalado desde el otro lado.	
Desviación del procedimiento:		
5.	Recolección del material triturado 1. Recoger el cullet (vidrio triturado) desde las bandejas. 2. Separar la plancha de PVB si esta se ha desprendido. 3. Evitar contacto con bordes filosos.	
Desviación del procedimiento:		
6.	Mediciones post-prueba 1. Pesar el cullet y registrar el peso. 2. Pesar la plancha de PVB recuperada y registrar el peso. 3. Tomar una muestra representativa del cullet y medir el tamaño promedio de partícula (largo y ancho) usando un calibrador vernier. 4. Registrar los valores para análisis de eficiencia.	
	Tamaño promedio del cullet:	

Desviación del procedimiento:

7.	Cierre de prueba y limpieza Realizar una inspección rápida visual del estado de la máquina (alineación de rodillos, estado de dientes, fijaciones). Limpiar cuidadosamente el área de trabajo, eliminando residuos de vidrio con una escoba y recogedor apropiados para materiales cortantes. Desechar los residuos siguiendo las normas de manejo de vidrio triturado.	
----	---	--

Böhler K110. Equivalente europeo del acero AISI D2. Su estructura martensítica le confiere gran resistencia al desgaste abrasivo y estabilidad dimensional después del tratamiento térmico (Böhler Uddeholm, 2022).

Carga de prueba. Esfuerzo máximo que puede soportar un tornillo o barra roscada sin presentar deformación permanente. Se emplea para verificar la resistencia de elementos sometidos a carga axial, garantizando que operen dentro del rango elástico del material (SAE International, 2019).

Ciclo de trabajo. Relación entre el tiempo efectivo de operación bajo carga y el tiempo total del ciclo. Se expresa como porcentaje y se utiliza para ajustar la vida útil de componentes en sistemas con funcionamiento intermitente.

Cullet. Vidrio triturado o fragmentado que resulta del proceso de reciclaje. En este proyecto se define con dimensiones promedio de 2 cm × 2 cm, adecuadas para su reprocesamiento industrial (National Glass Association [NGA], 2021).

Disgregación. Proceso mediante el cual un material compuesto o adherido se separa en sus componentes individuales por acción mecánica, térmica o química. En el contexto del proyecto, se refiere a la separación del vidrio y la película de PVB mediante trituración. Factor de seguridad Cociente entre la capacidad máxima de carga de un componente y la carga real aplicada. Indica el margen de seguridad estructural o funcional del diseño (Shigley et al., 2020).

Polivinil Butiral (PVB). Película plástica intermedia que une las láminas de vidrio en los vidrios laminados. Su alta adherencia proporciona seguridad, pero dificulta el reciclaje mecánico del material (Moeyersons, 2023).

Templado (tratamiento térmico). Proceso metalúrgico que consiste en calentar el acero a alta temperatura y enfriarlo rápidamente para incrementar su dureza y resistencia al desgaste (Callister & Rethwisch, 2020).

Trituración mecánica. Proceso de reducción de tamaño que aplica esfuerzos de compresión, fricción o impacto. En este proyecto se emplea para separar las capas de vidrio y PVB sin recurrir a procesos térmicos o químicos.