



FABRICACIÓN DE SISTEMA RETICULADO PARA USO DIDÁCTICO

PROYECTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORES

BENITES, ALEJANDRO - LEGAJO 49353

BUSTOS FERNANDEZ, ESTEBAN - LEGAJO 49143

2016

Un modelo didáctico de reticulado de barras ha sido diseñado, mecanizado y probado para luego ser utilizado en un ámbito de aprendizaje. De este modo se permite facilitar la comprensión de la mecánica de los mismos, como ser la carga puramente axial que se logra en los elementos barra, como también observar las deformaciones que se presentan solamente en la zona de deformación elástica a través de *strain gauges* colocados en las barras. De esta manera, se busca que el alumnado este más familiarizado con la mecánica del reticulado de barras y logre visualizar distintos aspectos teóricos, como ser la no generación de momentos al dejar articuladas las uniones, la comprensión de la comparación entre un reticulado y la teoría de vigas al observar tensiones de compresión y de tracción donde correspondan y, otras posibilidades que el docente crea oportuno aprovechar para mejorar la comprensión de los alumnos.

Modelos de esta índole existen y fueron investigados cada uno presentando sus particularidades. Fue esta una de las razones que nos motivó a encarar este proyecto en busca de nuestra versión de modelo de reticulado para medición de deformaciones y tensiones.

INDICE

Lista de Figuras	ii
Lista de Tablas y Gráficos.....	v
Marco teórico	1
Strain Gauges	2
Marco teórico	2
Elemento sensor.....	4
Medición	5
Introducción.....	8
Diseño y Performance del modelo	8
Barras	9
Nodos.....	9
Apoyos	13
Bulones.....	14
Modelado y Cálculo teórico.....	14
Resultados.....	16
Conclusión.....	17
Anexo.....	18
Anexo I.....	19
Anexo II.....	22
Anexo III	26
Anexo IV	30
Anexo V.....	34
Anexo VI.....	40
Anexo VII.....	45
Anexo VIII.....	49
Anexo IX.....	53
Anexo X.....	56
Bibliografía.....	59
Planos.....	60

LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Pag.</i>
Figura 1.....	1
Figura 2.....	3
Figura 3.....	4
Figura 4.....	4
Figura 5.....	5
Figura 6.....	6
Figura 7.....	6
Figura 8.....	7
Figura 9.....	7
Figura 10.....	9
Figura 11.....	11
Figura 12.....	12
Figura 13.....	12
Figura 14.....	12
Figura 15.....	13
Figura 16.....	16
Figura 17.....	19
Figura 18.....	19
Figura 19.....	20
Figura 20.....	20
Figura 21.....	20
Figura 22.....	22
Figura 23.....	22
Figura 24.....	23
Figura 25.....	23

<i>Número</i>	<i>Pag.</i>
Figura 26.....	24
Figura 27.....	24
Figura 28.....	25
Figura 29.....	26
Figura 30.....	30
Figura 31.....	31
Figura 32.....	34
Figura 33.....	35
Figura 34.....	36
Figura 35.....	37
Figura 36.....	37
Figura 37.....	38
Figura 38.....	38
Figura 39.....	40
Figura 40.....	41
Figura 41.....	41
Figura 42.....	42
Figura 43.....	42
Figura 44.....	43
Figura 45.....	43
Figura 46.....	45
Figura 47.....	46
Figura 48.....	46
Figura 49.....	47
Figura 50.....	47
Figura 51.....	48
Figura 52.....	49

<i>Número</i>	<i>Pag.</i>
Figura 53.....	50
Figura 54.....	50
Figura 55.....	51
Figura 56.....	51
Figura 57.....	52
Figura 58.....	52

LISTA DE TABLAS Y GRAFICOS

<i>Número</i>	<i>Pag.</i>
Tabla 1	5
Tabla 2	8
Tabla 3	15
Tabla 4	15
Tabla 5	16
Tabla 6	28
Tabla 7	39
Gráfico 1	27
Gráfico 2	27
Gráfico 3	28

MARCO TEORICO

Un reticulado consta de elementos rectos que se conectan en nodos. Los elementos del mismo solo están conectados en sus extremos, por lo tanto, ningún elemento continúa más allá de un nodo. Los elementos de un reticulado, por lo general, son delgados y solo pueden soportar cargas laterales pequeñas, por eso todas las cargas deben estar aplicadas en los nodos y no sobre los elementos. Cuando se va a aplicar una carga concentrada entre dos nodos o cuando el reticulado debe soportar una carga distribuida, como en el caso de un puente, debe proporcionar un sistema de piso, el cual, mediante el uso de travesaños y largueros, transmite la carga a los nodos. Al estar los elementos unidos entre sí por medio de pernos, las fuerzas que actúan en cada uno de los extremos del elemento se reducen a una sola y no existe momento.

Como ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior se pueden apreciar las imágenes 1 a) y b) que se muestran a continuación en las cuales se observa el diagrama de cuerpo libre para cada nodo y cada elemento. Cada elemento está sometido a la acción de dos fuerzas, una en cada uno de sus extremos, estas fuerzas tienen la misma magnitud, misma dirección y sentido opuesto. Además, la tercera ley de Newton indica que las fuerzas de acción y reacción entre un elemento y un nodo son iguales y opuestas. Por lo tanto, las fuerzas ejercidas por un elemento sobre los dos nodos a los cuales se conecta deben estar dirigidas a lo largo de ese elemento y deben ser iguales y opuestas. Como las líneas de acción de todas las fuerzas internas en un reticulado son conocidas, el análisis de un reticulado se reduce a calcular las fuerzas en los elementos que las constituyen y a determinar si cada uno de dichos elementos está en tensión o compresión.

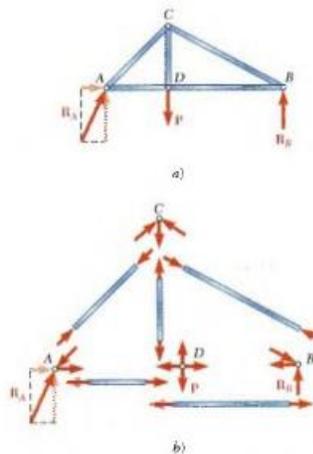


Figura 1.

Como el reticulado en su totalidad está en equilibrio, cada nodo debe también estarlo. El que un nodo esté en equilibrio se expresa dibujando su diagrama de cuerpo libre y escribiendo dos ecuaciones de equilibrio ($\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$). Sin embargo, primero se deben determinar las reacciones en los apoyos considerando a todo el reticulado como un cuerpo libre y utilizando las ecuaciones de equilibrio de un cuerpo rígido ($\sum F_x = 0$; $\sum F_y = 0$; $\sum M_{apoyo} = 0$).

A continuación se detalla un paso a paso para resolver un reticulado:

1. Dibujar un diagrama de cuerpo libre para el armazón completo y utilizarlo para determinar las reacciones que sean posibles en los apoyos.

2. Es importante señalar que la selección del primer nodo no es única. Una vez que se han determinado las reacciones en los apoyos del reticulado, se selecciona cualquiera de dos nodos como punto de partida para el análisis. Por otra parte, una vez que se ha seleccionado el primer nodo, en algunos casos se puede llegar a un punto en el análisis a partir del cual ya no se puede continuar. Entonces se debe comenzar de nuevo a partir de otro nodo para terminar la solución del problema. Como hay más de una forma de resolver un problema, se recomienda bosquejar la solución antes de comenzar a llevar a cabo cualquier cálculo.
3. Localizar un nodo que conecte solo dos elementos y dibujar su diagrama de cuerpo libre. Este diagrama de cuerpo libre sirve para determinar la fuerza desconocida en cada uno de los elementos si solo están involucradas tres fuerzas (las dos fuerzas desconocidas y una fuerza conocida), probablemente se encontrará que es más conveniente dibujar y resolver el triángulo de fuerza correspondiente, si están involucradas más de tres fuerzas, se deben escribir y resolver las ecuaciones de equilibrio para el nodo ($\sum F_x = 0$ y $\sum F_y = 0$), suponiendo que los elementos están en tensión. Una respuesta positiva significa que el elemento está efectivamente en tensión y una respuesta negativa se refiere a que el elemento está en compresión. Una vez que se han encontrado las fuerzas, se deben introducir sus valores en un croquis del reticulado, con una T para indicar tensión y una C para indicar compresión.
4. Después, se debe localizar un nodo en el cual solo las fuerzas en dos de los elementos que se conectan a éste aún son desconocidas. Se debe dibujar el diagrama de cuerpo libre del nodo y utilizarlo como se indicó en el punto anterior para determinar las dos fuerzas desconocidas.
5. Se debe repetir este procedimiento hasta que las fuerzas en todos los elementos del reticulado hayan sido determinadas. Como previamente se usaron las tres ecuaciones del equilibrio asociadas con el diagrama de cuerpo libre de todo el reticulado para determinar las reacciones en los apoyos, se tendrán tres ecuaciones adicionales. Estas ecuaciones sirven para comprobar que los cálculos se realizan en forma correcta.

STRAIN GAUGES

- Marco teórico

Las galgas extensiométricas, o *strain gauges*, son dispositivos que se utilizan para determinar el estado de tensiones, las cargas aplicadas a un objeto o el peso del mismo. Estos se determinan a partir de la medición de la deformación de la banda.

La medición de la deformación de la misma se realiza mediante un circuito eléctrico, el cual mide la variación en la resistencia que sufre la banda al deformarse por la aplicación de alguna carga.

Sea la siguiente figura una representación infinitesimal de un *strain gauge*,

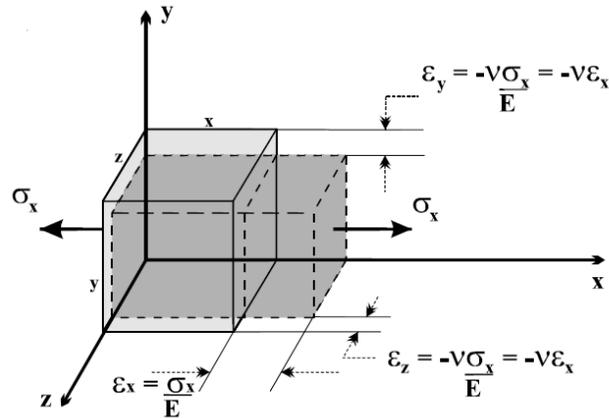


Figura 2

La disminución de la sección transversal al sentido de la tensión aplicada se puede relacionar con el aumento de la longitud mediante el módulo de *Poisson* (ν), el cual es particular de cada material. Siendo E el Módulo de Elasticidad del material y σ_x la tensión generada al sólido, las deformaciones unitarias en cada sentido son,

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} \\ \epsilon_y &= -\nu \cdot \epsilon_x \\ \epsilon_z &= -\nu \cdot \epsilon_x\end{aligned}$$

La sección o área de paso de la corriente eléctrica se define como:

$$A = y \cdot z$$

Aplicando logaritmos naturales en ambos lados de la ecuación se obtiene,

$$\ln A = \ln y + \ln z$$

Si se le aplica un esfuerzo al material sufrirá un incremento de la longitud Δl , y una disminución de la sección ΔA , con lo cual la ecuación anterior nos queda,

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z} = \epsilon_y + \epsilon_z = -\nu \cdot (\epsilon_x + \epsilon_x) = -2 \cdot \nu \cdot \epsilon_x$$

La resistencia eléctrica de un material depende de la resistividad del material (ρ), de la longitud (l) y sección (A) del mismo de la siguiente manera,

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

Tomando logaritmos naturales y diferenciando,

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon_x + 2 \cdot \nu \cdot \epsilon_x = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2 \cdot \nu) \cdot \epsilon_x$$

Ahora bien, en bandas metálicas se puede despreciar el término de la variación de la resistividad, en cambio cuando se trate de bandas semiconductoras este arreglo se tendrá que ver con más cuidado.

Despreciando este término nos queda,

$$\Delta R = (1 + 2 \cdot \nu) \cdot \epsilon \cdot R_0$$

Esta ecuación nos da una idea de cuánto cambiará la resistencia de la banda con su deformación.

De la ecuación anterior se puede definir un parámetro importantísimo en la aplicación de *strain gauges*, el *Gauge Factor* o GF,

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon}$$

Este parámetro nos define la sensibilidad de los *strain gauges* y es constante para todo el rango de deformaciones de los mismos, siempre y cuando se esté en el régimen elástico.

Para bandas metálicas el GF generalmente está entre 2 y 4.5, para semiconductores pueden ser del orden de 150.

- Elemento sensor

La galga extensiométrica consiste en una configuración geométrica de hoja ultra delgada de una aleación especialmente conformada para maximizar el cambio de resistencia con la deformación sin oponer resistencia mecánica apreciable a la deformación.

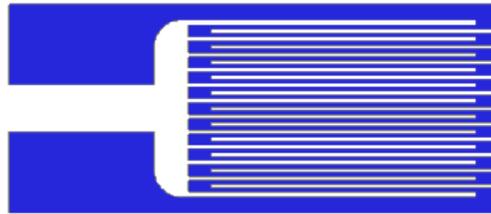


Figura 3

Componentes:

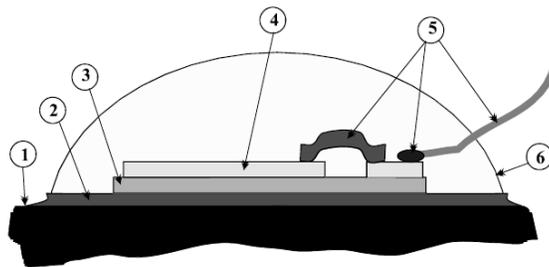


Figura 4

1. Superficie de la pieza cuya deformación se desea medir.
2. Adhesivo efectivo entre la pieza y el *strain gauge*.
3. Material de soporte del *strain gauge*.
4. El *strain gauge*.
5. Conexiones apropiadas.

6. Recubrimiento protector o *Coating*.

A continuación, en la tabla 1 se muestra un cuadro comparativo sobre los dos grandes grupos de *strain gauges*, los metálicos y los semiconductores:

Tipo de Banda	Metálica	Semiconductora
Máxima deformación admisible	Alta	Baja
Sensibilidad	Baja	Alta
Resolución	Baja	Alta
Autocalentamiento	Alto	Bajo
Curva característica	Lineal	Alineal
Flexibilidad	Muy alta	Difícil montaje en superficies curvas
Costo	Bajo	Moderado
Sensibilidad a la temperatura	Moderada	Alta
Ancho de banda	Moderado	Amplio

Tabla 1

Efecto de la temperatura:

Ante un cambio en la temperatura ambiente la resistencia varía, aún en ausencia de deformaciones. Tanto la banda como la pieza bajo medición cambiarán sus mediciones y, como ambos cambios no son idénticos, se captará una deformación a la salida del *strain gauge*, sin que ningún esfuerzo la genere.

En caso de que haya un cambio de temperatura apreciable durante la medición se debe compensar este efecto, esta idea es básicamente tratar de que este se cancele entre ellos.

- Medición

Un puente de *Wheatstone* se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Los mismos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia que se desea medir. En el caso de medición de deformaciones, el *strain gauge* sería esta resistencia y lo que se mide es la variación de la misma a través del cambio de tensión entre los brazos del puente. Este puente tiene básicamente tres variantes: puente simple o $\frac{1}{4}$ de puente, medio puente y, puente completo. Estas variantes serán elegidas dependiendo del tipo de tensión que se quiera medir y de la sensibilidad y respuesta que se requiera.

Barra de eje recto sometida a tracción simple con $\frac{1}{4}$ de puente:

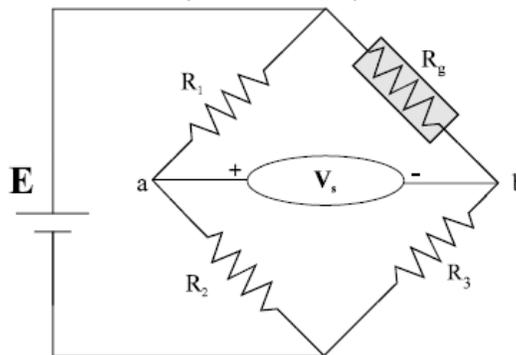


Figura 5

Este es la variante más simple del puente, R_g en este caso sería la resistencia del *strain gauge*, las otras tres resistencias son constantes.

El método de medición sería el siguiente:

1. Leer y almacenar V_s con la muestra no sometida a deformación.
2. Aplicar deformación y volver a leer y almacenar V_s .
3. Conociendo o midiendo E , módulo de elasticidad del *strain gauge*, se calcula V_r .
4. Calcular la deformación ϵ .

$$V_r = \frac{V_s}{E} \Big|_{\text{en reposo}} - \frac{V_s}{E} \Big|_{\text{bajo medición}}$$

$$\epsilon = \frac{-4 \cdot V_r}{GF \cdot (1 + 2 \cdot V_r)}$$

Como muestra esta ecuación, la respuesta no es lineal con la variación de las tensiones entre los brazos.

Barra de eje recto sometida a tracción simple con $1/2$ puente:

En esta variante se utilizan dos *strain gauges*, el primero se coloca de forma longitudinal al eje de la barra y el segundo se coloca a 90° del mismo como lo muestra la siguiente figura.

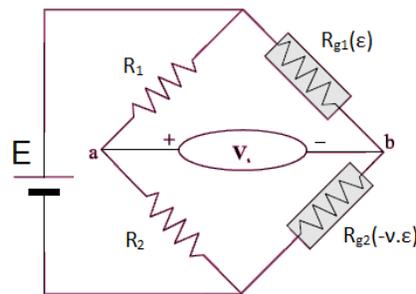


Figura 6

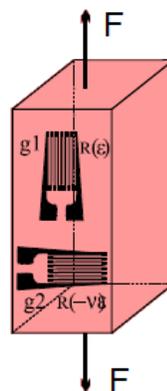


Figura 7

$$\epsilon = \frac{-4 \cdot V_r}{GF \cdot [(1 + \nu) + 2 \cdot (1 - \nu) \cdot V_r]}$$

En este caso la respuesta tampoco es lineal con respecto a la tensión entre los brazos del puente, pero aquí hay una verdadera compensación debido a efectos en la medición originados por la temperatura. También se obtiene un leve aumento en la sensibilidad.

Barra de eje recto sometida a tracción simple con puente completo:

Aquí la cantidad de *strain gauges* utilizados son cuatro, el modo de colocarlos es similar al 1/2 puente pero haciendo la misma instalación del lado contrario. La siguiente figura muestra esta configuración, seguida de la ecuación de la misma.

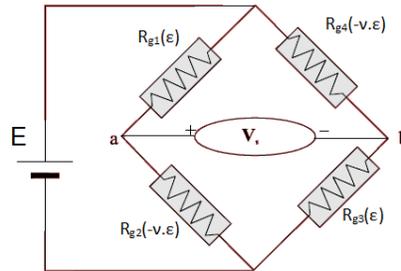


Figura 8

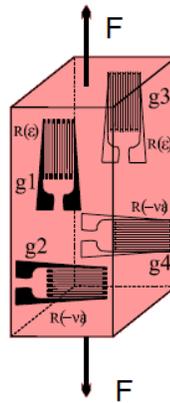


Figura 9

$$\epsilon = \frac{-2 \cdot V_r}{GF \cdot [(1 + \nu) + (1 - \nu) \cdot V_r]}$$

Analizando esta configuración se puede concluir que la misma, además de compensar los efectos de la temperatura y que la respuesta sigue siendo no lineal, es la que mayor sensibilidad presenta. A continuación se muestra una tabla en donde se comparan las tres configuraciones analizadas. En la misma se calculan las deformaciones obtenidas a partir de las fórmulas descriptas anteriormente, variando V_r , con un GF fijo de 2,06 y un ν de 0,32.

[mV]	[$\mu\epsilon$]		
V_r	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
0,0001	-194,13593	-147,086934	-73,5472556
0,0002	-388,194237	-294,143566	-147,086934
0,0003	-582,174967	-441,169905	-220,619038
0,0004	-776,078167	-588,16596	-294,143566
0,0005	-969,903883	-735,13174	-367,660522

Tabla 2

Viendo estos resultados, se puede observar cómo, a una misma salida V_r , se obtiene una menor deformación a medida que se completa el puente *Wheatstone*. Esto nos da una idea de que un medio puente podrá tener una mejor apreciación de la deformación que un cuarto de puente, y que el puente completo, como se dijo anteriormente, será el que mejor apreciación de la deformación tendrá.

INTRODUCCION

La forma en que se deforman todos los elementos de un reticulado sujetos a fuerza puramente axial es compleja de ver y definitivamente no es intuitiva. Las estructuras de reticulados de barras son ideales e importantes desde muchos puntos de vista que merecen una atención especial. Además, los reticulados de barras se utilizan en muchas tecnologías tradicionales, por ejemplo, puentes, torres de alta tensión, grúas, aviones, autos y, son cruciales para la comprensión de modelos conceptuales de la física. Nuestro objetivo es desarrollar un modelo de enseñanza para mejorar la capacidad de visualizar la deformación de este tipo de estructuras, que es la clave principal para que el alumno entienda el concepto de los mismos, motivados en el interés personal de quienes trabajamos en este proyecto por entender cabalmente el funcionamiento de estos.

DISEÑO Y PERFORMANCE DEL MODELO

Se planteó el diseño y construcción de un reticulado con elementos barras (elementos articulados en sus extremos) en la que los mismos han sido construidos a partir de tubos de aluminio prensados y posteriormente agujereados en sus extremos, los cuales irán unidos a nodos de aluminio con distribución de ajuste a 45° o a 60° .

El modelo está pensado para ser utilizado cualitativamente para observar distintos elementos, a saber, la deformación general de un reticulado, la flecha máxima de flexión de un elemento deformado y, cuantitativamente para obtener la deformación unitaria de cierta barra que se encuentra conectada a un *strain gauge* y así obtener posteriormente el esfuerzo a la que está sometida y comparar los resultados con los calculados analíticamente.

- Barras

Para definir el diseño de las barras se comenzó con modelos que se iban acoplando a los distintos modelos de nodos que iban surgiendo a lo largo del diseño, por lo que se comenzó con elementos de perfil circular para poder acoplarlos a nodos con encastres apropiados, ya sea con rosca en la punta o diseñar una arandela en la punta del perfil para abulonarlo al siguiente.

Al ir variando el diseño de los nodos se fueron variando en conjunto el diseño de las barras hasta llegar al perfil rectangular de aluminio con el cual se fueron presentando ciertos inconvenientes. En primer lugar, se presentaba un problema con el momento de inercia que provocaba fallas por pandeo, por lo que se planteó un diseño de doble perfil rectangular unidos transversalmente para así aumentar su momento de inercia y, en la unión de los nodos asegurarse la no aparición de los momentos flexores provocados por la pequeña excentricidad que se presentaba con un solo perfil. En segundo lugar, al continuar con el diseño, se observó que al trabajar con estos perfiles para poder obtener una tensión apreciable en la medición de la deformación unitaria de las galgas extensiométricas se necesitarían esfuerzos de 80 kgs., tomando conciencia de que físicamente esta carga no era un peso apto de fácil manipuleo, se decidió buscar bajar el módulo de *Young* sin perder el momento de inercia para poder evitar la precipitada falla por pandeo del reticulado, es ahí donde finalmente se definió el modelo actual.

A partir de los datos obtenidos se observó la importancia del diseño de las barras. La necesidad de que ambas caras prensadas se encuentren no solo en el mismo plano entre sí, sino que en ese mismo plano se encuentre el eje axisimétrico del tubo. Es por esto que se procedió a diseñar un molde de prensa para poder lograr el diseño planteado.

Con lo dicho anteriormente se diseñaron barras de perfil tubular circular de diámetro exterior de 3/8" y 1.1 mm de espesor, teniendo los dos extremos prensados, formando una lámina de 13.6 mm de ancho y 2.2 mm de espesor. En dichos extremos se practicó un agujero de diámetro 6 mm. Estas barras tienen tres longitudes, dependiendo de la configuración de reticulado requerido. Para mayor detalle de dimensiones y materiales utilizados se encuentran en los planos RE-01-200, RE-01-210, y RE-01-220 luego de los Anexos.

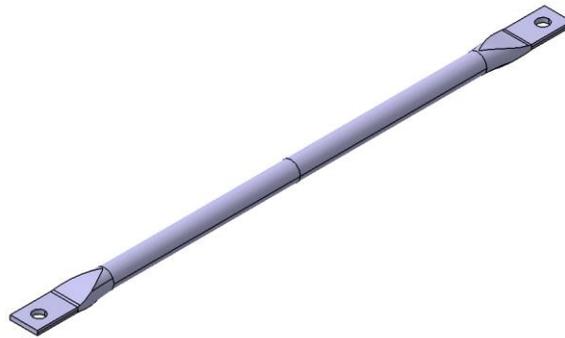


Figura 10

- Nodos

El nodo es un elemento fundamental dentro del proyecto debido a que en este se aplican las cargas del reticulado y en él recaen todas las tensiones provenientes de las barras.

En el diseño del nodo se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Las fuerzas generadas desde el nodo y hacia el mismo deben converger a un punto, en caso de no obtener esto no se puede hablar de un nodo propiamente dicho, y efectuará errores no deseados en el cálculo de tensiones y deformaciones.
- ✓ El nodo debe ser capaz de soportar el rango de tensiones que se quiere medir. En caso de falla de la estructura, la misma nunca debe ocurrir en el nodo, sino que debe suceder en la barra o en las uniones abulonadas. Por lo tanto, el nodo se sobredimensiona para cumplir con esta consideración.
- ✓ La deformación del mismo debe ser la menor posible, de modo de no inferir en el error del cálculo. Por lo cual, se debe tener una estructura lo más rígida posible.
- ✓ El diseño del nodo debe ser tal que permita armar gran variedad de estructuras de reticulados.
- ✓ Dentro de lo posible, este nodo tendrá una baja relación Densidad/Rigidez y Densidad/Resistencia.

Se fueron distinguiendo distintos tipos en la elección de los nodos:

- ✓ Uniones de tuberías: estas fueron consideradas por su facilidad para obtenerlas en distintas dimensiones y por su fácil montaje. El inconveniente encontrado es que no se consiguen comercialmente uniones de 5 salidas, por lo que limitaría considerablemente el tipo de estructura del reticulado, siendo también difíciles de mecanizar de cero. Por otro lado, resulta ser una unión muy pobre en cuanto a resistencia.
- ✓ Articulaciones de competencia: estas articulaciones son de fácil montaje, además de tener la ventaja de no necesitar uniones abulonadas. Su gran desventaja es que no tienen libertad de movimiento en 360°. Tampoco se consiguen que todas las barras trabajen en el mismo plano, lo que interfiere en el error de cálculo.
- ✓ Bulón de nodo: Este formato de nodo tiene su gran ventaja de ser económica y práctica debido a su simplicidad. El problema principal es que las distintas barras sobre el nodo terminarían actuando en planos diferentes, causando la misma causa que el diseño nombrado anteriormente.
- ✓ Placa con uniones abulonadas: Es una placa de forma preferida en la cual se le practican unos agujeros en donde se realiza la unión abulonada entre las barras y el nodo. Este diseño es un poco más trabajoso a la hora de armar la estructura, siendo también más costoso que algunas otras opciones. Pero debido a que tiene un gran potencial para cumplir la mayoría de las consideraciones descriptas con anterioridad, se eligió este tipo de nodo para seguir desarrollando el diseño del mismo.

Diseño de los nodos:

A continuación se pueden ver los distintos diseños en los cuales se trabajó. Cada uno de estos tuvo su influencia en el diseño final del nodo. Por lo que no se puede hablar de descartes en esta etapa debido a que se tomó alguna propiedad de los mismos.

Luego de ver en detalle estos diseños se puede observar la evidencia de la idea.

Una unión entre barras y nodos a través de agujeros, los cuales pueden ir bulones pasantes entre las dos piezas, dándole a la estructura una cierta movilidad de acomodamiento debido a que la

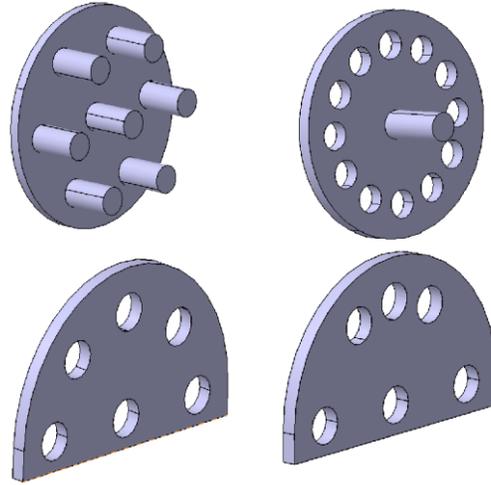


Figura 11

unión entre bulones restringe el desplazamiento relativo del punto pero no el giro del mismo. Dicho esto, se contempla en el cálculo del mismo que este acomodamiento no está sujeto a medición, por lo que será parte del error total de cálculo. Comparativamente, las uniones soldadas de un puente convencional generan en la estructura una rigidez notable, pero debido a la naturaleza del proyecto, la idea de realizar uniones que restrinjan todos los grados de libertad hace de la aparición de tensiones distintas a las normales, de tracción y compresión, haciendo su medición muy dificultosa.

Otro tema no menor es el de la aplicación de la carga, en este caso un peso, que simula una carga puntal en donde convergen los ejes de las barras. Debido a la dificultad de poder aplicarla en un solo punto, se debió pensar una manera viable de aplicación de carga, que simule de la mejor manera la carga puntal. Para ello, en vez de recurrir de un orificio como se mostró en los diseños de la figura anterior, ya que estos si bien le sacan peso al nodo generalmente no tienen un buen desempeño en la concentración de tensiones debido a su forma cóncava, aumentando la tensiones *Hertzianas* de contacto, se prefiere aplicarla en el contorno convexo de un cilindro, puesto de manera tal que la resultante de la fuerza genere un efecto idéntico al de una carga puntal aplicada en donde se quiere.

El siguiente tema planteado es el de la cantidad y distribución de los agujeros en los nodos, de modo de poder optar por una gama considerable de reticulados. Hay dos grandes grupos de reticulados, aquellos que forman triángulos equiláteros, y aquellos cuyos triángulos de barras son rectángulos. Existe otro grupo de reticulados en los cuales los triángulos formados son más diversos. Para poder emplear ambos, se requieren de ángulos de 45, 60, y 90 grados entre los agujeros. Como se vio en la anterior figura, en la placa se pueden realizar cuantos orificios se quiera, siempre que se esté dispuesto a sacrificar o un nodo compacto o una elevada concentración de tensiones debido a la proximidad de los agujeros entre sí. Debido a este inconveniente, se llegó a un compromiso entre cantidad de agujeros, concentración de tensiones, y compacticidad del nodo.

Como solución a estos problemas se diseñaron dos tipos de nodos, por un lado un nodo con cuatro agujeros en los cuales su separación es de 60 grados entre sí, y por el otro un nodo de 5 orificios con una separación de 45 grados entre los mismos. Estos tienen de un lado de la placa un cilindro soldado en donde se aplicará la carga. De esta manera, se permiten equilibrar los momentos generados por las cargas a través del baricentro del nodo.

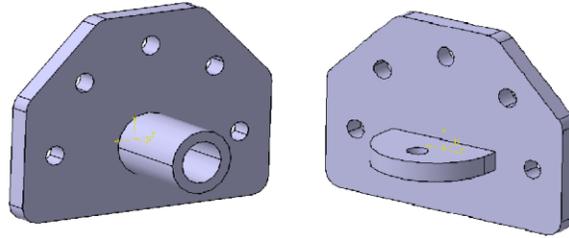


Figura 12

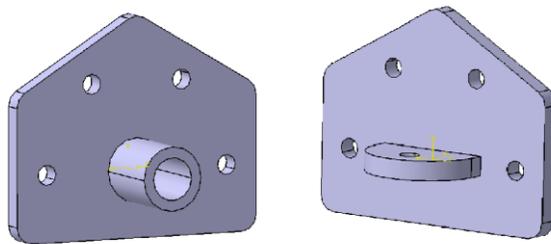


Figura 13

Los mismos son realizados de Aluminio 5083, el cual tiene buenas propiedades mecánicas, densidad reducida, buena soldabilidad y maquinabilidad.

Al diseño elegido se los unió de a pares a través de un tubo de aluminio de una pulgada para darle rigidez al sistema.

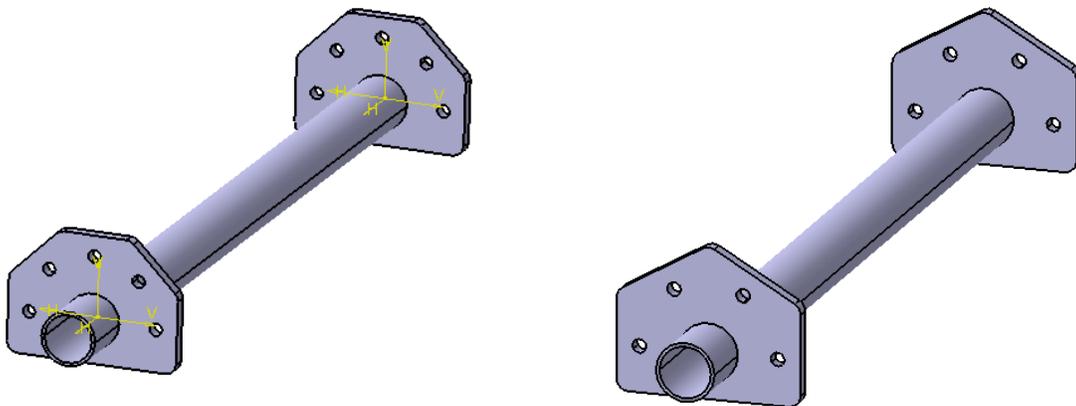


Figura 14

- Apoyos

Los apoyos son una parte fundamental en el armado del reticulado debido a que sobre ellos recaen todas las cargas. Además, uno de ellos debe idealizar un apoyo fijo de manera satisfactoria, mientras que el otro debe tener la capacidad de permitir un movimiento lineal a lo largo de un eje.

El material seleccionado para estos es un Aluminio 5083, debido principalmente a que tiene una buena resistencia mecánica y maquinabilidad, acompañado de su soldabilidad con una TIG. También, tiene las ventajas características del aluminio como resistencia a la corrosión y su baja densidad.

Para su diseño se tuvieron en cuenta algunos factores:

- ✓ Las dimensiones de los apoyos debe ser tal que abarque sobre el mismo a los dos nodos junto con su barra transversal, lo cual lo limita a una longitud no menor a 300 mm. También, debe tener un ancho tal que la estructura apoye firmemente sobre los apoyos sin mucho movimiento oscilatorio o de poca estabilidad, entendiéndose que se quiere que el reticulado sea fácil de manejar. El ancho elegido es de 100 mm, dándole un excelente apoyo a toda la estructura. Por razones estructurales y prácticas, el espesor de todas las piezas de los apoyos es de 10 mm.
- ✓ El peso de cada apoyo debe ser lo más reducido posible por la razón ya mencionada de que debe ser fácilmente manejable además de que debe ser transportable. Con el diseño actual de los mismos y el material utilizado el peso de cada uno de los apoyos es de aproximadamente 1,5 kg.
- ✓ Para asegurar estructuralmente los apoyos se añadieron al diseño dos nervios por apoyo, uno de cada lado del reticulado. Esto favorece notablemente la estabilidad del apoyo reduciendo el riesgo de fallo.
- ✓ Un punto muy importante en la etapa de diseño fue el de definir la superficie en la cual apoya el tubo de los nodos. La misma debe tener una ranura por la que el conjunto Tubo-Nodos sea montable con facilidad en el apoyo. Para el mismo se tuvieron en cuenta dos diseños que se desarrollarán más adelante.

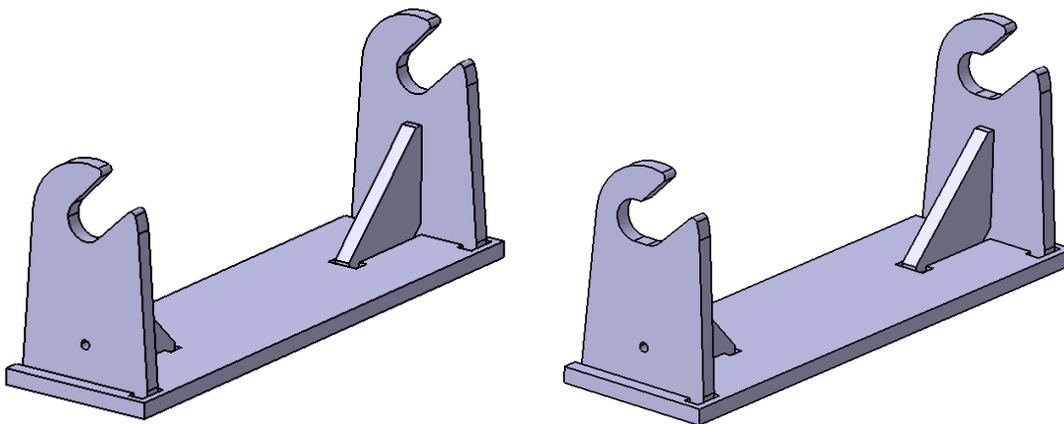


Figura 15

El apoyo cuenta con cinco piezas en las cuales hay una placa horizontal, dos apoyos verticales con sus respectivas ranuras y, dos nervios. Todas las piezas son unidas mediante soldadura TIG de

doble cordón con un espesor mínimo de entre 4 mm y 5 mm. Para facilitar esta tarea, se realizaron unas ranuras sobre la placa horizontal de 2 mm de profundidad que permiten encastrar perfectamente los apoyos verticales y los nervios antes de su soldado.

- Bulones

Para asegurar el óptimo ajuste barra-bulón-nodo (entendiéndose por ajuste al juego generado entre el diámetro de los agujeros de la barra y del nodo respectivamente y el diámetro de la parte lisa del bulón) se debieron modificar espárragos *allen* autofrenantes M6x1 calidad 12.9 (Diámetro de sin roscar de 5.9 mm).

Las modificaciones consisten en aumentar la parte roscada del espárrago hasta obtener una parte lisa de 5mm de largo y 8mm roscados. De esta manera, se asegura prácticamente eliminar el juego entre el eje del bulón, los agujeros de la barra y el nodo y, asegurar que la barra asiente sobre la parte lisa del bulón para asegurar un apoyo homogéneo.

MODELADO Y CÁLCULO TEÓRICO

El cálculo teórico se realizó utilizando un método de elementos finitos con elementos barra.

Para ello, se consideraron:

- ✓ Solo pequeños desplazamientos y deformaciones.
- ✓ Material isotrópico, elástico y lineal.
- ✓ Solo existen desplazamientos y esfuerzos axiales.
- ✓ Las cargas son aplicadas en el baricentro de los nodos.
- ✓ Las fuerzas sobre el nodo convergen al baricentro del mismo.
- ✓ El área de las barras no varía.

A su vez, se realizó un modelo con elementos vigas para hacer una comparación con los resultados del modelo de barras. Esto tiene como objeto verificar si se tiene un considerable error al abulonar con apriete las barras sobre los nodos, impidiendo el libre giro de las mismas, generándose un par flexor.

Para el modelo de vigas se consideró:

- ✓ Solo pequeños desplazamientos y deformaciones.
- ✓ Material isotrópico, elástico y lineal.
- ✓ Las cargas son aplicadas en el baricentro de los nodos.
- ✓ Las fuerzas sobre el nodo convergen al baricentro del mismo.
- ✓ El área y el momento de inercia no varían.

El módulo de elasticidad E utilizado para ambos modelos se obtuvo de unos ensayos de tracción (ver anexo III), y es de 65.85 GPa.

Los mismos se realizaron en Matlab, con los códigos que se muestran en el Anexo IX (Elementos Barra) y Anexo X (Elementos Viga).

En las tablas 3 y 4 se muestran las tensiones y las deformaciones unitarias del cálculo teórico de ambos modelos.

En el caso del modelo de vigas, en las figuras se muestran los resultados de las tensiones y deformaciones unitarias en el medio del elemento, es decir en $L/2$, y sobre $D/2$ y otra sobre $-D/2$. A su vez, se realiza el promedio de estas. También se muestra la diferencia porcentual entre el cálculo de tensiones en elementos barras y el promedio de los elementos viga en el medio del elemento.

Nro de elemento	σ_{barra} [Mpa]	Mitad de viga			diferencia [%]
		$\sigma_{viga}(-D/2)$ [Mpa]	$\sigma_{viga}(D/2)$ [Mpa]	$\sigma_{viga,prom}$ [Mpa]	
1	1,6158	1,2283	2,0028	1,61555	0,02%
2	3,2316	3,2188	3,2188	3,2188	0,40%
3	1,6158	2,0028	1,2283	1,61555	0,02%
4	-3,2316	-3,6438	-2,7966	-3,2202	0,35%
5	3,2316	2,9106	3,4991	3,20485	0,83%
6	0	-0,00001197	0,00001382	9,25E-07	0,00%
7	0	0,00001382	-0,00001197	9,25E-07	0,00%
8	3,2316	3,4991	2,9106	3,20485	0,83%
9	-3,2316	-2,7966	-3,6438	-3,2202	0,35%
10	-3,2316	-3,3842	-3,0535	-3,21885	0,39%
11	-3,2316	-3,0535	-3,3842	-3,21885	0,39%

Tabla 3

Nro de elemento	ϵ_{barra} [Mpa]	Mitad de viga			diferencia [%]
		$\epsilon_{viga}(-D/2)$ [Mpa]	$\epsilon_{viga}(D/2)$ [Mpa]	$\epsilon_{viga,prom}$ [Mpa]	
1	25,2902	19,2254	31,3471	25,28625	0,02%
2	50,5805	50,3811	50,3811	50,3811	0,39%
3	25,2902	31,3471	19,2254	25,28625	0,02%
4	-50,5805	-57,032	-43,7714	-50,4017	0,35%
5	50,5805	45,5562	54,7677	50,16195	0,83%
6	0	-1,874	2,1623	0,14415	0,00%
7	0	2,1623	-1,874	0,14415	0,00%
8	50,5805	54,7677	45,5562	50,16195	0,83%
9	-50,5805	-43,7714	-57,032	-50,4017	0,35%
10	-50,5805	-52,9688	-47,7937	-50,38125	0,39%
11	-50,5805	-47,7937	-52,9688	-50,38125	0,39%

Tabla 4

RESULTADOS

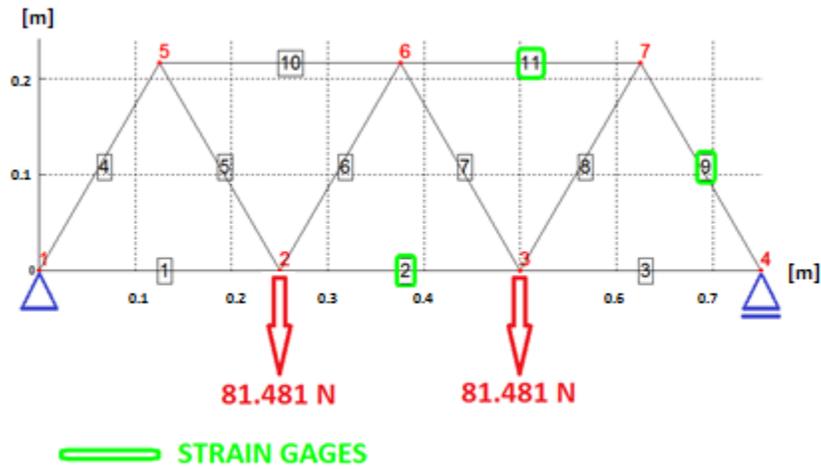


Figura 16

Ensayo	Barra	Carga (N/nodo)	Deformación teórica ($\mu\epsilon$)	Deformación real ($\mu\epsilon$)	Error (%)
1	11	-81,481	-42	-43	2%
	9	-81,481	-42	-42	0%
	2	-81,481	42	38	10%
2	11	-81,481	-42	-42	0%
	9	-81,481	-42	-49	17%
	2	-81,481	42	36	14%
3	11	-81,481	-42	-43	2%
	9	-81,481	-42	-54	29%
	2	-81,481	42	35	17%
4	11	-81,481	-42	-35	17%
	9	-81,481	-42	-49	17%
	2	-81,481	42	44	5%
5	11	-81,481	-42	-41	2%
	9	-81,481	-42	-51	21%
	2	-81,481	42	42	0%
6	11	-81,481	-42	-43	3%
	9	-81,481	-42	-49	17%
	2	-81,481	42	45	7%
7	11	-81,481	-42	-43	3%
	9	-81,481	-42	-49	17%
	2	-81,481	42	45	8%
8	11	-81,481	-42	-43	2%
	9	-81,481	-42	-49	16%
	2	-81,481	42	45	7%
9	11	-81,481	-42	-43	3%
	9	-81,481	-42	-49	18%
	2	-81,481	42	45	8%
10	11	-81,481	-42	-43	3%
	9	-81,481	-42	-49	17%
	2	-81,481	42	45	7%
	11	Promedio del strain gauge			4%
	9				17%
	2				8%
Promedio total					10%

Tabla 5

Las mediciones se realizaron según el siguiente esquema de reticulado:

El mismo cuenta con 7 nodos a 60 grados, cuatro de ellos inferiores y tres superiores, y 22 barras. En la barra 2 se instalaron dos *strain gauges* en el centro de la barra, los mismos fueron instalados en dirección al eje y en el plano paralelo a las caras planas de la barra, formando un medio puente de *Wheatstone*. En la barra 9 y 11 se instalaron un *strain gauge* en cada una, los mismos fueron instalados en dirección al eje y en el plano perpendicular a las caras planas de la barra. Los apoyos se ubicaron en los extremos del reticulado, en el nodo 1 el apoyo fijo, y en el nodo 5 el apoyo deslizante. Las cargas fueron aplicadas en la dirección indicada en la figura, siendo de 81.481 N por lado del nodo. Cabe aclarar que los *strain gauges* fueron instalados sobre un lado del puente, y no sobre los dos lados, y que del otro lado del puente los bulones fueron apretados con un par mínimo para impedir el giro de los nodos, y por lo tanto de las barras. Del lado del puente en donde se instalaron los *strain gauges*, las barras son articuladas, y por lo tanto a los bulones no se les aplicó un par, de manera que las barras puedan girar libremente.

Los *strain gauges* utilizados son los EP-08-125AD-120. Y el medidor de resultados es el Modelo P3 – Strain Indicator and Recorder del fabricante VISHAY.

En la tabla 5 se muestran los resultados de las deformaciones unitarias obtenidas frente a las teóricamente calculadas con el modelo de elementos barra.

CONCLUSION

Analizando los resultados de las mediciones realizadas con el reticulado descrito anteriormente, se puede sacar varias conclusiones.

En primer lugar, se puede observar que los valores medidos por los strain gauges son bastantes certeros, siendo la variación porcentual promedio del 10% con respecto al modelo teórico planteado (ver tabla 5). Si nos enfocamos en los valores medidos para cada barra, observamos que las barras 2 y 11 tienen un promedio menor al general, siendo de 8% y 4% respectivamente, y un promedio de 17% para la barra 9. Este desvío se debe a que el correcto posicionamiento de los sensores cuando se los pega con el adhesivo es de suma importancia. Los mismos deben estar alineados con el eje de la barra. Al mínimo desvío, la medición puede cambiar drásticamente. Por lo tanto, la habilidad en el pegado de los strain gauges es de gran importancia para reducir el error y por lo tanto obtener una adecuada medición. A su vez, se puede ver que en promedio la barra 2 obtuvo un error mucho menor al resto, del 4%, frente a un 17% en la barra 9 y a un 8% en la barra 11. La principal razón de esta diferencia es que en la barra 2 se instalaron dos strain gauges formando un medio puente de Wheatstone, dándole una mayor sensibilidad a la medición.

Estos resultados se obtuvieron utilizando un Cian acrilato como adhesivo para pegar los strain gauges. Los mismos se pueden mejorar notablemente utilizando adhesivos recomendados por la marca Micro Measurement, los cuales tiene una vida útil mucho menor, y un costo elevado, pero que pueden lograr mediciones bastante precisas. A su vez, debido a que la variación de la resistencia eléctrica en los cables utilizados en la medición es muy sensible, se espera que el error en la medición disminuya con el aumento de las deformaciones, dando un mejor resultado.

Una idealización del modelo teórico utilizado para el cálculo de las tensiones y deformaciones del reticulado fue suponer que las barras se comportaban como mismas, siendo su única tensión la axial, sin presentar ningún otro tipo de tensiones. La diferencia entre un modelo y el otro es considerable, de un 25% en el peor de los casos. Sin embargo, si se realiza un promedio entre las tensiones y deformaciones a un lado y el otro de la sección de las vigas, se puede observar que los resultados son similares al del modelo de barras. Con lo cual se concluye que la idealización realizada se puede tomar teniendo el siguiente recaudo:

La instalación del strain gauges, sensor de medición utilizado, debe ser tal que la medición no se vea sustancialmente afectada por la diferencia de tensiones provocada por el momento flexor que se generan en las uniones entre las barras y los nodos.

Esto puede llevarse a cabo si el strain gauges se instala en el medio de la barra ($L/2$), y además, se debe instalar en el plano paralelo a las caras prensadas de la barra, o instalarse dos sensores en el plano perpendicular a estas caras, uno a cada lado de la sección de la barra.

Por lo dicho anteriormente, se puede concluir que el modelo de reticulado de barras es capaz de medir en forma instantánea las deformaciones generadas por cargas externas, siendo el rango de deformaciones de $40 \mu\epsilon$ a $400 \mu\epsilon$.

ANEXOS

ANEXO I - CONFIGURACIÓN DE RETICULADOS

Uno de los objetivos del presente trabajo, es el de tener la mayor cantidad de configuraciones de reticulados para armar. Por esta razón, en el diseño de las piezas se tuvieron en cuenta 5 configuraciones típicas de puentes, las cuales se muestran a continuación.

Reticulado 1:

Esta configuración se arma con 30 Barras de 250 mm y 9 Nodos a 60 grados.

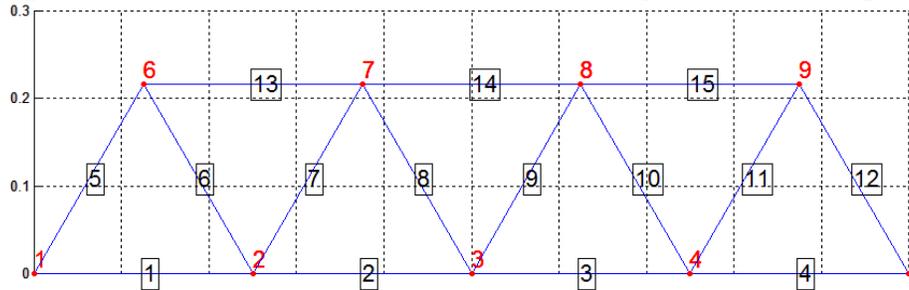


Figura 17

Reticulado 2:

En esta configuración se requiere utilizar 12 barras de 250 mm, 12 Barras de 378.4 mm, y 2 Barras de 500 mm. Los nodos a utilizar son 8 Nodos a 45 grados.

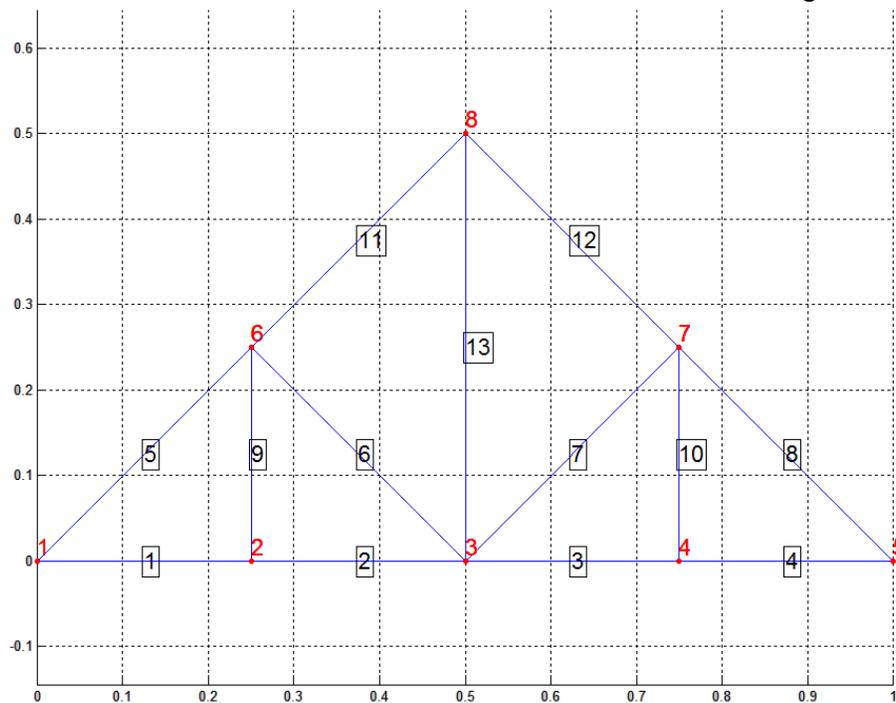


Figura 18 [m]

Reticulado 3:

En este reticulado se utilizan 18 Barras de 250 mm, 8 Barras de 378.4 mm, y 8 Nodos a 45 grados.

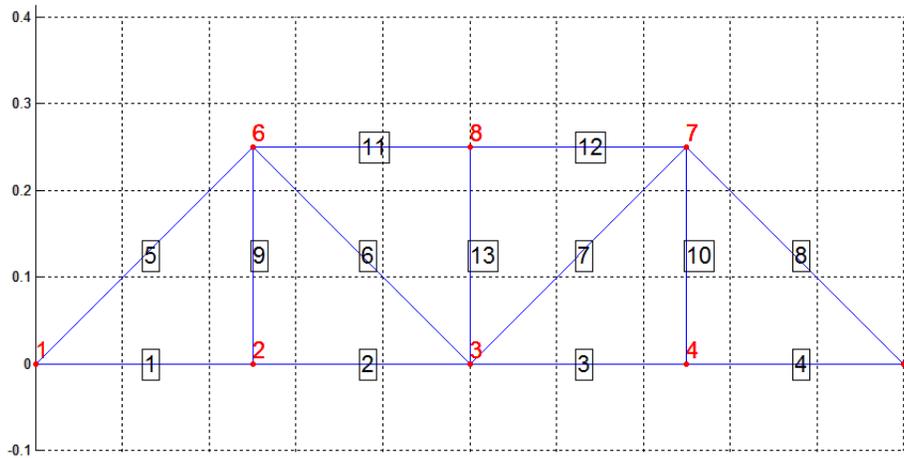


Figura 19

Reticulado 4:

Para esta configuración se usan 18 Barras de 250 mm, 8 Barras de 378.4 mm, y 8 Nodos a 45 grados.

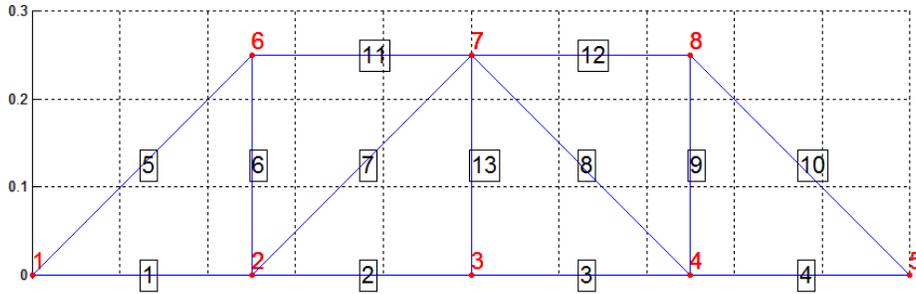


Figura 20

Reticulado 5:

Para realizar este reticulado se utilizan 12 Barras de 250 mm, 8 Barras de 378.4 mm, 2 Barras de 500 mm, y 7 Nodos a 45 grados.

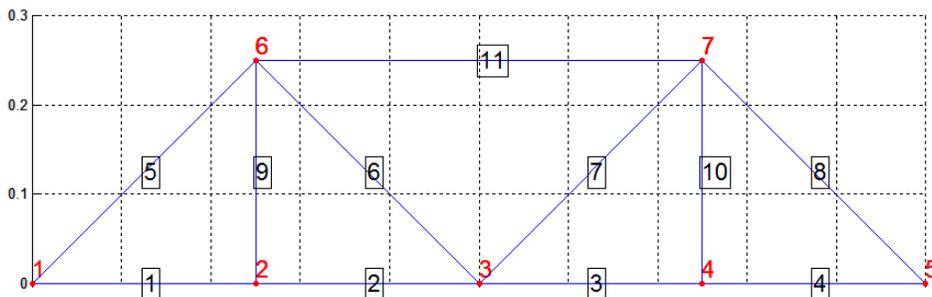


Figura 21

La ubicación de los apoyos en un puente es en los extremos inferiores (nodos 1 y 5). A su vez, es interesante ensayar reticulados en donde sus apoyos se ubiquen en otras posiciones, por ejemplo en la posición 1 y 3.

Estas 5 configuraciones posibles son unas de las muchas que se pueden realizar con las piezas fabricadas. Queda a cargo del usuario desarrollar nuevas configuraciones que pretendan dar un más claro aprendizaje de la importancia de los reticulados en la ingeniería y en el cálculo de estructuras.

ANEXO II - ARMADO DEL RETICULADO

A continuación se detalla el procedimiento a seguir para armar un tipo de reticulado de forma genérica.

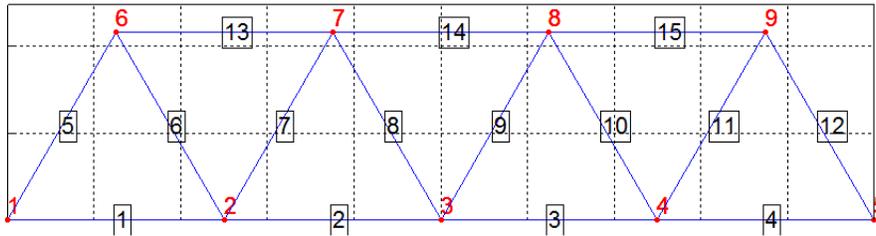


Figura 22

Las imágenes mostradas corresponden al reticulado 1, en donde las barras están a 60° entre sí, y los apoyos colocados en los nodos de los extremos y de forma horizontal. Esta configuración tiene 5 nodos inferiores (del 1 al 5), 4 nodos superiores (del 6 al 9), 15 barras a cada lado de los nodos (30 en total), un apoyo fijo en nodo 1, un apoyo deslizante en nodo 5, y 60 bulones Allen M6X1 con sus respectivas tuercas autofrenantes.

Como se pueden ver en las siguientes imágenes, la numeración de las barras corresponde a un solo lado del reticulado, por lo tanto, cuando se haga mención a alguna de las barras, se estará hablando a la correspondiente a ambos lados.

1. Colocar los nodos 1 a 5 en fila apoyados sobre algún lugar plano.

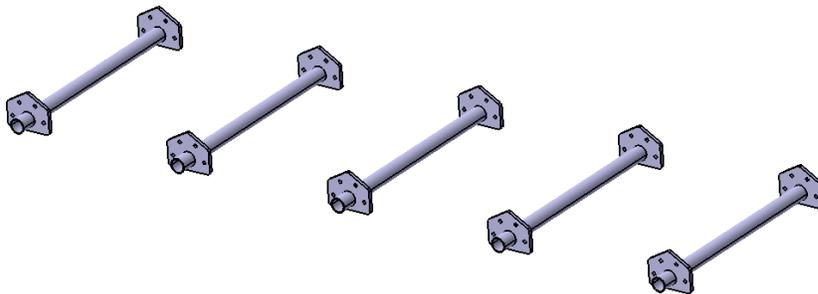


Figura 23

2. Colocar las barras 1 a 4 horizontalmente y unirlos con los respectivos nodos mediante un bulón sin apriete.

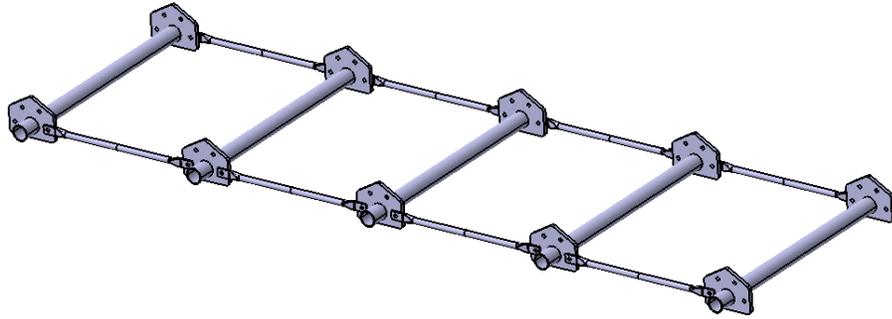


Figura 24

3. Colocar y abulonar las barras 5 a 12 en los agujeros de los nodos de manera de quedar a 60° del eje horizontal. El apriete debe ser lo suficiente como para que no giren las barras y queden en su lugar hasta colocar los demás nodos.

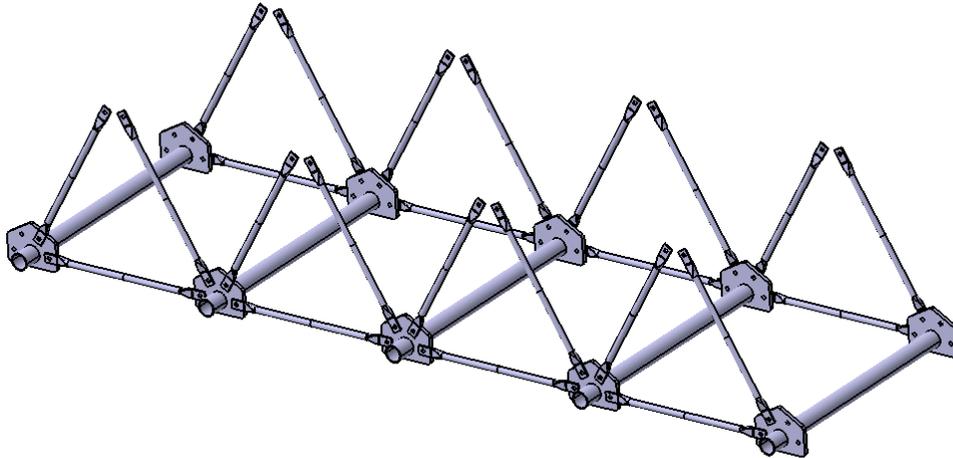


Figura 25

4. Colocar los nodos 6 a 9 de manera invertida sobre las barras que están inclinadas.

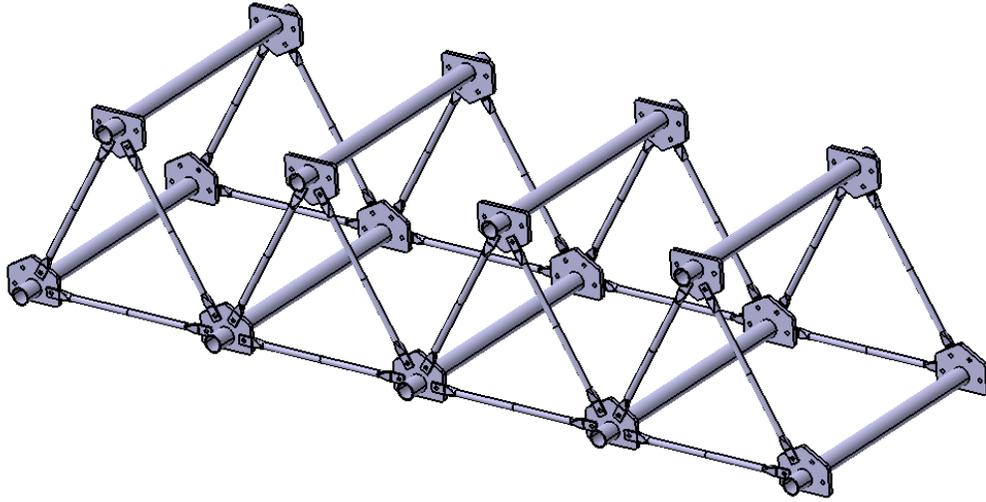


Figura 26

5. Colocar y abulonar las barras 13 a 15 sobre sus respectivos nodos para completar el armado del reticulado.

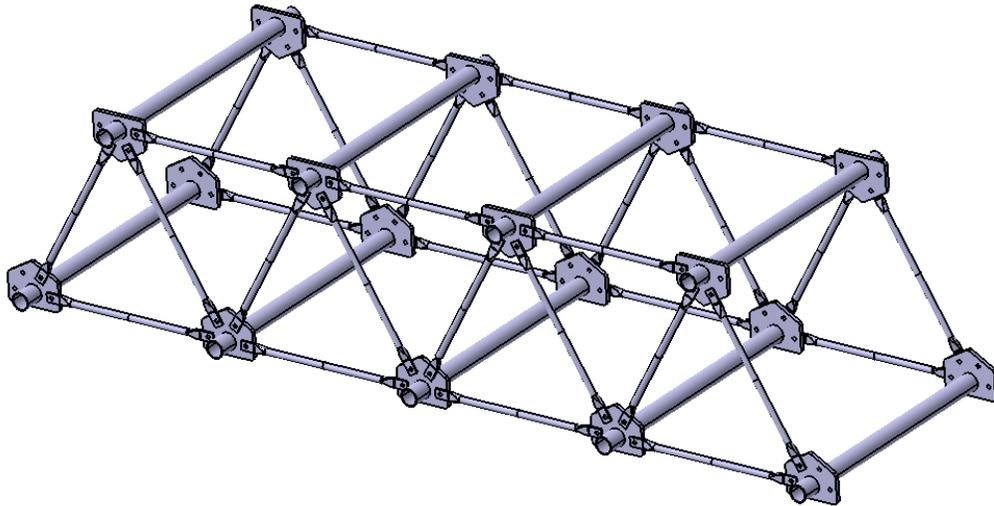


Figura 27

6. Colocar los apoyos en los nodos 1 y 5.

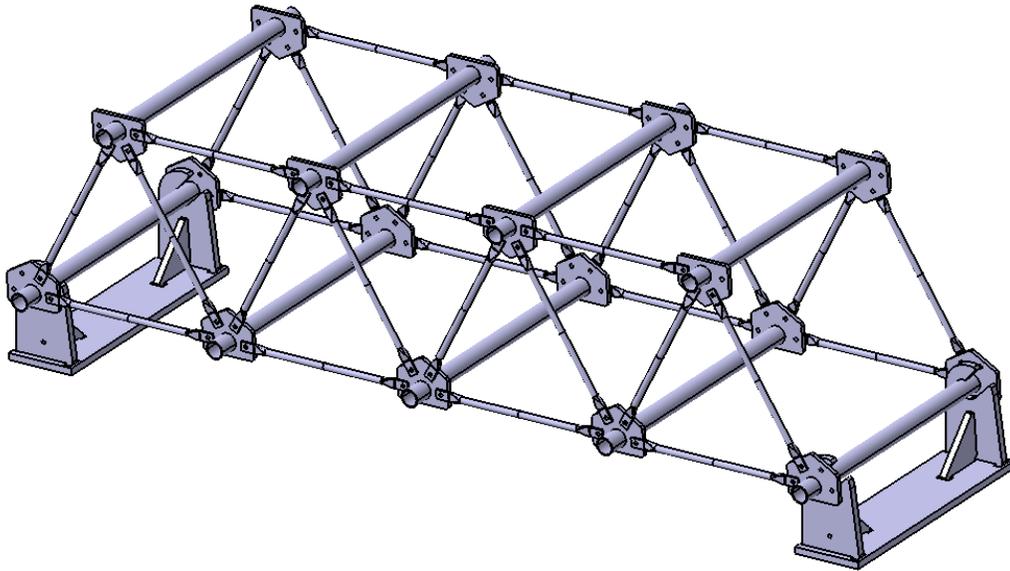


Figura 28

Una vez finalizado el armado del reticulado, se deben apretar los bulones de un solo lado del reticulado, y del otro lado dejar todos los bulones sin apriete alguno, de manera que de este lado los mismos puedan girar, sin mucho juego, sobre su eje. Esto se debe principalmente para impedir que los nodos, y por lo tanto las barras, giren sobre su eje como consecuencia de pertenecer a un sistema mecánico articulado con más de un grado de libertad. Por ello, se decide omitir estos grados de libertad pendientes apretando los bulones de un solo lado del reticulado, y de esta manera, obtener una mejor medición.

ANEXO III - MÓDULO DE YOUNG DE LAS BARRAS

Para el cálculo teórico de las tensiones y deformaciones es necesario el módulo de Young E del material utilizado en las barras. Debido a esta necesidad se realizaron ensayos de tracción y un ensayo de compresión para la determinación del mismo. Esto se realizó en el taller mecánico del ITBA con la máquina Instron 3382 (ver foto).

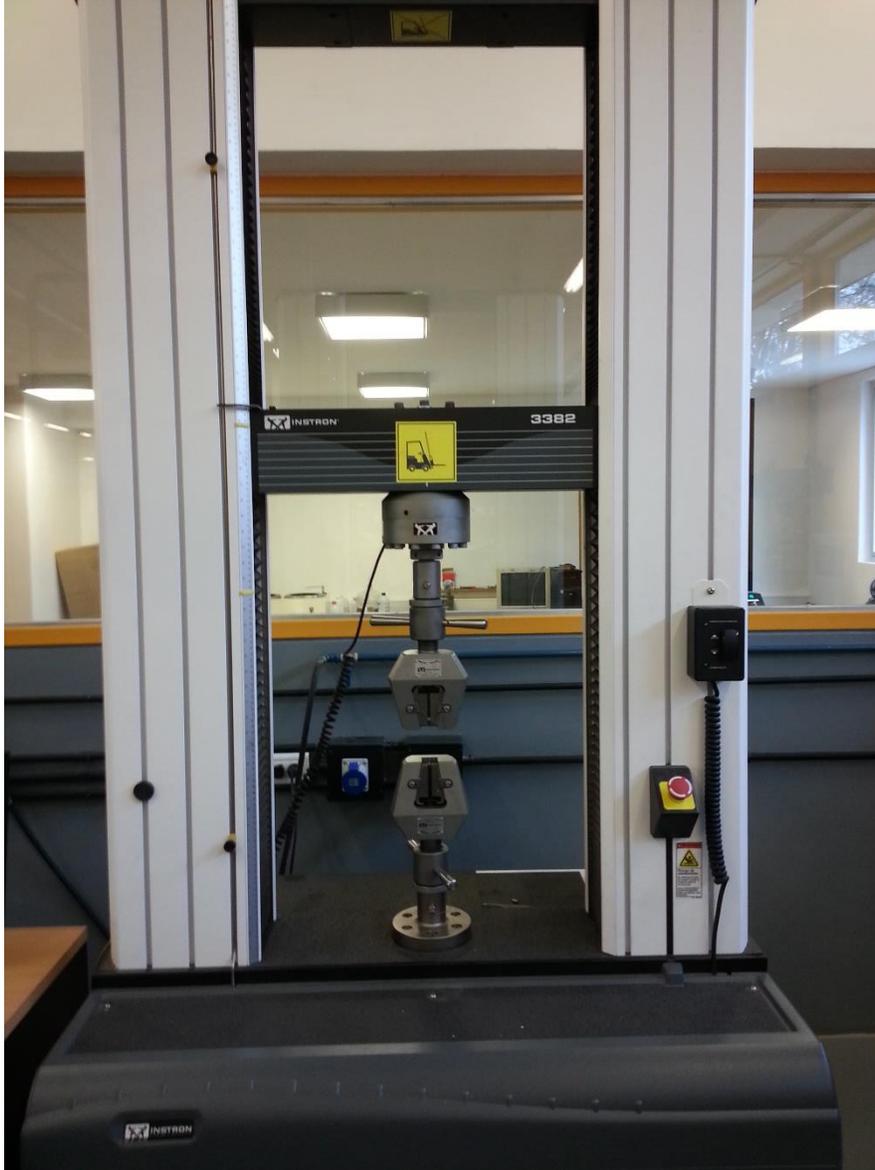
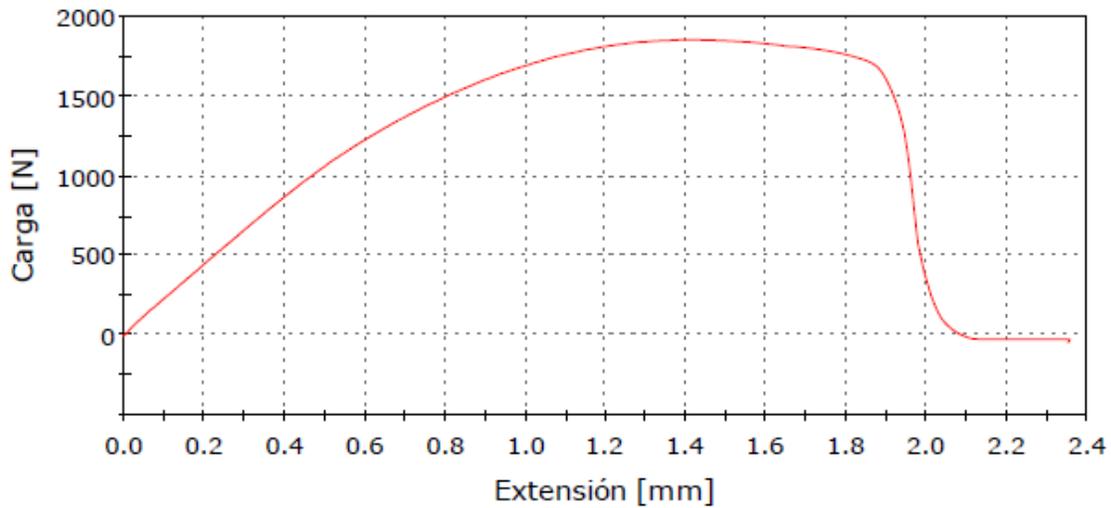


Figura 29

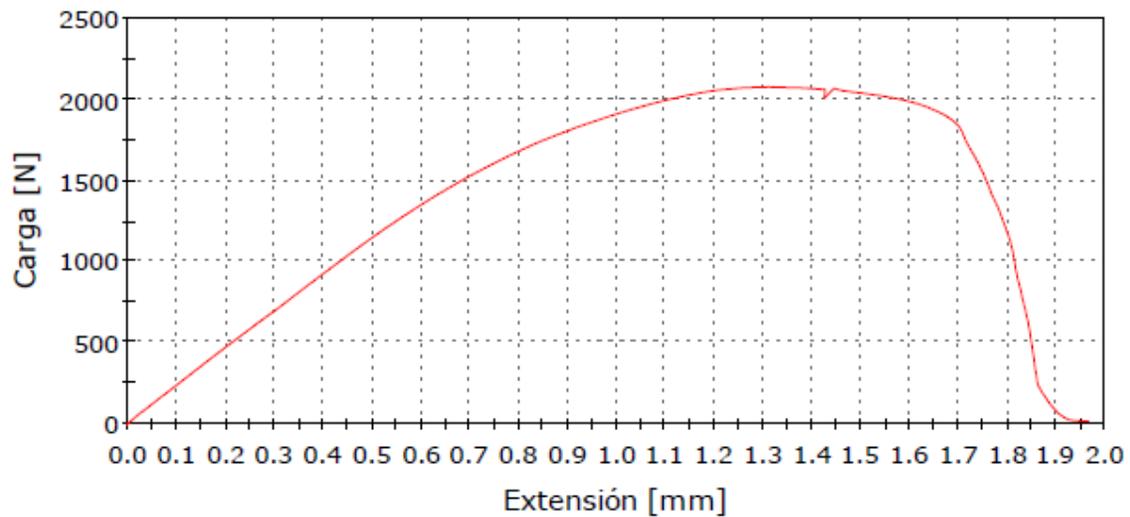
Las barras utilizadas fueron las mismas que se utilizan en el reticulado, las Barras 250 mm, abulonadas a dos nodos en sus extremos con bolones Allen M6 con su extremo roscado hasta 5mm antes de la cabeza del bulón, con el objetivo de aproximarse a las condiciones de reales de las barras en el reticulado. Para medir deformaciones se utilizó un extensómetro, el cual fue ubicado en el centro de la barra.

El objetivo principal del ensayo es la obtención de módulo de elasticidad E . Además, se llevó la barra hasta la rotura con el propósito de obtener la tensión de fluencia y la tensión máxima antes de la rotura del material.

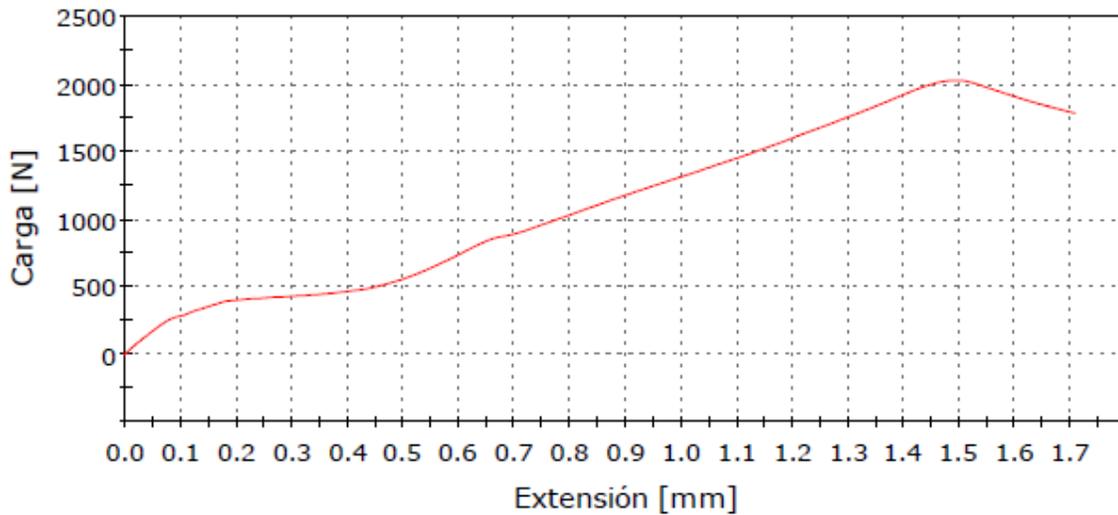
Las gráficas obtenidas se muestran a continuación:



Gráfica 1



Gráfica 2



Gráfica 3

Las gráficas 1 y 2 muestran el ensayo de tracción realizado, la gráfica 3 es una gráfica del ensayo de compresión realizado. Como se puede observar, los resultados varían de una barra a otra. La carga de fluencia, difícil de determinar al no haber una clara diferencia entre la transición Lineal – Fluencia, se estima en 1500 N, o aproximadamente 52 MPa. La carga máxima a la rotura se estima en 1800 N, o aproximadamente 62 MPa. Los resultados de Módulo de Young obtenidos se muestran para tramos de deformación unitaria que van de 0 a 50 $\mu\epsilon$, hasta 0 a 500 $\mu\epsilon$, en intervalos creciente de a 50 $\mu\epsilon$. Esto se realizó debido a que la dispersión promedio es de 4.06% entre este rango de incrementos calculados.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

MEDICIÓN	E [0 $\mu\epsilon$ -50 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -100 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -150 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -200 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -250 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -300 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -350 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -400 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -450 $\mu\epsilon$] (Gpa)	E [0 $\mu\epsilon$ -500 $\mu\epsilon$] (Gpa)
1	69,3502438	73,59471666	73,67311253	70,82443713	71,55274841	69,82209113	70,57964056	71,0271868	69,58431725	69,68150319
2	63,89236952	64,66606235	64,37156025	64,41261327	64,24042484	64,7665424	64,74758226	65,18051262	65,56982013	66,04619063
3	62,87588272	64,3547818	64,99190166	64,806303	64,80919914	65,13675678	64,83635469	64,96272527	64,93113073	65,19073109
Ponderación	64,58	66,33	66,48	65,85	65,93	65,93	65,95	66,26	66,12	66,43

Tabla 6

En la tabla 6 se muestran los distintos Módulos de Young según la siguiente formula.

$$E_{\epsilon_a, \epsilon_b} = \frac{F_b - F_a}{A \cdot (\epsilon_b - \epsilon_a)}$$

Siendo ϵ_a y ϵ_b las deformaciones unitaria en mm/mm, $E_{\epsilon_a, \epsilon_b}$ el módulo de Young E

Entre las deformaciones ϵ_a y ϵ_b , y F_a y F_b la carga en Newton, A es el área en mm².

Para obtener un único valor, se realizó un promedio ponderado entre los tres ensayos para cada rango de deformaciones. La ponderación realizada es la siguiente:

$$E_{\varepsilon_a, \varepsilon_b, \text{ponderado}} = 0,2 \cdot E_{\varepsilon_a, \varepsilon_b, 1} + 0,4 \cdot E_{\varepsilon_a, \varepsilon_b, 2} + 0,4 \cdot E_{\varepsilon_a, \varepsilon_b, 3}$$

La razón de realizar de esta manera el promedio es que de los tres ensayos realizados, el primero fue ejecutado a una velocidad de aumento de carga casi 5 veces mayor que los siguientes dos, viendo en los resultados un claro incremento en la rigidez de la barra. Como por lo general la aplicación de las cargas en el reticulado será de manera gradual y lenta, se decidió darle más peso a los ensayos que tuvieron una menor velocidad de aumento de carga.

Según en qué rango de deformaciones unitarias se esté trabajando durante las mediciones realizadas en el reticulado, los cálculos se deben realizar con el Módulo de Young E según esta última tabla.

ANEXO IV - ANÁLISIS DE TENSIONES EN BARRA

Objetivos:

Obtener los esfuerzos máximos admisibles en las barras utilizadas en el reticulado.

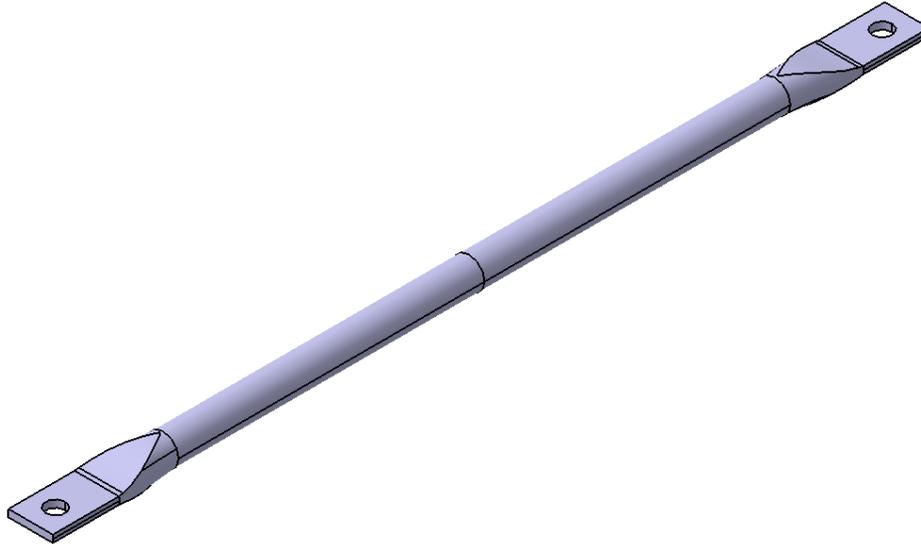


Figura 30

Método:

Se calculará el esfuerzo máximo admisible P_{max} en la barra a partir de la tensión de fluencia calculada en los ensayos de las barras (ANEXO IV) teniendo en cuenta los esfuerzos normales a la sección tubular de la misma, la concentración de tensiones por el agujero, los esfuerzos generados por el pandeo con y sin excentricidad de carga.

Valores utilizados:

$E = 65850 \text{ MPa}$ (Aluminio);

$D_{ext} = 3/8'' = 9,525 \text{ mm}$

e (espesor de sección tubular) = 1,1mm

Área sección transversal (hueca) = 29,11 mm²;

$I_z = 262,7 \text{ mm}^4$;

$\sigma_{fl} = 52 \text{ Mpa}$;

A_{net} (Area neta en agujero) = $13,6\text{mm} \cdot 2,2\text{mm} - 6\text{mm} \cdot 2,2\text{mm} = 16,72\text{mm}^2$;

b (Ancho de cara prensada) = 13,6mm;

Φ (Diámetro de agujero en cara prensada) = 6mm;

s (espesor de cara prensada) = 2,2mm;

L_1 (distancia entre agujeros de barra de 250mm) = 250mm

L_1 (distancia entre agujeros de barra de 378,4mm) = 378,4mm

L3 (distancia entre agujeros de barra de 560mm) = 560mm

Análisis de esfuerzos normales a sección tubular:

Siendo P el esfuerzo en la barra y A el área de la sección tubular uniforme de la misma,

$$\sigma = \frac{P}{A} \rightarrow P_{max} = \sigma_{fl} \cdot A \rightarrow P_{max} = 52MPa \cdot 29,11mm^2 \rightarrow P_{max} = 1513,72N$$

Análisis de esfuerzo en agujero:

La tensión nominal en la sección por donde se encuentra el agujero es:

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A_{net}}$$

Teniendo en cuenta que en las proximidades del agujero habrá concentración de tensiones, se estima el factor de concentración de tensiones según lo recomendado por Bruhn en su manual "Analysis and Design of Flight Vehicle Structures", página D1.5, sección "Failure in Tension", en donde define que para una placa con unión abulonada (figura 31) el margen de seguridad requerido es de 25%. En nuestro caso, se puede considerar que la cara prensada de la barra es similar a una placa abulonada. Por lo tanto el factor de concentración de tensiones en el mismo se estima en 1,25.

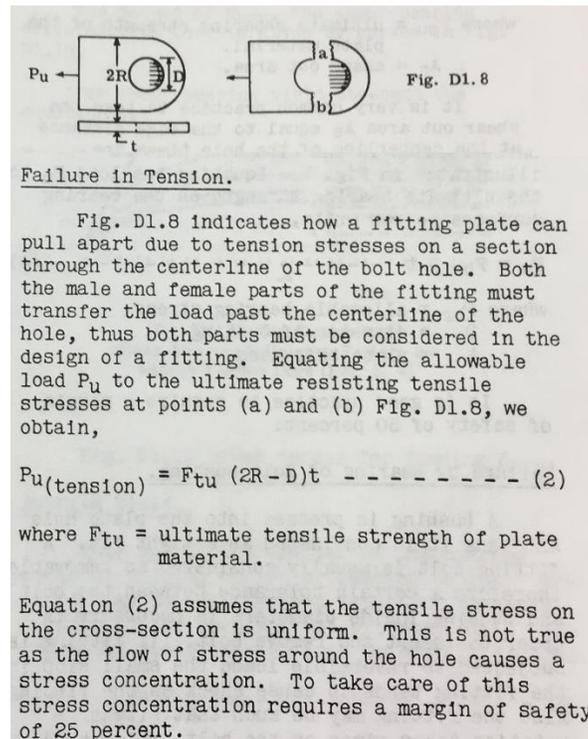


Figura 31

Por lo tanto, la tensión máxima en la sección por donde pasa el agujero es:

$$\sigma_{max} = K \cdot \sigma_{nom} = K \cdot \frac{P}{A_{net}}$$

Y entonces el esfuerzo máximo admisible en esta sección es:

$$P_{max} = \frac{\sigma_{max} \cdot A_{net}}{K} = \frac{52MPa \cdot 16,72mm^2}{1,25} = \mathbf{695,6N}$$

Análisis de pandeo:

Para las barras L1, L2 y L3 en compresión con sus extremos articulados la carga crítica de la misma es,

$$P_{cri,1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_1^2} = \frac{\pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{250^2mm^2} = \mathbf{2728,9N}$$

$$P_{cri,2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_2^2} = \frac{\pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{378,4^2mm^2} = \mathbf{1191,1N}$$

$$P_{cri,3} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_3^2} = \frac{\pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{560^2mm^2} = \mathbf{543,9N}$$

En el caso de las barras utilizadas, la hipótesis de extremos articulados es correctamente aplicada en el plano paralelo a la placa de los nodos.

Pero la hipótesis anterior no es aplicable para las condiciones en el plano perpendicular a la placa de los nodos. La barra en este plano se asimila más a extremos empotrados. A su vez, a pesar de que la carga en este plano es excéntrica, no tiene significado tomarla como tal ya que cualquier momento aplicado en el extremo de la barra es resistido directamente por la unión entre la barra y la placa, y no produce flexión en la misma.

Por lo comentado, la carga crítica para la barra L1, L2 y L3 en compresión con extremos empotrados es,

$$P_{cri,1} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_1^2} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{250^2mm^2} = \mathbf{10915,6N}$$

$$P_{cri,2} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_2^2} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{378,4^2mm^2} = \mathbf{4764,4N}$$

$$P_{cri,3} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_3^2} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 65850MPa \cdot 262,7mm^4}{560^2mm^2} = \mathbf{2175,6N}$$

Con los resultados obtenidos anteriormente, previo a realizar el ensayo el usuario deberá analizar los esfuerzos en las barras, y por lo tanto el sistema de cargas propuesto en el reticulado, para que ninguno de estos supere los esfuerzos máximos y cargas críticas establecidas.

ANEXO V - PRENSA TUBOS

Se requirió la construcción de un Prensa Tubos para la realización de las barras del reticulado. El mismo tiene la función de prensar las puntas de las barras de manera de poder realizarles un agujero que las fije a los nodos.

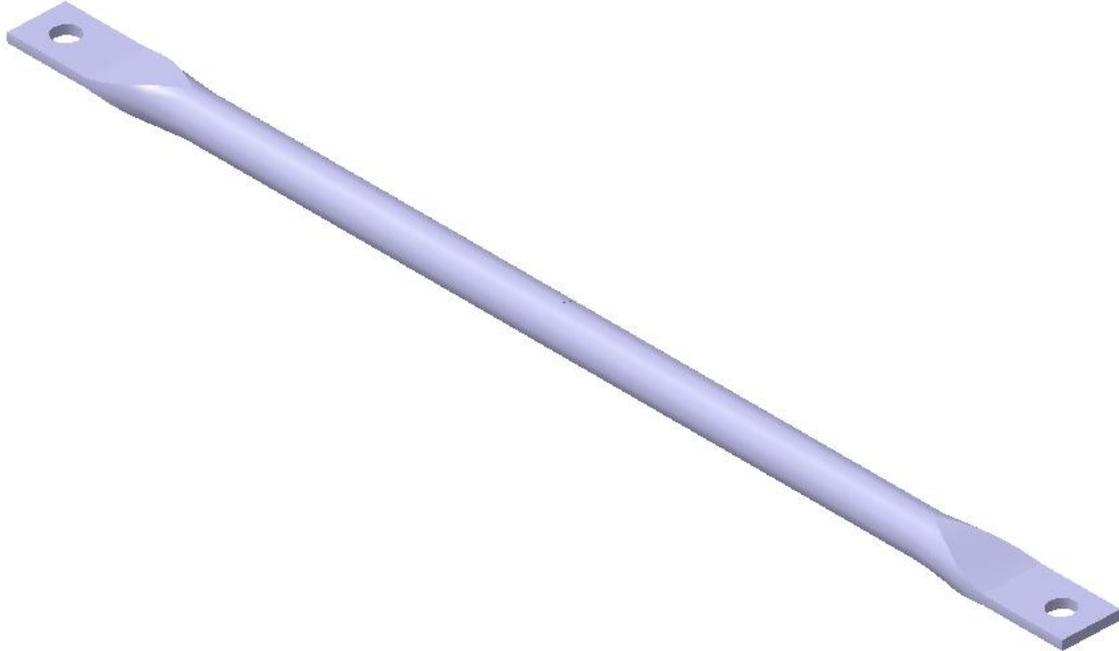


Figura 32

Se utilizará la máquina de ensayos de la facultad como prensa. En la misma se puede controlar la fuerza de prensado.

Los requisitos del Prensa Tubos son los siguientes:

- Obtener dos caras planas en cada punta del tubo.
- Lograr una excentricidad reducida entre el plano medio de la barra y las puntas prensadas, de manera de reducir el error causado por la misma en la medición de las tensiones y deformaciones.
- Ser capaz de prensar por lo menos los dos largos de barras más utilizados en los reticulados sugeridos. Estos serían las barras con una distancia entre agujeros de 250 mm y de 378.4 mm.
- Poder centrar correctamente el tubo antes de ser prensado, de manera de obtener un prensado parejo hacia ambos lados del eje axial.
- Ser capaz de soportar una fuerza de prensado de por lo menos 2.000 kg.

El primer diseño realizado es el siguiente:

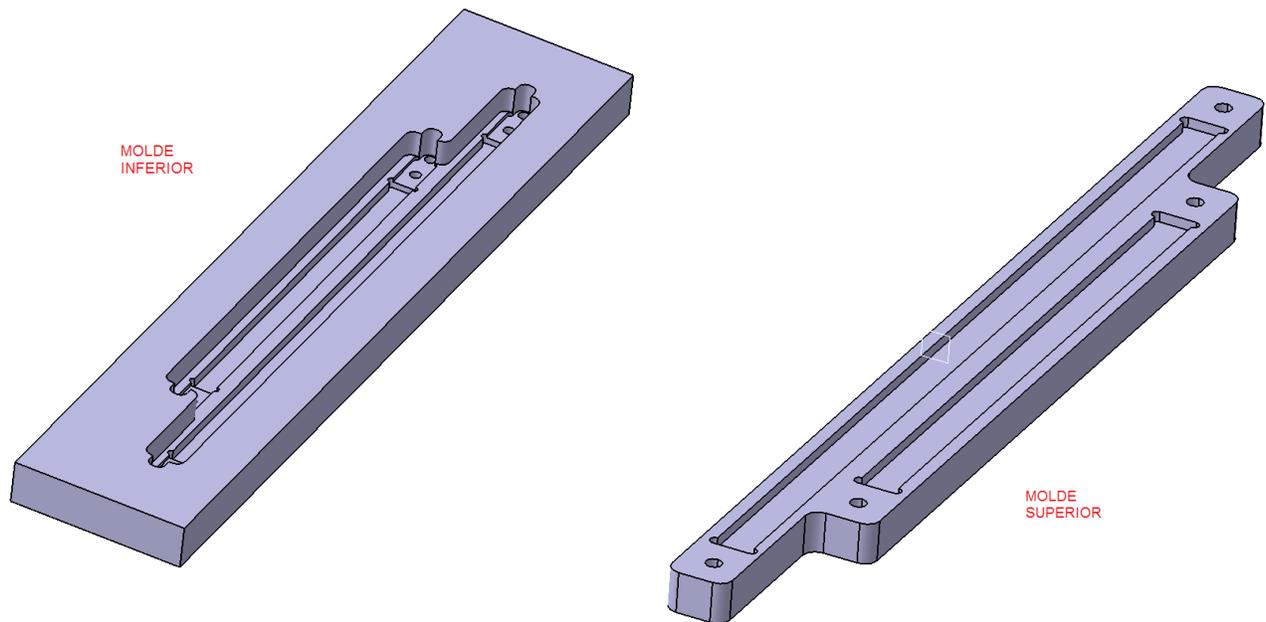


Figura 33

Este diseño cumple con todos los requisitos planteados, pero en el mismo se requiere de mucho material base así como también de muchas horas de mecanizado, razón por la cual se realizó un nuevo diseño para optimizar estos recursos. El segundo y último diseño es el siguiente:

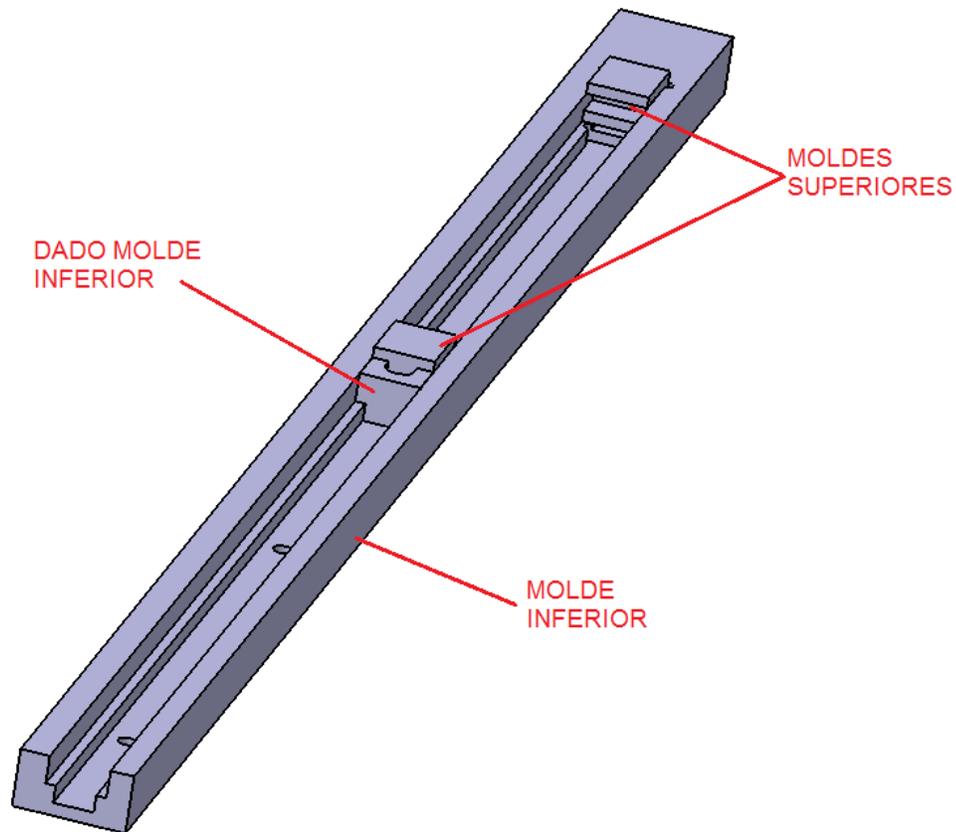


Figura 34

Este Prensa Tubos cuenta con los siguientes elementos:

- Molde Inferior: Este tiene un ranurado realizado desde un extremo de unos 650 mm en el cual se realizaron tres agujeros fijadores del Dado Molde Inferior, correspondientes a los tres largos de barras. En el extremo del ranurado se realizó el contorno en donde se produce el prensado con la forma final del extremo del tubo. Este también tiene una abertura para fijar la barra sin deformar de manera de obtener un correcto centrado.

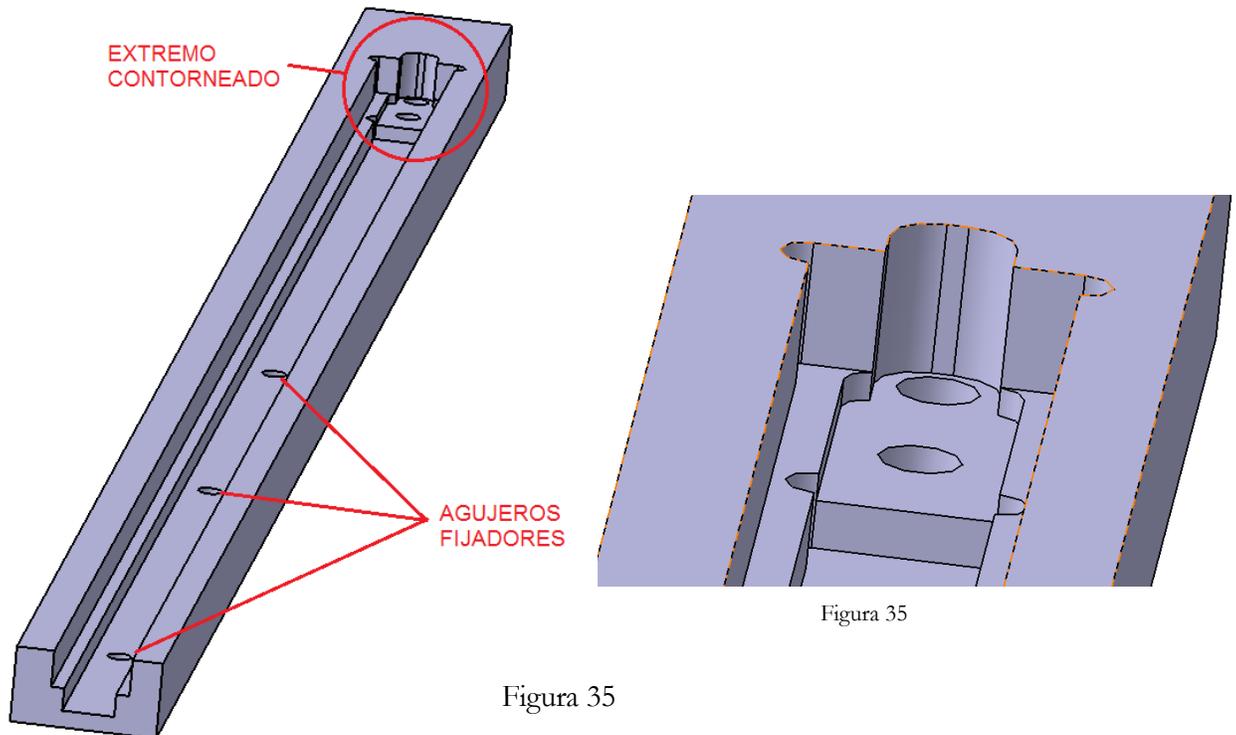


Figura 35

- Dado Molde Inferior: Este dado es la contracara del extremo contorneado del Molde Inferior. El mismo se fija al Molde Inferior mediante un agujero realizado en ambas piezas el cual se le introduce un pasante que termina limitando su movimiento.

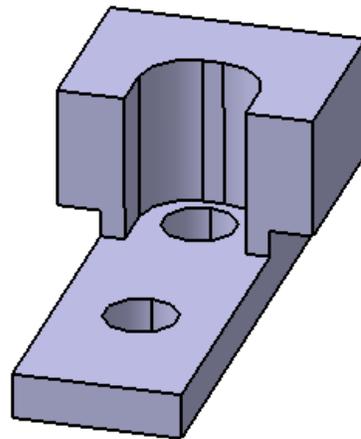


Figura 36

- Molde Superior: Se requieren dos de estos moldes. Estos tienen la tarea de comprimir la barra contra los moldes. Su cara inferior es plana, la cual termina apoyando en los hilos del Molde Inferior. Tienen una ranura de 6

mm realizada de lado a lado para encuadrar una plancha entre ambos Moldes Superiores.

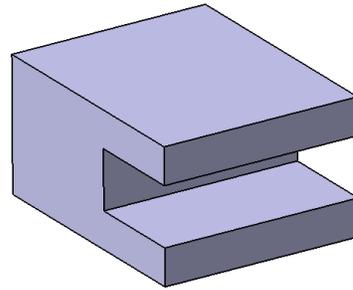


Figura 37

- Plancha de 6 mm: Esta plancha, como se explicó anteriormente, se encuadra entre los Moldes Superiores. Tiene la función de evitar que la barra, cuando se prensa, pandee provocando una deformación no deseada. El largo de esta plancha varía según el largo de la barra que se prensa. Por lo que en total hay tres planchas, una por cada largo de barra.

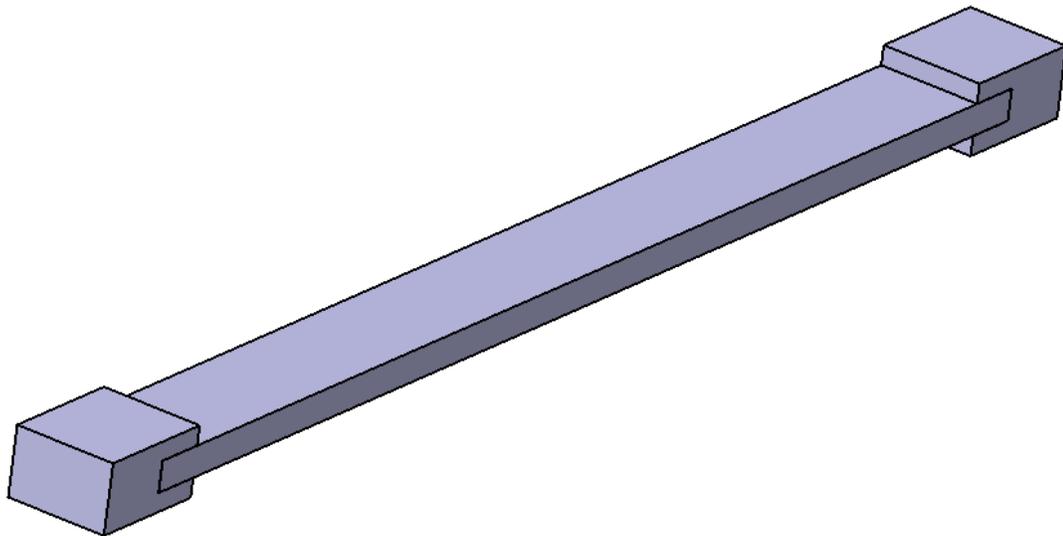


Figura 38

- Pasante: Este tiene el objetivo de fijar el Molde Inferior con el Dado Molde Inferior. El diámetro del mismo es tal que el ajuste es deslizante.

El Prensa Tubos realizado cumple con todos los requisitos, además tiene la ventaja de poder prensar los tres largos de tubos utilizados y tiene oportunidad futura de prensar algún otro largo que se requiera hasta barras de longitud de 612 mm.

La realización de las piezas es a través de una fresadora CNC – HASS TM1 para el Molde Inferior, Dado Molde Inferior y los dos Moldes superiores. El pasante se realiza en un torno manual y la Plancha en una fresadora manual.

El material del molde es un Aluminio 7075 proveído por ILPEM S.A. con las siguientes propiedades.

CARGA A LA ROTURA [MPA]	LÍMITE ELÁSTICO [MPA]	DUREZA [Hb]	MODULO DE ELASTICIDAD [GPA]
500-550	450-500	150-160	71.5

Tabla 7

A la vez, este material tiene una buena resistencia a la corrosión, con lo que las tolerancias obtenidas se mantendrán con el transcurso del proyecto. No está de más aclarar que este Aluminio es muy difícil de soldar con MIG o TIG, por lo que no se debe intentar soldar salvo que sea por resistencia.

Como material alternativo al Aluminio, se analizó la utilización de un Acero dulce como ser el 1020 para los mismos. Si bien este material es más económico que el Aluminio, el tiempo de mecanizado es tres veces mayor. Esto se debe a que las pasadas de mecanizado son como máximo de 0.5 mm frente a unas pasadas máximas de 1.5 mm en el Aluminio, y también la velocidad de mecanizado en el caso del Acero es de 300 mm/s frente a 400 mm/s o 500 mm/s en el Aluminio. Por estas razones se prefirió utilizar Aluminio. Además, este prensatubos de acero se corroería con el paso del tiempo

ANEXO VI - INSTRUCTIVO DE PENSADO Y AGUJEREO DE BARRAS

Para el prensado de las barra se utiliza el prensa tubos y tubos de aluminio común. El mismo se realiza en una máquina de compresión, MEMTC de 3 toneladas, para poder llegar a aplicar la carga necesaria para deformar el tubo de una manera controlada logrando una buena terminación y las tolerancias de la barra.

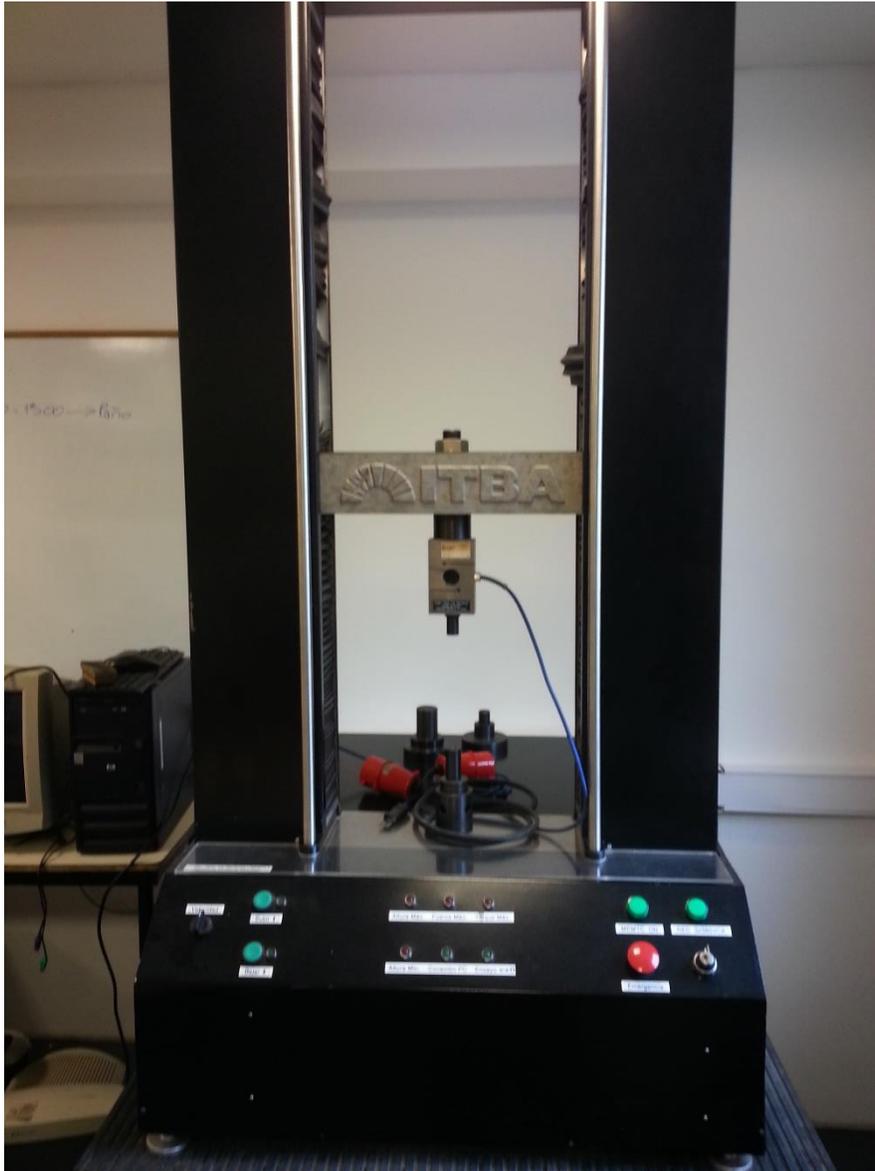


Figura 39

Como se explicó anteriormente, el prensa tubos cuenta con unas ranuras en los extremos que sirven para alinear correctamente el tubo antes de ser prensado. Para que el tubo se alinee de esta manera, los tubos deben tener un largo mayor al requerido en la barra. Cortar los tubos unos 20 mm más de lo que mide la barra entre agujeros es suficiente para que el tubo sea soportado por estas ranuras antes del

prensado. Además, los extremos cortados de los tubos no deben tener rebaba alguna, con el fin de que entren deslizantes en las ranuras y no se traben por fricción. Las operaciones a seguir son las siguientes:

1. Cortar los tubos al largo correspondiente según lo requerido y rebabar los extremos cortados.

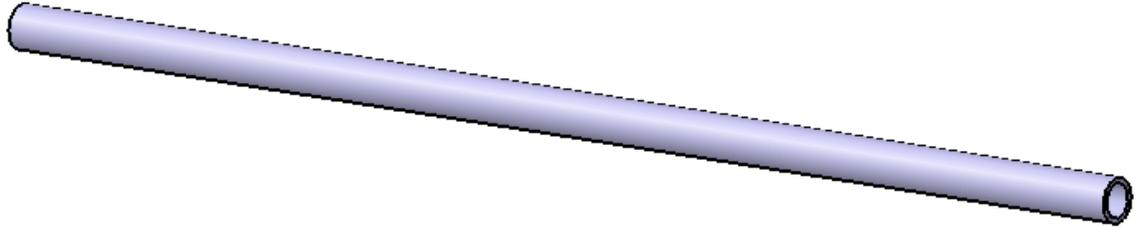


Figura 40

2. Insertar el Dado Molde Abajo en el agujero correspondiente al largo de barra requerido, a través de un perno de 6 mm de diámetro.

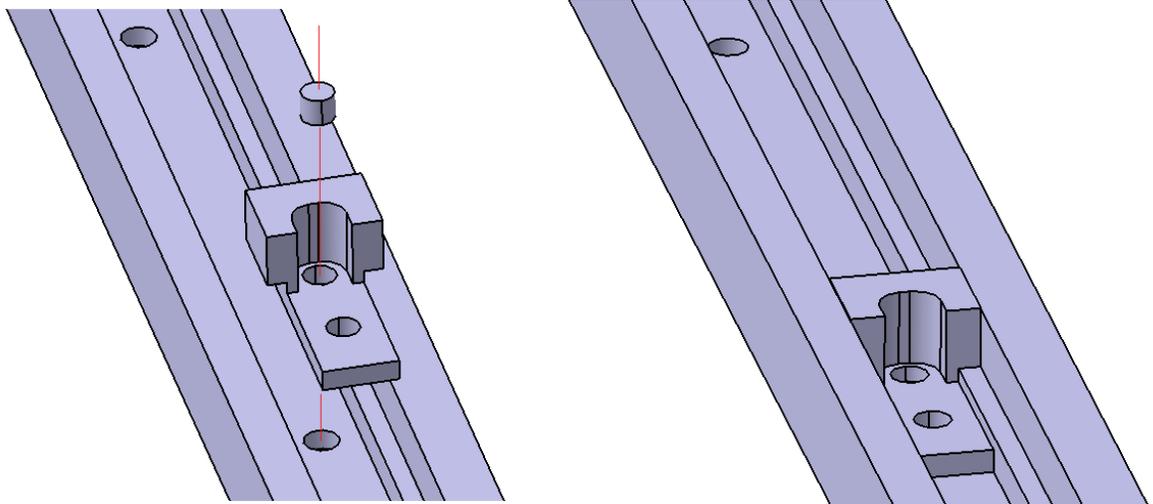
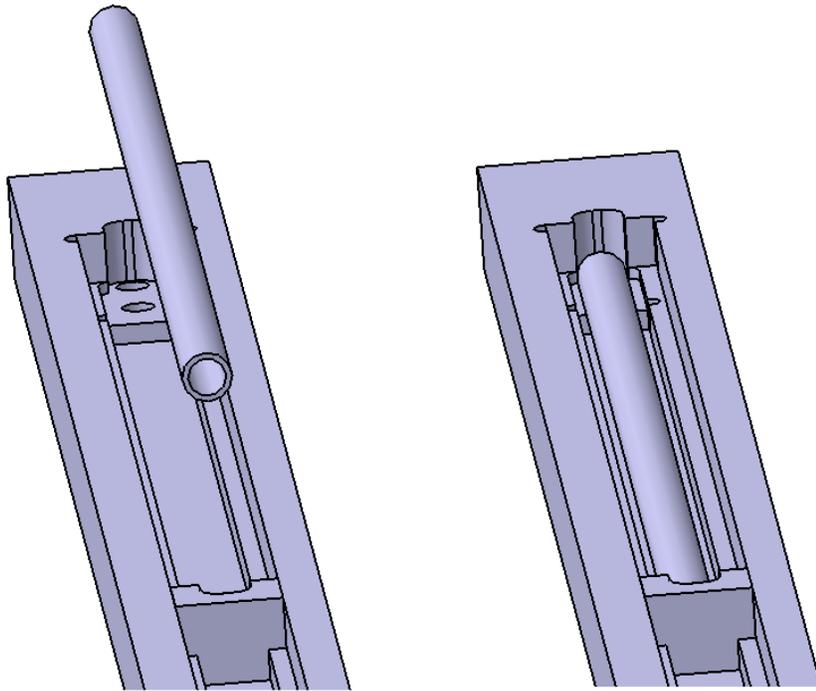


Figura 41

3. Insertar el tubo en las ranuras del prensa tubos (verificar que el largo de los tubos es el adecuado para poder tener una correcta alineación).



z

Figura 42

4. Apoyar los Moldes Superiores en las caras de apoyo de los mismos.

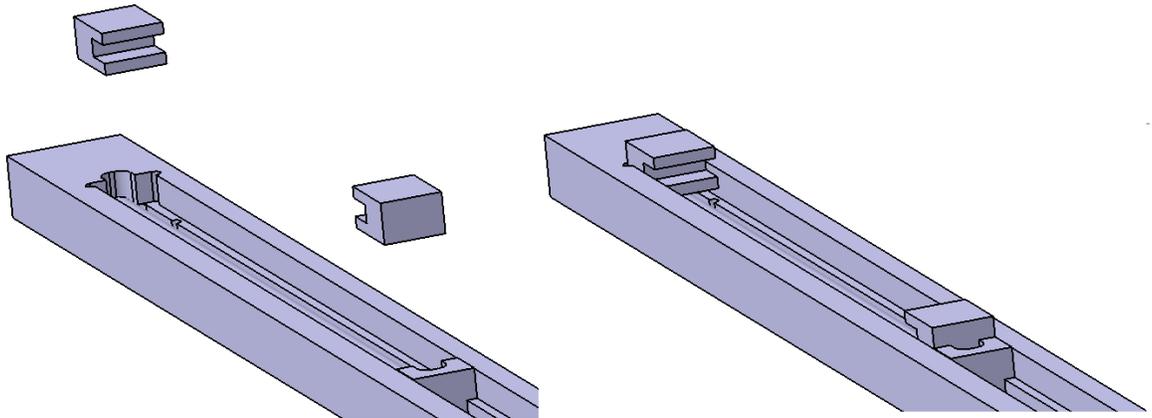


Figura 43

5. Colocar el prensa tubos en la máquina de compresión.
6. Prensar hasta una fuerza de 18000 N aproximadamente.
7. Retirar el prensa tubos de la máquina de compresión.

8. Retirar los Moldes Superiores del prensa tubos.



Figura 44

- 9.

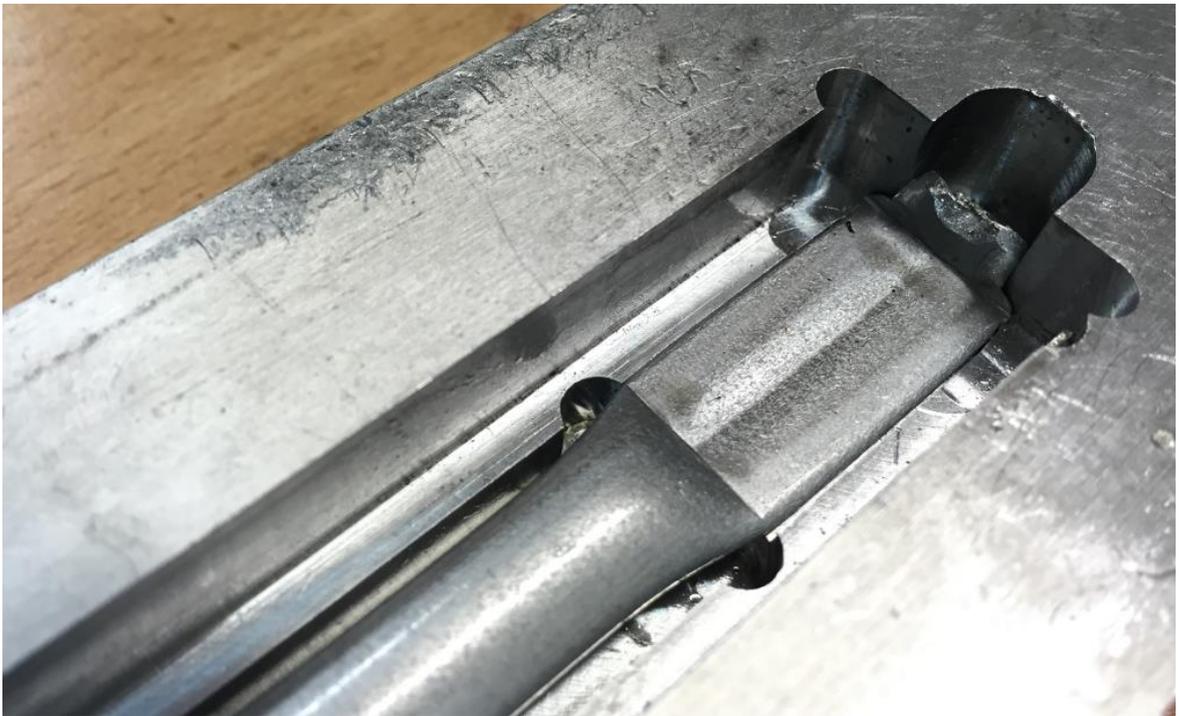


Figura 45

10. Alinear el prensa tubos en la Fresadora (el eje X de la misma debe coincidir con el eje del prensa tubos).
11. Agujerear con mecha de 6 mm la barra utilizando previamente una mecha autocentrante.
12. Sacar la barra terminada del prensa tubos.

El procedimiento recién enumerado se puede realizar para los tres largos de barras que se requieren. Para ello el punto 2 debe llevarse a cabo en el agujero del molde prensa tubos correspondiente. En caso de querer realizar barras con un largo diferente, se puede lograr realizándole al molde un agujero con una mecha de 6 mm.

Por razones de practicidad, el paso 9 y 10 pueden llevarse a cabo una vez prensado varios tubos. En este caso debe tenerse especial cuidado cuando se sacan las barras del prensa tubos para prensar la siguiente, ya que si se deforma mucho la misma, por acción de la fuerza que se realiza para sacarlo de las ranuras, no se podrá asegurar un correcto centrado de los agujeros cuando se mecanizan los mismos en la fresadora.

ANEXO VII - INSTRUCCIONES DE MECANIZADO EN CNC DE PRENSA TUBOS

- DADO MOLDE ABAJO:

Herramientas a utilizar:

1. Fresa de 8 mm de diámetro.
2. Broca de 6 mm de diámetro.

Material inicial: un cubo de 40x20.4x15.8

Operaciones:

1. Frentado de la cara de abajo: Se utiliza la fresa de 8. El eje x es el eje del cubo que mide 40 mm, el eje y es el eje del cubo que mide 20.4, y el eje z es el eje del cubo que mide 15.8. El cero de la herramienta está en una esquina, como se muestra en la figura, la herramienta se debe ubicar de manera que el cero sea la parte más baja de la cara A. La cara B (sería la cara de arriba del dado y contraria a la cara A) debe ser la cara más lisa que tiene el material, es decir, la que vino lisa de fábrica (no es ninguna de las dos caras pulidas) ya que esta es la cara que es paralela a las dos caras pulidas.

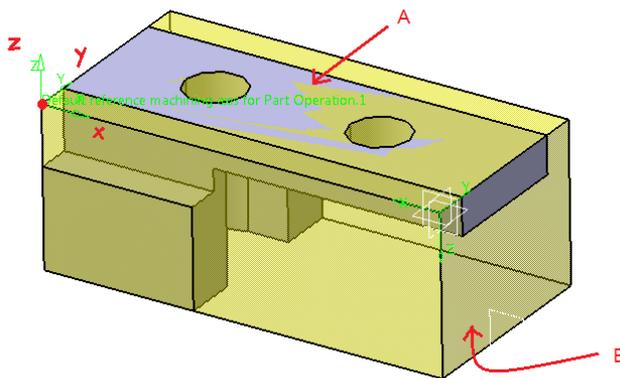


Figura 46

2. Contorneado interior: Se utiliza la fresa de 8. El cero de la herramienta está en la esquina que se muestra en la figura, este cero debe estar a 15.8 mm de la cara A. Debido a que se usa la misma posición de 2 a 5, cuando se fije la pieza se deben poder hacer los dos agujeros pasantes que se ven en la pieza. Las operaciones de 2 a 5 usan el mismo cero.
3. Frentado de cara frontal: Con fresa de 8mm.
4. Frentado de la cara de arriba (cara B): También con misma fresa.
5. Agujereado: Se debe cambiar la herramienta, por la broca de 6mm.

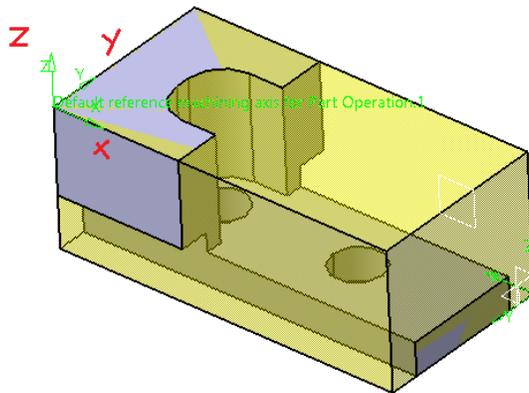


Figura 47

6. Frenteado de cara lateral derecha: Se debe cambiar nuevamente la herramienta por la fresa de 8mm. El cero se muestra a continuación.

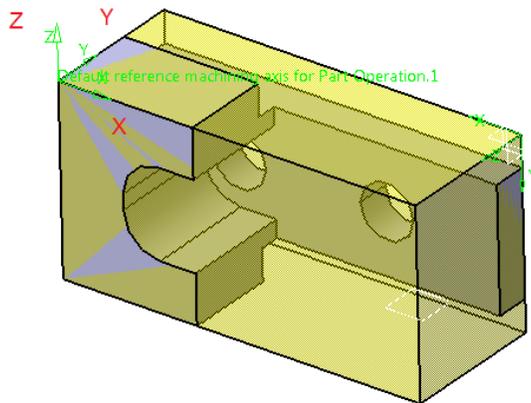


Figura 48

7. Frenteado de cara lateral izquierda: Con la misma fresa se realiza lo mismo del otro lado. El cero se muestra a continuación.

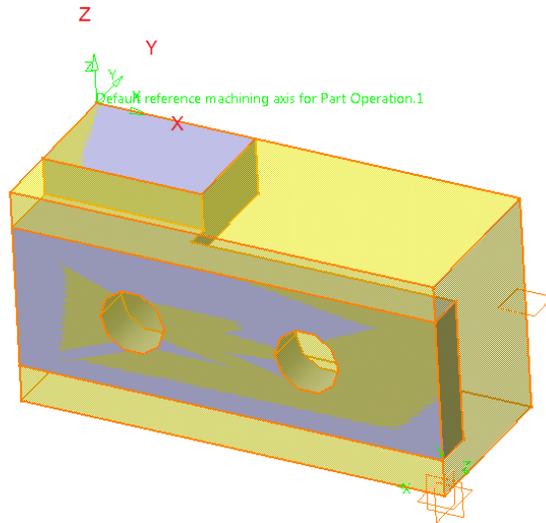


Figura 49

- DADO MOLDE SUPERIOR:

Herramientas a utilizar:

1. Fresa de 10 mm de diámetro.
2. Fresa de 4.75 mm de diámetro.

Material inicial: Cubo de 25x20.4x13.5

Operaciones:

1. Frentado de cara posterior: Utilizar la fresa de 10. El cero está en donde lo indica la figura siguiente, elegir el lado más bajo de esta cara. Agarrar la pieza de manera que esta cara sea perpendicular a las dos caras pulidas.

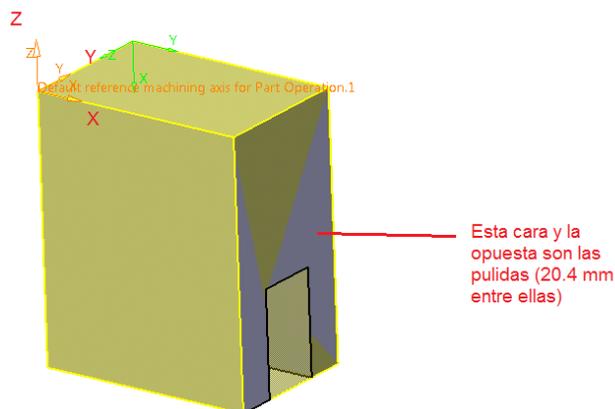


Figura 50

2. Ranurado del frente: Cambiar la fresa por la de 4.75 mm. El cero está indicado por la siguiente figura (es el mismo cero para operaciones 2 a 6), el mismo debe estar a 25 mm de la cara frentada en la primera operación. Lo mejor para fijarla es utilizar la cara frentada en 1, pero tener cuidado con la 5ta y 6ta operación, las cuales requieren llegar hasta el fondo de la pieza.
3. Freteado de cara frontal: Cambiar la fresa nuevamente por la de 10 mm.
4. Freteado de cara frontal: Seguir con la fresa de 10 mm.
5. Freteado de cara izquierda: Seguir con la fresa de 10 mm. Tener cuidado con el agarre para que no interfiera con la fresa.
6. Freteado de cara derecha: Seguir con la fresa de 10 mm. Tener cuidado con el agarre para que no interfiera con la fresa.

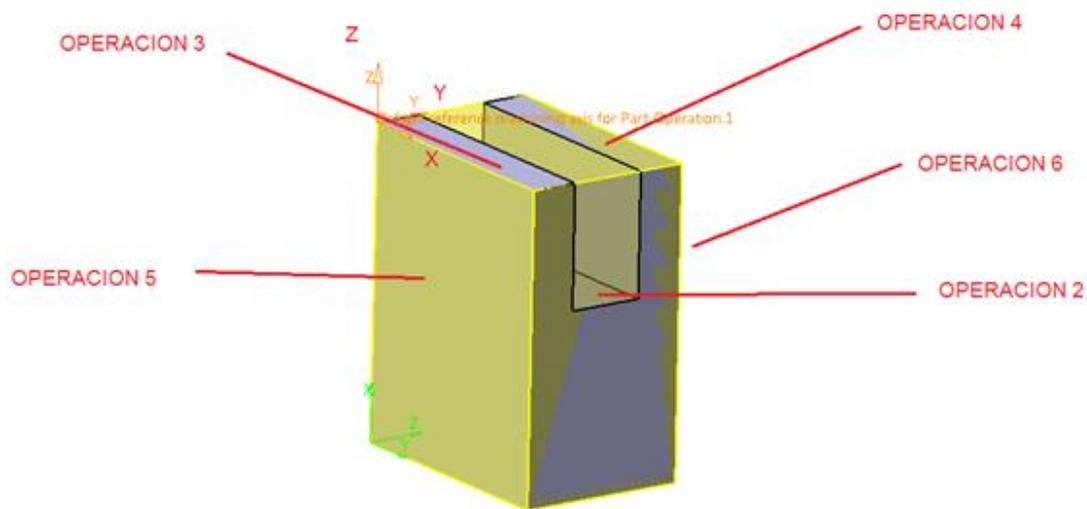


Figura 51

ANEXO VIII - INSTRUCCIONES DE MECANIZADO DE NODO 45 GRADOS Y NODO 60 GRADOS

Los dos tipos de nodos parten de una plancha de aluminio 5083 de 6 mm de espesor, de un ancho de más de 80 mm, y del largo correspondiente según cuantos nodos se requieran fabricar. El mecanizado de los mismos se realiza en una fresadora Universal con Controlador Sinumerik 840 (ver figuras 55 y 56).



Figura 52



Figura 53

Operaciones:

1. Agujereado: Se utiliza una broca de 6 mm. En esta operación se realizar los agujeros correspondientes de cada nodo de un diámetro de 6 mm. Para ello se debe cerar la herramienta en la cara superior de la placa, y a una distancia desde un vértice de poco menos de 2 mm por cada eje.

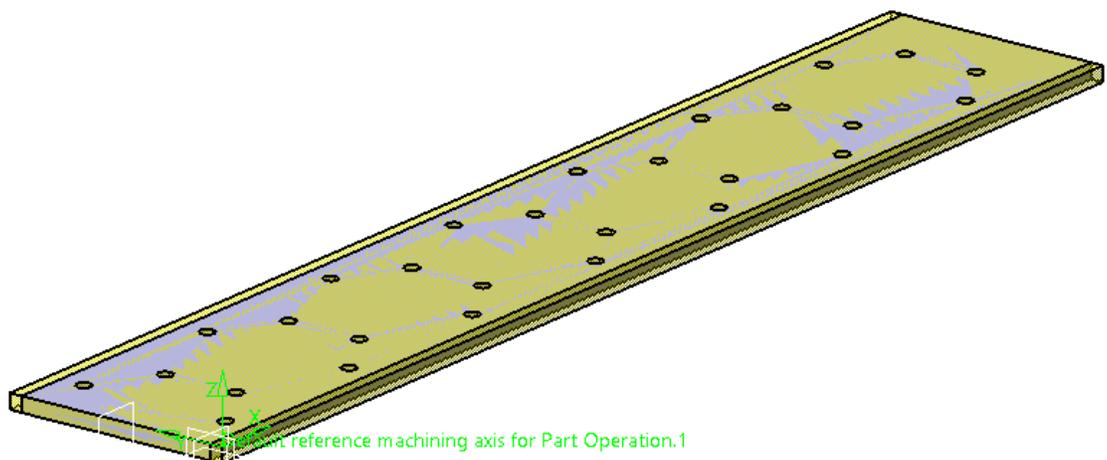


Figura 54

2. Corte de plancha: Realizar los cortes correspondientes de la plancha de forma que cada nodo quede separado del resto.
3. Contorneado: Se utiliza una fresa de 10 mm. Realizar el contorno exterior del nodo, realizando varias pasadas y en varios niveles para que la fresa no vibre demasiado y obtener el mejor acabado posible.

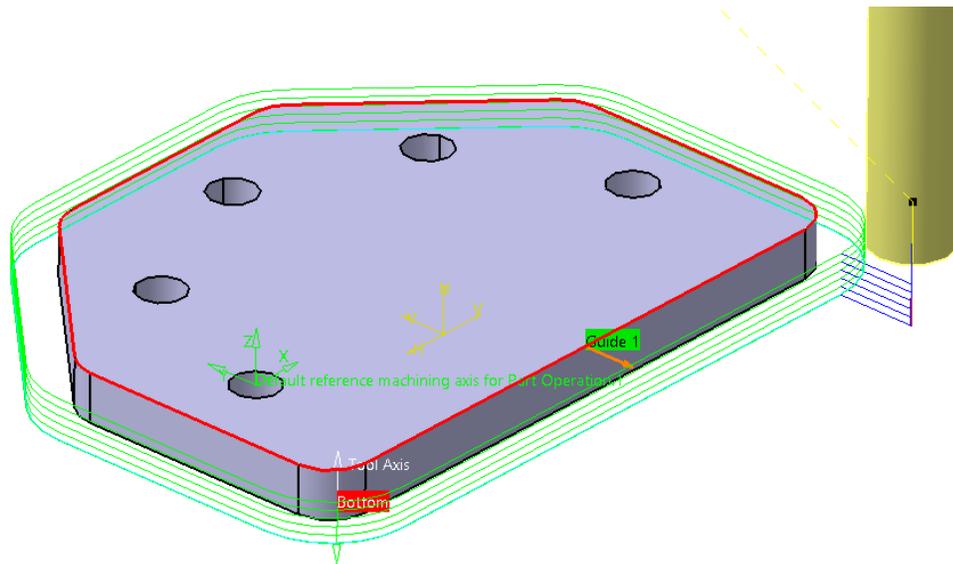


Figura 55

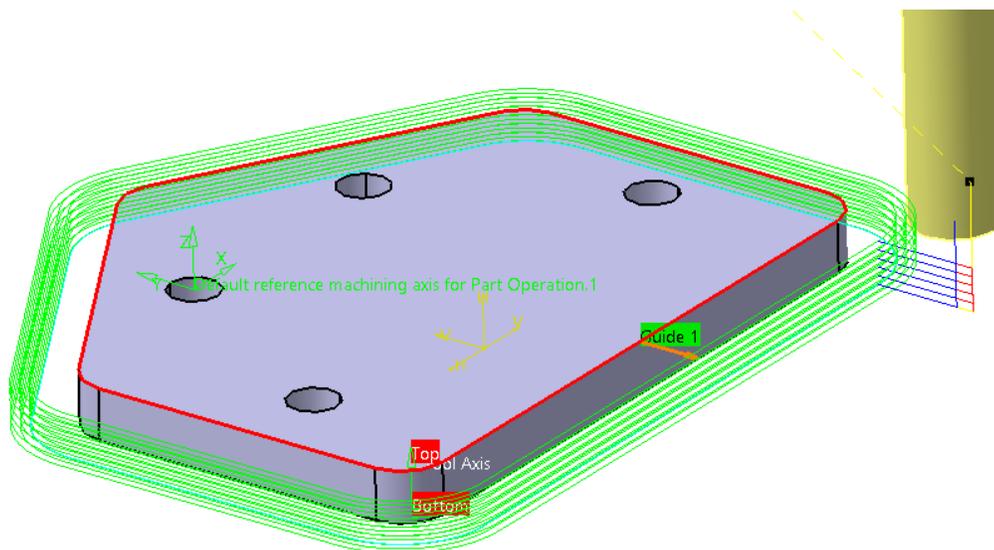


Figura 56

4. Agujereado: Se utiliza broca de 6 mm, 8 mm, 10 mm, y 11 mm, y fresa de 10 mm. Realizar en forma progresiva el agujero central del nodo con las brocas correspondientes. Luego mecanizar con fresa el agujero para agrandarlo hasta la medida correspondiente.

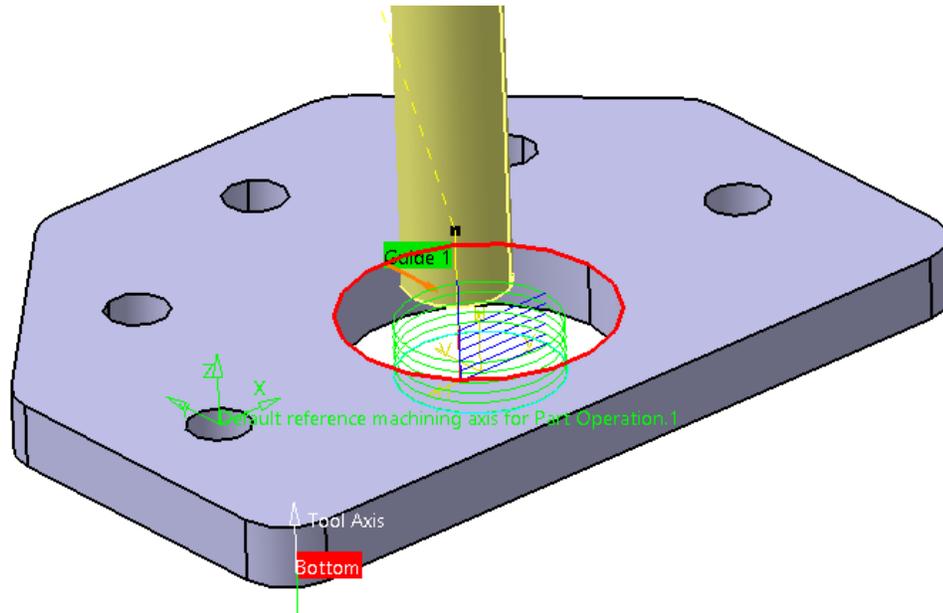


Figura 57

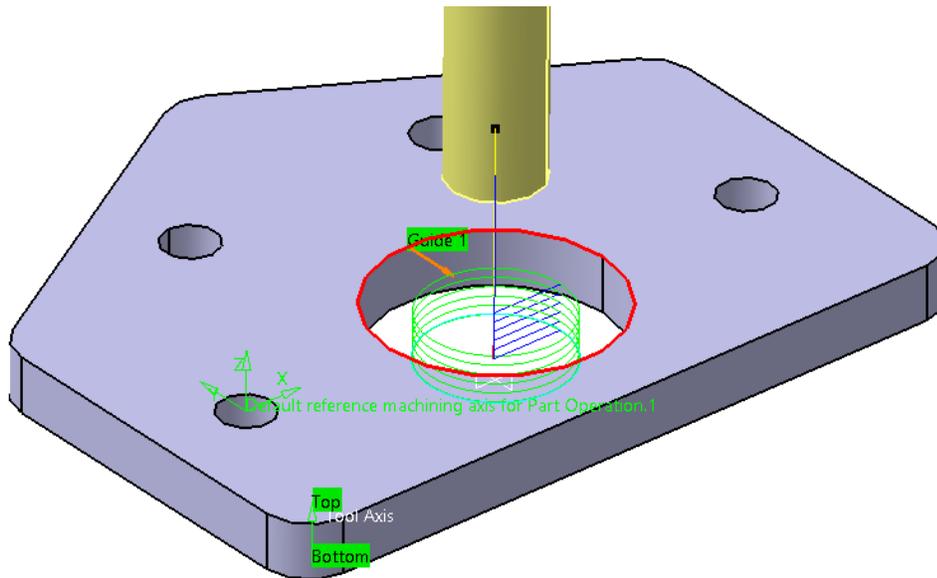


Figura 58

ANEXO IX - CÓDIGO DE MATLAB PARA CÁLCULO DE BARRAS:

```

% Modelo de barras plano.

% LAS UNIDADES SOSN SIEMPRE EN EL SISTEMA SI!
clear
clc
close all

% Discretizacion
nodes1 = load('NODOS.txt');
length=size(nodes1,1);
nodes= zeros(length,2);
for i=1:length
nodes(i,1) = nodes1(i,2);
nodes(i,2) = nodes1(i,3);
end

elements1 = load('ELEMENTOS.txt');
length=size(elements1,1);
elements= zeros(length,2);
for i=1:length
elements(i,1) = elements1(i,2);
elements(i,2) = elements1(i,3);
end          %Conectividades de elementos

dext = (25.4*3/8)/1000;
dint = dext-0.0022;

A = (dext^2-dint^2)*pi()/4*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Area de cada elemento
Ix = (dext^4-dint^4)*pi()/64*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Momento de Inercia con respecto
a X de cada elemento
Iy = (dext^4-dint^4)*pi()/64*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Momento de Inercia con respecto
a Y de cada elemento
rx = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Radio critico con respecto a X de cada elemento
ry = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Radio critico con respecto a X de cada elemento

nDofNod = 2;          % Número de grados de libertad por nodo
nel = size(elements,1); % Número de elementos
nNod = size(nodes,1); % Número de nodos

bc = false(nNod,nDofNod); % Matriz de condiciones de borde
bc(1,1:2) = true;
bc(5,2) = true;

R = zeros(nNod,nDofNod); % Vector de cargas
R(2:4,2) = -20*9.81; % tracción simple

Draw_Barra(elements,nodes,'b');

disp('Configuración inicial')
disp(nodes)
disp('Conectividades')
disp(elements)
disp('Condiciones de Borde')
disp(bc)
disp('Cargas')
disp(R)

% Propiedades del Material
E = 65850000000;
Sfluencia = 70000000;

% Armado Matriz de Rigidez
K = zeros(nDofNod*nNod);

for iele = 1:nel;
dir = nodes(elements(iele,2),:) - nodes(elements(iele,1),:);
le = norm(dir);
dir = dir/le;
T = [ dir 0 0

```

```

        0 0 dir ];
    Ke = A(iele)*E/le * [ 1 -1
                        -1 1 ];
    Ke = T'*Ke*T;
    eleDofs = node2dof(elements(iele,:),nDofNod);
    K(eleDofs,eleDofs) = K(eleDofs,eleDofs) + Ke;
end

% Reduccion Matriz
fixed = reshape(bc',[ ],1);
free = ~fixed;

Rr = reshape(R',[ ],1);

% Solver
Dr = K(free,free)\Rr(free);

% Reconstruccion
D = zeros(nDofNod*nNod,1);
D(free) = D(free) + Dr;

% Verificar reacciones

% Tensiones
S = zeros(1,nel);
Scrx = zeros(1,nel);
Scry = zeros(1,nel);
for iele = 1:nel;
    dir = nodes(elements(iele,2),:) - nodes(elements(iele,1),:);
    le = norm(dir);
    dir = dir/le;
    T = [ dir 0 0
          0 0 dir ];
    B = [-1 1]/le;
    eleDofs = node2dof(elements(iele,:),nDofNod);
    S(iele) = E * B * T*D(eleDofs);
    Scrx(iele) = pi()*^2*E*Ix(iele)/(le^2*A(iele));
    Scry(iele) = pi()*^2*E*Iy(iele)/(le^2*A(iele));
end

%Fluencia
F = zeros(1,nel);
for iele = 1:nel;
    if abs(S(iele))-Sfluencia > 0
        F(1,iele) = true;
    end
end

% Pandeo en la direccion X e Y
Px = zeros(1,nel);
for iele = 1:nel;
    if S(iele) < 0
        if abs(S(iele))-Scrx(iele) > 0
            Px(1,iele) = true;
        end
    end
end

Py = zeros(1,nel);
for iele = 1:nel;
    if S(iele) < 0
        if abs(S(iele))-Scry(iele) > 0
            Py(1,iele) = true;
        end
    end
end

defNodes = nodes + (reshape(D,nDofNod,[ ]))';

% Salida de datos
disp('Desplazamientos')
```

```
disp(D)

disp('Configuración deformada')
disp(defNodes)

disp('Tensiones normales')
disp(S')

disp('Tensiones criticas X')
disp(Scrx')

disp('Tensiones criticas Y')
disp(Scry')

disp('peligro de rotura por fluencia si es mayor a cero en')
disp(F')

disp('peligro de rotura por pandeo si es mayor a cero en')
disp((Px+Py)')

disp('deformacion unitaria en micro e')
disp(S'/E*1000000)

Draw_Barra(elements,defNodes,'k')
```

ANEXO X - CÓDIGO DE MATLAB PARA CÁLCULO DE VIGAS:

```

%% MODELO DE VIGAS
clear
clc
close all

% Discretizacion
nodes1 = load('NODOS.txt');
length=size(nodes1,1);
nodes= zeros(length,2);
for i=1:length
nodes(i,1) = nodes1(i,2);
nodes(i,2) = nodes1(i,3);
end

elements1 = load('ELEMENTOS.txt');
length=size(elements1,1);
elements= zeros(length,2);
for i=1:length
elements(i,1) = elements1(i,2);
elements(i,2) = elements1(i,3);
end      %Conectividades de elementos

dext = (25.4*3/8)/1000;
dint = dext-0.0022;

Iz = ones(1,21)*100^4/12; % Momento de Inercia de cada elemento
A = (dext^2-dint^2)*pi()/4*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Area de cada elemento
Iz = ones(1,11)*(dext^4-dint^4)*pi()/32; % Momento de Inercia con respecto a X de cada elemento
Ix = (dext^4-dint^4)*pi()/64*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Momento de Inercia con respecto
a X de cada elemento
Iy = (dext^4-dint^4)*pi()/64*[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Momento de Inercia con respecto
a Y de cada elemento
rx = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Radio critico con respecto a X de cada elemento
ry = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Radio critico con respecto a X de cada elemento

nDofNod = 3; % Número de grados de libertad por nodo
nel = size(elements,1); % Número de elementos
nNod = size(nodes,1); % Número de nodos

bc = false(nNod,nDofNod); % Matriz de condiciones de borde
bc(1,1:2) = true;
bc(5,2) = true;

R = zeros(nNod,nDofNod); % Vector de cargas
R(2:3,2) = -20*9.81; % tracción simple

Draw_Barra(elements,nodes,'b');

disp('Configuración inicial')
disp(nodes)
disp('Conectividades')
disp(elements)
disp('Condiciones de Borde')
disp(bc)
disp('Cargas')
disp(R)

% Propiedades del Material
E = 63890000000;
Sfluencia = 70000000;

% Armado Matriz de Rigidez
K = zeros(nDofNod*nNod);

dofList = 1:nDofNod*nNod;
dofList = reshape(dofList,nDofNod,[]);

for iele = 1:nel;
dir = nodes(elements(iele,2),:) - nodes(elements(iele,1),:);

```

```

le = norm(dir);
dir = dir/le;
dirp=zeros(1,2);
dirp(1,1)=-dir(1,2);
dirp(1,2)=dir(1,1);

T = [ dir 0 0 0 0
      dirp 0 0 0 0
      0 0 1 0 0 0
      0 0 0 dir 0
      0 0 0 dirp 0
      0 0 0 0 0 1 ];

Ke=zeros(6,6);
Ke(1,1)=A(iele)*E/le;
Ke(1,4)=-A(iele)*E/le;
Ke(2,2)=12*E*Iz(iele)/(le^3);
Ke(2,3)=6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(2,5)=-12*E*Iz(iele)/(le^3);
Ke(2,6)=6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(3,2)=6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(3,3)=4*E*Iz(iele)/le;
Ke(3,5)=-6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(3,6)=2*E*Iz(iele)/le;
Ke(4,1)=-A(iele)*E/le;
Ke(4,4)=A(iele)*E/le;
Ke(5,2)=-12*E*Iz(iele)/(le^3);
Ke(5,3)=-6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(5,5)=12*E*Iz(iele)/(le^3);
Ke(5,6)=-6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(6,2)=6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(6,3)=2*E*Iz(iele)/le;
Ke(6,5)=-6*E*Iz(iele)/(le^2);
Ke(6,6)=4*E*Iz(iele)/le;

Ke = T'*Ke*T;
eleDofs = node2dof(elements(iele,:), nDofNod);
eleDofs = reshape(eleDofs',1,[]);
K(eleDofs,eleDofs) = K(eleDofs,eleDofs) + Ke;
end
disp('matriz de rigidez')
disp(K)
% Reduccion Matriz
fixed = reshape(bc',[],1);
free = ~fixed;

Rr = reshape(R',[],1);

% Solver
Dr = K(free,free)\Rr(free);

% Reconstruccion
D = zeros(nDofNod*nNod,1);
D(free) = D(free) + Dr;

% Verificar reacciones

% Tensiones
S = zeros(7,nel);
for iele = 1:nel;
dir = nodes(elements(iele,2),:) - nodes(elements(iele,1),:);
le = norm(dir);
dir = dir/le;
dirp=zeros(1,2);
dirp(1,1)=-dir(1,2);
dirp(1,2)=dir(1,1);

T = [ dir 0 0 0 0
      dirp 0 0 0 0
      0 0 1 0 0 0
      0 0 0 dir 0

```

```

    0 0 0 dirp 0
    0 0 0 0 0 1 ];

    B1 = [1/le -6*(dext/2)/(le*le) -4*(dext/2)/le -1/le 6*(dext/2)/(le*le) -
2*(dext/2)/le];%matriz de desplazamiento para x=0 , y=(dext/2) local en elemento iele
    B11 = [1/le 6*(dext/2)/(le*le) 4*(dext/2)/le -1/le -6*(dext/2)/(le*le)
2*(dext/2)/le];%matriz de desplazamiento para x=0 , y=-(dext/2) local en elemento iele
    B2 = [1/le 0 -1*(dext/2)/le -1/le 0 -1*(dext/2)/le]; %matriz de desplazamiento para x=le/2,
y=(dext/2) local en elemento iele
    B22 = [1/le 0 1*(dext/2)/le -1/le 0 1*(dext/2)/le]; %matriz de desplazamiento para x=le/2,
y=-(dext/2) local en elemento iele
    B3 = [1/le -6*(dext/2)/(le*le) -2*(dext/2)/le -1/le 6*(dext/2)/(le*le) -4*(dext/2)/le];
%matriz de desplazamiento para x=le, y=(dext/2) local en elemento iele
    B33 = [1/le 6*(dext/2)/(le*le) 2*(dext/2)/le -1/le -6*(dext/2)/(le*le)
4*(dext/2)/le];%matriz de desplazamiento para x=le, y=-(dext/2) local en elemento iele

    eleDofs = dofList(elements(iele,:),:);
    eleDofs = reshape(eleDofs',1,[]);

    S(1,iele) = iele;
    S(2,iele) = E*B1*T*D(eleDofs);
    S(3,iele) = E*B11*T*D(eleDofs);
    S(4,iele) = E*B2*T*D(eleDofs);
    S(5,iele) = E*B22*T*D(eleDofs);
    S(6,iele) = E*B3*T*D(eleDofs);
    S(7,iele) = E*B33*T*D(eleDofs);
end

% Configuración deformada
D = (reshape(D,nDofNod,[]))';
defNodes = nodes + D(:,1:2);

% Salida de datos
disp('Desplazamientos')
disp(D)

disp('Configuración deformada')
disp(defNodes)

disp('Tensiones Nodales Sigma')
disp(S')

disp('Tensiones Nodales Sigma en mitad de barra')
disp(S(4:5,:))

disp('Deformación unitaria en micro e')
disp(S(4:5,:)/E*1000000)

Smedio = zeros(1,nel);
Smedio = (S(4,1:nel)+S(5,1:nel))/2;

Draw_Barra(elements,defNodes,'k')

```

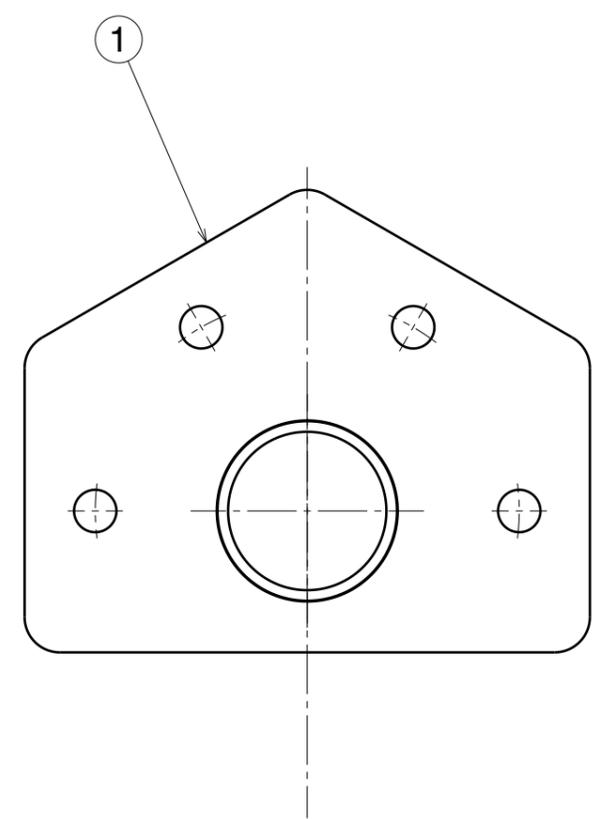
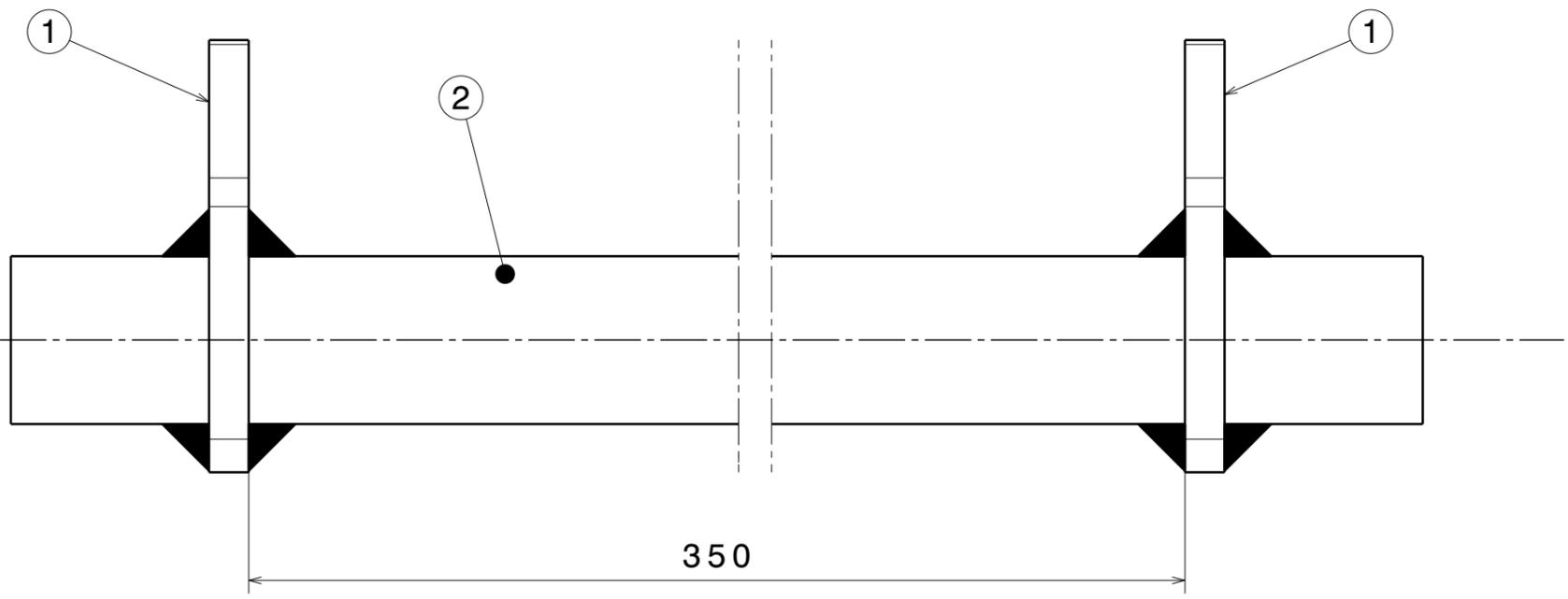
BIBLIOGRAFIA

- 1- R. Cook, D. Malkus, Plesha, Witt, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 4th Edition, J.Wiley & Sons, 2002
- 2- Gere, Timoshenko, "Resistencia de Materiales" , 5th Edition, S.A. Ediciones Paraninfo, 2004
- 3- E.F. Bruhn, B.S., M.S., C.E, Dr. Eng., "Analysis and Design of Flight Vehicle Structures", 1973
- 4- Software NX 8.5

H G F E D C B A

4

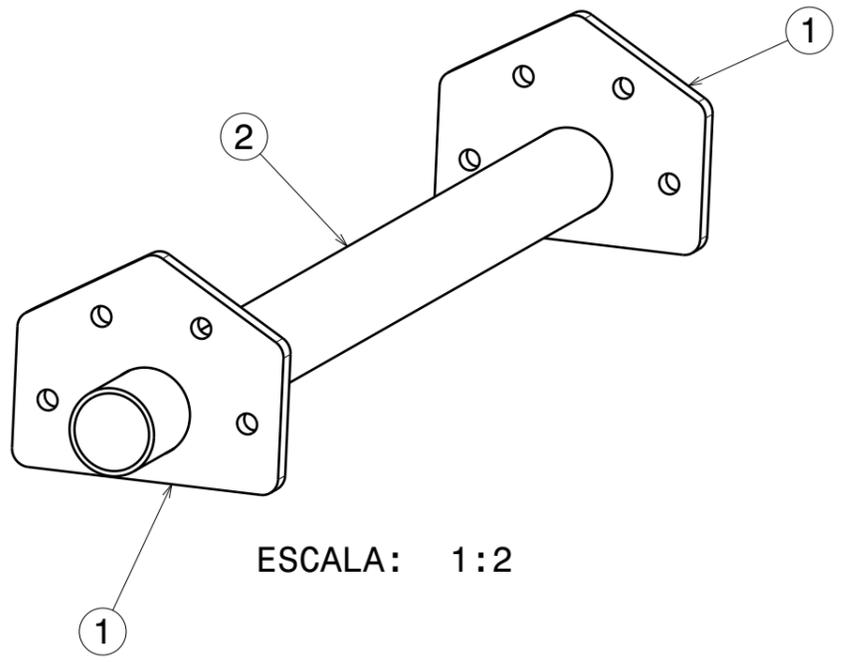
3



4

3

2



ESCALA: 1:2

2

1

NOTA 1: EL SOLDADO DE LOS NODOS DEBE SER CON UNA TIG CON APORTE DE MATERIAL ALUMINIO
 NOTA 2: SE DEBE ASEGURAR LA CONCENTRICIDAD DE LOS RESPECTIVOS AGUJEROS DE LOS NODOS OPUESTOS

REFERENCIA	NOMBRE DE PIEZA	NÚMERO DE PLANO
1	NODO 60 GRADOS	RE-01-101
2	TUBO	RE-01-102

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA	
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Eliminar rebabas y cantos vivos		Rugosidad superficial 3.2[.125]	
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)	
+1°	+0°30'	+0°20'	+0°10'	Aprobaciones	
Dibujó: ALEJANDRO BENITES		Fecha: 25/05/2015		Denominación	
Aprobó: HERNAN BARANDA		Fecha: 25/05/2015		TUBO Y NODOS 60 GRADOS	
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Esc. 1:1		Material ALUMINIO	
				Peso [kgf]	
				Plano Nº RE-01-100	

H G F E D C B A

D

C

B

A

4

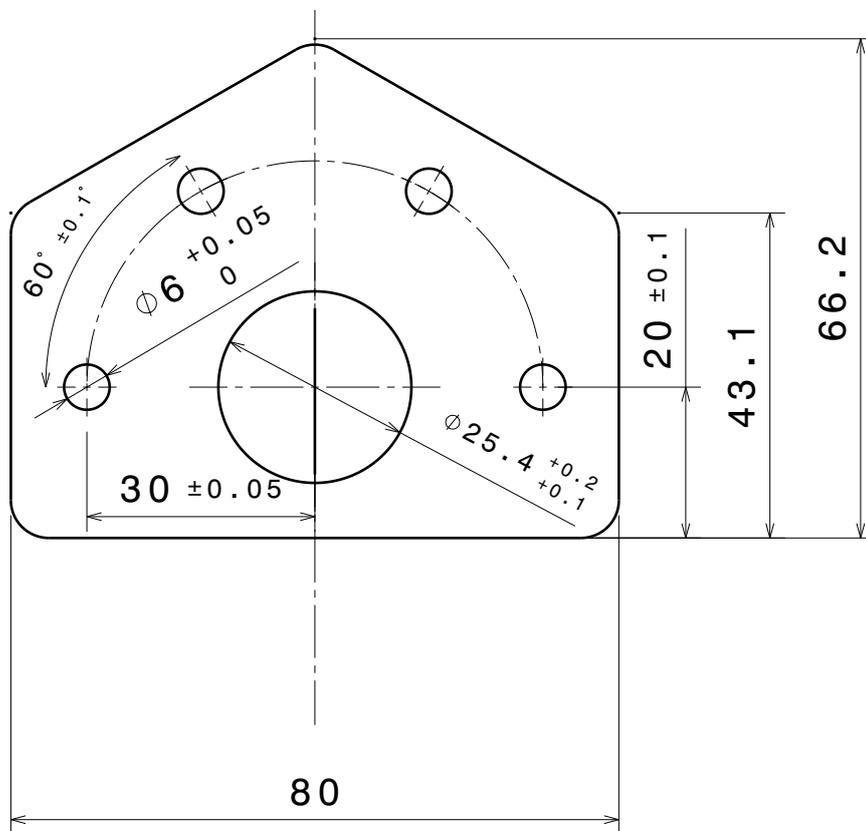
4

3

3

2

2



6

NOTA: LOS RADIOS NO ACOTADOS SON DE 5mm

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media							Rev.	Descripción	Fecha	VºBº	
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales							SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA		Cliente
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000		Denominación			
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2		NODO 60 GRADOS			
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares							Aprobaciones		Fecha		A4 Material AL. 5083 Peso [kgf]
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400			Dibujó:	ALEJANDRO BENITES	23/05/2015		
							Aprobó:	HERNAN BARANDA	23/05/2015		
							Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Esc. 1:1	Plano N° RE-01-101	

D

A

1

D

C

B

A

4

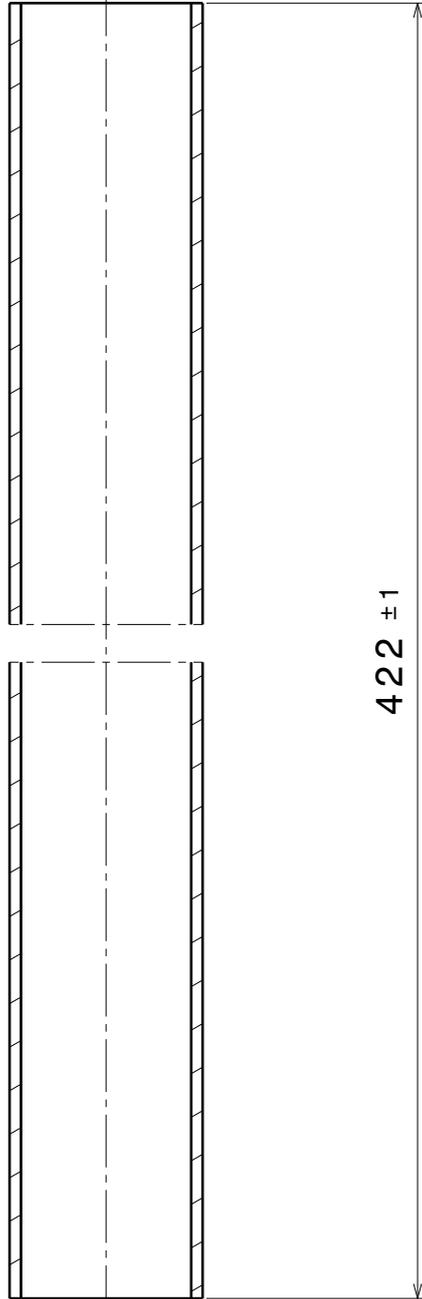
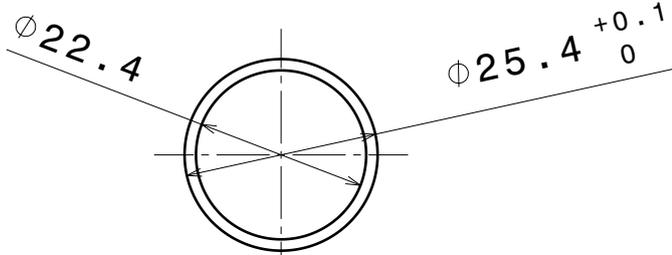
4

3

3

2

2



422 ± 1

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha

VºBº

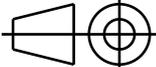
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



ITBA

Denominación

TUBO DE NODOS

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: ALEJANDRO BENITES

25/05/2015

A4

Material

ALUMINIO COMÚN

Peso [kgf]

Aprobó: HERNAN BARANDA

25/05/2015

Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Esc.

1:1

Plano N°

RE-01-102

D

A

1

D

C

B

A

4

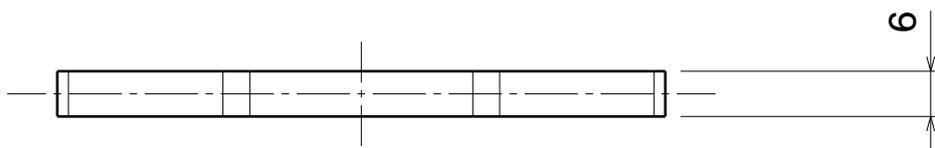
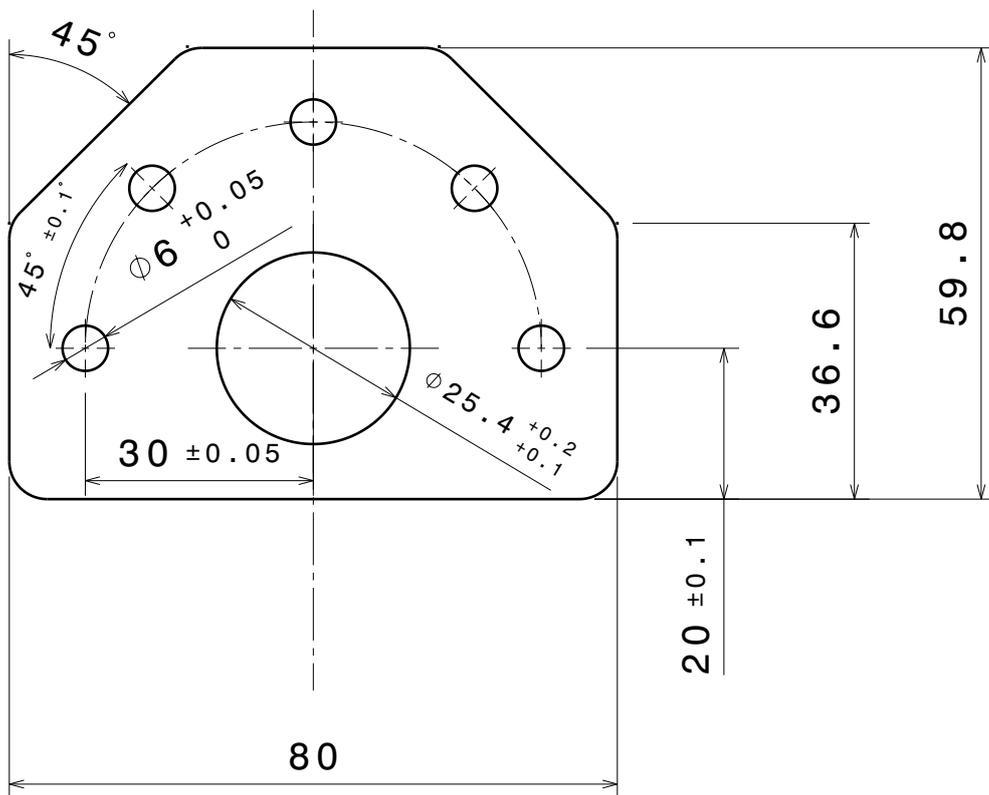
4

3

3

2

2



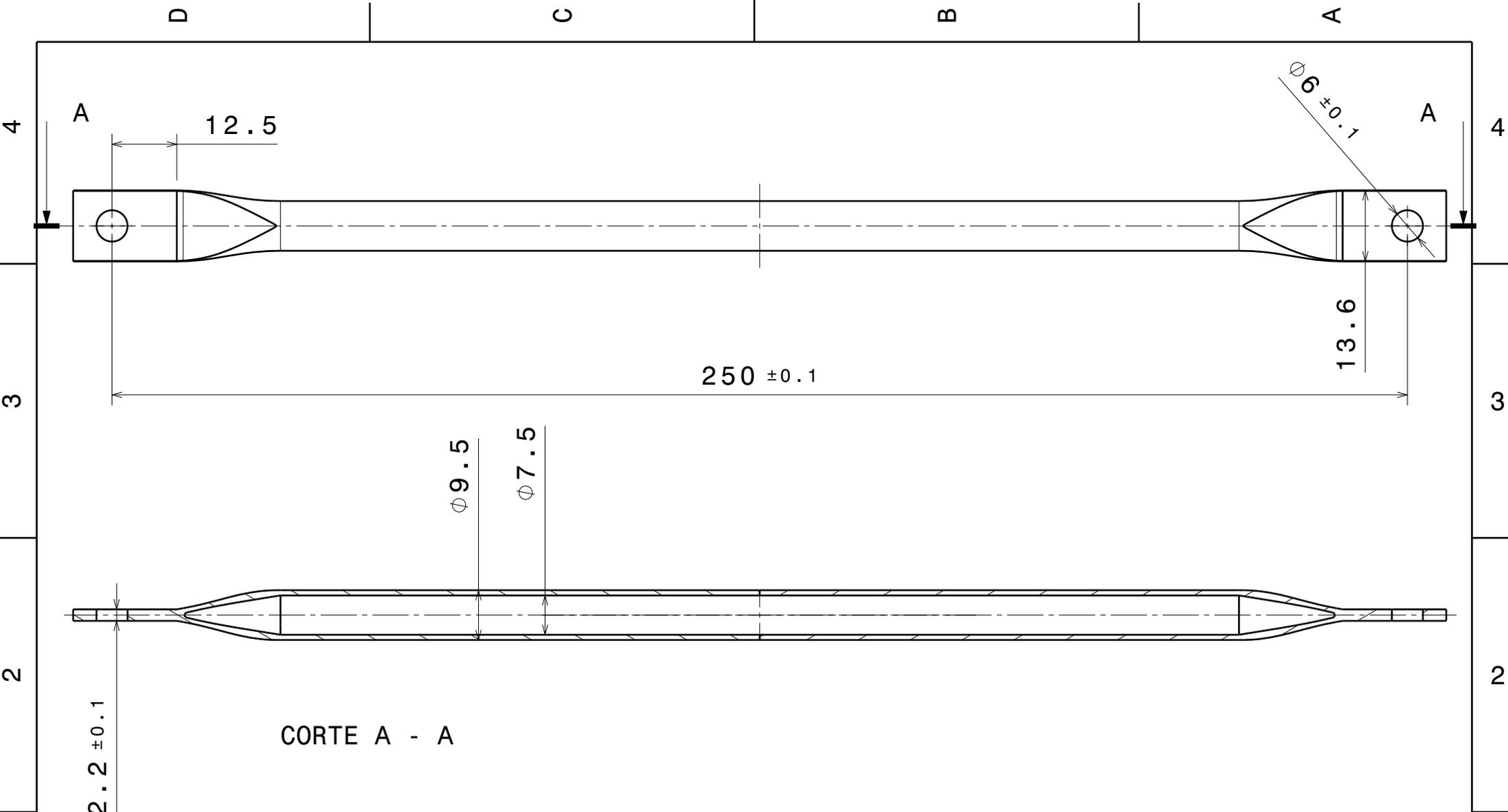
NOTA: LOS RADIOS NO ACOTADOS SON DE 5mm

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media							Rev.	Descripción	Fecha	VºBº	
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales							SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA		Cliente
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000		NODO 45 GRADOS			
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2					Denominación
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares							Aprobaciones		Fecha		A4
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400	Dibujó: ALEJANDRO BENITES		23/05/2015		Material	Peso [kgf]	
±1º	±0º30'	±0º20'	±0º10'	±0º5'	Aprobó: HERNAN BARANDA		23/05/2015		AL. 5083		
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES							Esc. 1:1		Plano N°		RE-01-151

D

A

1



CORTE A - A

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media								Rev.	Descripción		Fecha	vºBº	
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales								SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]				ITBA	
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000	Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		Denominación		BARRA 250 MM		
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	Aprobaciones		Fecha		Material		
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares								Dibujó: ALEJANDRO BENITES		18/06/2015		A4	ALUMINIO COMÚN
								Aprobó: HERNAN BARANDA		18/06/2015			
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400			Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Esc. 1:1		Plano N° RE-01-200		
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'									

1

2

3

4

D

C

B

A

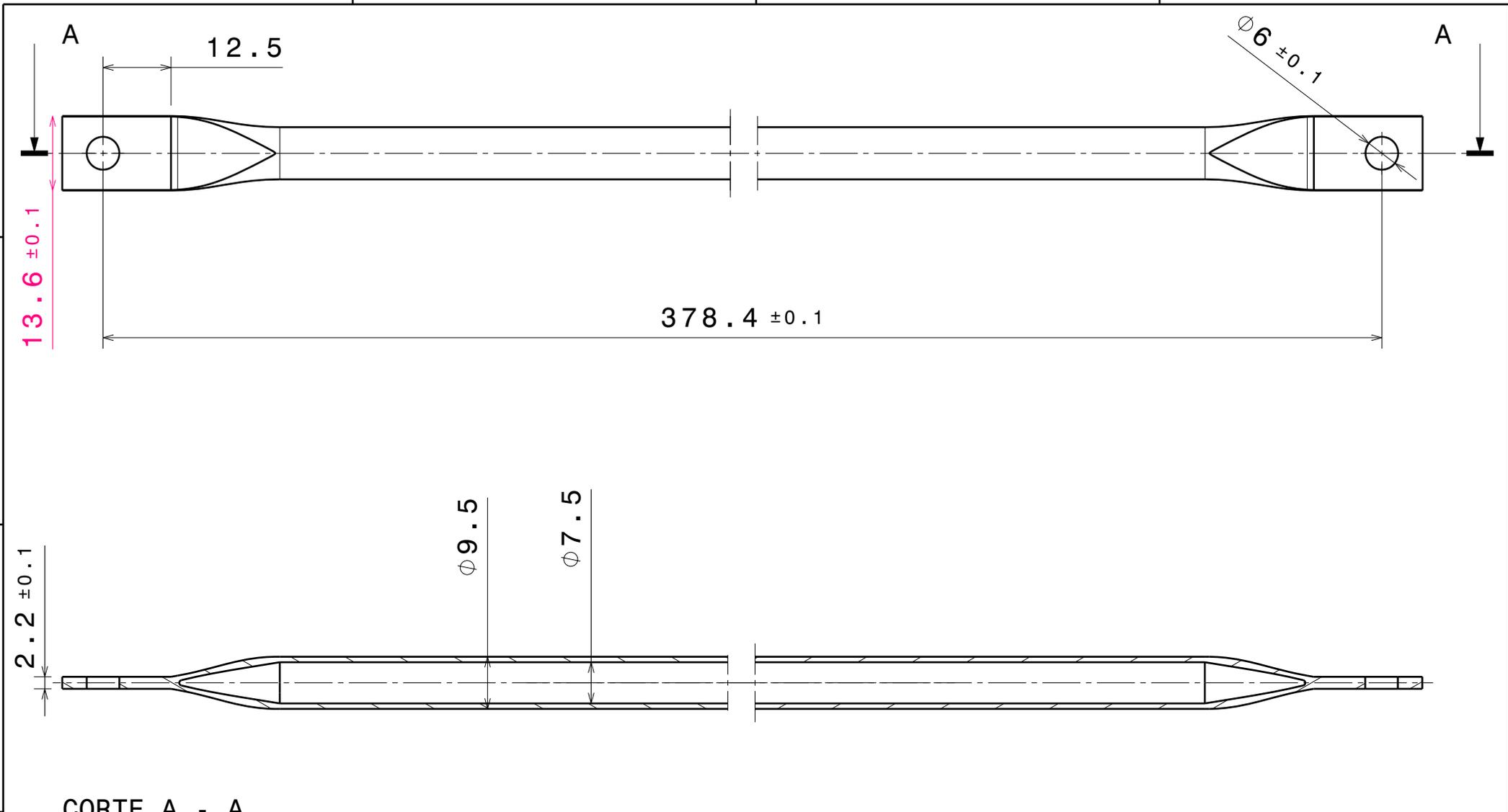
1

2

3

4

A

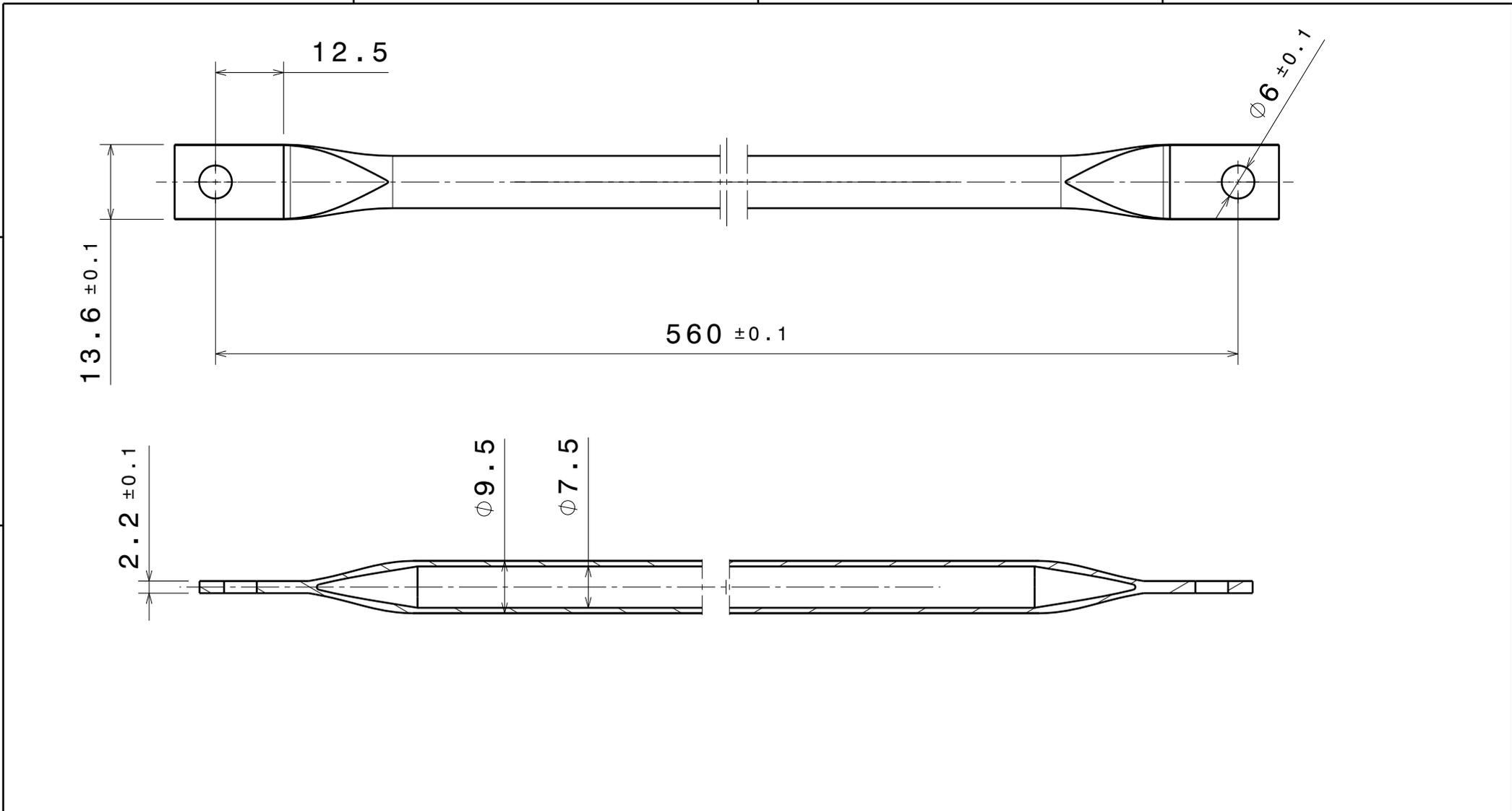


CORTE A - A

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media							Rev.	Descripción		Fecha	VºBº			
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales							SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]				Cliente			
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000	Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)						Denominación	
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	Aprobaciones		Fecha		BARRA 378.4 MM			
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares							Dibujó:	ALEJANDRO BENITES	18/06/2015	A4		Material	ALUMINIO COMÚN	Peso [kgf]
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400	Aprobó:		HERNAN BARANDA	18/06/2015	Esc.			1:1	Plano N°	RE-01-210
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'	Proyecto:		MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES							

D

A



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media								Rev.	Descripción		Fecha	vºBº			
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales								SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]				Cliente			
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000	Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		Denominación					BARRA 560 MM	
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	Aprobaciones		Fecha						
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares								Dibujó:	ALEJANDRO BENITES	18/06/2015	A4	Material	ALUMINIO COMÚN	Peso [kgf]	1
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400	Aprobó:		HERNAN BARANDA	18/06/2015	Esc.	1:1		Plano N°	RE-01-220		
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'	Proyecto:		MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES								

D

A

H G F E D C B A

4

3

2

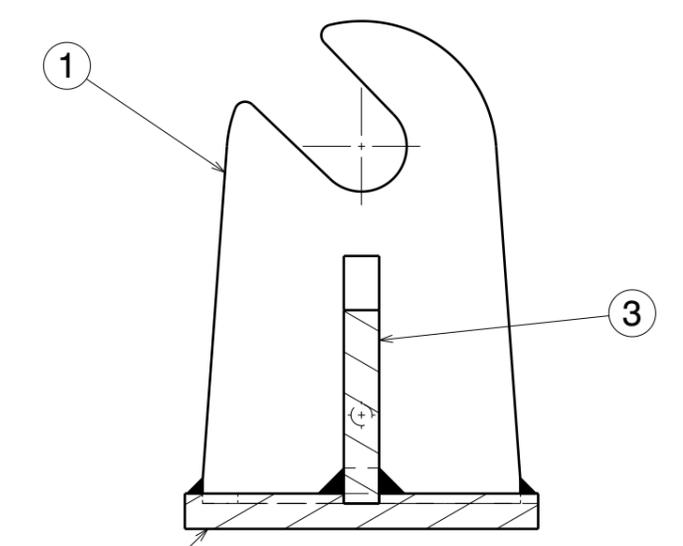
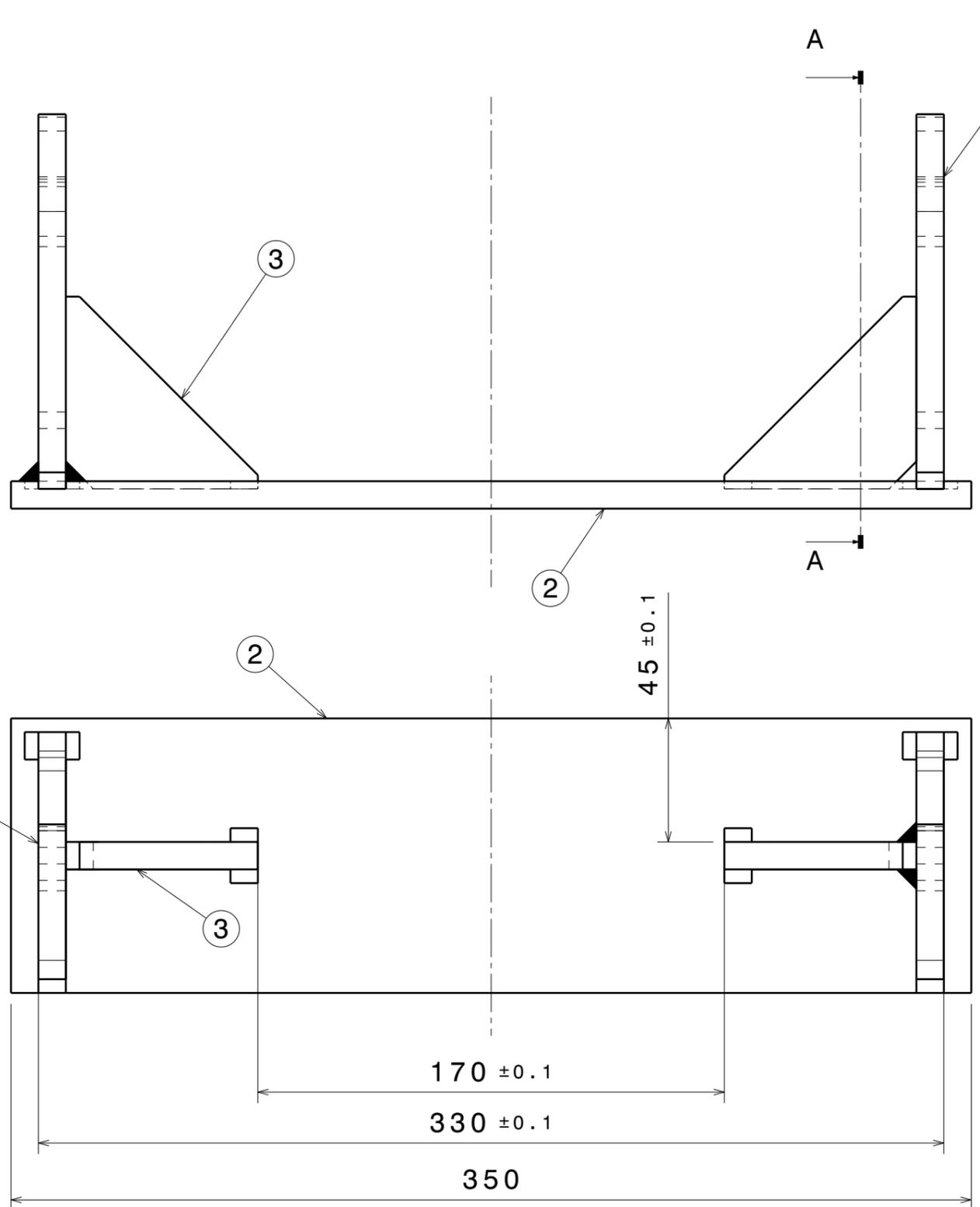
1

4

3

2

1



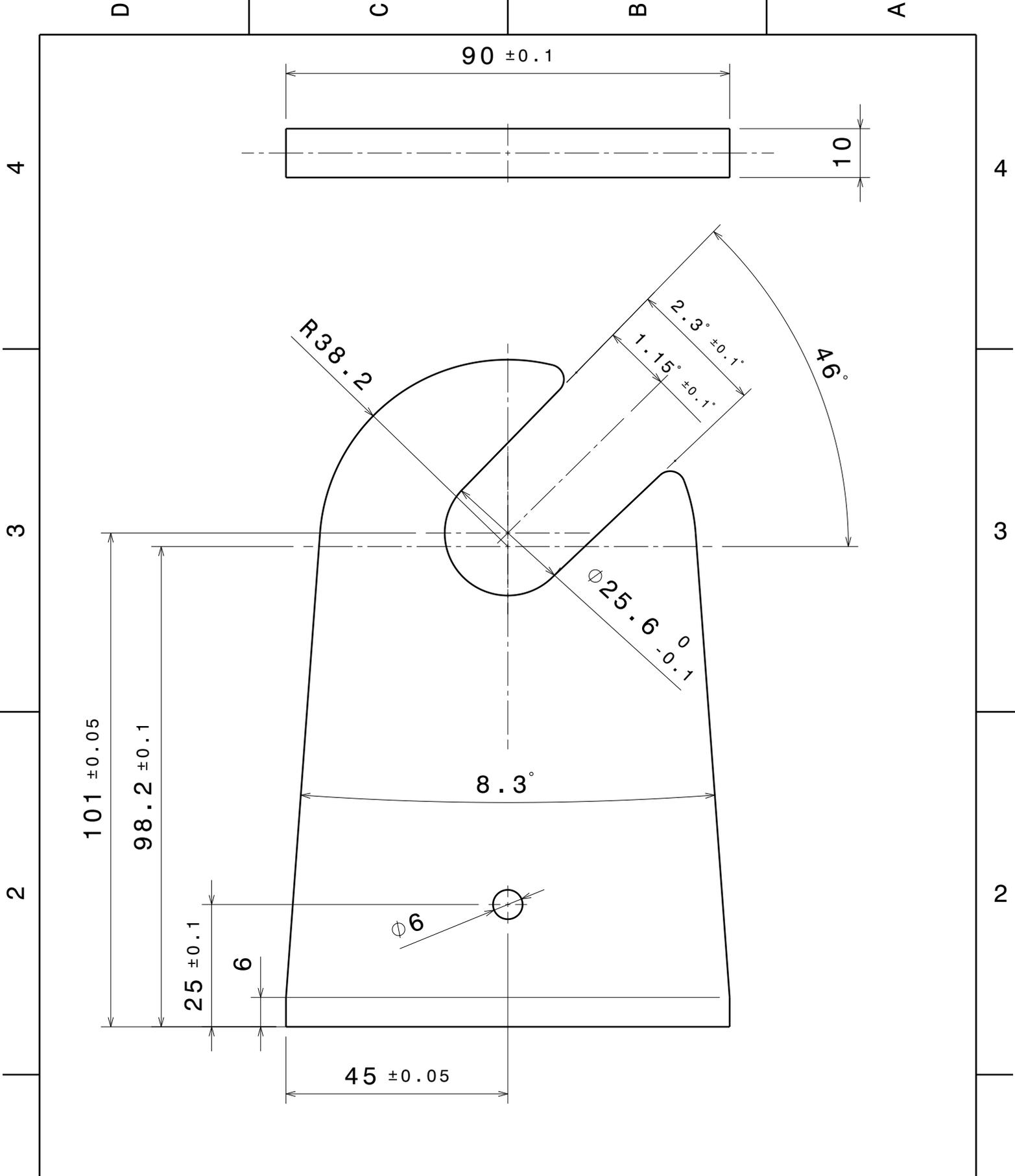
CORTE A-A

NOTA 1: EL SOLDADO DE LOS NODOS DEBE SER CON UNA TIG CON APORTE DE MATERIAL ALUMINIO.
 NOTA 2: EL CORDON DE TODAS LAS SOLDADURAS DEBE SER COMO MÍNIMO DE 5 mm.
 NOTA 3: SE DEBE ASEGURAR QUE LAS PLACAS APOYO SEAN CONCENTRICAS EN SUS RANURAS.

REFERENCIA	NOMBRE DE PIEZA	NÚMERO DE PLANO
1	PLACA APOYO	RE-01-301
2	PLACA INFERIOR APOYO	RE-01-302
3	NERVIO APOYO	RE-01-303

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA	
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Eliminar rebabas y cantos vivos		Rugosidad superficial 3.2[.125]	
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)	
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	Aprobaciones	
Dibujó: ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ		Fecha: 1/12/2015		A3	
Aprobó: HERNAN BARANDA		Fecha: 1/12/2015		Material: AL. 5083	
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Esc. 1:2		Plano Nº: RE-01-300	

H G F E D C B A



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

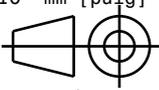
Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permitibles para dimensiones lineales						
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
Desviaciones permitibles para dimensiones angulares						
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400		
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'		

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



ITBA
Denominación

PLACA APOYO

Aprobaciones Fecha

Dibujó: ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ 1/12/2015

Aprobó: HERNAN BARANDA 1/12/2015

A4 Material AL. 5083 Peso [kgf]

Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

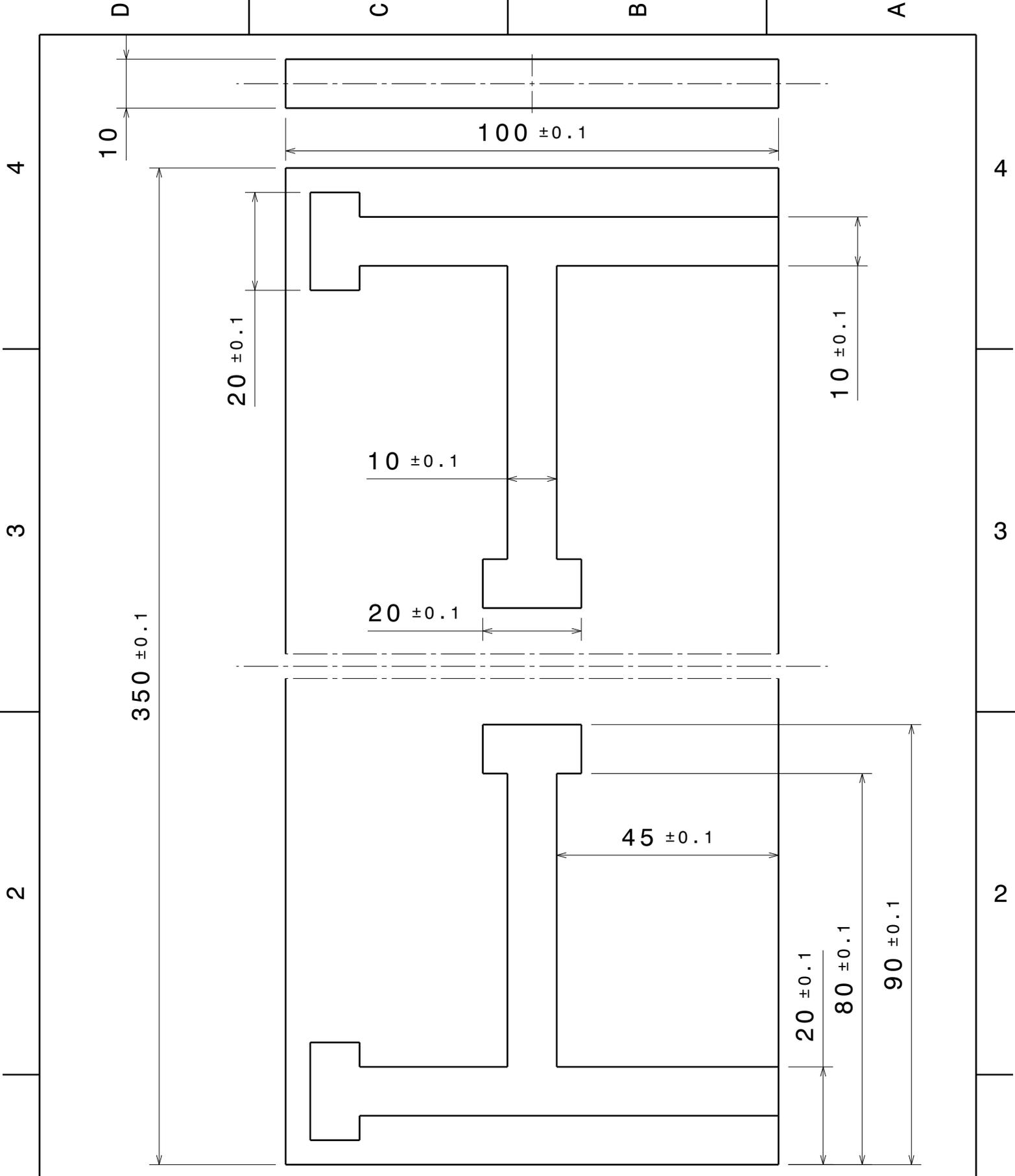
Esc. 1:1 Plano N° RE-01-301

1

1

D

A



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

ITBA
Denominación

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)

PLACA APOYO INFERIOR

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones Fecha

A4 Material AL. 5083 Peso [kgf]

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ 1/12/2015
Aprobó: HERNAN BARANDA 1/12/2015
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Esc. 1:1 Plano Nº RE-01-302

D A

D

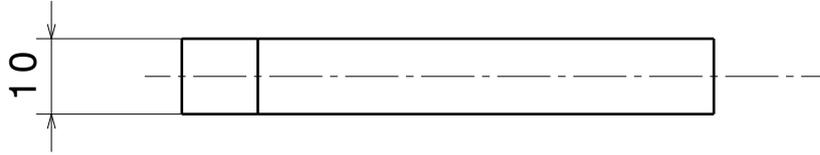
C

B

A

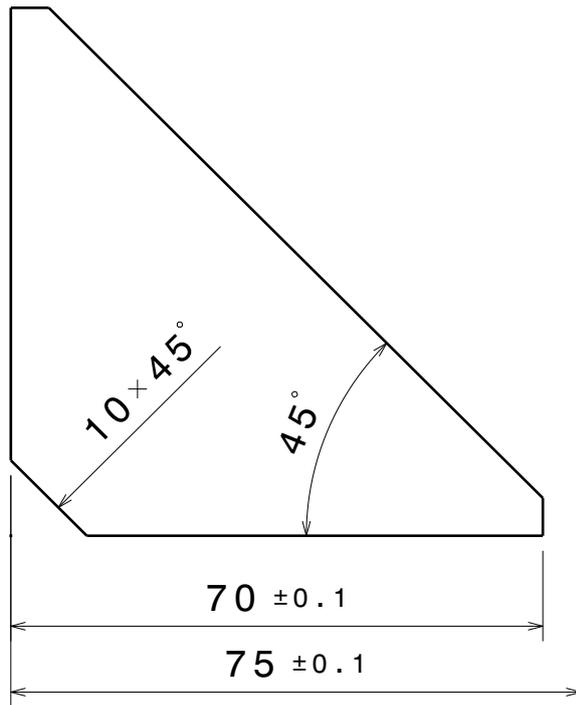
4

4



3

3



2

2

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

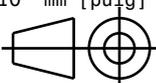
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



ITBA

Denominación

NERVIO APOYO

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ

1/12/2015

A4

Material

AL. 5083

Peso [kgf]

Aprobó: HERNAN BARANDA

1/12/2015

Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Esc. 1:1

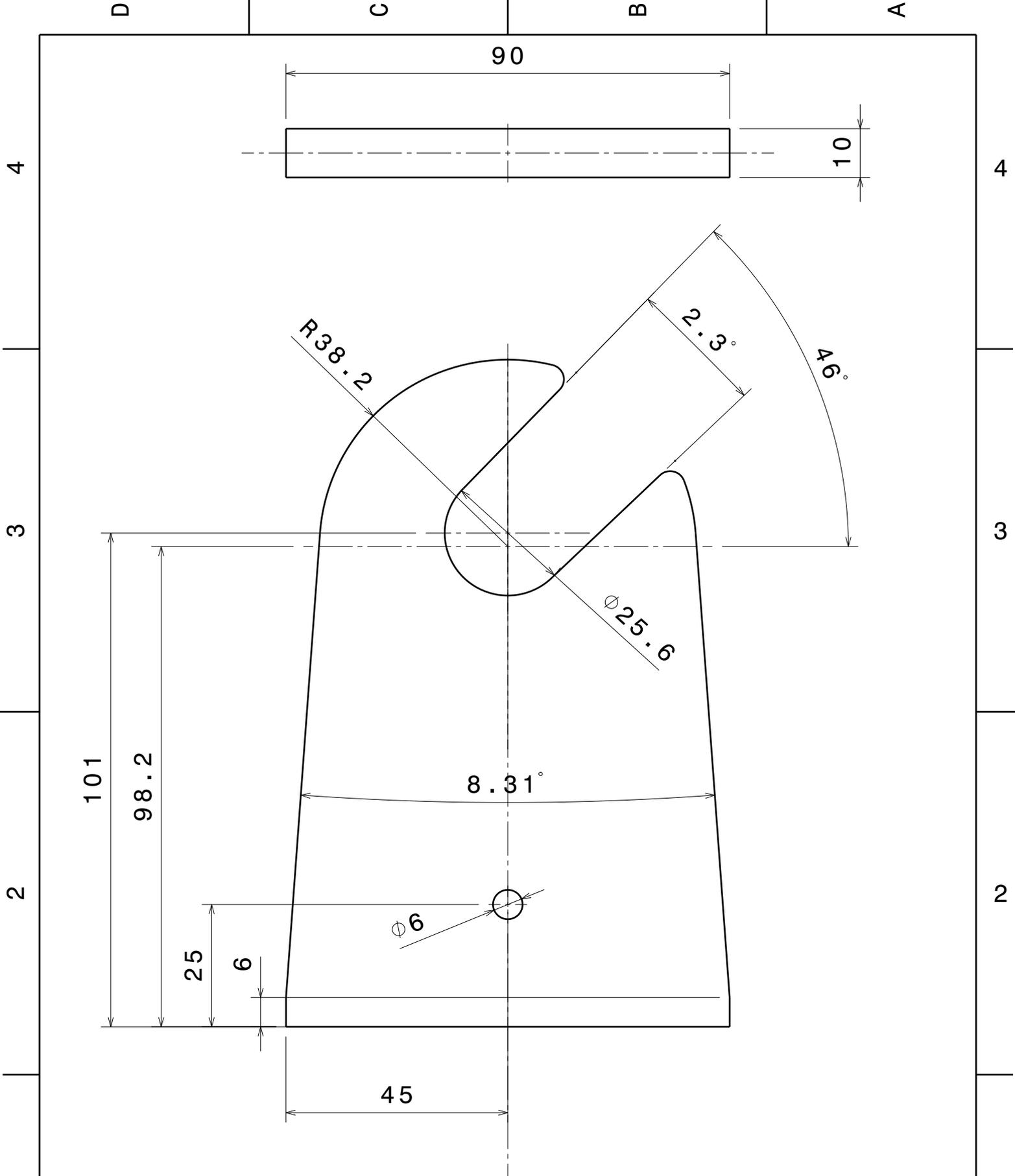
Plano N°

RE-01-303

D

A

1



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

ITBA

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos
Rugosidad superficial 3.2[.125]
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)

Denominación
PLACA APOYO

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones Fecha

Material
A4 AL. 5053

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ 1/12/2015
Aprobó: HERNAN BARANDA 1/12/2015

Peso [kgf]

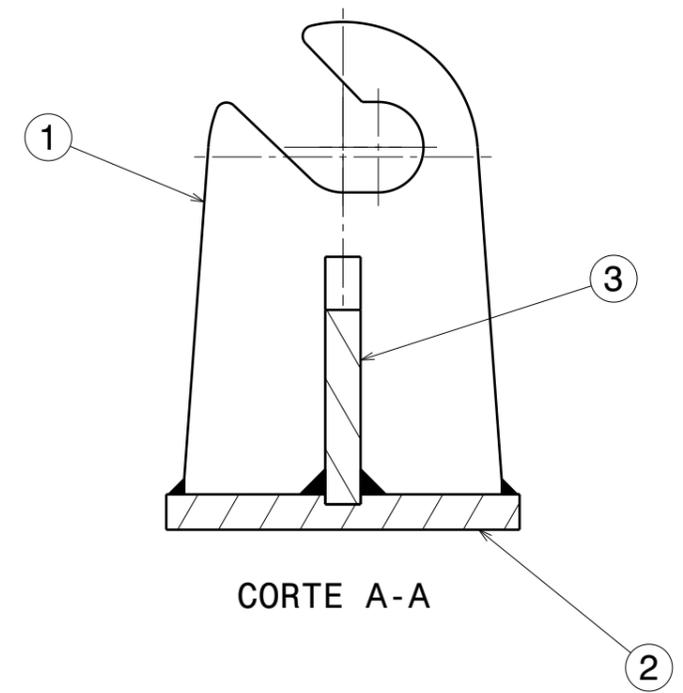
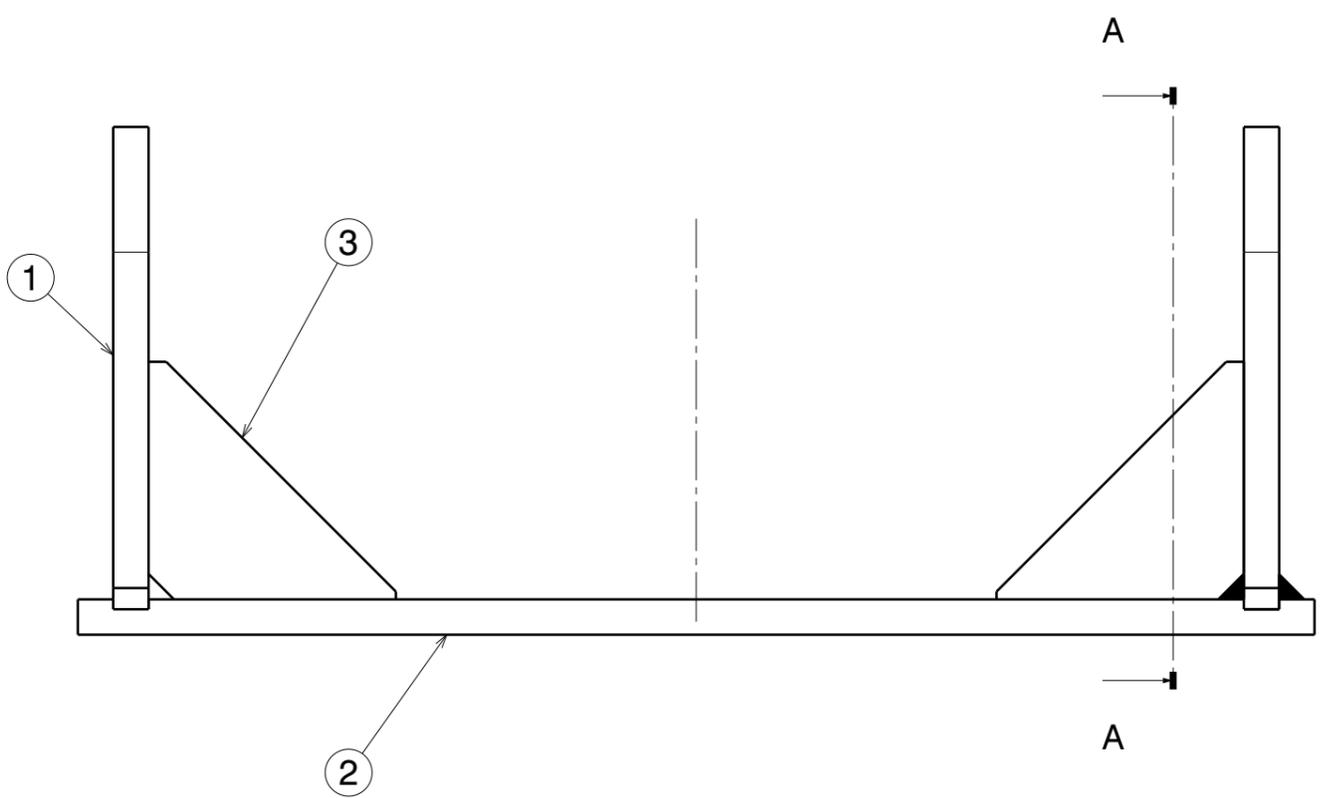
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Esc. 1:1

Plano N° RE-01-304

H G F E D C B A

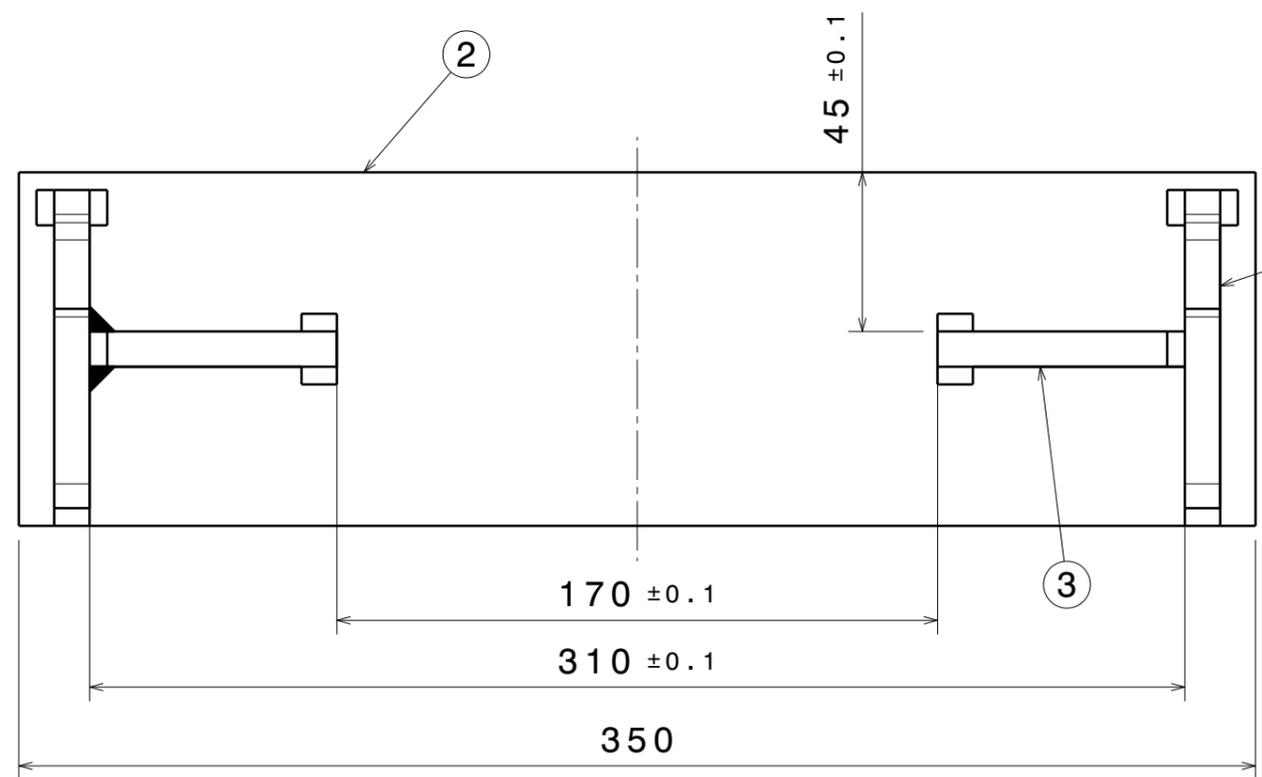
4



4

3

3



2

REFERENCIA	NOMBRE DE PIEZA	NÚMERO DE PLANO
1	PLACA APOYO DESLIZANTE	RE-01-351
2	PLACA INFERIOR APOYO	RE-01-302
3	NERVIO APOYO	RE-01-303

NOTA 1: EL SOLDADO DE LOS NODOS DEBE SER CON UNA TIG CON APORTE DE MATERIAL ALUMINIO.
 NOTA 2: EL CORDON DE TODAS LAS SOLDADURAS DEBE SER COMO MÍNIMO DE 5 mm.
 NOTA 3: SE DEBE ASEGURAR QUE LAS PLACAS APOYO DESLIZANTE SEAN CONCENTRICAS EN SUS RANURAS.

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA	
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Eliminar rebabas y cantos vivos		Rugosidad superficial 3.2[.125]	
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400	
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'	
Aprobaciones		Fecha		APOYO DESLIZANTE	
Dibujó:	ESTEBAN BUSTOS FERNANDEZ	1/12/2015		Material	
Aprobó:	HERNAN BARANDA	1/12/2015		AL. 5083	
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Esc. 1:2		Plano Nº RE-01-350	

1

H G B A

H G F E D C B A

4

3

2

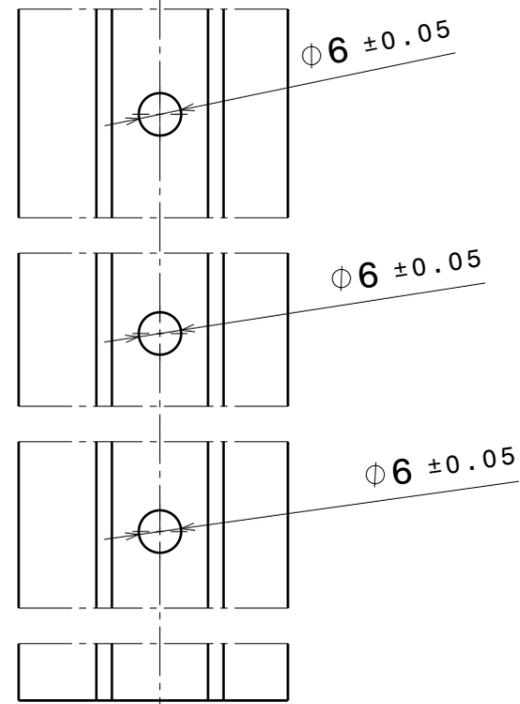
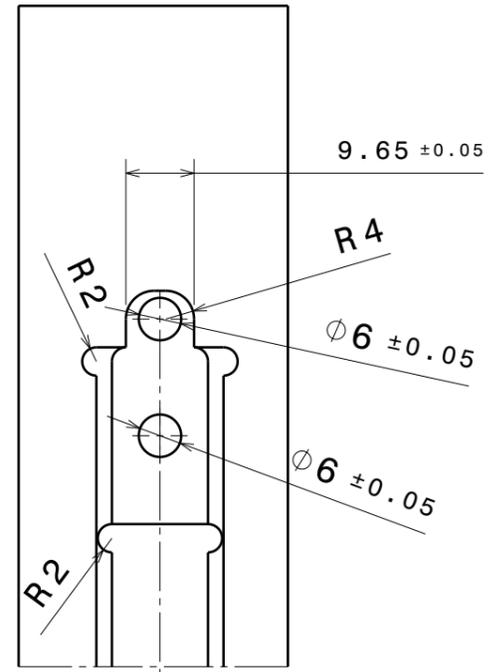
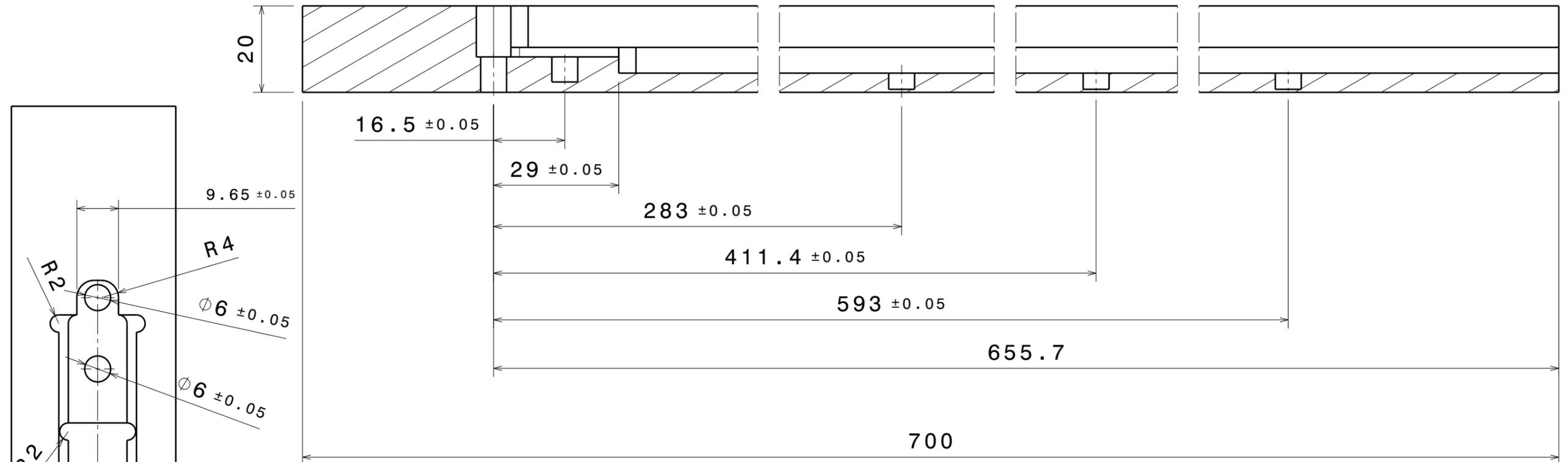
1

4

3

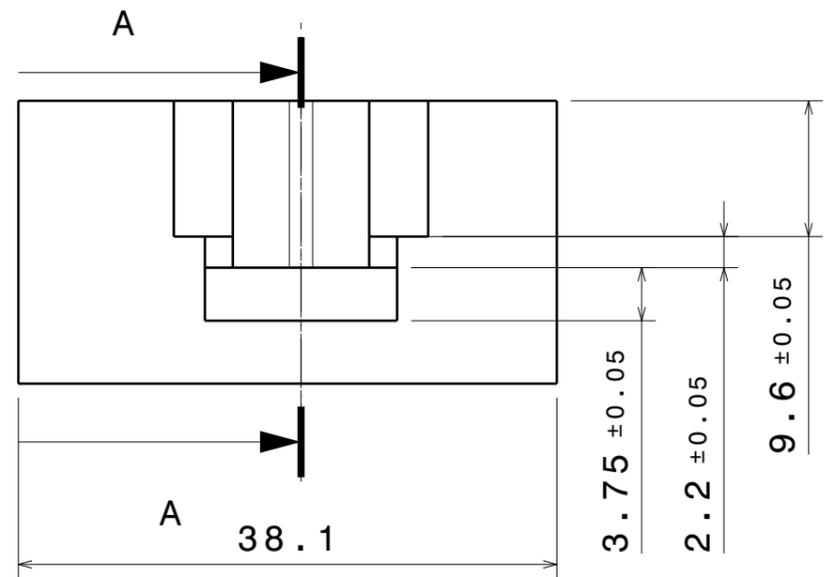
2

1



18 ± 0.05

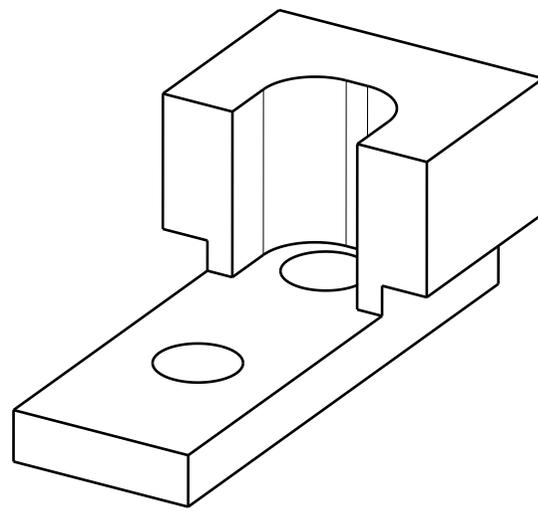
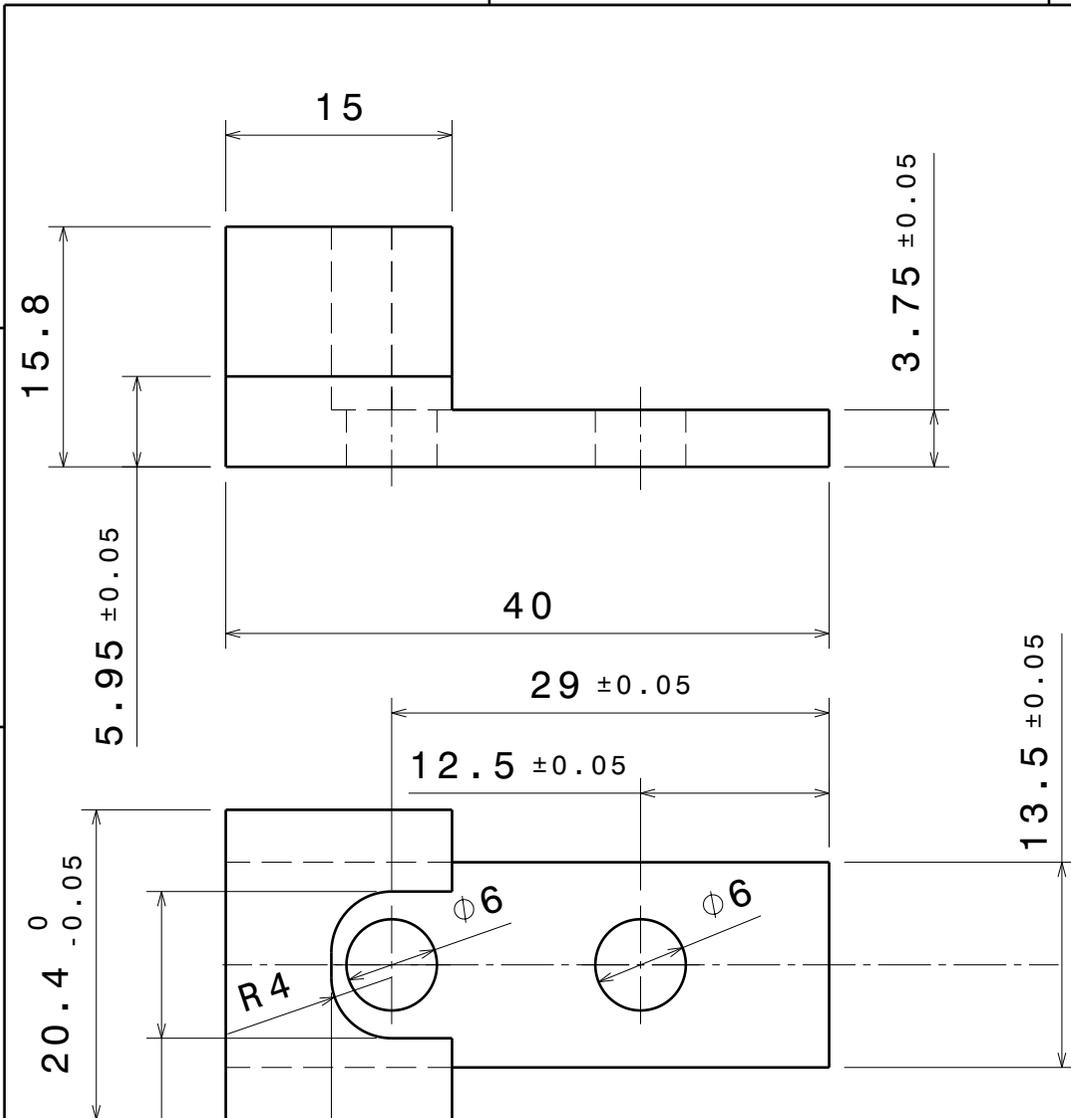
CORTE A-A



ESCALA 2:1

H G F E D C B A

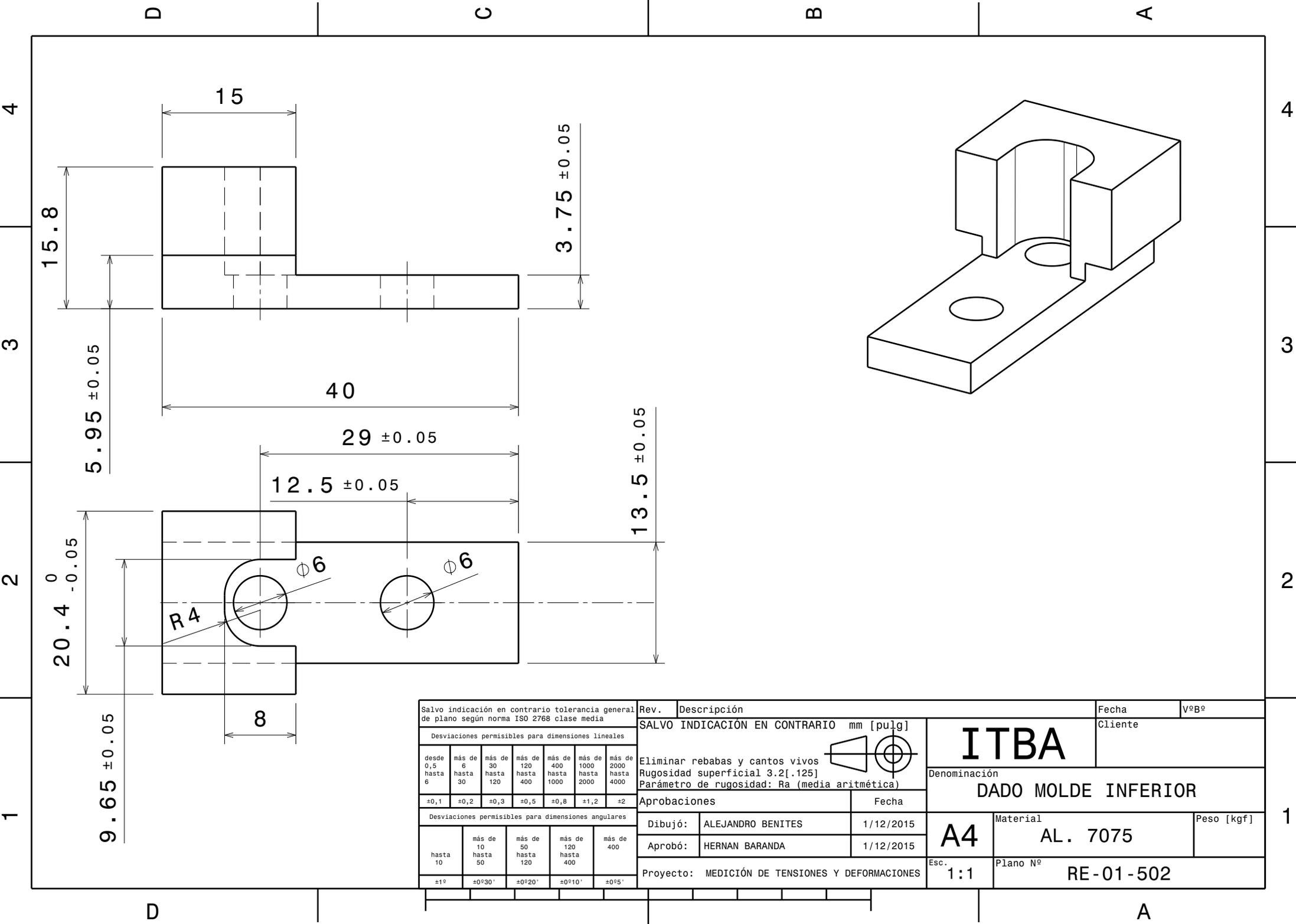
Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA	
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Eliminar rebabas y cantos vivos		Rugosidad superficial 3.2[.125]	
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)	
±1º	±0º30'	±0º20'	±0º10'	Aprobaciones	
Dibujó: ALEJANDRO BENITES		Fecha: 14/06/2015		Esc. 1:1	
Aprobó: HERNAN BARANDA		Fecha: 14/06/2015		Denominación: MOLDE ABAJO	
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		Material: AL. 7075		Peso [kgf]	
Plano Nº: RE-01-501		Material: AL. 7075		Peso [kgf]	



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media						
Desviaciones permisibles para dimensiones lineales						
desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares						
hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400		
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'		

Rev.	Descripción	
	SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]	
	Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)	
Aprobaciones		Fecha
Dibujó:	ALEJANDRO BENITES	1/12/2015
Aprobó:	HERNAN BARANDA	1/12/2015
Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES		

Fecha		vºBº
Cliente		
ITBA		
Denominación		
DADO MOLDE INFERIOR		
Material		Peso [kgf]
A4		AL. 7075
Esc.	Plano N°	
1:1	RE-01-502	



D

C

B

A

4

4

3

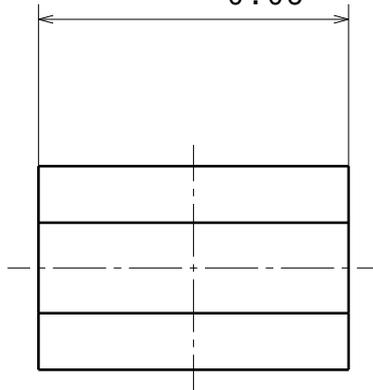
3

2

2

1

1

20.4⁰_{-0.05}

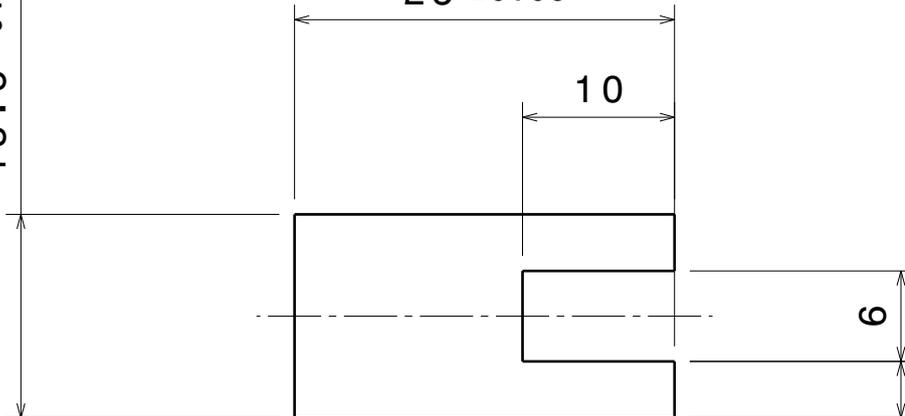
13.5 ± 0.05

25 ± 0.05

10

6

3.75 ± 0.05



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha

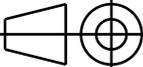
VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos 
 Rugosidad superficial 3.2[.125]
 Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)

ITBA

Denominación

DADO SUPERIOR

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: ALEJANDRO BENITES

1/12/2015

A4

Material

AL. 7075

Peso [kgf]

Aprobó: HERNAN BARANDA

1/12/2015

Proyecto: MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Esc.

1:1

Plano N°

RE-01-503

D

A