

---

# **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**

**Subdirección Académica**

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

## **TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Evaluación Numérica del Efecto de Refuerzos Estampados  
de Elementos Estructurales Laminados en sus Formas y  
Frecuencias Naturales**

presentada por

**Ing. Erick Jael Enríquez Rubio**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Eladio Martínez Rayón**

Codirectora de tesis

**Dra. Claudia Cortés García**

**Cuernavaca, Morelos, México. Marzo 2016.**

---

Cuernavaca, Mor., 23/febrero/2016

OFICIO No. DAc/0xx/2013  
Asunto: Aceptación de documento de tesis

**C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Erick Jael Enríquez Rubio, con número de control M14CE003, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.", hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
8500740

REVISOR 1



DR. ANDRÉS BLANCO ORTEGA  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica  
6559298

REVISOR 2



DR. JORGE GALÍN OCAMPO  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
4694783

REVISOR 3



DR. DARIUSZ SŁAWOMIR SZWEDOWICZ W.  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
PROF. IIT. FM-2

C.p. (Lic. Guadalupe Garrido Rivera).- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

Cuernavaca, Mor., 23 de febrero de 2016  
OFICIO No. SAC/130/2016

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. ERICK Jael ENRÍQUEZ RUBIO**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Evaluación Numérica del Efecto de Refuerzos Estampados de Elementos Estructurales Laminados en sus Formas y Frecuencias Naturales”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

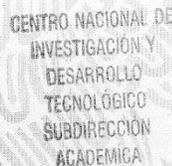
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”



**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



CENTRO NACIONAL DE  
INVESTIGACIÓN Y  
DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCION  
ACADEMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr

# *Agradecimientos*

A DIOS, el espíritu universal que ánima todas las cosas, gracias por permitirme tener esta experiencia terrenal.

## A mi familia:

A mi mamá, **Hilda Rubio**, Por darme el aliento, cariño y apoyo incondicional. Gracias mami, te amo y te llevo siempre conmigo, me has inspirado y motivado siempre.

A mi padre, **Eduardo Enríquez**, Por todo tu apoyo y consejos que me han ayudado a formarme como persona y profesionalista, te amo.

A mi hermana **Frida**, a quien adoro con el alma y aunque a veces soy duro contigo, quiero que sepas que es por tu bien y que siempre te deseo lo mejor pequeña.

## A mis compañeros de generación:

A mi novia **Ileana**, gracias por todo tu apoyo, por los momentos que hemos pasado, sin duda eres una persona increíble y maravillosa, que me ha motivado y me ha inspirado, ¡de quien he aprendido muchísimo!

A mi amigo **Dilvar**, gracias por tu amistad y por hacer cada momento muy ameno, eres único amigo.

A **Manuel**, gracias campeón por tu amistad y tu buena vibra.

A **Félix**, Gracias por todo Profesor, aunque convivimos poco, te considero un amigo y una persona ejemplar.

## A mis profesores y colaboradores del Cenidet:

**A mi director de tesis el Dr. Eladio Martínez**, todo mi aprecio y gratitud por sus enseñanzas, su amistad y apoyo, sin duda lo tengo en muy alta estima y de verdad gracias por creer en mí.

**A mi Codirectora la Dra. Claudia Cortés**, gracias por sus enseñanzas, mi admiración y respeto para usted doctora.

**A mi comité revisor: Dr. Dariusz Szwedowicz, Dr. Andres Blanco y Dr. Jorge Colín**. Sin duda profesores e investigadores a quienes admiro les agradezco por su paciencia y por todo el conocimiento que me transmitieron.

**A el Dr. Arturo Abundez**, gracias por sus enseñanzas, recomendaciones e interés por sus alumnos

**A todo el personal administrativo** que agilizo los tramites, por su eficiencia y buen trato, **Roció Salazar, Anita, Nadia**.

#### **A mis amigos y familiares:**

**A mis amigos de la prepa**, con quien tengo lazos de amistad muy fuertes, Cuauhtémoc Sotelo, Gustavo Castro, Luis Balón, Alberto Moreno, Fausto Cabrera, Samuel Roldan, Eleazar Castro, gracias muchachos.

**A mi abuelita Rosita, y toda mi familia Rubio**, gracias por su apoyo, son personas maravillosas.

**A mis compañeros del Cenidet**, Luis, Beny, Alma, Enrique, Miguel, Pancho, Ingrid, Blanca, Xóchitl y a todos los que me brindaron su amistad.

#### **A las Instituciones:**

**Al pueblo de México**, que por medio de sus impuestos el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT, financio la beca que me permitió realizar mis estudios.

**A Cenidet**, por permitirme esta magnífica oportunidad de seguir con mis estudios, pero en especial al departamento de Mecánica.

---

## RESUMEN

---

En este trabajo se utiliza la metodología de elemento finito para la obtención de frecuencias naturales y modos de vibración de elementos estructurales laminados con refuerzos estampados, donde se propone como caso de estudio una barrera acústica.

De acuerdo con la revisión de la literatura se establecen las condiciones de frontera y dimensiones del modelo. Como punto de partida para el análisis numérico se propone una placa calibre 16, se establecen los parámetros para la aplicación de refuerzos estampados siguiendo la metodología del proceso de embutido superficial, donde se seleccionan los radios de los dados con base a el espesor de la placa, posteriormente se proponen configuraciones con refuerzos variados y se observa el efecto que tienen sobre la frecuencia y modos de vibración, esto permite centrar los análisis en un tipo específico de refuerzos. De acuerdo a las condiciones de frontera y geometría de la placa, los refuerzos que mayor incremento de la rigidez tuvieron fueron los refuerzos en dirección horizontal, a los que se hace referencia como “RX”, estos mismos se analizaron bajo distintas condiciones como el incremento en cantidad, alternar su posición, recortar el refuerzo y variar el radio del dado, así se determinó la configuración de caso de estudio, que presento el mayor incremento en la rigidez de la placa alejando las frecuencias naturales de la misma. Finalmente, con base a los resultados obtenidos se propone el análisis de aislamiento acústico para una placa calibre 8 con 16 refuerzos horizontales, que es efectiva para mitigar ruido a bajas, medias y altas frecuencias.

---

## ABSTRACT

---

In this work, a finite element methodology to obtain natural frequencies and mode shapes of vibration in laminated structural elements with pressing reinforcements is used, where an acoustic barrier is proposed as a case of study.

Boundary conditions and dimensions of the model are defined according to the literature review. A plate caliber 16 is proposed as a starting point for the numerical analysis, the corresponding parameters for the location of the pressing reinforcements are set according to the methodology of dimple process, where the radius of the dices are chosen based on the plate thickness. Afterwards, configurations with diverse reinforcements are proposed in order to observe the effect they have on the natural frequencies and mode shapes, this allows us to focus the analysis on a specific type of reinforcement. According to the boundary conditions and geometry of the plate, the reinforcements with the highest stiffness increment were the ones located on horizontal direction, referred as “RX”; these reinforcements were analyzed under different conditions: as increasing the amount of reinforcements, alternating their position, trimming the reinforcement and varying the radius of the dice; this way, a particular configuration could be reached, the one with the highest stiffness increment and that moved the natural frequencies away.

Finally, based on the results, the analysis of acoustic isolation is proposed for a plate caliber 8 with 16 horizontal reinforcements, which results to be effective for mitigating noise at low, medium and high frequencies.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS .....	vi
SIMBOLOGIA .....	vii
Introducción .....	1
Capítulo 1.....	2
Antecedentes .....	2
1.1 Teorías de vibración de placas y láminas.....	2
1.2 Procesos de laminado y estampado .....	6
1.3 Barreras acústicas (Aplicación).....	7
1.4 Conclusión de la revisión bibliográfica.....	12
1.5 Objetivo .....	13
1.6 Alcances y aportaciones .....	13
1.7 Limitaciones .....	13
1.8 Justificación .....	13
1.9 Estructura del documento .....	14
Capítulo 2.....	15
Marco teórico .....	15
2.1 Teoría de placas .....	15
2.1.1 Ecuación diferencial de flexión en placas .....	15
2.1.2 Solución a la ecuación diferencia de flexión de una placa isótropa .....	21
2.1.3 Método Rayleigh Ritz.....	21
2.2 Vibración en placas rectangulares, método Warburton .....	22
2.3 Método de elemento finito.....	24
2.4 Procesos de conformación por deformación plástica.....	26
2.5 Embutido.....	27
2.5.1 Variables importantes del proceso de embutido .....	29
2.5.2 Fuerzas de embutido .....	30
2.6 El sonido .....	32
2.6.1 Representación gráfica del sonido.....	33
2.7 Magnitudes del sonido.....	35
2.7.1 Periodo y frecuencia .....	35
2.7.2 Amplitud .....	35
2.7.3 Longitud de onda .....	36
2.7.4 Velocidad de propagación del sonido ( <i>c<sub>medio</sub></i> ).....	36
2.8 Rango de frecuencias audibles .....	37
2.9 Espectro de frecuencias .....	37

2.10 Impedancia acústica.....	38
2.11 Características del sonido .....	39
2.11.2 Potencia sonora.....	39
2.12 Ruido acústico .....	40
2.14 Posibles fuentes de ruido de baja frecuencia.....	41
2.15 Efectos posibles de ruidos a bajas frecuencias.....	42
2.16 Aislamiento acústico.....	42
2.16.1 Pérdida de transmisión (TL).....	43
2.16.2 Aislamiento teórico de una partición simple.....	43
2.16.3 Aislamiento real de una partición simple .....	44
2.16.3.1 Aislamiento de paneles controlados por la rigidez del panel.....	46
2.16.3.2 Aislamiento de paneles en zona de masa controlada .....	46
2.16.3.3 Aislamiento de paneles sólidos en zona controlada por la amortiguación interna, (damping).....	47
Capítulo 3.....	49
Metodología .....	49
3.1 Dimensiones de la placa .....	49
3.2 Propiedades del material.....	50
3.3 Condiciones de frontera de la placa .....	50
3.4 Forma de los refuerzos para placa calibre 16.....	51
3.5 Reducción de longitudes de la placa .....	52
3.6 Metodología para el análisis numérico.....	53
3.7 Placas con refuerzos variados.....	54
3.8 Placas con refuerzos en horizontales “RX”.....	55
3.8.1 Posición de los refuerzos .....	56
3.8.2 Alternando la colocación de los refuerzos para la configuración “4RX”.....	56
3.8.3 Refuerzos recortados .....	57
3.8.4 Incremento de la cantidad de refuerzos.....	57
3.8.5 Incremento del radio en dado .....	58
Capítulo 4.....	59
Resultados .....	59
4.1 Análisis de convergencia de malla .....	59
4.2 Secuencia de embutido y reducción de longitudes de la placa .....	61
4.3 Tablas de reducción de longitud.....	61
4.4 Cálculo de frecuencias naturales en placa rectangular método de Warburton .....	64
4.5 Comparación de resultados teóricos y numéricos .....	65
4.6 Resultados de placas con refuerzos variados .....	65
4.7 Resultados de placas con refuerzos horizontales “RX” .....	66
4.7.1 Posición de los refuerzos para la configuración “4RX”.....	66

4.7.2 Alternando la posición de los refuerzos para “4RX” .....	66
4.7.3 Refuerzos recortados .....	67
4.7.4 Incremento de la cantidad de refuerzos “RX” .....	68
4.7.5 Incremento de los radios del dado .....	69
Capítulo 5.....	71
Análisis de resultados. ....	71
5.1 Modos de vibración de la placa lisa .....	71
5.2 Placas con refuerzos variados.....	72
5.2.1 Incremento de frecuencia en placas con refuerzos variados .....	72
5.2.2 Modos de vibración de placas con refuerzos variados.....	72
5.3 Posición de los refuerzos “RX” .....	75
5.4 Refuerzos alternados.....	77
5.5 Refuerzos recortados .....	77
5.6 Incremento de la cantidad de refuerzos “RX” .....	78
5.7 Variación del radio del dado.....	79
Capítulo 6.....	80
Caso de estudio .....	80
6.1 Análisis de aislamiento acústico de la placa 16RX_9.5r, calibre 16 .....	80
Zona 3 .....	81
6.1.2 Conclusiones del análisis de aislamiento de la placa 16RX_9.5r .....	82
6.2 Placa calibre 13 y configuración 16RX_15.87r .....	82
6.3 Placa calibre 8 y configuración 16RX_25.4r .....	83
6.4 Análisis de aislamiento acústico placa 16RX_25.4r, calibre 8 .....	84
6.4.1 Conclusiones del análisis de aislamiento acústico 16RX_25.4r_ calibre 8 .....	85
Capítulo 7.....	86
7.0 Conclusiones y recomendaciones .....	86
7.1 Sugerencias para trabajos futuros .....	88
Referencias.....	89
ANEXOS .....	91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1.0	Placa rectangular	3
1.1	Variación de radios de redondeo	7
1.2	Distintos tipos de barreras acústicas	8
1.3	Pérdida por inserción de un panel de 3m de altura	9
1.4	Comportamiento acústico de un material poroso y un material aislante	11
1.5	Comportamiento de elementos absorbentes	11
2.0	Diagrama de fuerza y momentos de un elemento de dimensiones dx.dy	16
2.1	Forma libre de embutido	27
2.2	Mecánica básica del embutido	28
2.3	Fuerzas básicas, involucradas en el embutido convencional	31
2.4	Fuerza del punzón contra el movimiento del punzón en un embutido profundo	31
2.5	Vibración de una partícula a partir de su posición de equilibrio en un tiempo inicial	32
2.6	Zonas de compresión y rarefacción producidas por el movimiento ondulatorio de las moléculas de aire	33
2.7	Representación gráfica del sonido	34
2.8	Representación de la variación de presión en una onda sonora	34
2.9	Representación gráfica de una oscilación	35
2.10	Espectro de frecuencias	38
2.11	Representación gráfica de la ley de Berg	44
2.13	Ley de masas extendida	45
2.14	Efecto de la incidencia	48
3.1	Fijación de un panel	50
3.2	Condiciones de frontera de la placa	50
3.3	Vista de sección de dado de 6.3mm de radio	51
3.4	Cabeza de dados, a) Punzón recortado b) punzón completo	52
3.5	Secuencia de desdoblado de sección de placa calibre 16 y radio el refuerzo de 6.3mm.	53
3.6	Placas con refuerzos variados, radio interno del refuerzo 6.3mm.	55
3.7	Placa con 4 refuerzos horizontales distribuidos uniformemente 4RXU, y placa con refuerzos a 100mm de los bordes inferior y superior 4RX	56
3.8	a) Refuerzo convencional, b) Refuerzo alternado.	56
3.9	Refuerzos recortados y refuerzos pasados, para 4RX.	57
3.10	Incremento de refuerzos horizontales pasados de 6.3r mm de radio interno	57
3.11	Combinación de radios internos y radios externos.	58
4.0	Refinamiento de malla	59
4.1	Gráfica de convergencia de malla	60
4.2	Secuencia de embutido, radio del punzo 6.3mm, placa calibre 16.	61
4.3	Condiciones de frontera método Warburton, dimensiones en mm	64
4.4	Gráfica de frecuencias naturales de placas con refuerzos variados	65
4.5	Gráfica del efecto de la posición de los refuerzos en la frecuencia natural para 4RX	66
4.6	Gráfica del efecto en las frecuencias naturales de alternar la posición de los refuerzos en placas 4RX_6.3r.	67
4.7	Gráfica, refuerzos recortados Vs pasados.	67
4.8	Gráfica efecto del incremento de refuerzos RX_6.3.	68

4.9	Gráfica de Frecuencias naturales, variable radio del dado, para 4RX	69
4.10	Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del dado para 10 RX.	69
4.11	Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del dado, para 16 RX.	70
4.12	Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del dado, para 21 RX.	70
5.0	Seis primeros modos de vibración palca calibre 16	71
5.1	Comparación modos de vibración refuerzos verticales y placa lisa.	72
5.2	Modo 6, placa con dos refuerzos verticales y lisa	73
5.3	Primer modo de vibración de placas con refuerzos variados	73
5.4	Primer modo, placa tipo punzón y tipo cruz	74
5.5	Patrones nodales en placas con refuerzos variados	75
5.6	Comparación del efecto de los refuerzos al variar la posición, placa lisa y 4RX	76
5.7	Modo 10 de vibración, en placa lisa y placas con 4 refuerzos horizontales	76
5.8	Segundo modo de vibración de placas con refuerzos en una dirección y refuerzos alternados, para 4RX.	77
5.9	Primer modo de vibración de una placa con refuerzos recortados y pasados, para la configuración 4RX	77
5.10	Secuencia de imágenes donde se muestra el efecto del incremento de los refuerzos en los tres primeros modos de vibración	78
5.11	Primer modo de vibración placa con 16 refuerzos, radios 6.3mm, 7.5mm y 9.5mm	79
6.0	Primer modo de vibración placa 16RX_9.5r, frecuencia 27.965 Hz.	80
6.1	Primer modo de vibración placa lisa calibre 13 y 16RX_15.87r	83
6.2	Dos primeros modos de vibración placa 16RX_25.4r y Primer modo de placa calibre 8	84

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
2.0	Coeficientes para cálculo de frecuencias naturales, Warburton	24
2.1	Velocidad de propagación del sonido en diferentes medios	37
2.2	Rango de frecuencias audibles	37
2.3	Impedancia característica en algunos medios	37
2.4	Principales fuentes de contaminación acústica	38
3.0	Propiedades mecánicas del material, masa y dimensiones placa calibre 16	50
3.1	Aumento del radio del dado respecto al espesor (h) de una lámina cal 16.	51
4.0	Tamaño de malla, número de elementos y primera frecuencia natural	59
4.1	Veinte primeras frecuencias naturales, placa lisa calibre 16	60
4.2	Reducción de longitud, distancia entre refuerzos y verificación de conservación de masa, para refuerzos pasados de 6.3mm de radio interno.	62
4.3	Reducción de longitud para placas con refuerzos verticales (RY), radio interno 6.3mm	63
4.4	Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales recortados (RXC) radio interno 6.3mm.	63
4.5	Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales, pasados y radio interno de 7.9mm.	63
4.6	Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales, pasados y radio interno de 9.5mm.	63
6.0	Análisis de aislamiento acústico de la configuración placa calibre 16	81
6.1	Radios del dado en base al espesor (h) de una lámina calibre 13, con ajuste para perfiles comerciales	82
6.2	Ajuste de longitud de acuerdo a incremento de refuerzos, para placa calibre 13.	82
6.3	Radios del dado en base al espesor (h) de una lámina calibre 8, con ajuste para perfiles comerciales.	83
6.4	Ajuste de longitud de acuerdo a incremento de refuerzos, para placa calibre 8	83
6.5	Pérdidas por transmisión, de la configuración 16RX_25.4r.	84

## SIMBOLOGIA

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$\lambda$	Longitud de onda
$\alpha$	Coefficiente de absorción
$\omega$	Frecuencia angular
$M_x$	Momento flector en x
$M_y$	Momento flector en y
$M_{xy}$	Momento de torsión
$T_x$	Esfuerzo cortante en x
$T_y$	Esfuerzo cortante en y
$p$	Fuerza externa de excitación
$\sigma_x$	Tensión en dirección x
$\sigma_y$	Tensión en dirección y
$\tau_{xy}$	Tensión tangencial
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$G_{xy}$	Módulo de elasticidad tangencial
$E$	Módulo de Young
$h$	Espesor de la placa
$w$	Amplitudes de deflexión
$U_{max}$	Energía potencial elástica acumulada durante la deformación
$T_{max}$	energía cinética de la placa vibrando transversalmente
$\Theta$	Ángulo de rotación
$\Delta$	Ángulo de rotación
$N_x$	Carga perpendicular al eje x
$N_y$	Carga perpendicular al eje y
$R_p$	Radio del punzón
$R_d$	Radio del dado
$c$	Claro de embutido
$F_h$	Fuerza de sujeción
$Db$	Diámetro de área para embutido
RLE	Relación de embutido
$F_T$	Fuerza total
$F_p$	Fuerza del punzón
$F_{emb}$	Fuerza de embutido
$\sigma_{max}$	Resistencia a la tracción
$p_0$	Presión estática
$p$	Presión sonora
$\varphi$	Angulo de fase
$w_0$	Frecuencia angular propia
$A$	Máximo valor de desplazamiento
$f$	Frecuencia
$T$	Periodo
$c_{medio}$	Velocidad de propagación
$z$	Impedancia acústica
$V$	Velocidad

NPS	Nivel de presión sonora
NPS	Nivel de potencia sonora
<i>I</i>	Intensidad sonora
TL	Pérdida por transmisión
M	Masa por unidad de superficie
m	Masa
$f_c$	Frecuencia crítica
<i>B</i>	Módulo de BULK

---

## INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad los elementos estructurales laminados son muy utilizados en la industria automotriz, aeronáutica y de la construcción, por su ligereza, simplicidad de manufactura y bajo costo.

No obstante, su baja rigidez a la flexión los hace precisar de refuerzos para soportar cargas estáticas, utilizándose vigas, barras y refuerzos estampados para tal efecto.

Por otro lado, las cargas dinámicas vibratorias someten al sistema a posibles fallas por resonancia. Una estrategia para evitar esto es modificar la frecuencia natural de la estructura, la cual se define por su distribución de rigidez y masa.

En este trabajo se exploró la posibilidad de cambiar la frecuencia natural de un elemento estructural laminado plano, modificando su rigidez utilizando refuerzos estampados. A su vez se utiliza la metodología de elemento finito para la obtención de modos normales y frecuencias naturales, con la ventaja de poder crear distintos tipos de configuraciones mediante software de diseño.

También, se establecen parámetros para la aplicación de refuerzos estampados, que son útiles para todos los calibres de placas comerciales, y con base a los análisis realizados se elige una configuración útil como panel acústico, efectiva para bajas, medias y altas frecuencias, pues al cambiar la rigidez de las placas se alejan las frecuencias naturales del panel, incrementado su efectividad como supresor de ruido.

---

# CAPÍTULO 1

---

## ANTECEDENTES

*Se revisan las teorías utilizadas para el análisis de vibración en placas y los métodos para modificar sus modos de vibración y frecuencias naturales, también se exploran las técnicas de estampado en chapa metálica. Por otro lado, se reconocen la tipología de barreras acústicas, sus características y se definen los conceptos de absorción y aislamiento acústico.*

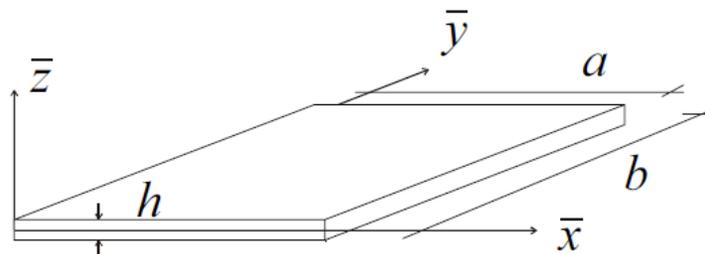
### **1.1 Teorías de vibración de placas y láminas**

Una de las primeras personas que realizó experimentos sobre la vibración en placas fue Ernst Chladni (1756-1827), físico alemán que investigó la vibración del sonido. Chladni descubrió que, si esparcía arena en una placa y la hacía vibrar con un arco de violín, la arena se distribuía formando patrones geométricos ordenados. Durante años exhibió su descubrimiento por toda Francia como una curiosidad de circo (Ullmann, 2007). Fue Sophie Germain en 1816, quien obtuvo un modelo matemático que explicaba las formas de Chladni. No obstante, la gran mayoría de matemáticos de esta época no intentó resolver el modelo a causa de que Lagrange había afirmado que los modelos matemáticos disponibles en esa época eran inadecuados para la solución del problema (Osen, 1974).

Por otro lado, son numerosos los trabajos realizados por grandes matemáticos y físicos que surgieron posteriormente para plantear el comportamiento a flexión de una placa. Como los trabajos de Euler, Lagrange, Navier, Poisson, entre otros. Sin embargo, Kirchhoff (1976), en su libro “Física Matemática” plantea la teoría de placas, que es considerada hoy como la teoría clásica de placas; posteriormente, Love recopiló y amplió los trabajos de Kirchhoff, esto a tal grado que actualmente se conoce a la teoría clásica de placas también como Kirchhoff-Love. En esta teoría se desprecia la deformación por cortante y se considera una hipótesis análoga a la hipótesis de Navier-Bernoulli para vigas. De hecho, existe un paralelo entre los modelos de vigas y de placas. El modelo de placa de Reissner-Mindlin es el equivalente de la viga de Timoshenko, mientras que el modelo de placa de Love-Kirchhoff es el equivalente de la viga de Euler-Bernoulli.

Por su parte Timoshenko (1959), dio un gran empuje a la teoría de vigas y placas, desarrollando la conocida viga de Timoshenko, que incluye el efecto cortante, despreciando la viga de Euler-Bernoulli. En occidente también se atribuye la teoría de placas como teoría clásica de placas de Timoshenko. Sin embargo, el estudio de vibración de placas (circulares, rectangulares) suele hacerse siguiendo los métodos Rayleigh y Ritz, mediante este método se pueden obtener los valores propios de un sistema. El método Ritz es en realidad un perfeccionamiento del de Rayleigh, este consiste en suponer una curva o superficie de flexión como representativa de modo de vibración. Las condiciones de contorno deben tomar valores tales que reduzcan al mínimo la frecuencia de vibración (Hacar, 1995).

No obstante, la determinación de frecuencias naturales de vibración en placas rectangulares isotrópicas es un problema que ha sido extensamente estudiado por diversos investigadores, las investigaciones de Leissa (1969), constituyen excelentes compilaciones de la literatura correspondiente. Por otro lado, para el análisis de placas de un material compuesto laminado se han empleado a lo largo de los años diversas teorías, partiendo de la teoría clásica de placas (Timoshenko, 1959), la teoría de primer orden de deformación por corte (Reissner, 1945) (Mindlin, 1951), hasta las teorías de deformación de orden superior (Reddy, 1993). Esta última utiliza una función coordenada del espesor de la placa ( $z$ ) para representar el campo de desplazamiento no lineal a lo largo del mismo, (ver figura 1.0). Por otro lado, las teorías trigonométricas, Mantari (2012), utiliza un término sinusoidal para representar el desplazamiento no lineal a lo largo del espesor. Este tipo de modelos satisface la continuidad de desplazamiento y tensión de corte transversal y también las condiciones de contorno de tensión de corte transversal.



*Figura 1.0-Placa rectangular (H. Felix, 2004)*

Oller *et al.* (2012), formularon un macro-elemento que constituye un elemento finito jerárquicamente enriquecido con polinomios de Gram-Schmidt, así la superficie de una placa se discretiza con una malla de macro-elementos que a diferencia de elementos finitos no requiere densificar el mallado. De esta manera se puede analizar placas cuadriláteras laminadas de cualquier forma geométrica en un espacio bidimensional; sin embargo, queda limitado en cuanto a placas con deformación volumétrica, pues no se considera el cambio de geometría en el plano ( $z$ ).

Ahora bien, aunque las teorías de alto orden también son efectivas para materiales isotrópicos se han utilizado más en placas cruzadas o paneles tipo sándwich tal es el caso de Ferreira *et al.* (2008), quienes utilizaron TSDT en el análisis de vibración de placas laminadas cruzadas.

Por otro lado, se han implementado variantes del método de Raleigh-Ritz para el análisis de placas rectangulares con parches ortótropos y anisótropos, como lo hacen H. Felix *et al.* (2004), quienes implementaron un algoritmo a través del método de Raleigh-Ritz que facilita la construcción de matrices de energía. Cabe destacar que este método funciona con diferencias de energía de deformación y energía cinética; es a través de esta ecuación como se obtienen los auto valores asociados con las frecuencias naturales del sistema. Este tipo de método se utiliza cuando se agregan parches rectangulares, circulares y cuadrados, mientras queda limitado a geometrías más complejas o con cambios de deformación volumétrica.

Otra forma de refuerzo en placas laminadas es la que utilizan Honda & Narita (2010) en la que colocan fibras arbitrariamente en forma curvilínea utilizando rodillos que compactan la fibra sobre la placa. Igualmente utilizan el método de Raleigh-Ritz para la obtención de frecuencias y comparan con el método de elemento finito sus resultados, los cuales obtuvieron frecuencias más altas para configuraciones con fibras delgadas en el centro y en el exterior, comparadas con las que únicamente tienen refuerzos en el exterior; cabe destacar que utilizan un espesor igual para ambas configuraciones.

En el mismo contexto de adición de refuerzos utilizando materiales compuestos, Malekzadeh (2014), agrega nanotubos de carbono a los contornos de la placa, utilizando un método de abrasión “Termo-Mecánica”; el método que utilizan para obtener las frecuencias es el de primer orden (FSTD) y el programa de elemento finito ANSYS, los resultados obtenidos

demuestran que una distribución homogénea de nanotubos de carbono en los contornos de la placa es efectiva para la obtención de placas más rígidas.

Hasta este punto, se han mencionado las teorías de placas y su aplicación de acuerdo a la linealidad o no linealidad del material, también algunos ejemplos en donde se refuerzan placas con materiales compuestos o no lineales. Una parte fundamental de esta investigación es conocer el efecto de refuerzos estampados en placas laminadas, a causa de la complejidad de la geometrías que se utilizaron, no se encontró un método que incluya el efecto de la deformación volumétrica que tienen los refuerzos estampados.

Por otro lado existen investigaciones que involucran la adición de elementos estructurales a las placas. Un trabajo muy extenso de este tipo, en el que se refuerzan placas (ortogonal a la placa base) y con elementos estructurales tipo “I” es el de Imtiaz (2001); principalmente se enfoca en analizar las formas de fallo por pandeo o “buckling”, y aunque no incluye análisis vibratorio resulta de interés pues sirve como referencia para el lugar de aplicación de refuerzos.

Otro trabajo que igualmente se basa en la adición de material a placas isotrópicas es presentado por Seung *et al.* (2015), donde utilizan (FSTD) teoría de primer orden de Mindlin para obtener frecuencias naturales, a su vez se incluye análisis de vibración forzada y se considera el efecto de los refuerzos tomando en cuenta las propiedades de viga de Timoshenko, también se compara con análisis numérico.

Por otro lado poco se ha estudiado el efecto de rótulas intermedias en la vibración de placas libres, pues la presencia de estas genera condiciones cuyas expresiones analíticas son análogas a las condiciones de contorno y complican notablemente su solución. Quintana M. (2012), obtuvo mediante el cálculo de variaciones de ecuaciones diferenciales que establecen las condiciones de contorno el comportamiento dinámico de placas laminadas con rótulas intermedias. Por consiguiente, se vuelve de interés para esta investigación al considerar cambios de rigidez en el centro de las placas, sin embargo el efecto de un refuerzo estampado genera un aumento de rigidez y no se podría evaluar la complejidad de las geometrías estampadas.

Como se puede inferir, existe una gran brecha para el estudio de métodos que modifiquen las formas y frecuencias naturales de placas mediante procesos de prensa o estampado y existen muchos otros trabajos que consideran la adición de parches de materiales ortótropos, fibras, resinas e inclusive nanotubos de carbono. No obstante la otra parte de los trabajos revisados se enfocan en la optimización de métodos para obtener frecuencias y modos de vibración en placas compuestas, pues el costo computacional (tiempo de simulación) es alto, a su vez otro factor que se a tratado de minimizar es el tiempo de análisis, desarrollandose teorías de alto orden que disminuyen el tiempo de análisis. Para este trabajo se utilizan teorías de primer orden para la obtención de modos de vibración y frecuencias naturales, puesto que se utiliza un material isotrópico.

## **1.2 Procesos de laminado y estampado**

Es importante conocer acerca de los procesos de laminación, que es un proceso que se basa en la deformación plástica y fuerzas de compresión para la obtención de elementos laminados Rodríguez (2001), presenta un análisis detallado del proceso de embutido y los defectos más comunes al momento de conformar chapa metálica.

Altan (1983), describe los procesos de laminación y las normas que se utilizan en los procesos de manufactura según la “American Society For Metals”.

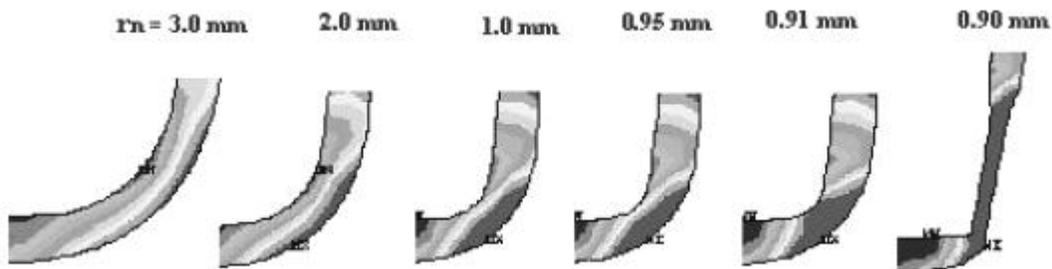
Este trabajo se centra en la utilización de procesos de laminado en frío, de igual manera se puede hacer referencia a estos como procesos de acabado de chapa metálica, Groover (1997), muestra los procesos de estampado de interés para esta investigación, tres principalmente: el proceso de embutición, engargolado y calandreo, como métodos para la aplicación de refuerzos.

Se puede decir que la gran mayoría de procesos de estampado han evolucionado lentamente, pues se siguen utilizando técnicas muy antiguas pero no por esto menos efectivas, aunque muchas técnicas se han ido mejorando a partir de los ensayos y muchas otras veces a prueba y error, las geometrías son muy variables y las consideraciones se vuelven particulares dependiendo qué se desee conformar, sobre todo en procesos como el embutido, donde puede ir desde un embutido superficial hasta el embutido profundo.

Sin embargo, un embutido profundo requiere de varios pasos, además de que existen adelgazamientos en las paredes de la placa conformada, principalmente cerca de las zonas con mayor deformación, por lo tanto resulta poco práctico aplicar embuticiones profundas como refuerzos estampados, pues al existir disminución del espesor de la placa se podrían tener problemas comunes de embutido como grietas o cortes en la misma.

Shimizu (2010), recomienda que para llevar a cabo el proceso de embutido en un solo paso, el radio del punzón y de la matriz deben de ser de 4 a 6 veces mayor que el espesor de la placa.

Mejía (2004), describe los fundamentos de la conformación plástica y mediante simulaciones por elemento finito verifica que el radio de redondeo del punzón en el proceso de embutido es una de las variables que más influyen, pues a medida que el radio del dado disminuye el esfuerzo plástico equivalente aumenta en el area de contacto del redondeo y la lámina, hasta llegar a un valor crítico en falle la lamina, ver figura 1.1.



*Figura 1.1-Variación de radios de redondeo (Mejía, 2004)*

La revisión bibliográfica correspondiente al proceso de estampado, se enfocó principalmente a la conformabilidad de los refuerzos, y se encontro que para los embutidos superficiales la variación del espesor de la placa es minima o prácticamente nula. Y que el utilizar radios mayores que el espesor de la placa en dados y matrices es un factor esencial para evitar defectos comunes como grietas, arrugas o cortes en la placa embutida.

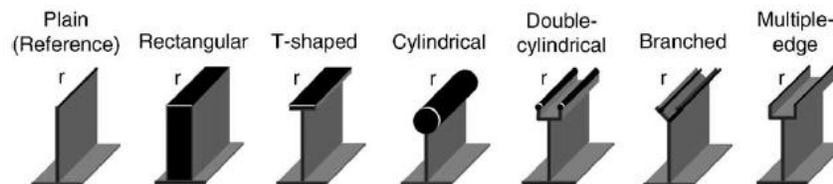
### **1.3 Barreras acústicas (Aplicación)**

El ruido es un sonido complejo y puede ser por la frecuencia de los sonidos puros que lo componen, y por la amplitud de la presión acústica correspondiente a cada una de estas frecuencias. Sin lugar a dudas el ruido es un problema que afecta a diario a los habitantes de

las grandes ciudades, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), 130 mil millones de habitantes de sus países miembros, se encuentran con un nivel sonoro superior a 65 decibeles, este nivel de presión sonora causa problemas a la salud (Polygal, 2013); las fuentes principales de ruido en la ciudades son: tráfico por rodadura (automóviles y motos), actividades de recreación (bares y discotecas), obras y construcción, aviones y ferrocarriles, estos dos últimos generado la mayor cantidad de ruido entre 80dB y 120dB.

La OCDE (1986), expresó que un ruido entre 55 y 60 dB(A) causa molestias a los seres humanos, entre 60 y 65 dB(A) la molestia aumenta considerablemente y por encima de 65 dB(A) surgen perturbaciones de los modelos de comportamientos sintomáticas del daño grave causado por el ruido. Por su parte, la OMS ha sugerido como valor estándar de orientación para los niveles medios de ruido al aire libre 55 dB(A).

Por consiguiente, una solución viable para mitigar el ruido en áreas urbanas es la utilización de pantallas acústicas o barreras acústicas, pues estas producen un efecto de atenuación del ruido en la zona del receptor. Esta atenuación depende fundamentalmente de las dimensiones de la pantalla, que son las que determinan la cantidad de energía sonora directa y difractada (fenómeno que afecta a la propagación del sonido). La eficacia frente a la transmisión del ruido viene dada por la capacidad de aislamiento acústico del panel utilizado, además de sus dimensiones, tipo de materia y las características geométricas de la barrera (Takashi Ishizuka, 2003).

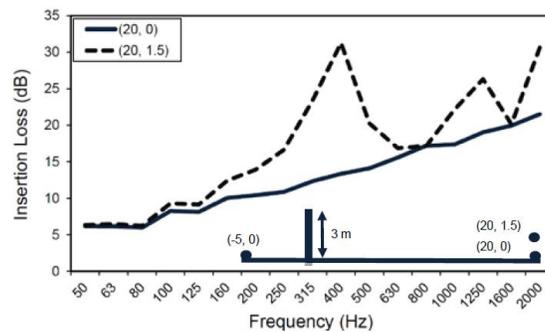


*Figura 1.2 -Distintos tipos de barreras acústicas (Takashi Ishizuka, 2003)*

Existen una amplia variedad de barreras acústicas como se muestra en la figura 1.2, Serrano *et al.* (2009), presentan un estudio sobre la tipología barreras acusticas, los distintos materiales con las que se fabrican, pueden ser de madera, hormigon, policarbonato, acero, pantallas de elementos organicos o espumás absorbentes. Como consecuencia del ruido y la

gran variedad de materiales, esta en auge el desarrollo de todo tipo de pantallas acústicas. Es por eso que en la actualidad las firmas fabricantes desarrollan y patentan sus propios elementos y materiales constructivos (Simon, 1997).

Si bien no existe un parámetro que defina de que material fabricar una barrera acústica, la efectividad de las barreras depende de muchos factores, como su espesor, su capacidad de absorción y refracción, sin embargo si existen estudios sobre la pérdida por inserción (forma de disipación de energía antes y después de colocar la pantalla) y la atenuación (reducción de la intensidad acúsica) de acuerdo a la geometría de las pantallas, Smaneh Fard (2013), determino que las pantallas altas son más efectivas pues generan mayores pérdidas por inserción como se muestra en la figura 1.3.



*Figura 1.3-Pérdidas por inserción de un panel de 3m de altura (Smaneh Fard, 2013)*

Por otro lado existen normas como la UNE-EN 1794-1:2003 (norma europea), que establecen parámetros dimensionales que deben tener las barreras acústicas para no comprometer su estabilidad mecánica.

Para poder comprender mejor el comportamiento de una barrera acústica es importante definir los fenómenos físicos que afectan a la propagación del sonido:

- **Absorción.** Se da cuando una onda sonora alcanza una superficie; una parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbido por el nuevo medio.
- **Reflexión.** Se origina cuando una onda se encuentra con un obstáculo que no puede traspasar y se refleja (vuelve al medio del cual proviene).
- **Transmisión.** En muchos obstáculos planos (las paredes de los edificios) una parte de la energía se transmite al otro lado del obstáculo. La suma de la energía reflejada, absorbida y transmitida es igual a la energía sonora incidente (original).

- **Difusión.** Si la superficie donde se produce la reflexión presenta alguna rugosidad, la onda reflejada no solo sigue una dirección, sino que se descompone en múltiples ondas
- **Refracción.** Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando el sonido pasa de un medio a otro diferente. La refracción se debe a que, al cambiar de medio, cambia la velocidad de propagación del sonido.
- **Difracción.** Se llama difracción al fenómeno que ocurre cuando una onda acústica se encuentran un obstáculo de dimensiones menores a su longitud de onda ( $\lambda$ ), esta es capaz de rodearlo atravesándolo. Otra forma de difracción es la capacidad de las ondas de pasar por orificios cambiando su divergencia a esférica con foco en el centro de éstos (Aguirre, 2013).

Ahora bien, en este trabajo se pretende utilizar una placa metálica como barrera acústica, es importante mencionar cual es la diferencia entre aislamiento y absorción acústica, y dejar claro bajo qué condiciones es efectiva como supresora de ruido.

**Aislar**, consiste en aplicar medidas encaminadas a la disminución de la energía transmitida, en este caso se miden las pérdidas de energía o pérdidas por transmisión (TL) que tiene una barrera acústica.

**Absorber**, todos los materiales absorben parte de la energía que contiene la onda sonora que sobre ellos inciden en mayor o menor proporción, esta propiedad esta expresada por un factor de absorción o coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), el cual se define como la relación de la energía acústica absorbida con respecto de la energía acústica incidente (Michel Moser, 2004).

Una pared dura y lisa, poseerá un coeficiente de absorción cercano a cero, dado que será muy reflexiva, mientras que un material poroso y blando poseerá un coeficiente de absorción cercano a la unidad.

Por lo tanto, para una placa metálica, se aprovecha principalmente la propiedad de aislamiento acústico debido a que es un material rígido, como podemos observar en la Figura 1.4, y las pérdidas por transmisión se evalúan mediante la ley que gobierna el aislamiento acústico, también conocida como Ley de masas o de Berg (Flores, 2003).

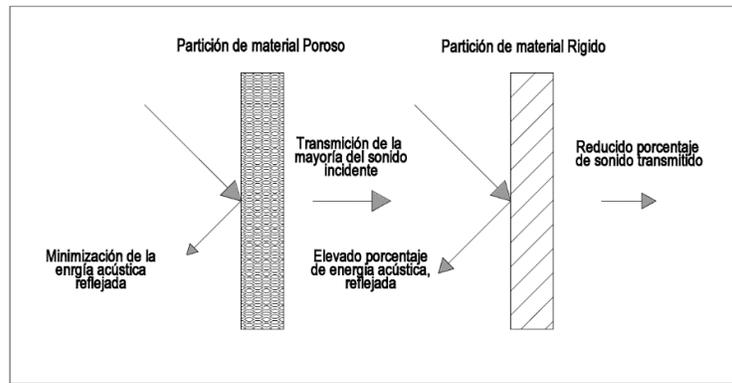


Figura 1.4- Comportamiento acústico de un material poroso y un material aislante

Los resonadores acústicos por ejemplo aprovechan la propiedad la absorción de energía, y clasifican también como silenciadores acústicos, pues son selectivos en el rango de frecuencias que absorben, como se puede observar en la figura 1.5. Las gráficas de absorción de los resonadores tienen “picos”, estos representan frecuencias características que son absorbidas, esto se debe a que poseen cavidades como el resonador Helmholtz, o en el caso de los resonadores de membrana, existe un hueco entre una pared rígida, generalmente de concreto y una placa flexible, la pérdida de energía se genera al transformar energía acústica en calor, mediante la flexión de la membrana.

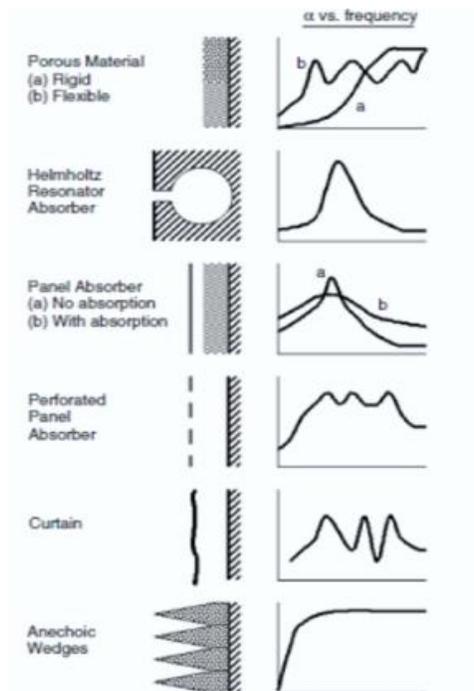


Figura 1.5 Comportamiento de elementos absorbentes (Fernandez, 2011)

Muchas de las barreras acústicas aprovechan la propiedad de la absorción, y muchas otras aprovechan el aislamiento acústico, como las paredes de hormigón o concreto. Aunque cabe destacar que este tipo de materiales tienen frecuencias críticas muy bajas, frecuencias a las que el aislamiento acústico es nulo, sin embargo una placa metálica tiene frecuencias críticas superiores, esto se atribuye al hecho de que las ondas sonoras transmiten energía en forma de ondas de flexión y el acero tiene un módulo de elasticidad mayor, además en frecuencias críticas el amortiguamiento interno juega un papel importante, pues de este depende la capacidad del material de absorber energía de vibración.

#### **1.4 Conclusión de la revisión bibliográfica**

La revisión de la literatura se hizo en tres áreas, la primera se enfocó en buscar un método para calcular frecuencias naturales y modos de vibración en placas rectangulares que incluyeran deformaciones volumétricas, sin embargo, no se encontró ninguna investigación al respecto. Por otro lado, fue de importancia para encontrar un método sencillo y práctico para validar los modelos de placas lisas que se incluyen en este trabajo.

La segunda parte está dirigida hacia los procesos de conformado de chapa metálica, se buscó un método de aplicación de refuerzos y se definieron las consideraciones importantes para la forma del refuerzo y las relaciones para dimensionar herramientas de acuerdo al espesor de la placa.

Finalmente, se establecen las características una barrera acústica y se definieron las dimensiones y la propiedad de aislamiento acústico que se aprovecha al utilizar un material sólido. En Resumen, para una placa metálica de grandes dimensiones, las primeras frecuencias naturales están en el rango de las bajas frecuencias, esto se debe a que la rigidez de la placa es baja, al colocar refuerzos estampados se incrementa la rigidez de la misma, y de acuerdo con la Ley de masas, existen tres zonas que influyen en el aislamiento acústico, la primera zona está controlada por la rigidez del sistema, la segunda por la masa y la tercera por el amortiguamiento interno del material, en este trabajo el principal aporte se encuentra en la primera zona, correspondiente a la rigidez, al poder modificar la rigidez de la placa, se logran alejar las frecuencias naturales y al no coincidir con las frecuencias de excitación del medio se tiene un aislamiento acústico, las otras dos zonas aprovechan las propiedades de masa y de amortiguamiento interno de la placa.

### **1.5 Objetivo**

Evaluar el efecto de refuerzos estampados en elementos laminados, obteniendo sus formas modales y frecuencias naturales a través de modelos numéricos basados en elementos finitos, así como modelar una barrera acústica que sea efectiva para mitigar ruido a bajas, medias y altas frecuencias, esto utilizando calibres de lámina comerciales y respetando los tamaños factibles de manufactura.

### **1.6 Alcances y aportaciones**

- Establecer dimensiones de las placas en base a perfiles comerciales y a las dimensiones de barreras acústicas.
- Definir rangos de contaminación auditiva nocivos y las frecuencias que los caracterizan.
- Establecer profundidades y formas para la embutición de acuerdo con su factibilidad de manufactura analizar distintas configuraciones de embutido y establecer las adecuadas de acuerdo a las condiciones de frontera y dimensiones de la placa.
- Recomendaciones de la aplicación de refuerzos estampados.

### **1.7 Limitaciones**

- No se considera el efecto del endurecimiento por deformación durante el análisis modal.
- Se utiliza el método de elementos finitos para el análisis exclusivamente numérico.
- El análisis acústico queda limitado únicamente a pérdidas por transmisión de una partición real.

### **1.8 Justificación**

Actualmente existe una gran brecha para estudiar el efecto dinámico que tienen los refuerzos estampados en placas laminadas, por lo tanto, en este trabajo se plantean recomendaciones de lugar y forma de aplicación de refuerzos embutidos y al mismo tiempo se propone una configuración para su utilización como barrera acústica, pues

actualmente el ruido en las grandes ciudades es un problema que afecta a la población mundial.

## **1.9 Estructura del documento**

Esta tesis está conformada por siete capítulos a continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

**Capítulo 1, Antecedentes:** Se revisan las teorías utilizadas para el análisis de vibración en placas y los métodos que se utilizan para modificar sus modos de vibración y frecuencias naturales, también se exploran las técnicas de estampado en chapa metálica. Por otro lado, se reconocen la tipología de barreras acústicas, sus características y se definen los conceptos de absorción y aislamiento acústico, también se muestran los objetivos, alcances y limitaciones del trabajo.

**Capítulo 2, Marco teórico:** En este capítulo se muestran las teorías y leyes que se utilizaron, empezando con conceptos básicos de vibración, análisis modal y un método para la obtención de frecuencias en placas rectangulares, por otro lado, se detallan los fundamentos para el proceso de estampado y finalmente se describen los fundamentos de acústica, fuentes de ruido y la Ley que rige el aislamiento acústico

**Capítulo 3, Metodología:** En este capítulo se presentan las características de los modelos utilizados, así como las condiciones de frontera, forma de los refuerzos en base a las ecuaciones teóricas ya definidas en el capítulo 2, también se muestra la metodología del análisis numérico y los parámetros que se tomaron en cuenta para el cálculo de tablas de reducción de longitud.

**Capítulo 4, Resultados:** En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis numérico, la convergencia de malla y la simulación del proceso de embutido que se realizó para verificar que no existiera adelgazamiento excesivo en los refuerzos aplicados. Se muestra también la comprobación del modelo, mediante el método Warburton y el modelado numérico, además se muestran las tablas de reducción de longitud y colocación de refuerzos, así como las gráficas resultantes del análisis de placas con refuerzos variados y refuerzos horizontales.

**Capítulo 5, Análisis de resultados:** Se hace el análisis de los resultados obtenidos, también se muestra el efecto que tienen los refuerzos sobre los modos de vibración y se describe que parámetros sirvieron para determinar las configuraciones que más alejaron las frecuencias naturales, además de observaciones importantes que se obtuvieron en el capítulo 4 de resultados.

**Capítulo 6, Caso de estudio:** Se realiza el análisis teórico de aislamiento acústico de la placa calibre 16 y se proponen nuevas configuraciones donde se cambia el espesor de la placa, hasta llegar a un caso donde la placa sea efectiva en la reducción de ruido para altas y bajas frecuencias.

**Capítulo 7, Conclusiones y recomendaciones:** En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis numérico, y las recomendaciones de para la colocación de refuerzos. Así como se proponen trabajos futuros.

---

## CAPÍTULO 2

---

### MARCO TEÓRICO

*Se definen los fundamentos teóricos que se utilizaron en este trabajo, empezando con conceptos básicos de vibración, análisis modal y un método para la obtención de frecuencias en placas rectangulares, por otro lado, se detallan los fundamentos para el proceso de estampado y finalmente se describen los fundamentos de acústica, fuentes de ruido y la Ley que rige el aislamiento acústico.*

#### **2.1 Teoría de placas**

Como se mencionó en el capítulo 1 de antecedentes, para poder obtener los modos de vibración y frecuencias naturales de una placa es necesario revisar la teoría clásica de placas, pues en esta se formula la ecuación diferencial de flexión en placas, esta representa cómo se deforma una placa o lamina bajo flexión y relaciona los desplazamientos con las deformaciones, posteriormente se puede resolver la ecuación mediante un método energético directo como el de Ritz, que aproxima una solución de acuerdo a las condiciones de frontera de la placa, al igual que en el análisis modal se pueden obtener los autovalores y autovectores del sistema, solo que de manera más sencilla.

Para placas delgadas se consideran las siguientes hipótesis (Leissa, 1969):

- No hay deformación en el plano medio de la placa puesto que este permanece neutro durante la flexión
- Se desprecian los esfuerzos cortantes en la deformación de la placa.
- Las tensiones normales en la dirección transversal de la placa son despreciables.

#### **2.1.1 Ecuación diferencial de flexión en placas**

De acuerdo con Timoshenko (1959), se empieza planteando el equilibrio en un elemento diferencial de la placa, de dimensiones  $dx$ ,  $dy$ , sometido a un estado de fuerzas generalizado

$p(x, y)$  en la figura 2.0 se respresentan los momentos internos flectores ( $M_x, M_y$ ) y de torsión( $M_{xy}$ ),, así como los esfuerzos cortantes( $T_x, T_y$ ).

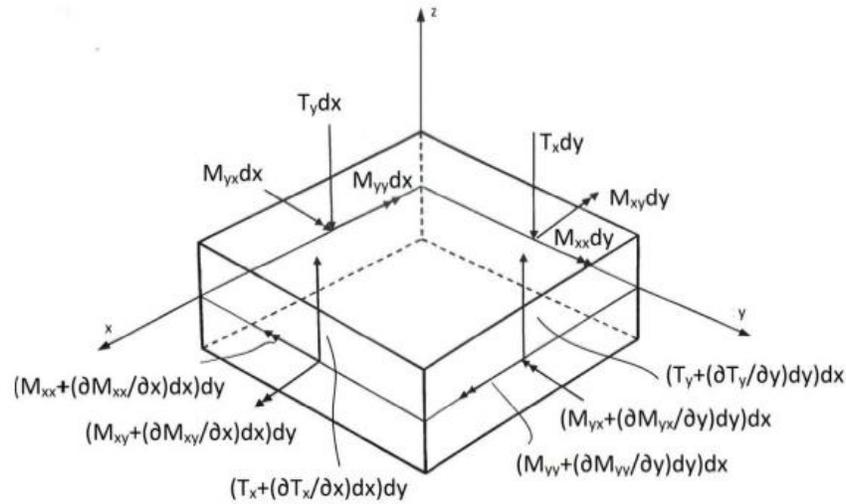


Figura 2.0-Diagrama de fuerza y momentos de un elemento de dimensiones  $dx, dy$

El equilibrio de momentos alrededor de la línea  $y = \frac{dy}{2}$ , es:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx dy + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} dx dy + T_y dx dy + \frac{\partial T_y}{\partial y} dx dy \frac{1}{2} dy \quad [2.0]$$

Despreciando el término  $\frac{\partial T_y}{\partial y} dx dy \frac{1}{2} dy$ , de acuerdo con las hipótesis de placas, y dividiendo la ecuación  $dx dy$ , se tiene:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + T_y = 0 \quad [2.1]$$

De manera similar, la suma de momento alrededor de la línea  $x = \frac{dx}{2}$ , es:

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} + T_x = 0 \quad [2.2]$$

Si se suman todas las fuerzas resultantes en la dirección  $z$ , también se asume que hay una fuerza de excitación externa de forma  $p(x, y)$  y se añade a la ecuación de equilibrio de la siguiente forma.

$$p dx dy - T_x dy + (T_x + \frac{\partial T_x}{\partial x} dx) dy - T_y dx + (T_y + \frac{\partial T_y}{\partial y} dy) dx = 0 \quad [2.3]$$

Dividiendo entre  $dx dy$  se tiene:

$$p + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad [2.4]$$

Sustituyendo la ecuación [2.2] y [2.3] en [2.4], resulta:

$$p = \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} \quad [2.5]$$

Los momentos internos de flexión y de torsión que aparecen en la ecuación [2.5], se relacionan con las tensiones a las que está sometida la placa de la siguiente forma (Timoshenko, 1959):

$$M_{xx} - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dz \quad M_{yy} - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z dz \quad M_{xy} - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz \quad [2.6]$$

Siendo  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  las tensiones en dirección x, y, respectivamente y  $\tau_{xy}$ , la tensión tangencial.

La tensión en una dirección puede relacionarse con la deformación provocada en la misma dirección mediante la ley de Hooke, suponiendo materiales elásticos y lineales (París Carballo, 2005),

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} \quad [2.7]$$

Con  $\varepsilon_i$  la deformación en la dirección i y  $E_i$  el módulo de Young en la dirección i.

La ley de Hooke, está asociada a estados uniaxiales de tensión por lo que se puede asumir precisa para estados bidimensionales. La tensión  $\sigma_i$  produce alargamiento en la dirección i, pero también acortamiento en la dirección perpendicular. Por lo tanto, el valor total de la deformación en la dirección x, vendrá expresado por:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_x \frac{\sigma_y}{E_x} \quad [2.8]$$

Siendo  $\nu_y$ , el coeficiente de Poisson en la dirección y.

Esto puede expresarse en términos de la dirección y de la siguiente manera:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_x \frac{\sigma_x}{E_y} \quad [2.9]$$

Despejando de las ecuaciones [2.8] y [2.9], los valores de las tensiones  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  se obtiene:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_x}{1 - \nu_x \nu_y} (\varepsilon_x + \nu_y \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E_y}{1 - \nu_x \nu_y} (\varepsilon_y + \nu_x \varepsilon_x) \end{aligned} \quad [2.10]$$

De manera similar se relaciona la tensión tangencial  $\tau_{xy}$ , con la deformación tangencial  $\gamma_{xy}$ :

$$\tau_{xy} = G_{xy} * \gamma_{xy} \quad [2.11]$$

Siendo  $G_{xy}$ , el módulo de elasticidad tangencial o módulo de cizalladura, y definiéndose como sigue:

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + (1 + 2\nu_{xy}) E_y} \quad [2.12]$$

Por último, se relacionan la deformaciones normales y tangenciales con los desplazamientos del plano medio de la placa. Dicha relación se puede expresar según la teoría de la elasticidad plana como:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad [2.13]$$

Si se considera ahora un elemento de la placa sometida a una carga vertical externa, los ángulos de rotación de este son:

$$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial x} \theta_y = \frac{\partial w}{\partial y} \quad [2.14]$$

Los desplazamientos horizontales a una distancia  $z$  del medio de la placa se expresan:

$$u = -z\theta_x = -z \frac{\partial w}{\partial x} \quad v = -z\theta_y = -z \frac{\partial w}{\partial y} \quad [2.15]$$

Sustituyendo la ecuación [2.15] en [2.10] y [2.11] y posteriormente, en [2.6], se obtienen las expresiones de los momentos internos de flexión y de torsión en función de la deflexión de la placa.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_x z}{1 - \nu_x \nu_y} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{E_y z}{1 - \nu_x \nu_y} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= -2G_{xy} z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{aligned} M_{xx} &= \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_{yy} &= \frac{E_y h^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} &= \frac{G_{xy} h^3}{6} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right. \quad [2.16]$$

Siendo h el espesor de la placa.

Se definen ahora las rigideces a flexión  $D_x$  y  $D_y$  y la torsión  $D_t$  como:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad D_t = \frac{G_{xy} h^3}{12} \quad [2.17]$$

Por lo tanto, los momentos internos a flexión y a torsión de la ecuación [2.16], se pueden escribir como:

$$M_{xx} = D_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

[2.18]

$$M_{yy} = D_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$M_{xy} = 2D_t \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Sustituyendo estas expresiones [2.18], en la ecuación [2.15], queda:

$$D_x \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \nu_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + 2 \left( 2D_t \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + y \left( \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \nu_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) = p(x, y) \quad [2.19]$$

Agrupando términos:

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (D_x \nu_y + 4D_t + D_y \nu_x) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) \quad [2.20]$$

E introduciendo la notación:

$$2D_{xy} = D_x \nu_y + 4D_t + D_y \nu_x \quad [2.21]$$

La ecuación [2.21] queda finalmente:

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_{xy} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) \quad [2.22]$$

La ecuación [2.22] es la ecuación diferencial de una placa ortótropa. Esta expresión se puede particularizar para una placa isótropa. Las características de una placa isótropa son:

- Las rigideces a flexión y a torsión son iguales en ambas direcciones:  $D = D_x = D_y = D_{xy}$ .
- Los módulos de Poisson son iguales en ambas direcciones:  $\nu = \nu_x = \nu_y$
- El módulo de cizalladura queda entonces:  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Entonces, la ecuación diferencial de flexión de una placa isótropa es:

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = p(x, y) \quad [2.23]$$

### **2.1.2 Solución a la ecuación diferencia de flexión de una placa isótropa**

En general hay tres métodos analíticos para resolver la ecuación diferencial de la placa (Pedersen, 2002):

- Método de Navier
- Método de Levy
- Método de Ritz

Para resolver la ecuación es necesario especificar primero las condiciones de frontera de la placa. El método de Levy utiliza series simples y expresa la solución de la ecuación de la placa como una suma de una solución particular más una homogénea. Otro método clásico, el de Navier, consiste en usar series trigonométricas dobles. El método de Ritz, es un método energético, también usa este tipo de series para la resolución de la ecuación diferencial. La diferencia con el de Navier es que este método se basa en la ley de conservación de la energía de sistemas conservativos que se encuentran en una configuración de equilibrio, por lo que se exige que la suma total de los trabajos internos sea igual y de signo contrario a la suma de los trabajos externos.

Sin embargo, el método más práctico para la obtención de frecuencias es el de Ritz, por lo tanto, en este trabajo se mencionan la estructura del método y posteriormente se aplica una variante de este desarrollado por Warburton (1974), pues resulta práctico para la obtención de frecuencias naturales en placas rectangulares.

### **2.1.3 Método Rayleigh Ritz**

Los métodos energéticos son los más generales en cuanto a condiciones de contorno, pues pueden aplicarse a cualquier caso, El método Rayleigh Ritz, o método Ritz, llamado así porque Walter Ritz retomó los trabajos propuestos por Lord Rayleigh, optimizando el método, está basado en el principio de la conservación de la energía, el cual requiere que el trabajo interno total sea igual y opuesto al trabajo externo (H. Felix, 2004):

$$J(W) = U_{max}(w) - T_{max}(w) \quad [2.24]$$

Donde  $W$  representa las amplitudes de deflexión en la dirección  $z$  (espesor): de la placa;  $U_{max}(w)$ , es la expresión de la energía potencial elástica acumulada durante la deformación y  $T_{max}(w)$ , es la energía cinética de la placa que vibra transversalmente.

$$\begin{aligned}
 U_{max} &= \frac{1}{2} \iint \left[ D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left( \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dx dy \\
 &= \frac{1}{2} \iint D \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy
 \end{aligned}$$

[2.25]

La máxima energía cinética de la placa que vibra transversalmente es:

$$T_{max} = - \left[ \iint (p_x u + p_y v + p_z w) + \sum_i P_i \Delta_i + \sum_i M_i \Theta_i \right] \quad [2.26]$$

Donde  $p_x, p_y,$  y  $p_z$ , representan las cargas uniformemente distribuidas,  $P_i$  las cargas concentradas y  $M_i$ , Los momentos. Las amplitudes de vibración se denotan por  $u + v + w, \Delta, \Theta$ , correspondiendo los primeros tres a las amplitudes y los dos últimos a rotaciones.

## 2.2 Vibración en placas rectangulares, método Warburton

Un método que resulta práctico para el cálculo de frecuencias naturales en placas rectangulares es el de Warburton (1974), pues utiliza el método de Raleigh Ritz, agregando que es efectivo para placas isotrópicas como ortótropas.

Dado que la placa isotrópica es un caso particular de la placa ortótropa, se parte del análisis de una placa ortótropa y luego se define la ecuación para placas isotrópicas.

Para esto se considera que la placa se encuentra en plano x-y y está restringida por  $x=0$  y  $Y=0$ , además de que es de un espesor uniforme “h”, de material ortótropa rectangular con los ejes de simetría del material ortogonal a los bordes de la placa, la deflexión “w”, se consideran pequeña en comparación con la longitud de onda de la vibración de flexión. Las fuerzas de tensión en el plano  $N_x$  y  $N_y$ , (fuerzas de tensión positivas) en el plano medio y la fuerza por cortante  $N_{xy}$  se asumen son iguales a cero.

Para vibración libre, el desplazamiento  $w = W(x, y) \sin \omega t$  donde  $\omega$  es la frecuencia natural en radianes, y W es la máxima deflexión de la placa con respecto al tiempo. La máxima energía potencial acumulada durante la deformación:

$$U_{max} = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ D_x \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + 2v_{xy} D_y \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + D_y \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + 4D_{xy} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 + N_x \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + N_y \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right\} d_y d_x \quad [2.27]$$

Donde las constantes de rigideces de la placa ortótropa son:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - v_{xy}v_{yx})}, \quad D_y = \frac{D_x E_y}{E_x} \quad y \quad D_{xy} = \frac{G_{xy} h^3}{12}$$

Donde  $E_x$  y  $E_y$  son el módulo de Young,  $G$  es el módulo de elasticidad transversal, y  $v_{xy}v_{yx}$  el coeficiente de Poisson. La energía cinética máxima de la placa que vibra transversalmente es de acuerdo a las expresiones simplificadas de Warburton es:

$$T_{max} = \frac{\rho h \omega^2}{2} \int_0^a \int_0^b w^2 d_y d_x \quad [2.28]$$

Usando la siguiente relación  $H = v_{xy}D_y + 2D_{xy}$ , se sustituye en la ecuación [2.27] y se asume la siguiente función como:  $W(x, y) = \theta(x)\varphi(y)$  una constante, donde  $\theta(x)$  y  $\varphi(y)$  son funciones características de un elemento viga que satisfacen las funciones de contorno establecidas: “ $x=0, a$ ” y “ $y=0, b$ ” respectivamente, e igualando las ecuaciones de energía de acuerdo con el método Rayleigh:

$$\frac{\rho h \omega^2}{H} = \int_0^a \int_0^b \left[ \frac{D_x}{H} (\theta'' \varphi)^2 + 2\theta \theta'' + 4 \frac{D_{xy}}{H} \{ (\theta' \varphi')^2 - \theta \theta'' \varphi \varphi'' \} + \frac{D_y}{H} (\theta \varphi'')^2 + \frac{N_x}{H} (\theta' \varphi)^2 + \frac{N_y}{H} (\theta \varphi')^2 \right] d_y d_x / \int_0^a \int_0^b (\theta \varphi)^2 d_y d_x \quad [2.29]$$

Y utilizando las tablas de funciones características de vigas de (Felgar, 1950) se tiene para placas ortótropas, la frecuencia expresada como:

$$\omega_{ortho}^2 = \frac{\rho h \omega^2 a^2 b^2}{\pi^4 H} = \frac{D_x}{H} G_x^4 \frac{b^2}{a^2} + \frac{D_y}{H} G_y^4 \frac{b^2}{a^2} + 2 \left[ H_x H_y + 2 \frac{D_{xy}}{H} (J_x J_y - H_x H_y) \right] + \frac{N_x b^2}{\pi^2 H} J_x + \frac{N_y a^2}{\pi^2 H} J_y \quad [2.30]$$

Donde los coeficientes  $G_x, G_y, H_x, H_y, J_x$  y  $J_y$  están dados en la siguiente tabla:

Boundary conditions on $\alpha = 0$ , $\alpha = a$ or $b$	$m$	$G_x$	$H_x$	$J_x$
Clamped-clamped	2	1.506	1.248	1.248
	3, 4, 5, ...	$m - \frac{1}{2}$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 - \frac{2}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 - \frac{2}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$
Clamped-simply supported	2, 3, 4, ...	$m - \frac{3}{4}$	$(m - \frac{3}{4})^2 \left[ 1 - \frac{1}{(m - \frac{3}{4})\pi} \right]$	$(m - \frac{3}{4})^2 \left[ 1 - \frac{1}{(m - \frac{3}{4})\pi} \right]$
Clamped-free	1	0.597	-0.0870	0.471
	2	1.494	1.347	3.284
	3, 4, 5, ...	$m - \frac{1}{2}$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 - \frac{2}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 + \frac{2}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$
Simply supported-simply supported	2, 3, 4, ...	$m - 1$	$(m - 1)^2$	$(m - 1)^2$
	1	0	0	$3/\pi^2$
Simply supported-free	2, 3, 4, ...	$m - \frac{3}{4}$	$(m - \frac{3}{4})^2 \left[ 1 - \frac{1}{(m - \frac{3}{4})\pi} \right]$	$(m - \frac{3}{4})^2 \left[ 1 + \frac{3}{(m - \frac{3}{4})\pi} \right]$
Free-free	0	0	0	0
	1	0	0	$12/\pi^2$
	2	1.506	1.248	5.017
	3, 4, 5, ...	$m - \frac{1}{2}$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 - \frac{2}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$	$(m - \frac{1}{2})^2 \left[ 1 + \frac{6}{(m - \frac{1}{2})\pi} \right]$

Tabla 2.0- Coeficientes para cálculo de frecuencias naturales (warburton, 1974).

para ecuaciones [2.30], [2.31], donde  $\alpha$  toma valores aproximados de X o Y, y m es el número de líneas nodales, incluyendo las adyacentes a las restricciones de la placa, perpendicular a la dirección de  $\alpha$ . Finalmente, a partir de la ecuación [2.59] para placas ortótropas se deduce la siguiente ecuación para placas isotrópicas:

$$\omega_{iso}^2 = \frac{\rho h w^2 a^4}{\pi^4 D} = G_x^4 + G_y^4 \frac{a^2}{b^2} + 2 \frac{a^2}{b^2} [v H_x H_y + (1 - v) J_x J_y] + \frac{N_x a^2}{\pi^2 D} J_x + \frac{N_y a^4}{\pi^2 D b^2} J_y$$

[2.31]

Donde los dos últimos términos  $N_x, N_y$  se consideran cuando se tienen cargas perpendiculares (efectos de pandeo), no se consideran para el análisis de frecuencias naturales.

### 2.3 Método de elemento finito

Una gran cantidad de problemas en la ingeniería pueden resolverse mediante ecuaciones algebraicas ya sean; diferenciales o integrales, Sin embargo, muchos otros no pueden ser

resueltos debido a la complejidad de las geometrías que se utilizan, tal es el caso de los modelos con refuerzos estampados que se plantean en este trabajo.

La idea general del método de los elementos finitos (MEF) es la división de una línea, una superficie o un volumen continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del objeto de estudio regirán también el de cada uno de los elementos. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad a un sistema discreto con un número de grados de libertad finito.

El dominio, que se define como el espacio geométrico que se va a analizar, se discretiza en elementos. Estos elementos pueden ser puntos si el dominio es lineal, líneas si es bidimensional, y superficies si es tridimensional. Con esto se consigue que el dominio se aproxime mediante un conjunto de porciones en el que se divide.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí dichos elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo.

Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas interpolan el valor de la variable nodal dentro del elemento.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (matrices de rigidez, amortiguamiento y masa), se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas que, resolviéndolas, proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

Por otra parte, el análisis del MEF debe ser convergente, es decir, que al disminuir el tamaño de los elementos y, por tanto, aumentar el número de nodos y de elementos, la solución obtenida debe tender a la solución exacta. Las funciones de interpolación elegidas para

representar el estado de deformación de un medio continuo deben satisfacer una serie de condiciones para que se cumpla la convergencia (CeligietaLizarza, 2011).

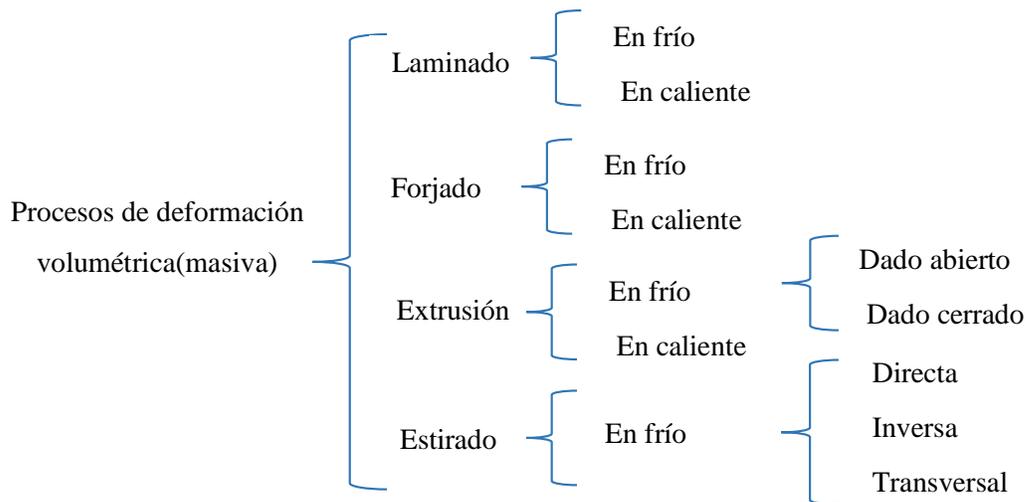
## **2.4 Procesos de conformación por deformación plástica**

Se denominan procesos de conformación por deformación plástica (PCDP), a aquellos procedimientos de obtención de componentes mecánicos que aprovechan el comportamiento plástico de los materiales, es decir, la posibilidad de cambiar la forma o dimensiones de los materiales, esto se logra aplicando esfuerzos exteriores suficientemente grandes para deformar el material (Rodríguez, 2011).

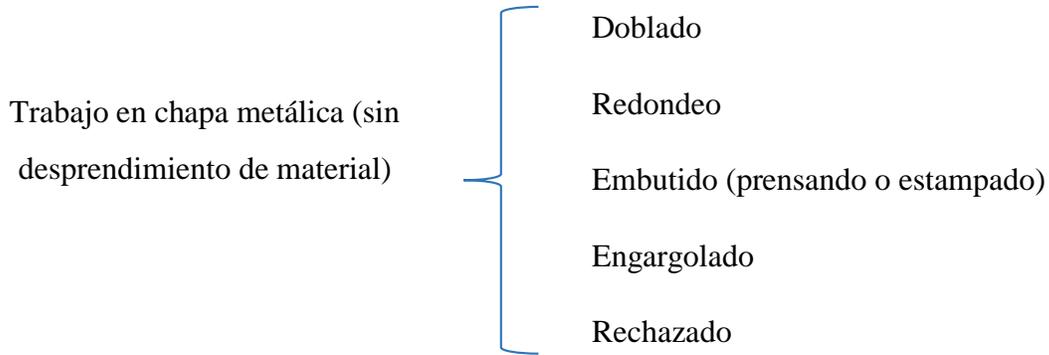
Dentro de una clasificación global los procesos de conformación por deformación plástica se pueden enmarcar en el conjunto denominado; procesos de conformado sin eliminación de material, ya que durante su ejecución las pérdidas de material del producto obtenido son prácticamente nulas con respecto al elemento de partida.

### **2.4.1 Clasificación de los procesos de conformado**

Existe una gran cantidad de procesos de conformado, pero principalmente se parte de la materia prima con la que se inicia, o si se trabajan en frío o en caliente, en este trabajo es de interés principalmente el trabajo en frío, se pueden clasificar como procesos primarios:



En los procesos secundarios se encuentran los trabajos de acabado principalmente. Ahora bien, los procesos secundarios de conformado que involucran el trabajo con chapa metálica (sin desprendimiento de material) son los siguientes:



En este trabajo es de principal interés el proceso de embutido o embutición, más específicamente el embutido superficial, donde el adelgazamiento en las paredes del material es prácticamente nulo.

## 2.5 Embutido

El proceso de embutido es una operación que tiene como principio la deformación plástica de lámina metálica y se emplea para hacer piezas de geometría acopada, de caja y de una gran variedad de formas huecas. El embutido se realiza colocando una lámina de metal aprisionada por un sujetador y un dado empujando el metal hacia la cavidad inferior de éste, con la presión ejercida por un punzón. En la práctica existen dos posibles métodos para llevar a cabo este proceso: el embutido libre y el embutido con sujetador (Groover M. , 2007).

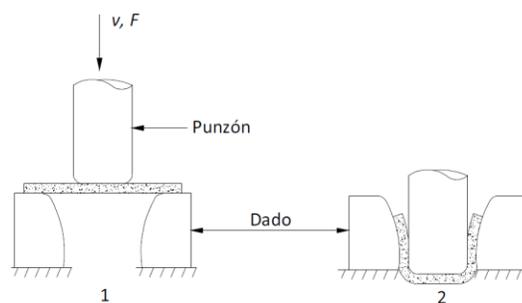


Figura 2.1 -Forma libre de Embutido 1- Antes de conformar 2- Pieza conformada (Groover M. , 2007)

El proceso de embutido se puede de la siguiente manera:

Se parte de un material plano ya sea un disco o una placa cuadrada o rectangular, para este ejemplo se utiliza un disco de diámetro  $D_b$  dentro de la cavidad de un dado de diámetro  $D_d$ , tanto el punzón como el dado están redondeados en las esquinas ( $R_p$  y  $R_d$ ) esto evita la concentración de esfuerzos en la zona de contacto, en el caso de tener esquinas agudas ( $R_p$  y  $R_d=0$ ) se ocasionaría la ruptura del material generando un proceso de troquelado, es decir la pieza fallaría por cortante y se ocasionaría el desprendimiento de material. Es importante señalar que las periferias del punzón y del dado deben estar espaciadas por un claro “c”, El claro punzón-dado debe ser aproximadamente 10% mayor que el espesor de la placa a embutir.

El punzón presiona con fuerza  $F$  hacia la dirección de embutido con el fin de deformar el material y el sujetador a su vez ejerce una fuerza de sujeción  $F_h$  en la misma dirección. En cada instante el material comienza a deformarse plásticamente mediante una serie compleja de dobleces y desdoblases, los esfuerzos en el material son severos y es difícil cuantificarlos de una forma discreta o puntual.

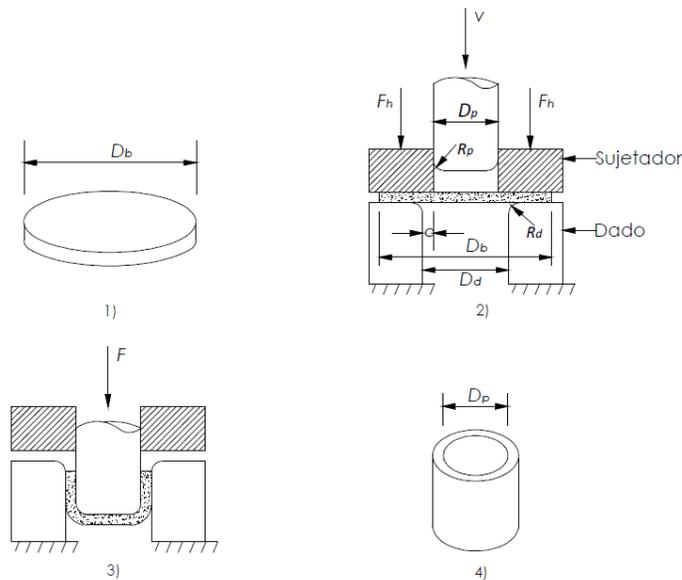


Figura 2.2 -Mecánica básica del embutido. 1) Se parte de un disco de diámetro conocido, 2) Configuración típica del proceso, 3) Deformación del disco, 4) Geometría final (Groover M. P., 1997).

Para obtener la mayor profundidad en un solo proceso del embutido, el radio del hombro del punzón  $r_p$  debe de ser 4 a 6 veces mayor al espesor de la lámina. Sin embargo, si el valor de

$r_p$  es demasiado grande, se incrementa el área de la lámina y queda fuera del área del pisador, lo cual puede considerar arrugas con mayor facilidad. Generalmente  $r_p$  se establece igual o menor al radio del hombro de la matriz  $r_d$  (Shimizu, 2010).

$$h \leq r_p \leq \frac{Db}{3} \quad [2.32]$$

### 2.5.1 Variables importantes del proceso de embutido

Existen variables que intervienen en el proceso de embutido, y son necesarios para obtener una buena confortabilidad.

La razón límite de embutido es una medida de la severidad del proceso y depende esencialmente de dos variables: el diámetro del disco a embutir y el diámetro del punzón. La relación límite de embutido (RLE) se define de la siguiente manera:

$$RLE = \frac{D_b}{D_p} \quad RLE \cong 2.0 \quad [2.33]$$

Donde:

$D_b$  = Diámetro del área que se desea embutir.

$D_p$  = Diámetro del punzón.

RLE = Relación límite de embutido.

La fuerza total de embutido se compone de las fuerzas requeridas en la sujeción de la pieza y de la fuerza necesaria que aplica el punzón para vencer la fricción entre la lámina y el pisador y para vencer la fricción alrededor del radio de embutido; de lo anterior se desprende que la relación límite de embutido no es precisamente una constante del material, sino una propiedad del proceso.

Se considera que un límite superior a la RLE es aproximadamente de 2.0, entre mayor sea este valor más severo se considera que es la operación. Los valores que imponen las verdaderas limitaciones al proceso dependen de la geometría del punzón y del dado, específicamente de sus radios,  $R_p$  y  $R_d$ , de la fricción entre los elementos, de la profundidad

de embutido y de las características de la lámina que se esté trabajando tales como la anisotropía y ductilidad.

Aparte de la RLE, existen otras maneras de caracterizar el proceso de embutido, entre las que figura la reducción (Re), cuyo valor debe ser menor de 0.5 siendo congruentes con el 2.0 máximo permitido para la RLE.

$$Re = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad Re < 0.5 \quad [2.34]$$

Dónde: Re=reducción

Otro indicador para el proceso de embutido se presenta con la relación de espesor al diámetro.

$$RED = \frac{h}{D_b} \quad RED > 1\% \quad [2.35]$$

Donde:

h=espesor de la lámina sin deformar

RED=reducción de espesor al diámetro.

Se recomienda que RED sea mayor al 1% debido a que se ha demostrado experimentalmente que una disminución de la RED aumenta la tendencia al arrugado. En condiciones donde los diseños excedan las relaciones expuestas se deberá embutir en más de un paso, siendo en algunos casos necesario un proceso de recocido entre cada embutición.

### **2.5.2 Fuerzas de embutido**

Dos fuerzas son fundamentales en el proceso de embutido, la primera es la fuerza del punzón y la segunda es la fuerza de sujeción.

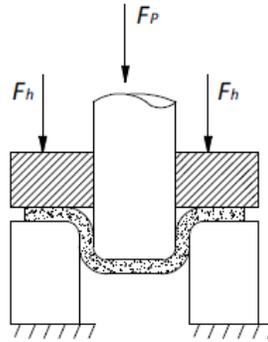


Figura 2.3- Fuerzas básicas que, involucradas en el embutido convencional, Donde  $F_p$  es la fuerza del punzón y  $F_h$  es la fuerza del pisador (Campos Vázquez, 2013).

La fuerza total de embutido puede expresarse como:

$$F_T = F_p + F_h \quad [2.36]$$

Donde:

$F_T$ =Fuerza total

$F_p$ = Fuerza del punzón

$F_h$ =Fuerza de sujeción

La fuerza que requiere el punzón para producir un embutido es la suma de la fuerza ideal de deformación, sin embargo, las fuerzas de fricción y la fuerza para producir un planchado si este se encuentra presente en la misma operación se ilustra en la figura 2.4, de manera que los componentes de la fuerza total del punzón varían con el movimiento del mismo (Campos Vázquez, 2013).

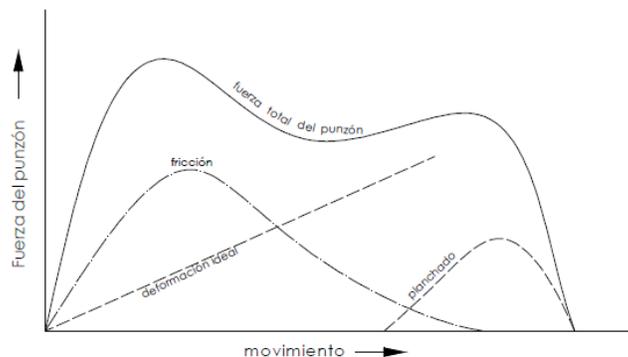


Figura 2.4- Fuerza del punzón contra el movimiento del punzón en un embutido profundo (Campos Vázquez, 2013)

Una medida del trabajo requerido en el embutido de una copa muestra que el 70% del trabajo se realiza en el embutido total radial, el 13% se consume en superar la fricción y el 17% restante se aplica en el doblado y doblado de la lámina en el dado.

De acuerdo con Groover (1977), una ecuación bastante empleada, marca como aproximada a la fuerza del punzón del embutido es:

$$F_{emb} = \sigma_{max} \pi t D_p \left( \frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad [2.37]$$

$F_{emb}$  = Fuerza de embutido

$h$  = Espesor inicial

$\sigma_{max}$  = Resistencia a la tracción

El término 0.7 se considera un factor de ajuste por fricción.

## 2.6 El sonido

El sonido es un fenómeno vibratorio que a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, bien sea gaseoso, líquido o sólido, se propaga, en ese medio, bajo la forma de una variación periódica de presión. Una perturbación producida en un punto de un medio elástico no queda localizada en ese punto, sino que se transmite a los puntos próximos y así sucesivamente (Ordoñez, 2014).

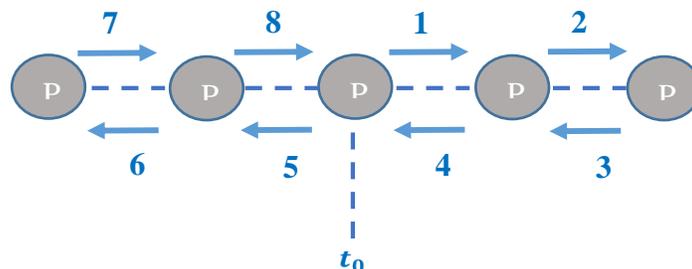
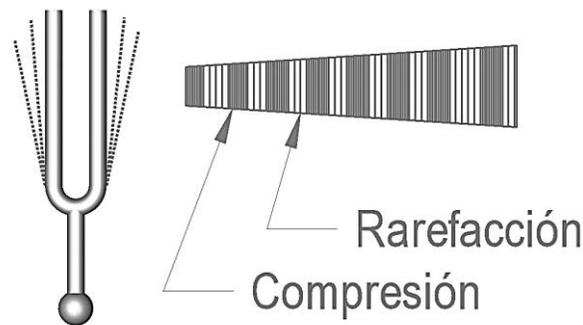


Figura 2.5-Vibración de una partícula "P" a partir de su posición de equilibrio en un tiempo inicial ( $t_0$ )

Físicamente en este proceso ocurren pequeñas variaciones de la presión en el medio. A estas pequeñas variaciones de presión, que se combinan con la presión estática ( $p_0$ ), se les denomina presión sonora  $p$ .

El pequeño desplazamiento oscilatorio que sufre las distintas moléculas de aire genera zonas en las que hay una mayor concentración de moléculas (mayor densidad) llamadas zonas de compresión y zonas en las que hay una menor concentración de moléculas (menor densidad) llamadas zonas de rarefacción, como se muestra en la figura 2.6.



*Figura 2.6-Zonas de compresión y rarefacción producidas por el movimiento ondulatorio de las moléculas de aire*

### **2.6.1 Representación gráfica del sonido**

El sonido puede ser graficado considerando la distancia recorrida por la partícula o por la variación de la presión producida:

- a) Distancia recorrida: la distancia recorrida por la partícula a un movimiento armónico simple (MAS) y se representa por una onda sinodal representada por:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad [2.38]$$

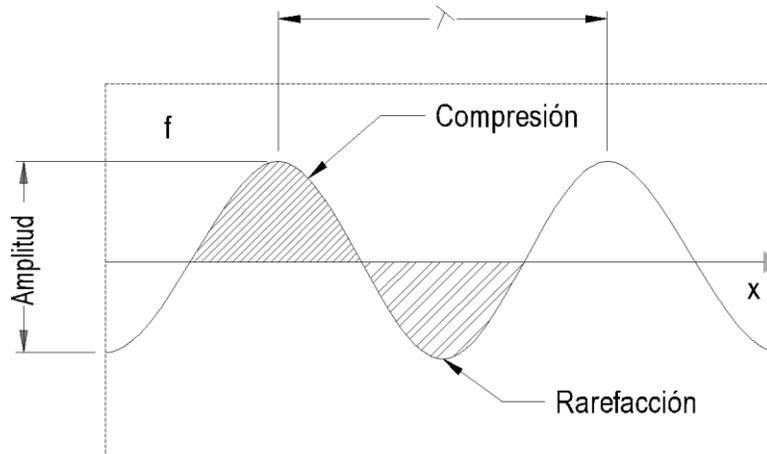


Figura 2.7 -Representación gráfica del sonido

Dónde:

$x$ = Distancia a la que se desplaza la masa respecto a su posición de equilibrio

$A$ = Máximo valor del desplazamiento, denominado amplitud

$\varphi$ = Ángulo de fase inicial del movimiento

$\omega_0=2\pi f$  es la pulsación o frecuencia angular propia de la oscilación

$t$ = tiempo en segundos

- b) Variación de la presión: La forma de onda de la variación de presión sonora que se propaga como onda periódica se presenta en la figura 2.8. Como se puede observar, se le denomina periódica porque se repite exactamente de una oscilación a la siguiente. La presión sonora resultante “p” varía por encima y por debajo de la presión estática de la atmosfera (105 Pa), de acuerdo con la relación (Krokstad, 1968).

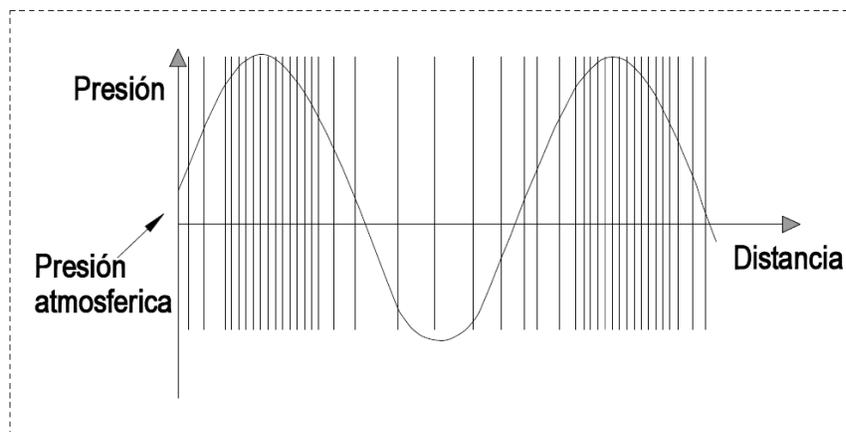


Figura 2.8-Representación de la variación de presión en una onda sonora

## 2.7 Magnitudes del sonido

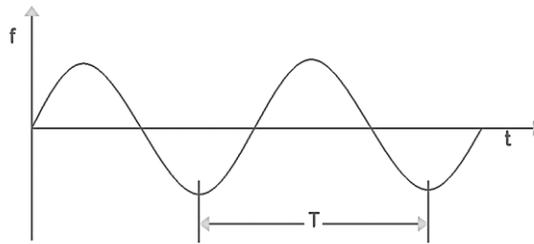
Las magnitudes fundamentales que describen el sonido son las siguientes:

### 2.7.1 Periodo y frecuencia

Este movimiento de compresión y rarefacción en las moléculas del aire produce un campo sonoro con una determinada distribución espacial, al que a cada instante de tiempo le corresponde una nueva presión instantánea.

El evento sonoro captado en un punto del espacio posee esencialmente dos características: volumen y tono. El volumen se relaciona con la magnitud física presión sonora  $p$ , y el tono con la frecuencia  $f$ . Esta última pertenece al número de periodos por unidad de tiempo y su unidad de medida es el Hertz (Hz), el tiempo transcurrido en un ciclo se conoce como periodo  $T$  (Urita, 2006).

$$f = \frac{1}{T} \quad [2.39]$$



*Figura 2.9- Representación gráfica de una oscilación*

Usualmente la frecuencia suele venir dada en términos de frecuencia angular. Para una frecuencia de vibración  $f$ , le corresponde una frecuencia angular  $w$ , dada por:

$$2\pi f = w \quad [2.40]$$

### 2.7.2 Amplitud

Es la cantidad de presión sonora que ejerce la vibración en el medio elástico; determina la cantidad de energía (potencia acústica) que contiene una señal sonora.

### 2.7.3 Longitud de onda

Indica el tamaño de la onda, es decir, la distancia que recorre un frente de onda en un periodo completo de oscilación. Se relaciona con la frecuencia, periodo y la velocidad del sonido mediante las siguientes expresiones (Michel Moser, 2004).

$$\lambda = c_{medio} * T \quad [2.41]$$

Donde  $c$ ; es la velocidad de propagación de la onda en un medio elástico y  $T$ ; el periodo.

### 2.7.4 Velocidad de propagación del sonido ( $c_{medio}$ )

Es la velocidad a la que viajan las ondas sonoras en un medio elástico. En el caso del sonido en el aire depende de las condiciones ambientales y fundamentalmente del medio donde se propague, llamado campo acústico. En general, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y en los líquidos es mayor que en los gases (Ordoñez, 2014).

En la velocidad de sonido se aprecian las siguientes características:

- La velocidad del sonido depende del medio de propagación (de su masa y la elasticidad).
- No depende de las características de la onda, o sea, es independiente de la intensidad que tenga [dB] y de la frecuencia [Hz].
- En el caso de un gas (como el aire) es directamente proporcional a su temperatura específica y a su presión estática e inversamente proporcional a su densidad. Dado que, si varía la presión, varía también la densidad del gas, la velocidad de propagación permanece constante ante los cambios de presión o densidad del medio.
- Se representa por la letra “ $c_{medio}$ ” y se mide en [m/s]

VELOCIDAD EN LOS SÓLIDOS	VELOCIDAD EN LOS LÍQUIDOS	VELOCIDAD EN LOS GASES
$c_g = \sqrt{\frac{E}{d}}$	$c_g = \sqrt{\frac{Q}{d}}$	$c_g = \sqrt{\frac{\gamma * P_0}{\rho}}$ $c_g = \sqrt{\frac{\gamma * R * T}{M}}$
<p><b>E</b> = módulo de Young o elasticidad de volumen. Unidad: [N/m<sup>2</sup>] = [Pa].</p> <p><b>d</b> = densidad del sólido.</p>	<p><b>Q</b> = módulo de compresibilidad del líquido. Unidad: [N/m<sup>2</sup>] = [Pa].</p> <p><b>d</b> = densidad del líquido.</p>	<p><b>γ</b> = coeficiente adiabático (γ(aire) = 1,4)</p> <p><b>P<sub>0</sub></b> = presión del gas. Unidad: [Pa].</p> <p><b>ρ</b> = Densidad del gas.</p> <p><b>R</b> = Cte. universal de los gases (8,314[J/(gmol °k)]).</p> <p><b>T</b> = Temperatura absoluta.</p> <p><b>M</b> = Masa molar del gas.</p>

Tabla 2.1- Velocidad de propagación del sonido en diferentes medios (Ordoñez, 2014)

## 2.8 Rango de frecuencias audibles

El rango de frecuencias audibles puede variar entre una persona y otra y también dependiendo la edad, pero el rango promedio puede ir de los 20 Hz a los 20,000 Hz, los sonidos inferiores a 20 Hz se denominan infrasonidos y los superiores a los 20,000 Hz se llaman ultrasonidos.

Tonos Graves	Tonos Medios	Tonos Agudos
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Frecuencias bajas</li> <li>•20Hz- 256Hz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Frecuencias medias</li> <li>•256Hz-2KHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Frecuencias altas</li> <li>•2KHz-20KHz</li> </ul>

Tabla 2.2- Rango de frecuencias audibles

## 2.9 Espectro de frecuencias

El espectro de frecuencias puede definirse como la representación de la distribución de la intensidad de un sonido en función de las frecuencias que lo componen. Generalmente se expresa mediante niveles de presión a bandas de tercios de octava o en bandas de octava.

Una banda de octava es un intervalo entre dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , tal que  $f_2=2*f_1$ . Un nivel de banda de octava es el nivel global de una porción de sonido ubicado entre  $f_1$  y  $f_2$ .

Por otro lado, una banda de tercio de octava es una banda de octava dividida en tres partes en forma logarítmica. Estas bandas son más finas y ofrecen la posibilidad de realizar un mejor análisis (Urita, 2006).

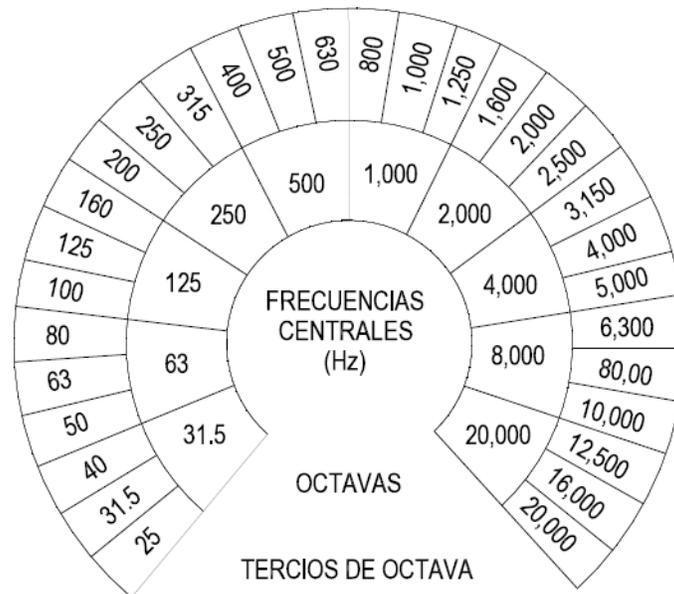


Figura 2.10-Espectro de frecuencias

## 2.10 Impedancia acústica

Matemáticamente, se define como la presión sonora  $p$ , dividida por la velocidad  $V$ , de una onda acústica, y físicamente representa la resistencia de una superficie al paso de dicha onda acústica (Michel Moser, 2004).

$$z = \frac{p}{V} \quad [2.42]$$

En la tabla que está a continuación se presentan algunos valores característicos de velocidad e impedancia acústica para algunos elementos:

MATERIAL	VELOCIDAD (m/s)	IMPEDANCIA (rayls)
Aire a 0 °C	331	427
Aire a 20 °C	340	414
Agua	1,493	144*10 <sup>4</sup>
Madera	3,900	140*10 <sup>5</sup>
Cemento	4,000	162*10 <sup>5</sup>
Acero	5,100	390*10 <sup>5</sup>

Tabla 2.3-Impedancia característica en algunos medios (Michel Moser, 2004).

## **2.11 Características del sonido**

Existen 3 conceptos íntimamente ligados con la cantidad de energía que compone una onda sonora y son (Urita, 2006):

- Presión sonora
- Potencia sonora
- Intensidad sonora

A continuación, se revisan detalladamente cada uno de los conceptos:

### **2.11.1 Presión sonora**

Es producto de la propia propagación del sonido. La energía provocada por las ondas sonoras genera un movimiento ondulatorio de las partículas del aire, provocando la variación alterna en la presión estática del aire (pequeñas variaciones en la presión atmosférica).

#### ***NPS***

Para cuantificar el nivel de presión sonora, debido a la respuesta del oído se utiliza una magnitud logarítmica, matemáticamente se define como nivel de presión sonora (NPS)

$$NPS: 20 \text{ Log} \left( \frac{P}{p_0} \right) : dB \quad [2.43]$$

Donde:

P=Presión sonora

$p_0$ =Presión de referencia ( $2 \times 10^{-5}$ ), presión mínima capaz de ser percibida por el ser humano.

### **2.11.2 Potencia Sonora**

Es la emisión de energía acústica de la fuente por unidad de tiempo y se mide en vatios (w).

## NWS

El nivel de potencia sonora NWS por sus siglas en inglés PWL no debe confundirse con el nivel de presión sonora NPS la diferencia radica en que NWS relaciona la potencia en vatios y NPS en pascales.

La referencia para esta medida es de  $10^{-12}$  vatios.

$$NWS = 10 \text{Log} \frac{w}{10^{-12}} \quad : \text{dB} \quad [2.44]$$

Donde  $w$  es la potencia acústica en vatios, dado que  $10^{-12}$  vatios corresponden a un nivel de  $-120 \text{ dB}$  la forma anterior puede expresarse como:

$$NWS = 10 \log W + 120 \quad [2.45]$$

### 2.11.3 Intensidad sonora

La intensidad de sonido ( $I$ ) en una dirección específica de un punto del campo sonoro, se define como el flujo de energía sonora a través de una unidad de área en este punto, siendo dicha unidad de área perpendicular a la dirección especificada.

$$I = \frac{P}{S} (W/m^2) \quad [2.46]$$

Siendo “P” la potencia sonora emitida por la fuente

La respuesta del oído humano no es lineal, es decir, la respuesta no es proporcional al valor absoluto del estímulo, sino que lo es a la relación entre el estímulo y un valor umbral. Debido a esto y a los amplios márgenes de potencia (1 a  $10^{-12}$ ) que se manejan en las ondas sonoras, se usan escalas logarítmicas.

### 2.12 Ruido acústico

La definición de ruido acústico puede hacerse desde dos puntos de vista diferentes, la expresión subjetiva del ruido que se refiere a la sensación que produce en el ser humano y una definición objetiva que conlleva al ruido como fenómeno físico (Parra, 1997).

Desde el punto de vista subjetivo, al ruido se lo puede definir como:

- Un sonido no deseado.
- Un conjunto de sonidos no coordinados que producen una sensación desagradable.
- Un sonido no deseado capaz de perjudicar psíquica, física, social o económicamente al receptor.

### 2.13 Principales fuentes de contaminación acústica

Las principales fuentes de contaminación acústica en la sociedad actual provienen de los vehículos de motor (80%); el 10% corresponde a las industrias; el 6% a ferrocarriles y el 4% a bares, locales públicos, talleres industriales, aviones, etc. (Aguirre, 2013)

En la siguiente tabla se representan los niveles de presión sonora del espectro del tráfico, aviones y trenes en dB y en dBA, esto debido a que se realiza una corrección adaptada al oído humano tal y como indica el Documento básico HR de Protección contra el ruido.

BANDA DE FRECUENCIAS (Hz)	ESPECTRO DEL RUIDO DE TRÁFICO			ESPECTRO DEL RUIDO DE AVIONES			ESPECTRO DEL RUIDO DE UN TREN		
	Lp (dB)	Corrección (dB)	Lp (dbA)	Lp (dB)	Corrección (dB)	Lp (dbA)	Lp (dB)	Corrección (dB)	Lp (dbA)
125	85	-20	65	108	-20,2	87,8	82	-20	62
250	80	-15	65	114	-12,6	101,4	80	-15	65
500	76	-12	64	110	-9,5	100,5	80	-12	68
1000	75	-8	67	106	-10,5	95,5	87	-8	79
2000	70	-11	59	100	-14,9	85,1	91	-11	80
4000	66	-16	50	90	-23,3	66,7	85	-16	69

Tabla 2.4-Principales fuentes de contaminación acústica (Edificación, 2009) .

### 2.14 Posibles fuentes de ruido de baja frecuencia

Las fuentes de ruido de baja frecuencia (8 a 100 Hz) son muchas y variadas, pero a menudo están relacionados con la industria. Este tipo de ruido es típico en grandes motores diésel de trenes, barcos y plantas de energía y, puesto que este ruido es difícil de amortiguar y se extiende fácilmente en todas direcciones, puede ser oído a muchos kilómetros. El ruido de baja frecuencia es más molesto que lo que se cabría esperar. (Environment, 2001)

Se puede observar que las fuentes son generalmente industriales o comerciales y que en su mayoría son fuentes de ruido situadas externamente. Sin embargo, el ruido de baja frecuencia también puede ser generada a partir de fuentes internas, tales como refrigeradores. Además de las fuentes artificiales hay algunas fuentes naturales de sonido de baja frecuencia, tales como el viento, el mar, los truenos y las vibraciones de los movimientos de tierra de bajo nivel.

Para calcular la audibilidad de componentes de baja frecuencia en el ruido, se mide el espectro y se compara con el umbral auditivo. Los infrasonidos tienen un espectro con componentes significantes por debajo de 20 Hz. Los percibimos no como un sonido sino más bien como una presión. La evaluación de los infrasonidos es aún experimental y en la actualidad no está reflejado en las normas internacionales (Hull, 1993).

### **2.15 Efectos posibles de ruidos a bajas frecuencias**

Los ruidos a bajas frecuencias provocan: estrés, irritación, malestar, fatiga, dolor de cabeza, náuseas y posibles trastornos del sueño. Por otro lado, la sensibilidad auditiva de las personas varía de un individuo a otro. Un ruido de baja frecuencia puede ser escuchado por una persona y no por otra, éste malestar se da manera más frecuente en los individuos de edades avanzadas los cuales tienen gran sensibilidad a las bajas frecuencias. En otro contexto, el ruido a baja frecuencia puede hacer que los elementos ligeros de la estructura de un edificio vibren causando una fuente secundaria de ruido. Esta vibración es generalmente superficial y no se debe confundir con la vibración de todo el edificio (Environment, 2001).

### **2.16 Aislamiento acústico**

El aislamiento se encarga de disminuir o eliminar cualquier vibración que se propague por una estructura sólida o por el aire, se define como la capacidad de oponerse al paso de la energía acústica a través de su estructura.

Al someter una pared o superficie cualquiera a ondas sonora de presión y extensión, esta vibra y emite otras ondas sonoras con una energía de un valor cuantitativo menor.

### 2.16.1 Pérdida de transmisión (TL)

Este parámetro cuantifica la capacidad de una partición para aislar el sonido transmitido por vía aérea. Matemáticamente se define como la relación logarítmica entre la energía incidente y la energía transmitida a través de la partición (Michel Moser, 2004).

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau}; \quad \tau = \frac{\text{Energía sonora Transmitida}}{\text{Energía sonora Incidente}} \quad [2.47]$$

### 2.16.2 Aislamiento teórico de una partición simple

Los materiales según su comportamiento ante las ondas sonoras de presión y extensión podemos clasificarlos en materiales rígidos y materiales flexibles.

Son materiales rígidos aquellos de densidad superior a la unidad impermeables al aire, normalmente isótropos (acero, plomo, contrachapado, pared de obra de hormigón)

Son materiales flexibles, porosos, absorbentes, aquellos de poca densidad tales como paneles de fibra de vidrio, de roca, corcho, plásticos.

Los materiales rígidos siguen una ley teórica en cuanto a su comportamiento aislante al sonido incidente. La ley que gobierna el aislamiento para estos materiales es conocida por ley de masas o de Berg (Flores, 2003).

$$Tl = 10 \text{Log} \left( \frac{\omega \cdot M}{2\rho c} \right)^2 \quad [2.48]$$

Donde  $\omega=2f$

$$Tl = 20 \text{Log} M + 20 \text{Log} f - 42 \text{dB} \quad [2.49]$$

Donde

$Tl$ = Pérdidas por transmisión en dB

$M$ = Masa por unidad de superficie en  $\frac{Kg}{m^2}$

$f$ = Frecuencia incidente en Hz

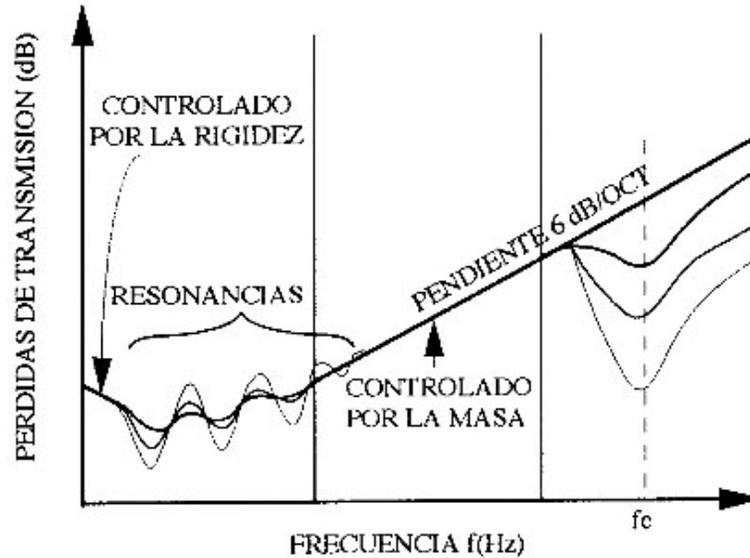


Figura 2.11-Representación gráfica de la ley de Berg (Flores, 2003).

Se puede concluir de la ley de Berg que:

Al aumentar al doble la frecuencia de excitación del parámetro, se aumenta en 6dB el aislamiento.

Al aumentar al doble la masa superficial del paramento, se aumenta en 6dB el aislamiento.

Esta ley se cumple solo en un margen de frecuencia distinto para cada material y conocido por zona de masa controlada.

### 2.16.3 Aislamiento real de una partición simple

La determinación del aislamiento real de una partición es un factor aún más complejo y viene gobernado por una serie de parámetro que actúan con base y magnitud diferente (Flores, 2003).

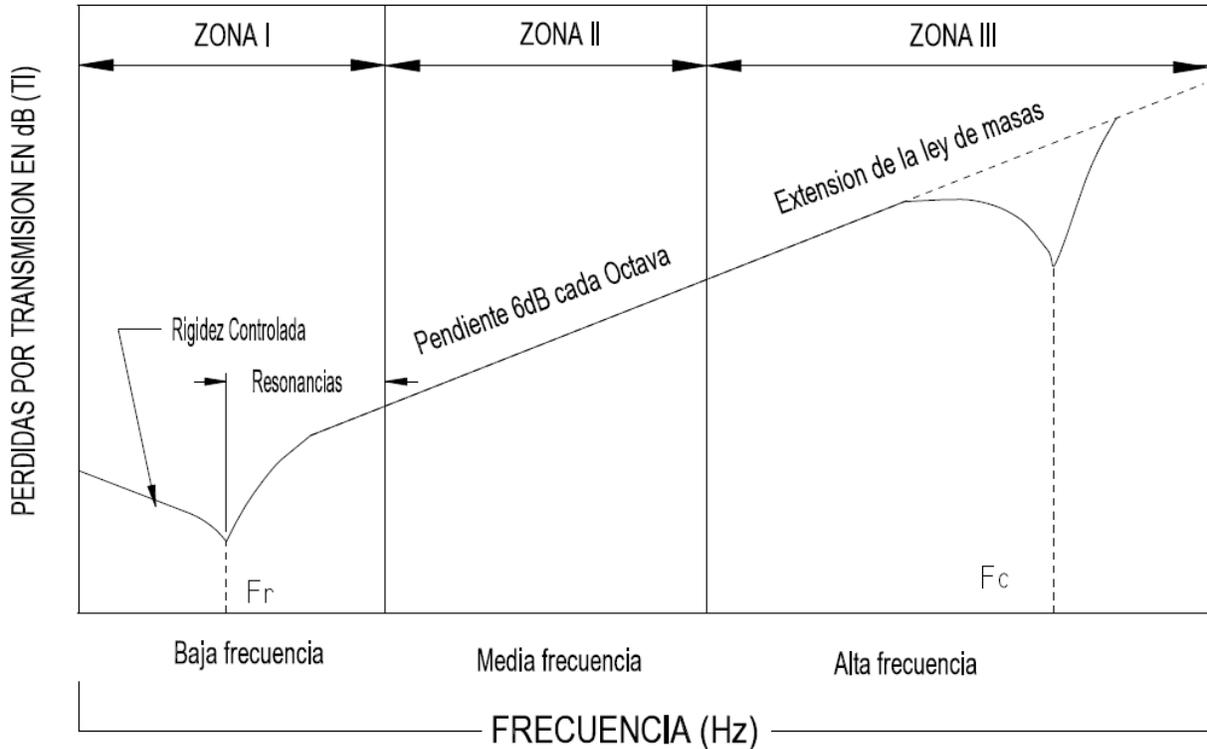


Figura 2.13-Ley de Masas-Extendida

El ancho de banda de respuesta de aislamiento según la Ley de Masas para una partición simple se puede dividir en tres zonas más o menos rígidas en cuanto a su separación e interpretación (Flores, 2003).

**ZONA I.** El aislamiento es controlado por la rigidez de la partición y por las resonancias de estas.

**ZONA II.** El aislamiento es controlado por la Ley de Masas. Esta zona está comprendida entre las más altas frecuencias naturales del panel y la frecuencia mitad de la frecuencia crítica del mismo aproximadamente.

**ZONA III.** El Aislamiento está muy influenciado por el amortiguamiento interno o damping de la partición.

A continuación, se analizan por separado estas zonas:

### **2.16.3.1 Aislamiento de paneles controlados por la rigidez del panel**

Los paneles finitos se caracterizan por estar todos o algunos de sus bordes rígidamente a una determinada estructura (condiciones de frontera de la placa), Ahora bien, al ser excitados, se producen movimientos ondulatorios que difieren en gran manera de aquellos que ocurren en los paneles finitos, fundamentalmente debidos a la presencia de ondas reflejadas producidas en bordes de los mismos.

Las interferencias de estas ondas llegan a producir ondas estacionarias las cuales se traducen en movimientos de gran amplitud en sentido transversal y longitudinal del panel.

Las resonancias ocurren en el panel cuando las ondas sonoras incidentes poseen las mismas frecuencias que las propias del panel, debidas estas a sus dimensiones, a sus características físicas y a su forma de sujeción.

Cuando se producen las resonancias, la vibración del panel adquiere una gran importancia y magnitud produciéndose una importante radiación sonora.

Los desplazamientos que ocurren en el panel al vibrar nunca pueden ser cero, dado que existe un desplazamiento real de todos sus ángulos, y a las formas de deformaciones espaciales para una frecuencia de resonancia dada se conocen por modos de vibración.

Como se puede observar en la gráfica de ley de masas extendida, en la zona de rigidez controlada, el aislamiento disminuye al aumentar la frecuencia, hasta llegar a la primera frecuencia de resonancia del panel.

### **2.16.3.2 Aislamiento de paneles en zona de masa controlada**

En esta zona el aislamiento sigue prácticamente la Ley de Masas y sólo posee una influencia con respecto a esta, la incidencia del sonido.

Para una incidencia aleatoria puede estimarse una disminución de 5 dB, respecto a su valor teórico, esto es el aislamiento viene dado por:

$$Tl_{Real} = Tl_{Teórico} - 5 \text{ dB} \quad [2.52]$$

$$Tl_{Real} = 20\text{Log}M + 20\text{L}gf - 47\text{dB} \quad [2.51]$$

La zona real de utilización de estas expresiones viene dada por una frecuencia de valor doble o triple, de la más baja frecuencia de resonancia y la frecuencia de la mitad de la frecuencia crítica.

### **2.16.3.3 Aislamiento de paneles sólidos en zona controlada por la amortiguación interna, (damping)**

Esta zona se caracteriza por proporcionar un aislamiento acústico muy inferior al esperado por la ley de Masas y variable en el ancho de banda.

La explicación de este fenómeno puede hacerse con base a la forma en cómo se realiza la transmisión sonora en un sólido.

Al ser excitado un sólido mediante un haz de ondas sonoras, planas, éste, transmite la energía de forma de ondas de flexión, las cuales se caracterizan por transmitirse transversalmente, eso es perpendicularmente al movimiento de las partículas y en forma de ondas longitudinales es decir en la misma dirección que el movimiento de las partículas, como sucede en la transmisión aérea.

Las ondas sonoras de flexión que se propagan en el panel sólido poseen una frecuencia de vibración que es en función del tipo de material y de las características físicas de este.

Cuando la frecuencia de la onda de flexión es igual a la frecuencia del sonido incidente, se produce un acoplamiento entre las ondas aéreas y las de flexión, al ser ambas de la misma frecuencia y transmitir a la misma velocidad, se produce un aislamiento teórico de cero para estas frecuencias en el panel sólido, a la frecuencia que esto ocurre se define por frecuencia crítica del panel.

Debido fundamentalmente a la fuerza de rozamiento interno y amortiguación, para la frecuencia crítica,  $f_c$ , el aislamiento acústico del panel  $TL \neq 0$ .

Lógicamente este efecto tendrá lugar cuando la onda incidente sea paralela a la pared. Cuando las ondas sean aleatorias, el efecto se producirá por  $\lambda = \lambda_0 \sin \theta$  donde  $\lambda$  y  $\lambda_0$  serán respectivamente las longitudinales de ondas de la onda incidente y de la vibración de la partición y  $\theta$  el ángulo de incidencia de las ondas (Flores, 2003).

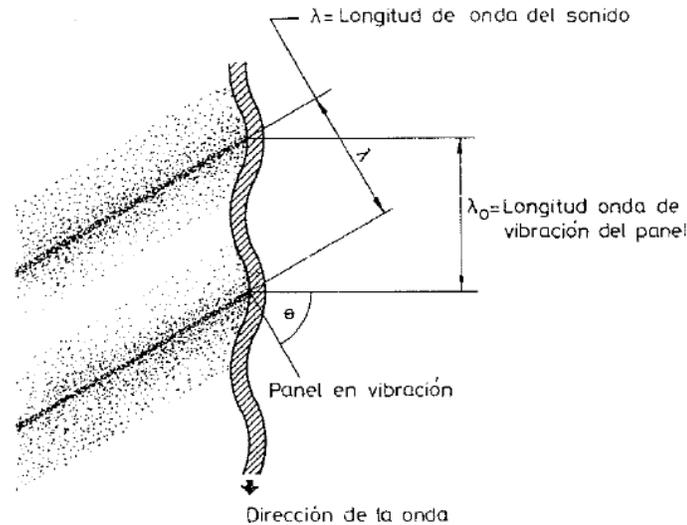


Figura 2.14-Efecto de coincidencia (Flores, 2003).

Para frecuencias superiores a la frecuencia crítica, hay siempre un ángulo de incidencia para los sucesivos frentes de ondas alcanzan la pared a distancias iguales a la longitud de onda de flexión del panel, de ahí que para frecuencias superiores a la frecuencia crítica, el aislamiento del panel siga siendo inferior al esperado por la Ley de Masa.

Se puede estimar que deja de cumplirse la Ley de Masas a una frecuencia aproximadamente igual a la mitad de la frecuencia crítica. A partir de esta frecuencia el aislamiento de esta zona es entre 10 y 20dB menor al esperado.

La frecuencia crítica de un panel puede ser determinada mediante la expresión para longitudes de ondas superior a 6 veces el espesor del panel analizado.

$$f_c = \frac{6.4 \times 10^4}{h} \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{B}} \quad [2.52]$$

Donde:

$f_c$  = Frecuencia crítica en Hz

$h$  = espesor del panel en metros

$\rho$  = Densidad del material en  $\frac{Kg}{m^3}$

$\nu$  = coeficiente elástico de Poisson del material

$B$  = Módulo de BULK en  $\frac{Nw}{m^2}$

---

## CAPÍTULO 3

---

### METODOLOGÍA

*En este capítulo se presentan las propiedades y características de los modelos utilizados, así como las condiciones de frontera de la placa, la forma de los refuerzos con base a las ecuaciones teóricas, también se muestra la metodología del análisis numérico y los parámetros que se tomaron en cuenta para el cálculo de tablas de reducción de longitud.*

#### **3.1 Dimensiones de la placa**

En el capítulo 1, se revisan las características principales de las barreras acústicas, de acuerdo con Smaneh Fard (2003), las barreras acústicas altas representan mayor pérdida por inserción. Además, existen normas como la UNE\_EN 1794-1:2003, que establecen una altura máxima de 4m para paneles acústicos, no obstante, uno de los objetivos de este trabajo es utilizar perfiles comerciales.

Ahora bien, de acuerdo con la tabla de perfiles comerciales de (AHMSA, 2013), que se muestra en el “anexo A”, la lámina más grande comercialmente es de 4ft x 10ft, el equivalente en metros es de **1.219m x 3.048m**, el cual cumple con las condiciones de estabilidad y altura para un panel acústico.

Una vez definidas las dimensiones de la lámina, es necesario definir el espesor, si bien las normas no describen un espesor estándar, fabricantes como Pancor, Metalesa, Postigo, manejan espesores por cara de 1.52 a 2.0mm, en este trabajo se pretende obtener una barrera ligera por lo tanto se toma como primera opción analizar una placa calibre 16 con un espesor de **1.58mm**.

Cabe destacar que la placa calibre 16 es la configuración inicial en donde se aplican distintos tipos de refuerzos y se observan los efectos que producen en las frecuencias naturales y modos de vibración, posteriormente se analizan distintas condiciones de formas de refuerzos y radios internos, así se definen parámetros para aplicar las configuraciones a placas de distintos calibres.

### 3.2 Propiedades del material

Según (AHMSA, 2013) los aceros de medio carbono como ASTM A36 son los más comunes para el uso estructural, perfiles laminados, perfil tubular, bases para vigas.

Propiedades de la placa ASTM A36		
Densidad " $\rho$ "	Módulo de Young "E"	Coefficiente de Poisson " $\nu$ "
7850kg/m <sup>3</sup>	200GPa	0.26
Masa de la placa	Longitud	Espesor
44.33 kg	3.048m x 1.219m	0.00152m

Tabla 3.0-Propiedades mecánicas del material, masa y dimensiones de placa calibre 16

### 3.3 Condiciones de frontera de la placa

Serrano et al (2009), mencionan que, la manera más convencional de sujetar un panel acústico es lateralmente, pues se empotran postes de acero o columnas de cemento para fijarlos en sus extremos, además de que se pueden remplazar con mayor facilidad al ser sujetados de la parte superior como se muestra en la en la figura 3.1.

Por lo tanto, se analizan todas las configuraciones con empotramiento en los laterales como se muestra en la figura 3.2.

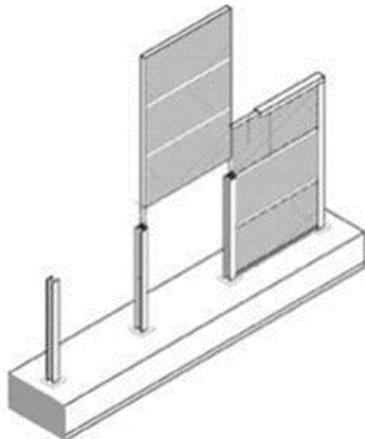


Figura 3.1- Fijación de un panel acústico (Serrano, 2009)

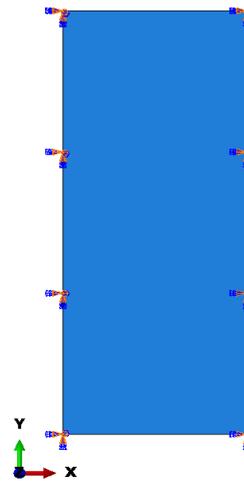


Figura 3.2- Condiciones de frontera de la placa

### 3.4 Forma de los refuerzos para placa calibre 16

De acuerdo con las consideraciones de embutido el radio del punzón  $r_p$  debe de ser de 4 a 6 mayor al espesor de la lámina, para evitar defectos de embutido y conservar un espesor continuo.

De acuerdo con la ecuación [2.32] se tiene:

$$1.52 \leq 6.08 \leq 19$$

El área que se desea embutir es suficientemente grande y no se considera problemas de embutido a menos que el refuerzo se encuentre en la orilla de la placa, pues bajo estas condiciones se tendría un defecto por falta de material, sin embargo, si se tiene un refuerzo continuo perpendicular, similar a una lámina corrugada, se podría embutir sin problemas, inclusive se podrían utilizar rodillos con la forma del punzón para crear el refuerzo.

$R_p(4 - 6)h$	Radios para el punzón	Ajuste a perfiles comerciales	Pulg.
4X1.52mm	6.08mm	6.3mm	(1/4)
5X1.52mm	7.06mm	7.9mm	(5/16)
6X1.52mm	9.12mm	9.5mm	(3/8)

Tabla 3.1 -Aumento del radio del dado respecto al espesor (h) de una Lámina calibre 16, con ajuste para perfiles comerciales

La Tabla 3.1 muestra las variaciones permitidas de acuerdo a la relación  $R_p(4 - 6)h$  para el radio del punzón de una lámina calibre 16.

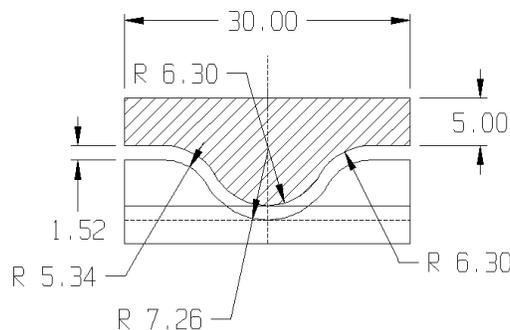
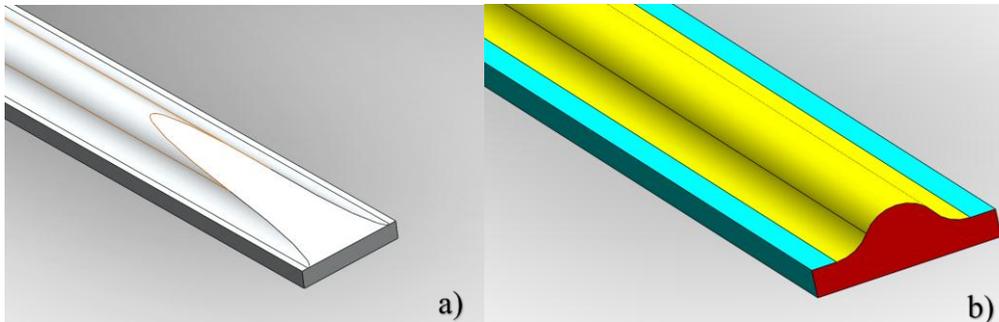


Figura 3.3-Vista de sección de dado de 6.3mm de radio.

En la figura 3.4, se muestra la cabeza de los dados que se utilizan para la embutición y en la figura 3.3, una vista a sección de la matriz y el dado, es importante mencionar que el perfil

del dado mantiene una relación de radios constante y que aumenta en proporción a la relación  $R_p(4 - 6)h$ , la cabeza del punzón recortado a) es para embuticiones donde el refuerzo no cruza por completo la placa, colocar un radio o chaflán con un Angulo mayor de  $45^\circ$  o mayor podría generar cortes en la placa por lo tanto se opta por un chaflán que corta la cabeza del punzón gradualmente con un ángulo de  $6^\circ$ , el punzón completo b) es para refuerzos que cruzan por completo la placa.



*Figura 3.4- Cabeza de dados, a) Punzón recortado b) punzón completo*

Para las placas de distintos calibres se plantea la misma relación y las tablas se pueden encontrar en la sección de Anexos A.

### **3.5 Reducción de longitudes de la placa**

Cuando se utiliza la herramienta de conformado de chapa metálica en Solid Works la longitud de la placa no se reduce, por lo tanto, aumenta la masa del modelo para solucionar este problema y mantener una masa constante se cortó una sección de la placa y utilizando una herramienta de desdoblado se obtuvo el perfil de la placa sin dobles, se mide la longitud restante y es la longitud que va a reducir la placa por refuerzo, en la figura 3.5, se muestra el proceso para obtener la variación de longitud. En el capítulo 4 se muestran las tablas de reducción de longitud y colocación de refuerzos, así como la secuencia de embutido de la placa calibre 16, donde se observa que no existen adelgazamientos en el espesor de la placa, y en la sección de “Anexos A” se muestran las tablas de reducción restantes.

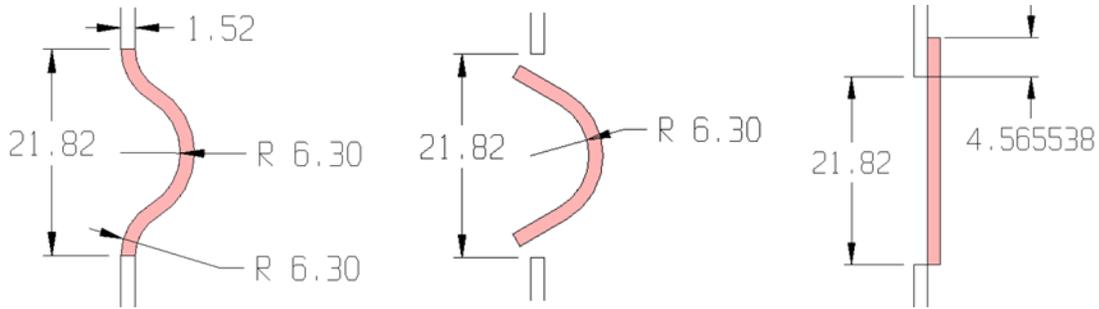
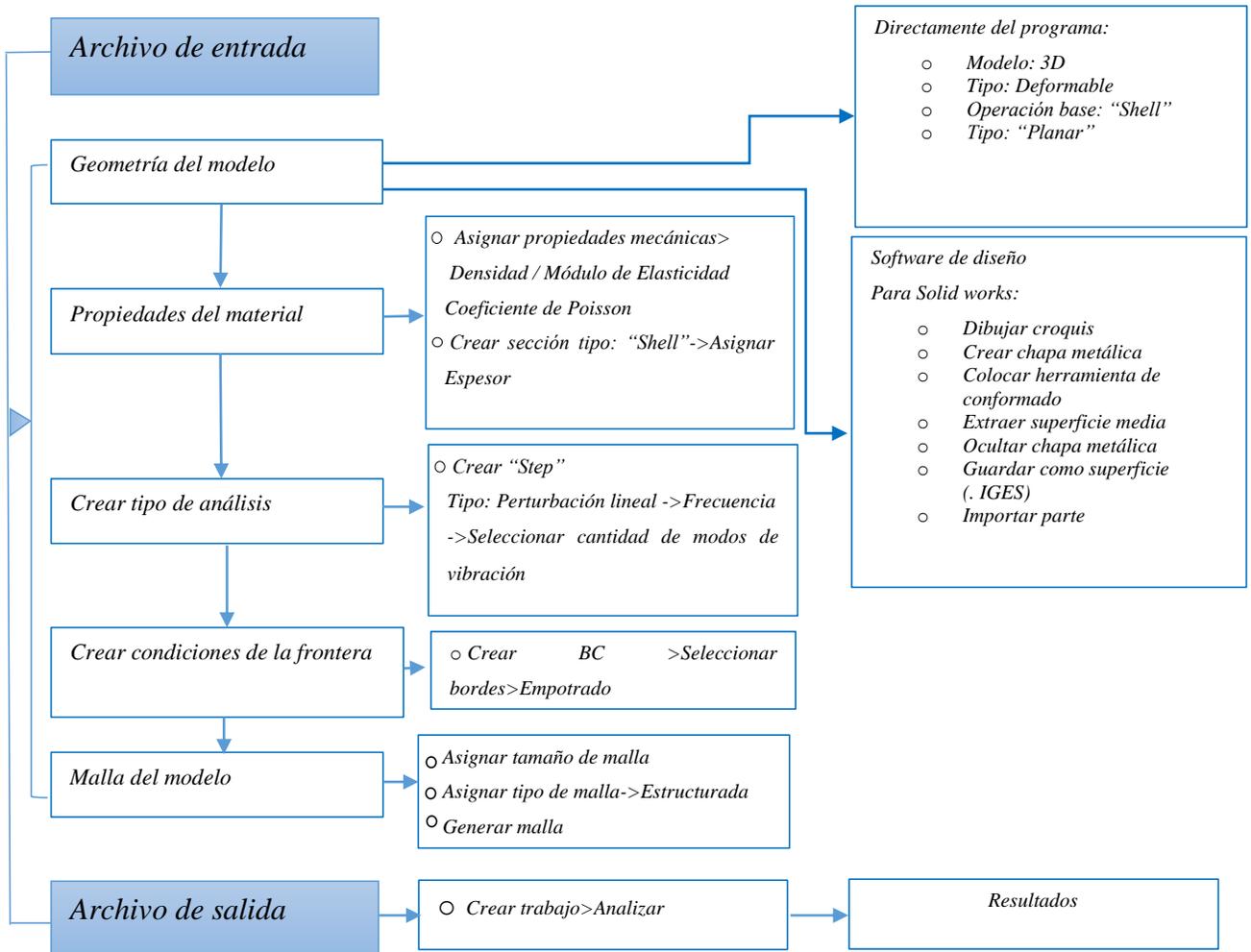


Figura 3.5- Secuencia de desdoblado de sección de placa calibre 16 y radio el refuerzo de 6.3mm.

### 3.6 Metodología para el análisis numérico

Para el análisis numérico de la placa rectangular se utiliza el programa de elementos finitos ABAQUS, a continuación, se muestra un diagrama que describe el análisis:



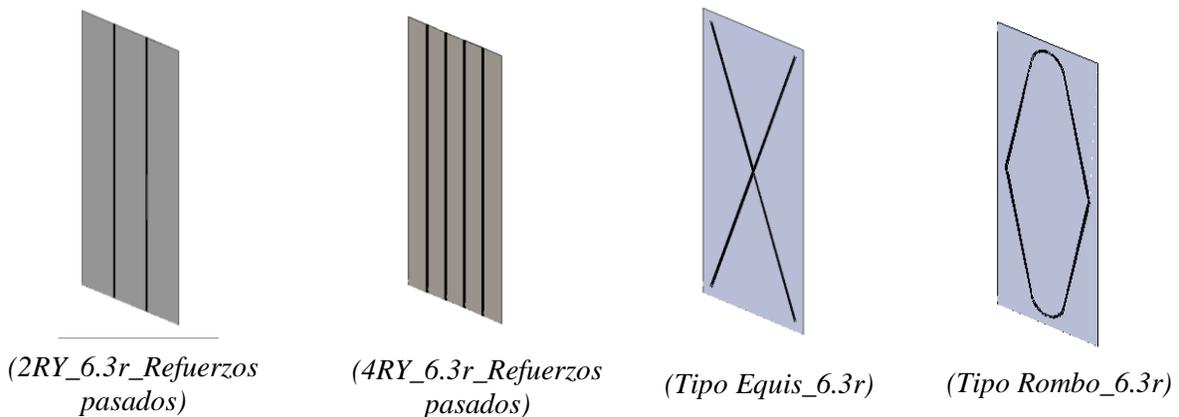
### 3.6.1 Elemento tipo “Shell”

El tipo de elemento utilizado en los modelos es tipo “Shell” que son adecuados para modelar estructuras en las cuales una dimensión (espesor), es significativamente más pequeño que el resto de las otras dimensiones, un elemento “Shell” continuo discretiza el cuerpo completo en tres dimensiones, este elemento tiene solo el desplazamiento como grado de libertad (Valdés, 2010).

Para el análisis modal de placas con estampados, resulta complicado utilizar elementos tipo sólido, por esta razón es mejor extraer el plano medio de la placa la cual se traduce a una superficie y se asigna como elemento el tipo Shell, de esta manera se reduce el tiempo de cálculo y se evitan problemas de mallado.

### 3.7 Placas con refuerzos variados

Una vez establecidas las propiedades de la placa, condiciones de frontera y los parámetros para embutido, se crearon distintos tipos de configuraciones variando la forma de los refuerzos, pero conservando el mínimo radio de punzón de 6.3mm, el mínimo recomendado para un mejor embutido, utilizar un mismo radio base permite observar la tendencia que tienen las frecuencias y los modos de vibración. A continuación, se muestran las placas con refuerzos variados que fueron analizadas, vista isométrica:



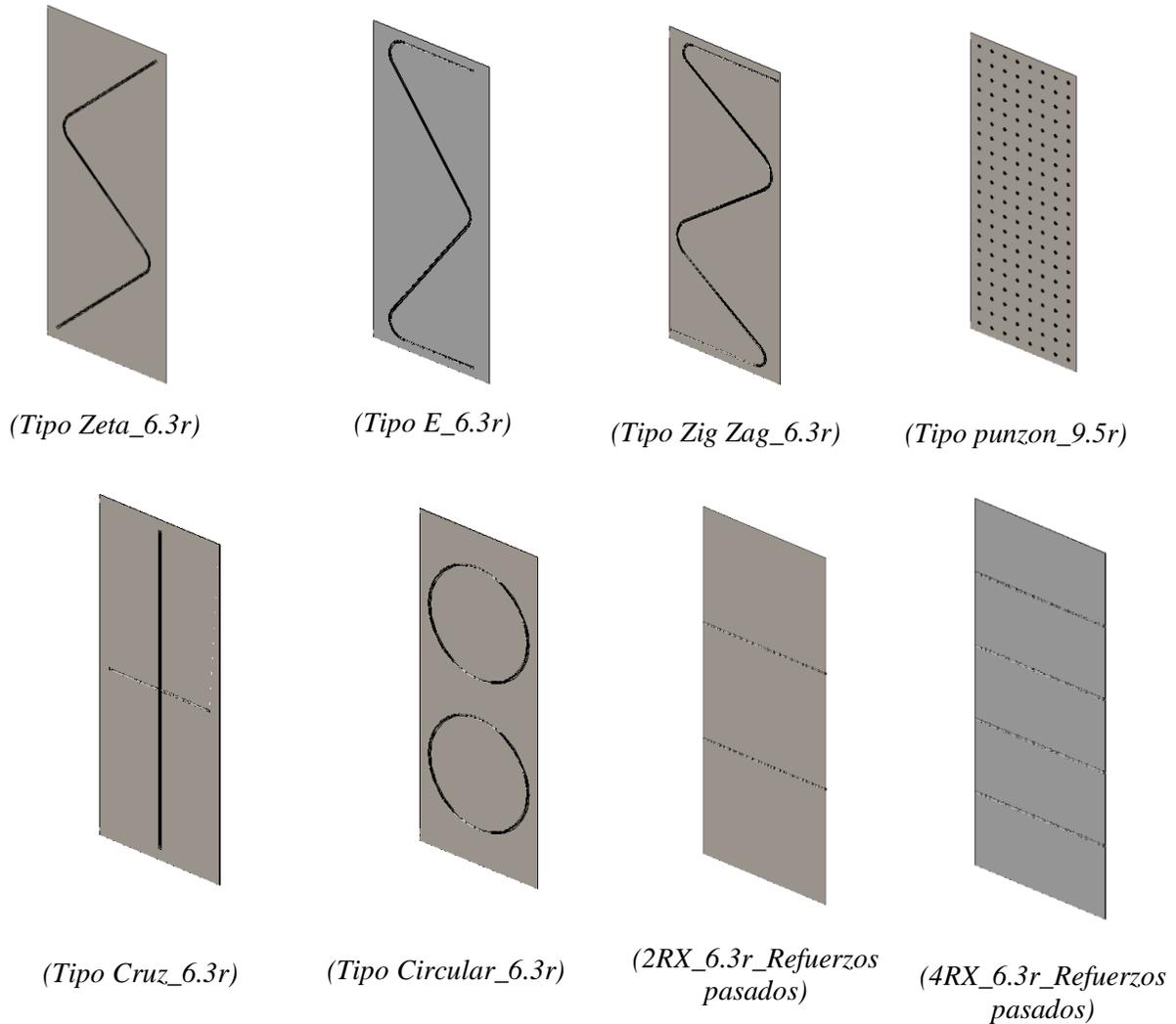


Figura 3.6-Placas con refuerzos variados, radio interno del refuerzo 6.3mm.

### 3.8 Placas con refuerzos en horizontales “RX”

Los refuerzos horizontales o “RX” (nomenclatura que se asignó para identificar con mayor facilidad el tipo de configuración), se plantean las configuraciones bajo las siguientes condiciones.

- Mover Posición del refuerzo longitudinalmente
- Alternar colocación del refuerzo
- Cambiar su longitud, recortando el refuerzo.
- Incremento de la cantidad de refuerzos.
- Variar el diámetro del dado

### 3.8.1 Posición de los refuerzos

Para el análisis de placas con refuerzos variados se observa que la posición de los refuerzos horizontales está distribuida homogéneamente a lo largo de la placa. El mover la posición de los refuerzos superior e inferior se determinó al observar el comportamiento modal de la placa lisa que se muestran en el capítulo 4 de resultados, pues se mostró mayor amplitud de desplazamiento en los extremos libres superior e inferior, ver figura 3.7.

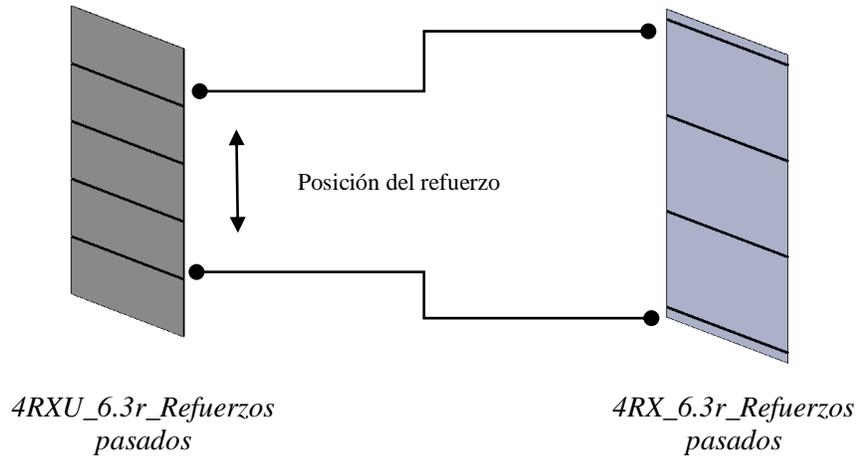


Figura 3.7-Placa con 4 refuerzos horizontales distribuidos uniforme 4RXU, y placa con refuerzos a 100mm de los bordes inferior y superior 4RX.

### 3.8.2 Alternando la colocación de los refuerzos para la configuración “4RX”

Si se observan las placas de perfil, los refuerzos tienen un mismo sentido como en la Figura 3.8 a), se muestra la placa 4RX alternando la posición de los refuerzos, figura 3.8 b), pero conservando la misma distancia entre ellos.

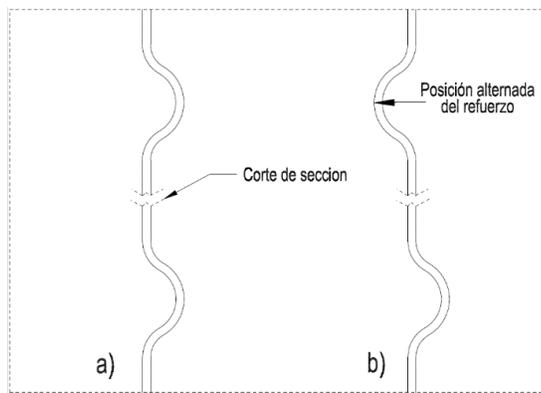


Figura 3.8 a) Refuerzo convencional, b) Refuerzo alternado.

### 3.8.3 Refuerzos recortados

Se colocaron refuerzos de un metro de longitud que no traspasan la placa, como se muestra en la figura 3.9, la distancia de inicio del refuerzo recortado se consideró tomando en cuenta la línea nodal adyacente al empotre, como se muestra en el análisis numérico de la placa lisa en el capítulo 4 de resultados.



Figura 3.9 - Refuerzos recortados y refuerzos pasados, para 4RX.

### 3.8.4 Incremento de la cantidad de refuerzos

Se incrementa la cantidad de refuerzos a partir de la configuración 4RX, y se conserva la posición del primer y último refuerzo a 100mm del borde inferior y superior de la placa como se muestran en la “Sección C” de anexos donde se muestran los planos a detalle de las configuraciones utilizadas. Los radios del refuerzo se mantienen de 6.3mm de radio, las tablas de reducción de longitud se encuentran en el capítulo 4, en la figura 3.10 se muestran los modelos utilizados.

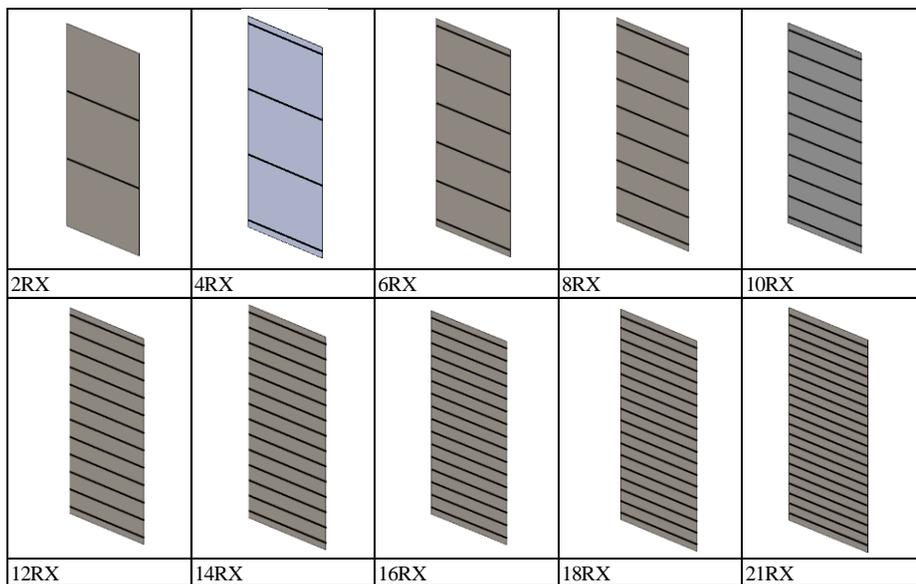


Figura 3.10-Incremento de refuerzos horizontales pasados de 6.3r mm de radio interno

### 3.8.5 Incremento del radio en dado

El incremento de los radios del dado o radios internos de los refuerzos, se muestran en la tabla 3.1, en el caso de los modelos se combinaron dos propiedades que fueron el incremento de número de refuerzos y el radio de los dados, ver figura 3.11.

Por ejemplo, para la placa con 4 refuerzos horizontales “4RX”, se varió el radio del dado de 6.3 mm a 7.9mm y 9.5mm, obteniendo así las placas 4RX\_7.9r y 4RX\_9.5r, se hizo mismo para las configuraciones 10RX, 16RX Y 21RX. Las tablas de reducción de longitud 4.2, 4.5 y 4.6 utilizadas, se muestran en el capítulo 4 y se encuentran completas en “anexos A”.

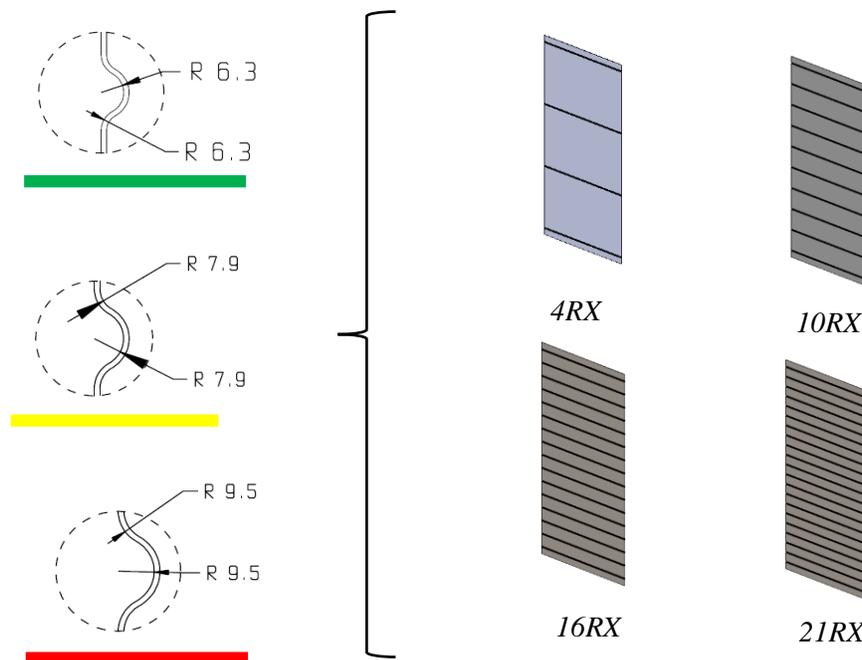


Figura 3.11-Combinación de radios internos y refuerzos.

Se obtienen así, 3 combinaciones de radios por cada placa, para identificar con mayor facilidad el radio del refuerzo se asignaron colores, como se puede ver la figura 3.11. La placa lisa se representa con color azul y se muestra en las gráficas de incrementos de radio del dado en el capítulo 4.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

En este capítulo podemos encontrar el análisis de convergencia de malla, los resultados obtenidos de la simulación del proceso de embutido, la comprobación del modelo, mediante el método Warburton y el modelado numérico. También se muestran las tablas de reducción de longitud y colocación de refuerzos, y las gráficas resultantes del análisis de placas con refuerzos variados y refuerzos horizontales.

#### 4.1 Análisis de convergencia de malla

Para el análisis de convergencia se utilizan elementos cuadráticos estructurales, donde se varía gradualmente el tamaño de la malla como se muestra en la figura 4.0 y el número de elementos como se muestra en la tabla 4.1:

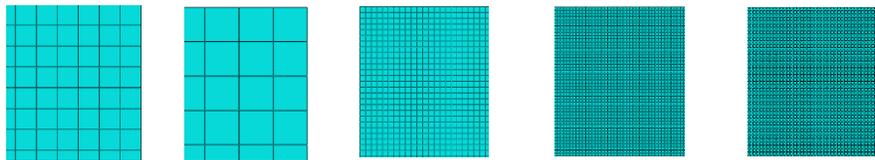


Figura 4.0- Refinamiento de malla

Tamaño de malla en metros	Número de elementos	Primera frecuencia natural (Hz)
0.1	360	5.7151
0.05	1460	5.6221
0.01	5978	5.599
0.005	148,840	5.5928
0.0025	412,496	5.5917

Tabla 4.0- Tamaño de malla, número de elementos y primera frecuencia natural

Como se puede observar en la Figura 4.1 a partir de 5,978 elementos la línea converge, sin embargo, se considera óptima a partir de 148,840 elementos pues se utiliza también estos parámetros en las placas con refuerzos estampados donde una malla más burda no es conveniente para las zonas donde se colocan los refuerzos.

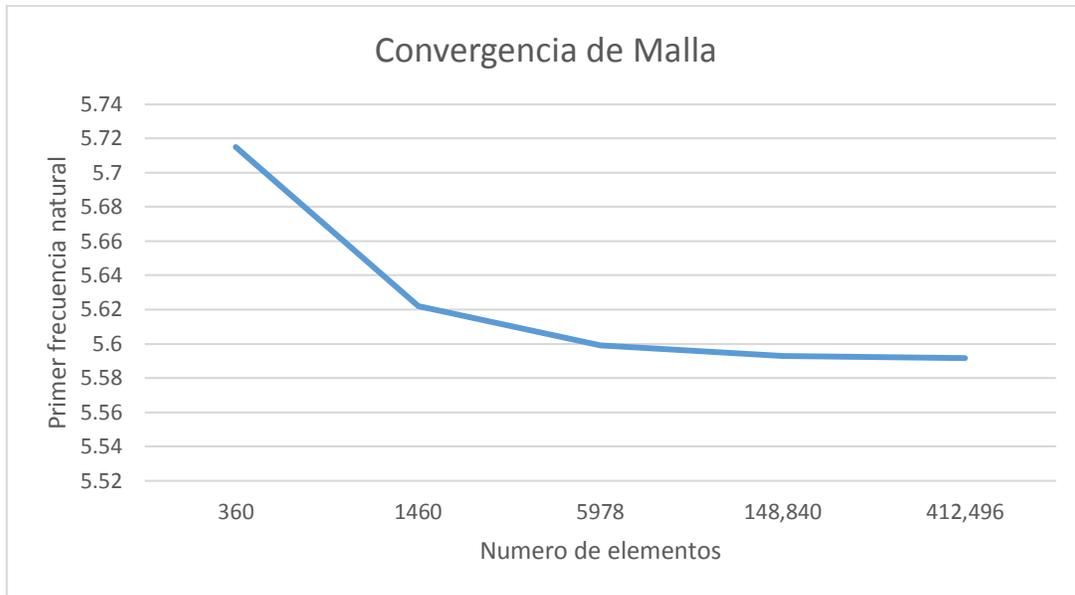


Figura 4.1-Grafica de convergencia de malla

Por lo tanto, las primeras 20 frecuencias naturales para una placa calibre 16 de 1.219m x 3.048m, se muestran en la tabla 4.1, cabe destacar que estos valores sirven como base para observar las variaciones de frecuencia por modo de vibración en placas con refuerzos estampados.

Placa rectangular calibre 16/ No. de elementos 148840			
Modo	Frecuencia natural (Hz)	Modo	Frecuencia natural (Hz)
<b>1</b>	5.5919	<b>11</b>	17.967
<b>2</b>	5.7612	<b>12</b>	20.095
<b>3</b>	6.4125	<b>13</b>	20.647
<b>4</b>	7.6538	<b>14</b>	22.94
<b>5</b>	9.6355	<b>15</b>	26.18
<b>6</b>	12.448	<b>16</b>	26.546
<b>7</b>	15.425	<b>17</b>	30.262
<b>8</b>	15.64	<b>18</b>	30.474
<b>9</b>	16.119	<b>19</b>	30.945
<b>10</b>	16.503	<b>20</b>	31.442

Tabla 4.1- Veinte primeras frecuencias naturales, placa lisa calibre 16

## 4.2 Secuencia de embutido y reducción de longitudes de la placa

Durante el proceso de embutido el material es “empujado por el dado” de tal manera que se podría decir que “fluye” hacia la matriz como se muestra en la figura 4.2, y puede existir una reducción de la longitud de la placa al realizar un embutido, el análisis de embutición en una sección de la placa permite verificar que no existen adelgazamientos o cortes en la placa, esto se debe a que se utilizan punzones y matrices con radios constantes.

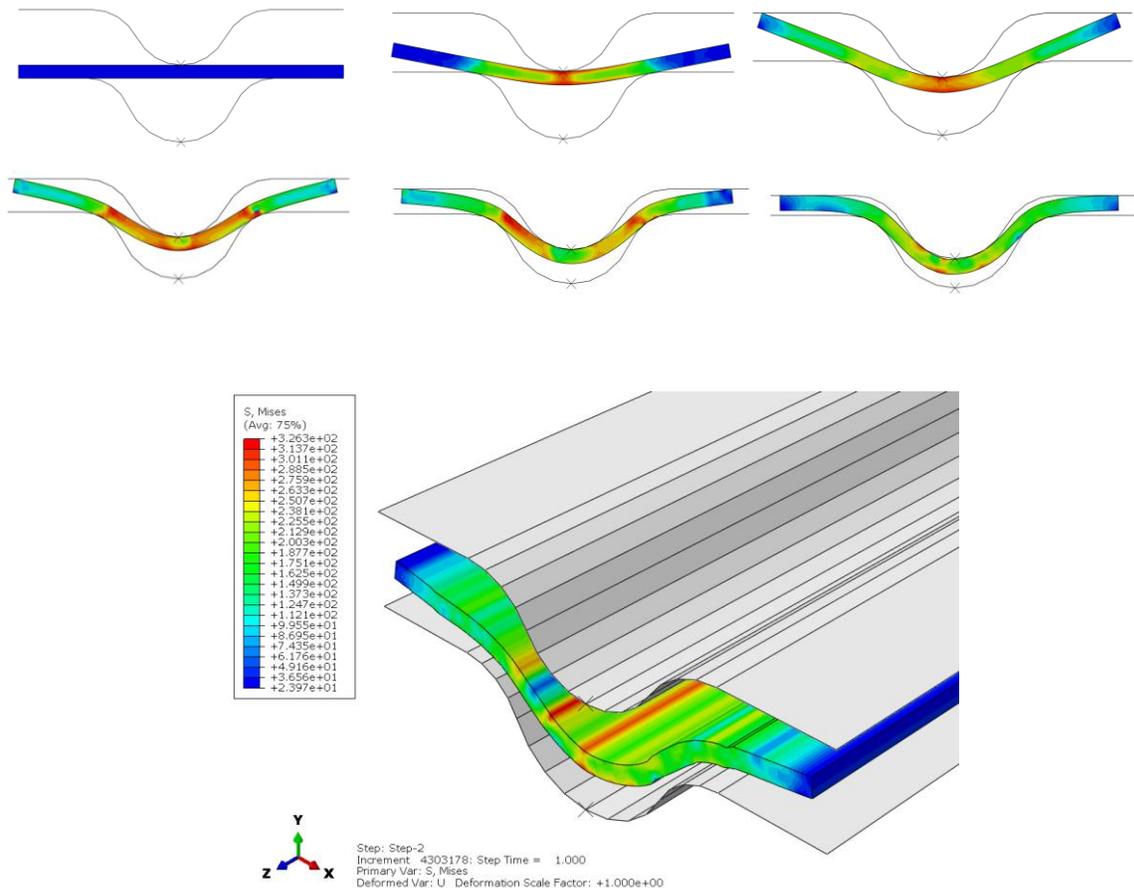


Figura 4.2- Secuencia de embutido, Radio del punzo 6.3mm, Placa calibre 16

## 4.3 Tablas de reducción de longitud

Tomando en cuenta la reducción de longitud que se requiere para cada refuerzo se implementó una hoja de cálculo que proporciona los datos de reducción de longitud por cada refuerzo, así como la nueva longitud de la placa y la distancia de aplicación de refuerzos. Se

hicieron tablas para refuerzos horizontales (RX), horizontales recortados (RXC), verticales (RY), para radios de punzón de 6.3mm, 7.9mm y 9.5mm.

Las constantes que se toman en cuenta para las tablas de reducción de longitud son; la longitud de la placa, el ancho y la densidad para calcular la masa, y un claro de 200mm entre el primer y último refuerzo, en el capítulo 3 se mencionan los análisis donde se varia la posición del refuerzo y se define este parámetro.

Para las placas con refuerzos variados se utilizan como referencia las tablas de refuerzos recortados, pasados y verticales, la masa de las placas se comprobó, asignando las propiedades de mecánicas del material a la placa, mediante la herramienta de propiedades físicas, así las placas con refuerzos variados no incrementan su masa, en la sección de anexos c se pueden ver los planos de cada configuración.

<b>Tabla de reducción para refuerzos horizontales: (RX_6.3r_ Refuerzos pasados)</b>				
Cantidad de Refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
1	4.5655381	N/A	3043.434462	44.3
2	9.1310762	N/A	3038.868924	44.3
3	13.6966143	N/A	3034.303386	44.3
4	18.2621524	943.2459492	3029.737848	44.3
5	22.8276905	706.2930774	3025.17231	44.3
6	27.3932286	564.1213543	3020.606771	44.3
7	31.9587667	469.3402056	3016.041233	44.3
8	36.5243048	401.639385	3011.475695	44.3
9	41.0898429	350.8637696	3006.910157	44.3
10	45.655381	311.3716243	3002.344619	44.3
11	50.2209191	279.7779081	2997.779081	44.3
12	54.7864572	253.9285039	2993.213543	44.3
13	59.3519953	232.3873337	2988.648005	44.3
14	63.9175334	214.1601897	2984.082467	44.3
15	68.4830715	198.5369235	2979.516929	44.3
16	73.0486096	184.9967594	2974.95139	44.3
17	77.6141477	173.1491158	2970.385852	44.3
18	82.1796858	162.6953126	2965.820314	44.3
19	86.7452239	153.4030431	2961.254776	44.3
20	91.310762	145.0889073	2956.689238	44.3
21	95.8763001	137.606185	2952.1237	44.3

Tabla 4.2-Reducción de longitud, distancia entre refuerzos y verificación de conservación de masa, para refuerzos pasados de 6.3mm de radio interno.

<b>Tabla de reducción para refuerzos verticales: (RY_6.3r_Refuerzos pasados)</b>				
Cantidad de Refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre refuerzos en mm	Nueva longitud de la placa en mm	Masa en Kg
1	4.5655381	N/A	1214.434462	44.3
2	9.1310762	403.2896413	1209.868924	44.3
3	13.6966143	301.3258464	1205.303386	44.3
4	18.2621524	240.1475695	1200.737848	44.3
5	22.8276905	199.3620516	1196.17231	44.3
6	27.3932286	170.2295387	1191.606771	44.3

Tabla 4.3-Reducción de longitud para placas con refuerzos verticales (RY), radio interno 6.3mm.

<b>Tabla de reducción para: (RXC_6.3r_Refuerzos recortados)</b>				
cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
4	14.157288	944.6142373	3033.842712	44.3
10	35.39322	312.5118644	3012.60678	44.3
16	56.629152	186.0913899	2991.370848	44.3
21	74.325762	138.6837119	2973.674238	44.3

Tabla 4.4 - Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales recortados (RXC) radio interno 6.3mm.

<b>Tabla de reducción para: (RX_7.9r_Refuerzos pasados)</b>				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos (mm)	Longitud Nueva de la placa(mm)	Masa en Kg
4	22.90016	941.6999467	3025.09984	44.3
10	57.2504	310.0832889	2990.7496	44.3
16	91.60064	183.7599573	2956.39936	44.3
21	120.22584	136.388708	2927.77416	44.3

Tabla 4.5- Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales, pasados y radio interno de 7.9mm.

<b>Tabla de reducción para: (RX_9.5r_Refuerzos pasados)</b>				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos (mm)	Longitud Nueva de la placa(mm)	Masa en Kg
4	27.538064	940.1539787	3020.461936	44.3
10	68.84516	308.7949822	2979.15484	44.3
16	110.152256	182.5231829	2937.847744	44.3
21	144.574836	135.1712582	2903.425164	44.3

Tabla 4.6- Reducción de longitud para placas con refuerzos horizontales, pasados y radio interno de 9.5mm.

#### 4.4 Cálculo de frecuencias naturales en placa rectangular método de Warburton

Una vez se han definido las dimensiones de la placa, se muestra los cálculos para la obtención de frecuencias naturales de una placa lisa, rectangular e isotrópica.

De acuerdo con la ecuación [2.60]

Se eliminan los efectos por pandeo “buckling”  $N_x, N_y$  y se tiene:

$$\omega_{iso}^2 = \frac{\rho h w^2 a^4}{\pi^4 D} = G_x^4 + G_y^4 \frac{a^2}{b^2} + 2 \frac{a^2}{b^2} [v H_x H_y + (1 - v) J_x J_y]$$

Para este método se considera la pantalla de la siguiente manera, la condición de frontera es empotrada en dos extremos, eje x, como se muestra en la *Figura 4.3*.

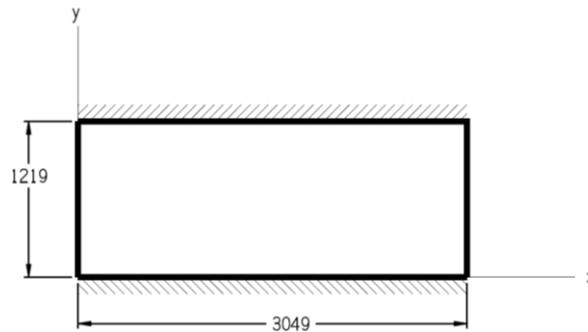


Figura 4.3- Condiciones de frontera método Warburton, dimensiones en mm.

Primer Frecuencia natural.

De acuerdo con la *Tabla 2.0*, en el eje x, Clamped-clamped, se tiene  $m = 2$ , que son las líneas nodales cerca del empotre:

$$a=3.048m, b=1.219m, D = \frac{(200E9 \frac{N}{m^2})(0.00158m)^3}{12-(1-.33^2)} = 73.77 \frac{N}{m}$$

$$\omega_{iso}^2 = \frac{(7850)(0.00158)^2(3.049)^4}{(\pi^4)(73.77)} = (0.149)$$

Para x, Clamped-clamped,  $m=2$

$$G_x=1.506$$

$$H_x=1.248$$

$$J_x=1.248$$

Para y, Free, Free,  $m=0$

$$G_y=0$$

$$H_y=0$$

$$J_y=0$$

$$\omega_{iso}^2 = (0.149) = (1.56)^4 + (0) + (0) = 5.14$$

$$fn = \sqrt{\frac{5.14}{0.1491}} = 5.87Hz$$

#### 4.5 Comparación de resultados teóricos y numéricos

Los valores numéricos son muy similares a los obtenidos mediante el método de Warburton, aunque los valores numéricos son más acertados, los cálculos son siempre importantes pues se comprueban los resultados, el porcentaje de variación entre el valor teórico y numérico es de 3.4% para la malla elegida.

#### 4.6 Resultados de placas con refuerzos variados

Se realizó el análisis numérico de las placas con refuerzos variados, en la figura 4.4 muestra las primeras 10 frecuencias naturales de las placas.

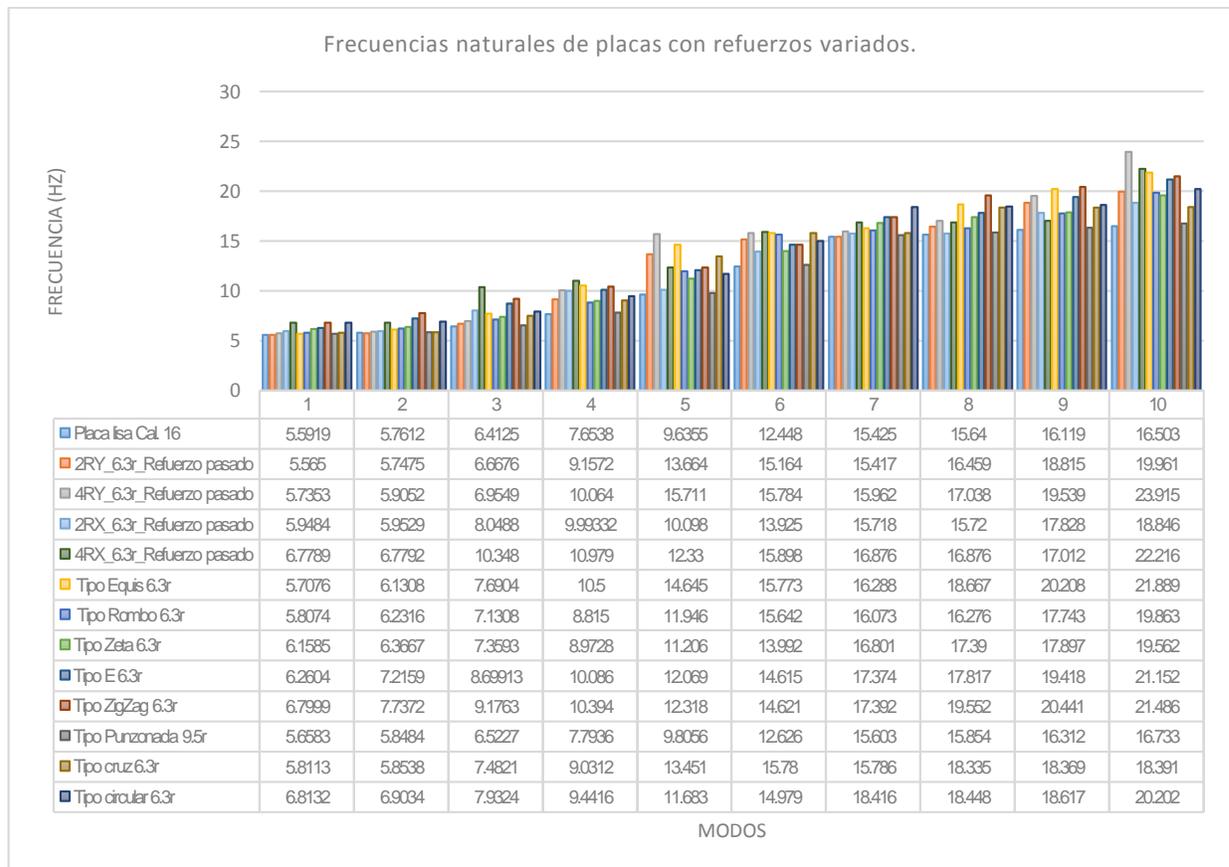


Figura 4.4 – Gráfica de frecuencias naturales de placas con refuerzos variados.

#### 4.7 Resultados de placas con refuerzos horizontales “RX”

Según el análisis de refuerzos variados al aumentar la cantidad de refuerzos se obtuvieron mayores frecuencias naturales, a continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis numérico bajo los siguientes parámetros:

- Mover posición de los refuerzos
- Alternar colocación del refuerzo
- Cambiar su longitud, recortando el refuerzo
- Incremento de la cantidad de refuerzos
- Variar el diámetro del dado

En el capítulo 3 se muestran los modelos utilizados y en el capítulo 5 se escribe el análisis de los resultados.

##### 4.7.1 Posición de los refuerzos para la configuración “4RX”

En la figura 4.5, se muestra el comportamiento de las frecuencias naturales al variar la posición los refuerzos en las placas 4RXU, 4RX, y se comparan las frecuencias naturales con la placa lisa.

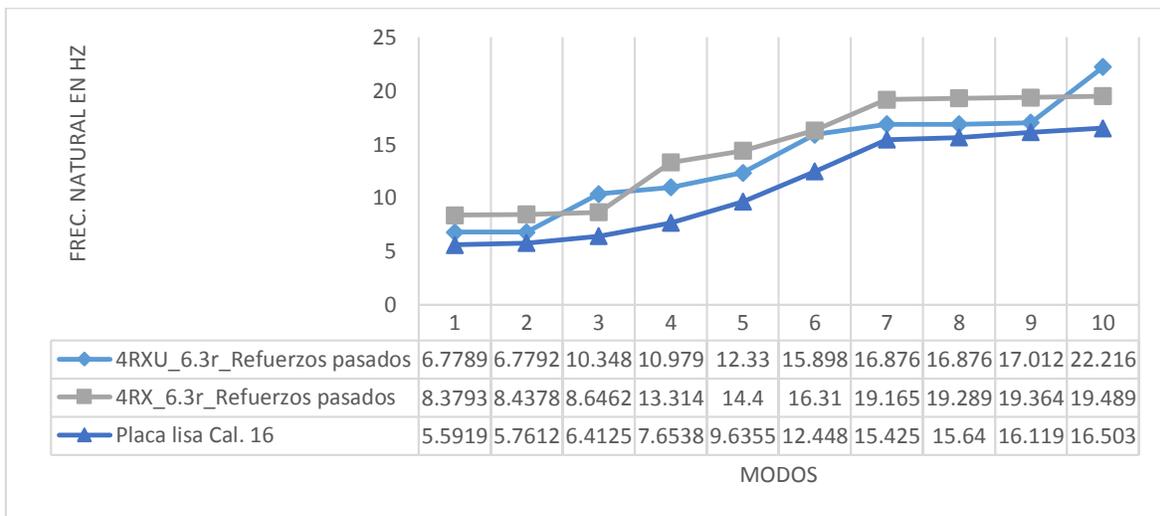


Figura 4.5- Gráfica del efecto de la posición de los refuerzos en la frecuencia natural para 4RX.

##### 4.7.2 Alternando la posición de los refuerzos para “4RX”

En la figura 4.6 se observa que existe una ligera disminución en las frecuencias naturales al utilizar refuerzos alternados, pues solo existe un cambio de dirección en la amplitud de

desplazamiento de la placa y el refuerzo conserva las propiedades de dimensión y dirección. En el capítulo 5 se describe el efecto que hay en los modos de vibración.

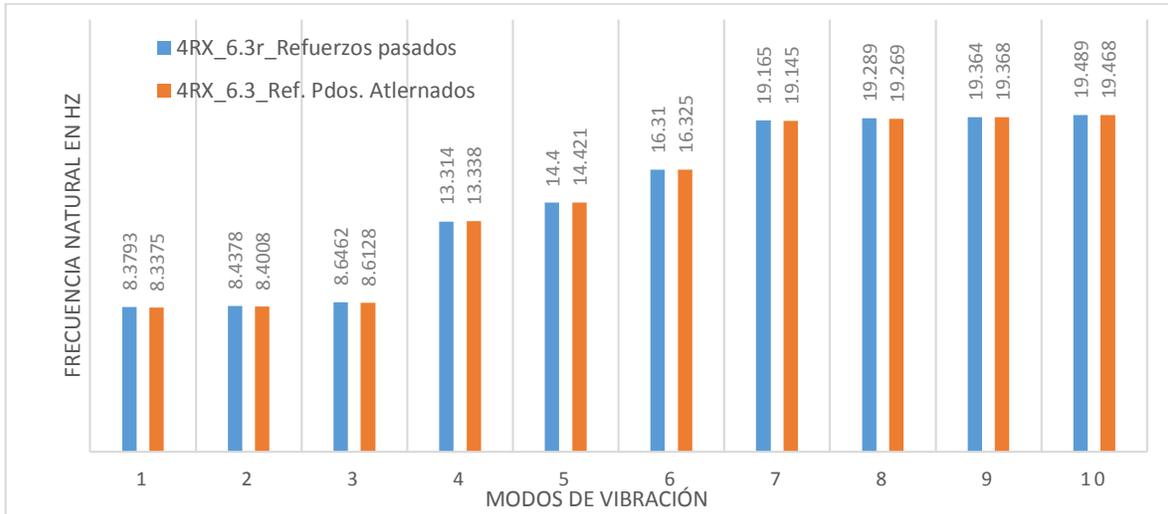


Figura 4.6- Gráfica del efecto en las frecuencias naturales de alternar la posición de los refuerzos en placas 4RX\_6.3r.

### 4.7.3 Refuerzos recortados

Se realizaron simulaciones de placas con refuerzos recortados: 4RXC, y como se observa en la gráfica de la figura 4.7 se tiene un mayor incremento de la rigidez al colocar refuerzos pasados. Las gráficas 10RXC, 16RXC y 21RXC, donde se comparan refuerzos pasados con recortados, mostraron el mismo comportamiento y se muestran en la sección de Anexos A.

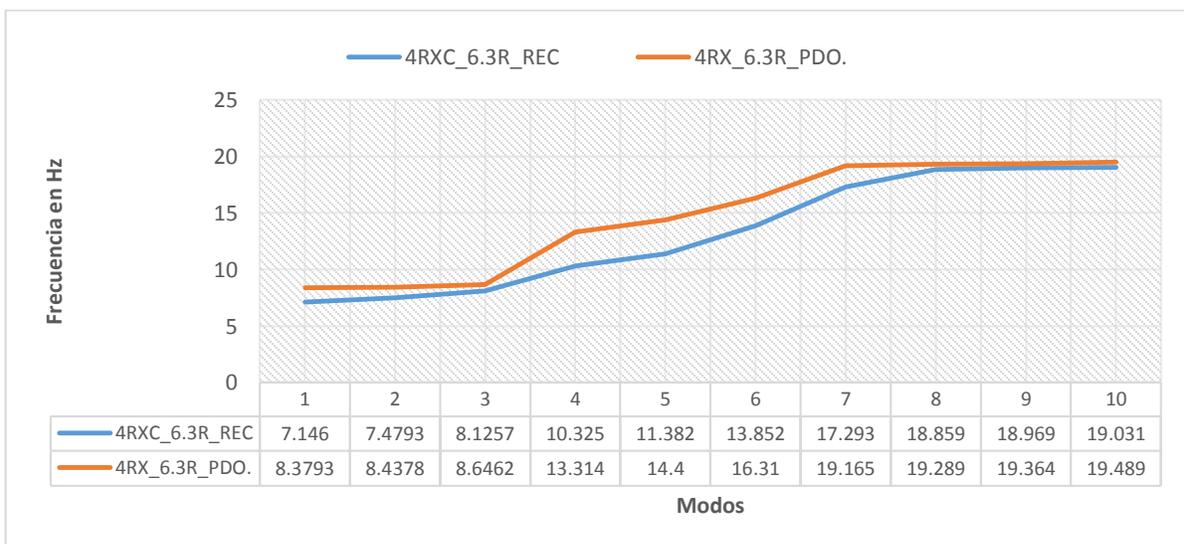


Figura 4.7-Gráfica, refuerzos recortados vs pasados.

#### 4.7.4 Incremento de la cantidad de refuerzos “RX”

Se incrementa la cantidad de refuerzos horizontales (RX) a lo largo de la placa se toma como base el radio de punzón de 6.3mm de radio y se utilizan la tabla 4.2, para la reducción de longitud de las configuraciones.

En la sección de Anexos A, se muestra la gráfica para los primeros 20 modos de vibración.

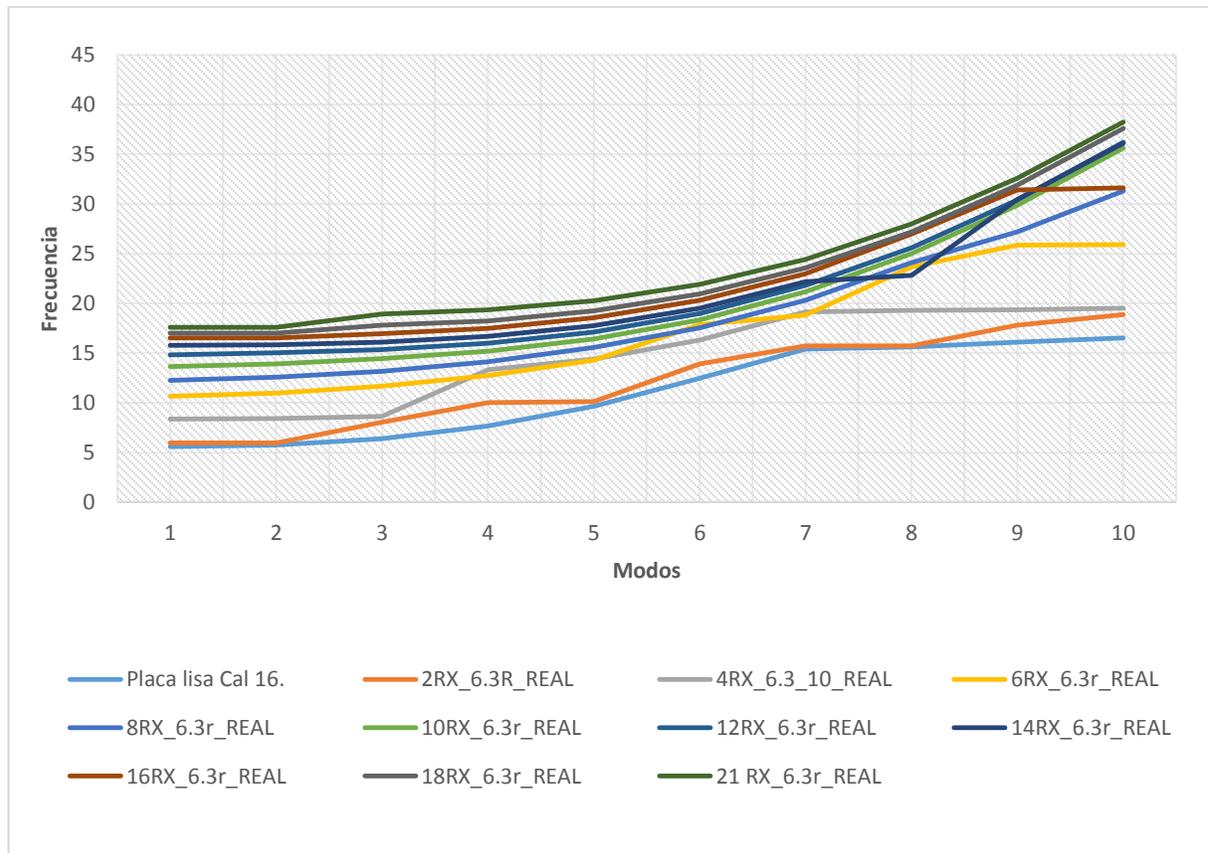


Figura 4.8- Gráfica Efecto del incremento de refuerzos RX\_6.3.

De la Figura 4.8, se muestra que el incremento de refuerzos horizontales en la placa (RX) tiene un efecto considerable sobre la distribución de rigidez en las placas, incrementando la frecuencia natural con cada refuerzo que se aplicó.

### 4.7.5 Incremento de los radios del dado

De acuerdo con la relación  $R_p(4 - 6)h$ , los radios del pueden variar, de cuatro seis veces el espesor de la placa para tener un embutido en un solo paso, en la tabla 3.1 se establecen las relaciones y ajustes comerciales para estos radios, en esta sección se muestran el efecto que tiene incrementar los radios de los dados, se analizaron placas con 4, 6, 10, 16 y 21 refuerzos horizontales “RX”, las tablas de reducción de longitud son 4.2, 4.5, 4.6.

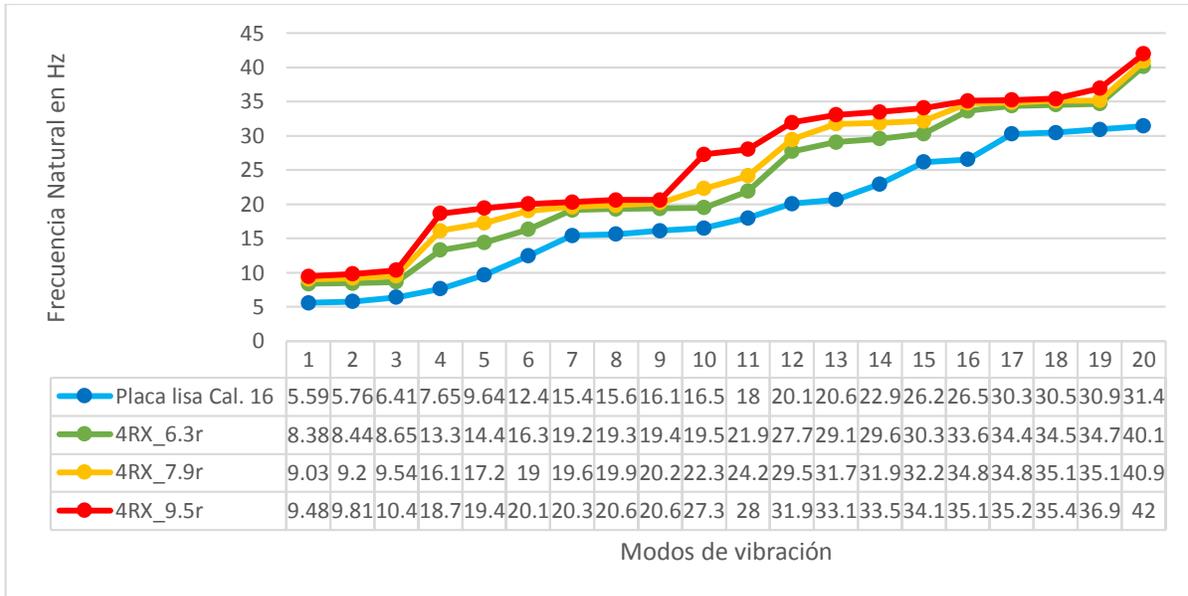


Figura 4.9-Gráfica de frecuencias naturales, al variar el radio del dado, para 4RX

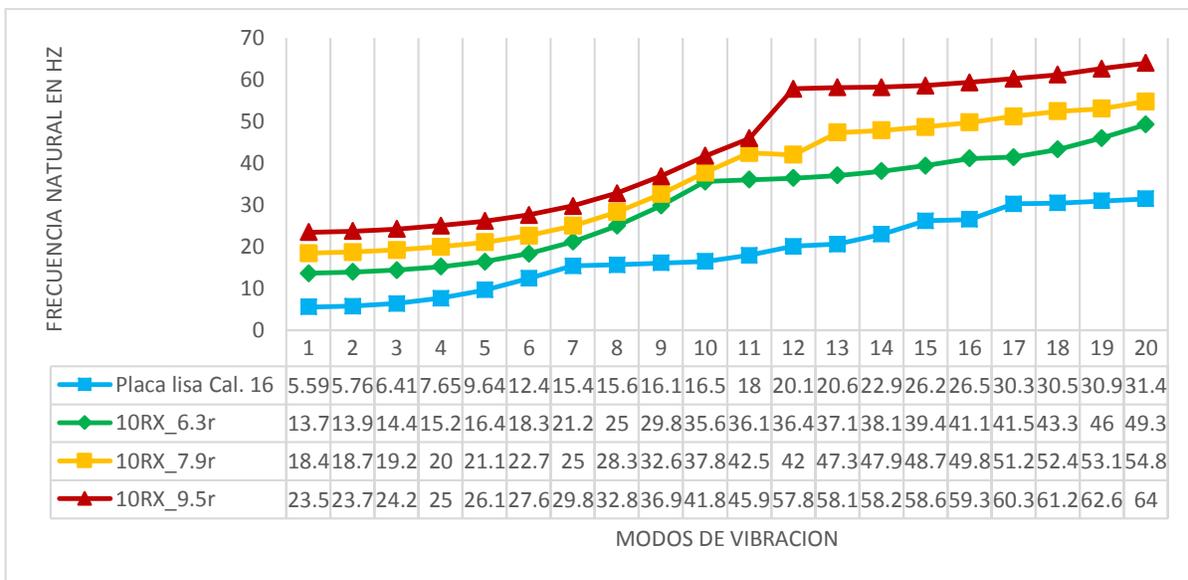


Figura 4.10 -Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del de dado para 10 RX.

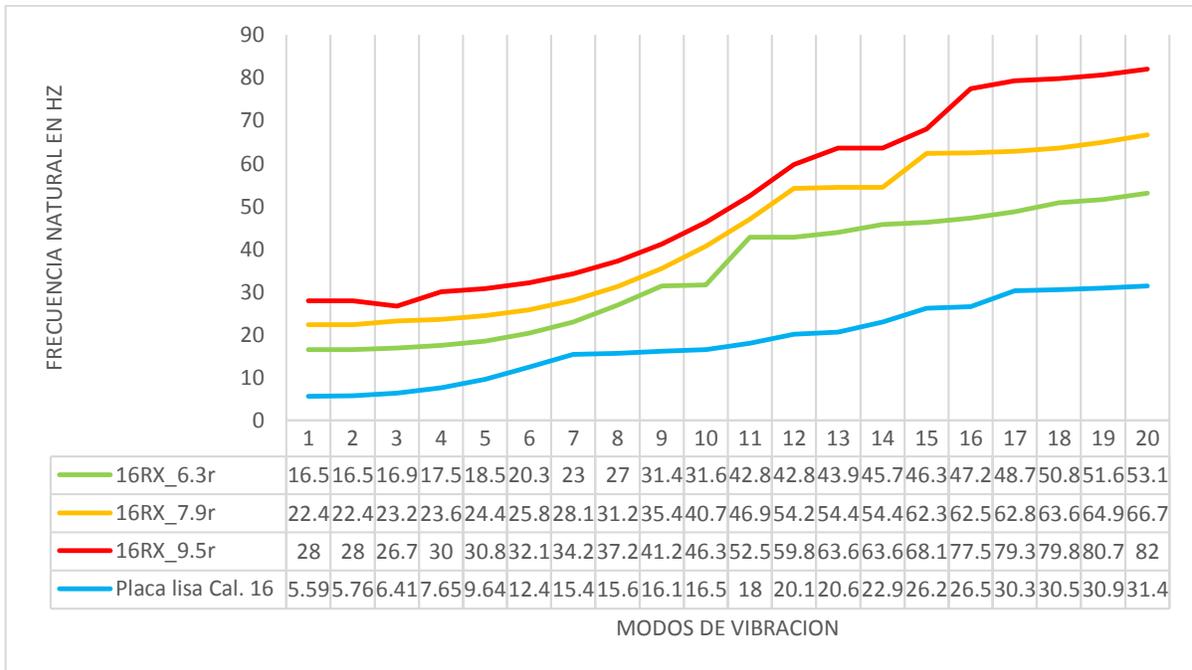


Figura 4.11-Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del dado, para 16 RX.

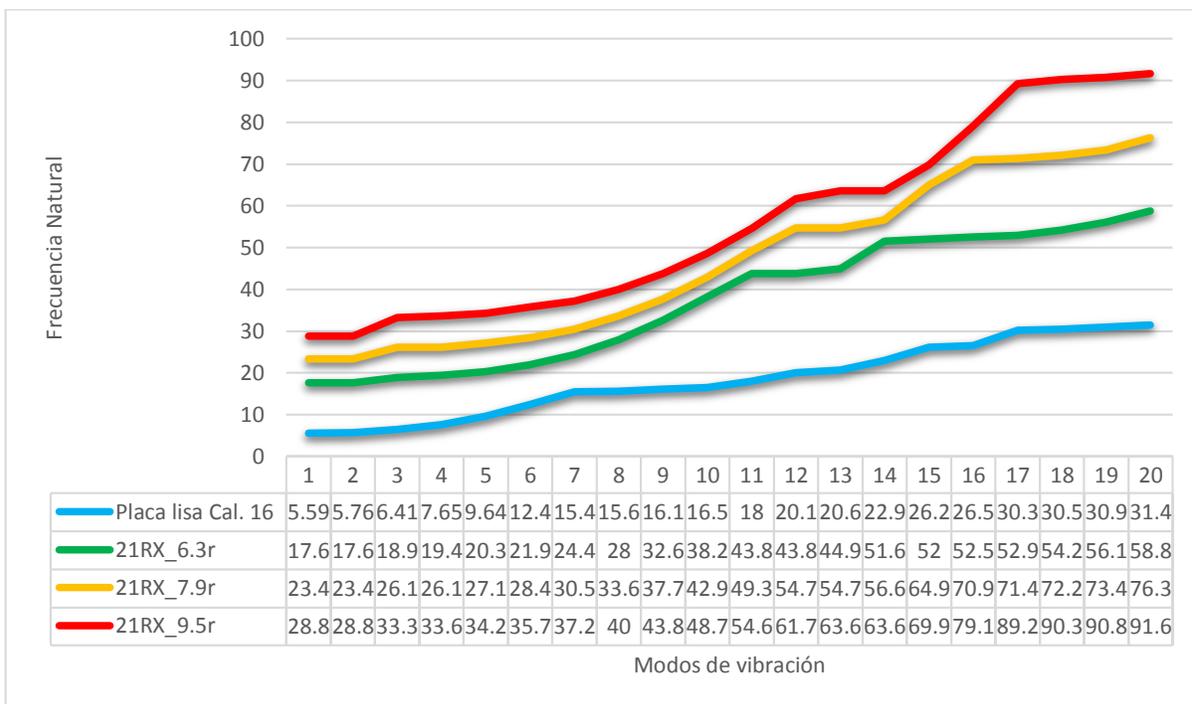


Figura 4.12-Gráfica de frecuencias naturales al variar el radio del dado, para 21 RX.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos, se observa el efecto que tienen los refuerzos sobre los modos de vibración y se describe que parámetros sirvieron para determinar las configuraciones que más alejaron las frecuencias naturales, además se describen los efectos más relevantes que se encontraron al colocar los refuerzos.

#### 5.1 Modos de vibración de la placa lisa

Una forma modal es un patrón de deformación que la estructura toma al vibrar en resonancia a una determinada frecuencia propia, a continuación, se muestran los 6 primeros modos de vibración de la placa lisa calibre 16.

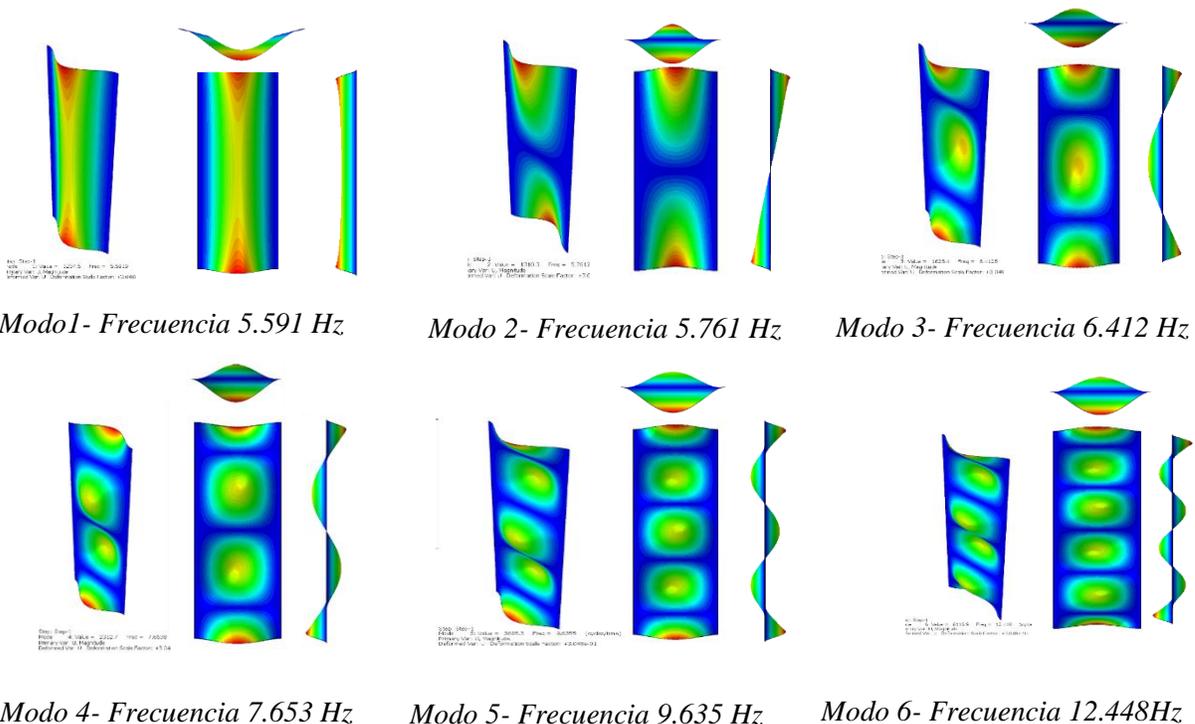


Figura 5.0- Seis primeros modos de vibración palca calibre 16.

Se puede observar que los primeros modos de vibración muestran concentraciones de amplitud de desplazamiento de mayor área por lo tanto se estiman bajas frecuencias, conforme aumentan las frecuencias naturales de la placa, la amplitud decrece y esto se

traduce a áreas de amplitud de desplazamiento más pequeñas en la placa, también existen zonas donde la amplitud de desplazamiento mínimas, estas se conocen como líneas nodales y siempre se forman adyacente a las condiciones de frontera de la placa.

## 5.2 Placas con refuerzos variados

Fue necesario analizar distintas placas bajo distintas formas de refuerzos, pues a partir de aquí se hicieron observaciones importantes que definieron el tipo de configuración elegida.

### 5.2.1 Incremento de frecuencia en placas con refuerzos variados

De la figura 4.4 se observa, que los tipos de refuerzos que obtuvieron un mayor incremento en la primera frecuencia natural, son la placa con 4 refuerzos horizontales pasados (4RX), el panel Tipo Zigzag y la Tipo circular, la frecuencia más baja la tiene la placa con dos refuerzos verticales pasados (2RY), inclusive más baja que la placa lisa.

De este análisis se puede observar que el variar la cantidad de refuerzos incrementa considerablemente la distribución de rigidez en la placa.

### 5.2.2 Modos de vibración de placas con refuerzos variados

Si se analiza el primer modo de vibración de la placa con refuerzos verticales 2RY\_6.3r y se compara con el primer modo de vibración de la placa lisa (figura 5.1), podemos observar que los refuerzos verticales favorecen la amplitud de desplazamiento en el centro de la placa creando una especie de punto de flexión, lo mismo sucede para 4RX\_6.3r, el efecto en las frecuencias naturales se muestra en la figura 4.4 de placas con refuerzo variados.

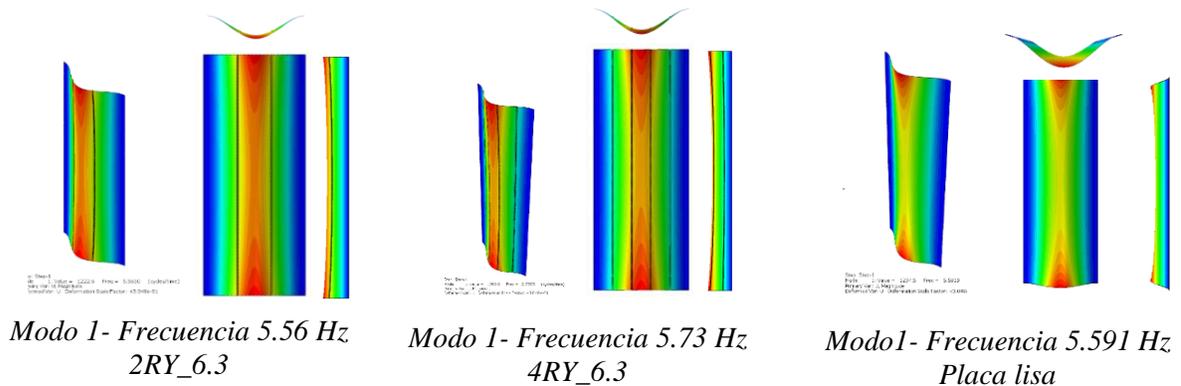


Figura 5.1- Comparación modos de vibración refuerzos verticales y placa lisa.

El segundo modo de vibración para “2RY” y “4RY” es igual al de la placa lisa y continúan iguales hasta el modo 6 donde se vuelve a repartir el mismo patrón:

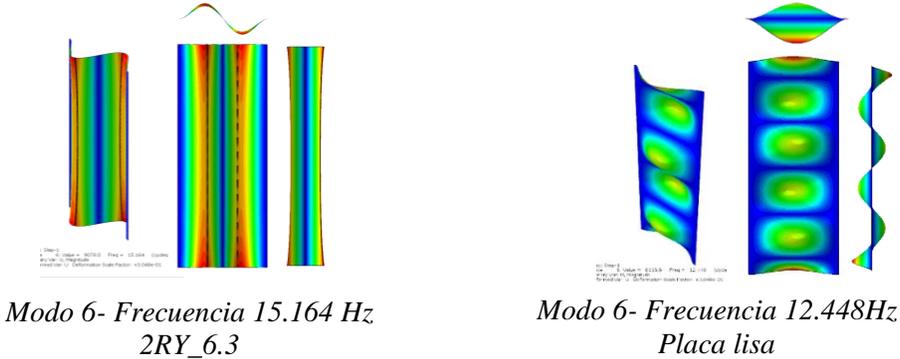


Figura 5.2- Modo 6, placa con dos refuerzos verticales y lisa.

Si se analiza el primer modo de vibración de cada configuración se puede observar que los refuerzos tienen un efecto en la forma de vibrar de la placa, en la placa lisa el primer modo de vibración tiene una mayor amplitud de desplazamiento en la parte superior e inferior de la placa, al colocar un refuerzo cerca de esta zona se puede observar que se cambia el desplazamiento en la placa, moviéndose hacia la zona central de la placa, tal es el caso el panel Tipo “rombo”, “Zeta”, “E”, “Zigzag” y “Circular” (figura 5.3).

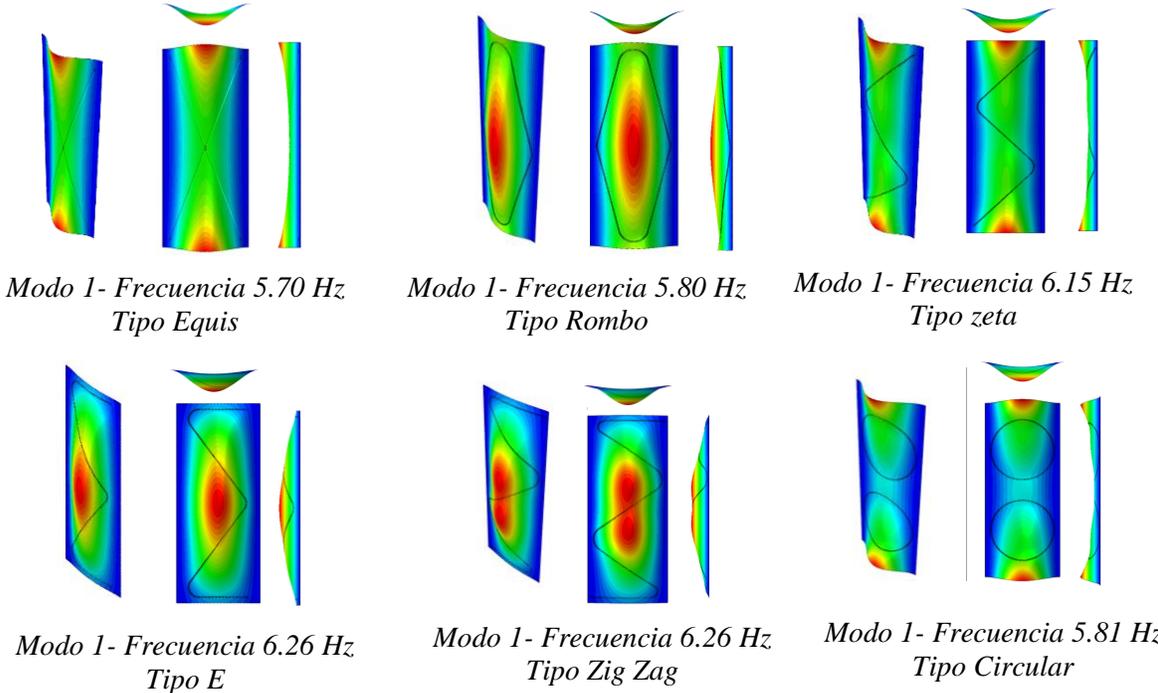
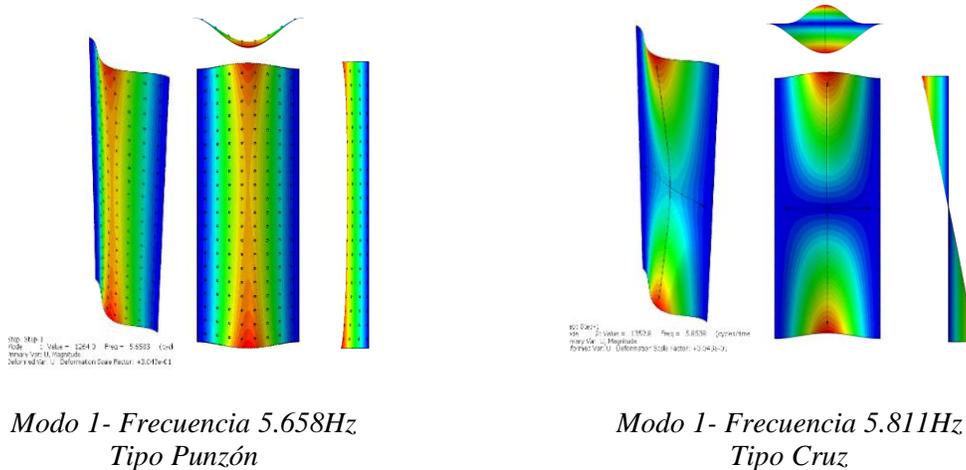


Figura 5.3- Primer modo de vibración de placas con refuerzos variados

Para el panel tipo punzando se utilizó un radio del punzón de 9.5mm, al ver la figura 4.4 y 5.4, se puede observar que en comparación con la placa lisa el incremento en la frecuencia es mínima y los modos de vibración toman las mismas formas que la placa lisa, se puede observar que efectivamente hay un incremento en la distribución de rigidez de la placa, pero no en los modos de vibración pues no existe continuidad en la forma de los refuerzos.

En la placa Tipo “cruz” el refuerzo horizontal suprime la amplitud de desplazamiento en el centro de la placa, como se muestra en la figura 5.4, creando una línea nodal en el lugar de aplicación del refuerzo, de tal manera que el modo 1 de la placa tipo cruz se comporta ahora como el modo 2 de la placa lisa, pues se rigidiza la placa en el centro de la placa, suprimiendo así la amplitud de desplazamiento en el centro de la placa tipo cruz.



*Figura 5.4- Primer modo, placa tipo punzón y tipo cruz.*

Un fenómeno que se puede observar con la aplicación de los refuerzos es que a ciertas frecuencias estos crean líneas nodales, aunque no existe un patrón que defina en qué modo o frecuencia natural se crean estas líneas nodales, se puede observar que sucede a frecuencias entre 30 y 100 Hz, como se muestra en la figura 5.5 donde se comparan con la placa lisa. Aunque los refuerzos estampados tienen un efecto en prácticamente todas las formas modales, no siempre se forman líneas nodales con la aplicación de estos. Para afectar un modo de vibración en particular se requiere hacer el análisis de la placa sin refuerzos, observar la forma modal particular y en el área de mayor amplitud de desplazamiento colocar el refuerzo estampado.

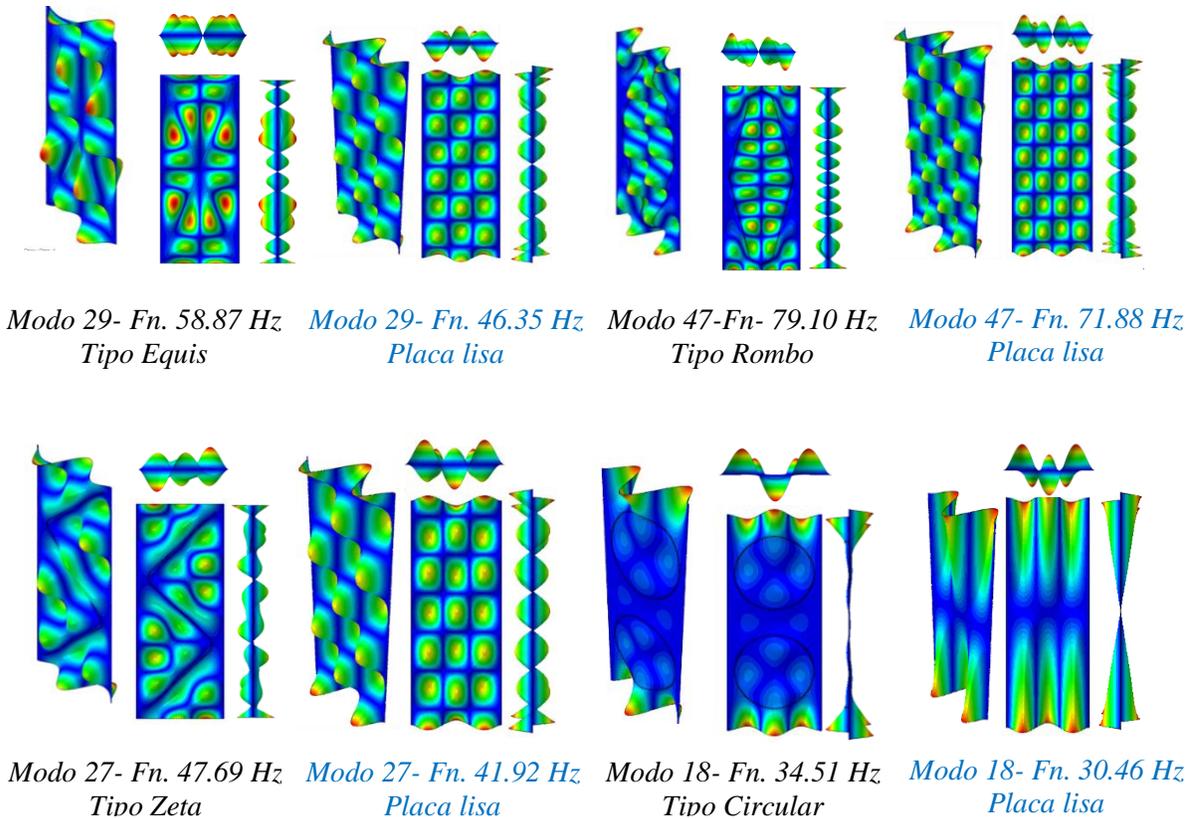
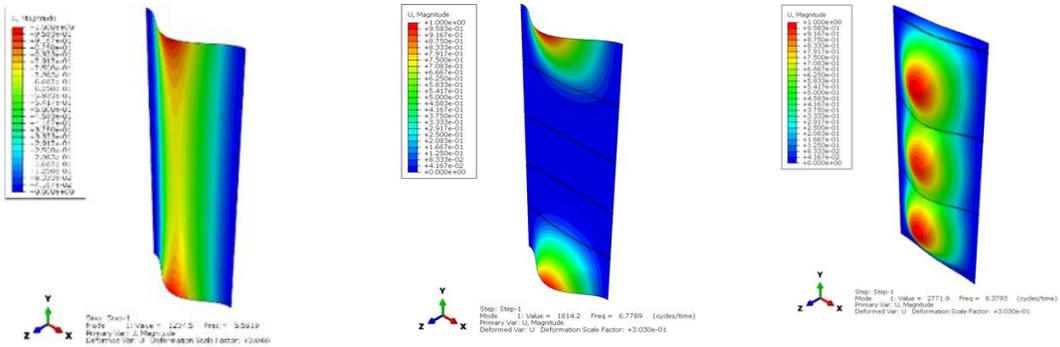


Figura 5.5-Patrones nodales en placas con refuerzos variados y placa lisa al mismo modo de vibración.

### 5.3 Posición de los refuerzos “RX”

Del análisis de placas con refuerzos variados se puede observar que los refuerzos que pasan cerca de los bordes, incrementaron la distribución de rigidez de la placa en mayor medida, pues afectan la amplitud de desplazamiento en el primer modo de vibración de la placa, por lo tanto, se modificó la posición de los refuerzos para 4RX. En el análisis de placas con refuerzos variados se colocaron los 4 refuerzos horizontales distribuidos uniformemente a lo largo de la placa, como se muestra en la figura 3.7, ahora bien para afectar directamente al primer modo de vibración de la placa se movió la posición del primer y último refuerzo a 100 mm del borde inferior y 100mm del borde superior, esto para evitar problemas de embutido, dejando un claro en los bordes superior e inferior de la placa, así el material puede “fluir” libremente por la matriz, durante el proceso de embutición.

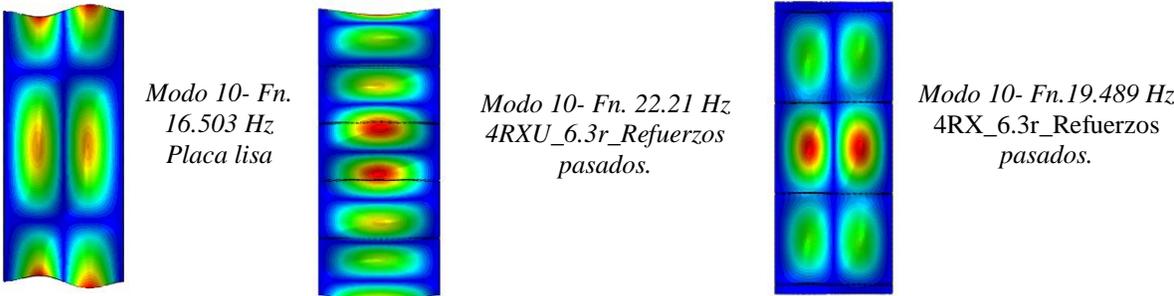


*Modo 1- Frecuencia 5.591 Hz Placa lisa      Modo 1- Frecuencia 6.778 Hz 4RXU\_6.3r\_Refuerzos pasados      Modo 1- Frecuencia 8.37 Hz 4RX\_6.3r\_Refuerzos Pasados*

*Figura 5.6- Comparación del efecto de los refuerzos al variar la posición, placa lisa y 4RX.*

Como se puede observar en la figura 5.6, en la configuración 4RX, al colocar los refuerzos cercanos al borde de la placa se afecta directamente la amplitud de desplazamiento en la parte superior de la placa, esto tiene un efecto en el incremento en la distribución rigidez de la placa, en la placa con 4RXU, donde los refuerzos se encuentran distribuidos uniformemente, se crea un espacio nodal de mayor área en el centro de la placa.

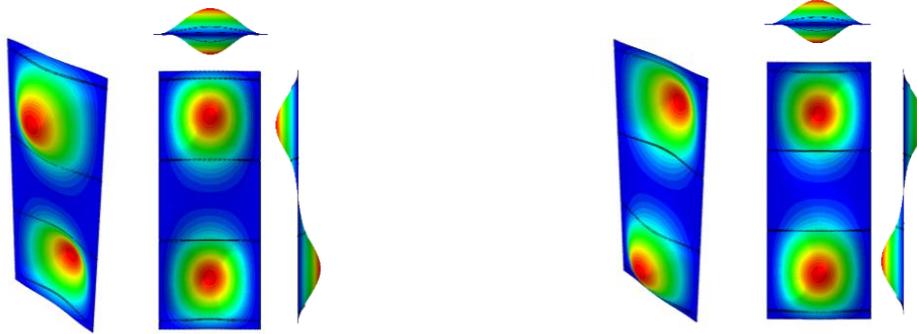
También se puede observar, que al colocar los refuerzos cerca de los bordes de la placa aumenta la frecuencia 1.6 Hz lo que es un 23.63% para la primera y segunda frecuencia natural. Para los modos 10 de las configuraciones analizadas, ver figura 5.7, para “4RXU” se tienen más líneas nodales, incrementado la distribución de rigidez en la placa, mientras que para “4RX” se crean dos líneas nodales más que en la placa lisa, afectando a la amplitud de desplazamiento inferior y superior de la placa.



*Figura 5.7- Modo 10 de vibración, en placa lisa y placas con 4 refuerzos horizontales.*

### 5.4 Refuerzos alternados

Si bien, en las frecuencias naturales no se aprecia un cambio considerable, en los modos 2, 4, 6, sucesivamente en números pares, se da un cambio de dirección en la amplitud de desplazamiento de la placa pues estas se alternan como se puede observar, en el modo 2 de la configuración “4RX”.



Modo 2- Frecuencia 8.437 Hz  
4RX\_6.3r

Modo 2- Frecuencia 8.437 Hz  
4RX\_6.3r\_REFUERZOS ALTERNADOS

Figura 5.8-Segundo modo de vibración de placas con refuerzos en una dirección y refuerzos alternados, para 4RX.

### 5.5 Refuerzos recortados

Los refuerzos recortados disminuyen las frecuencias naturales en comparación con las placas con refuerzos pasados, donde se muestra una mayor rigidez, para la primer frecuencia baja 6.025 Hz lo que es un 34.2% menos que el refuerzo pasado, en la sección de “anexos A” se pueden encontrar las gráficas del efecto de refuerzos pasados para 10 16 y 21 refuerzos. En la figura 5.9 se muestra la primera forma modal, con refuerzos recortados y refuerzos pasados, como se puede observar la placa con refuerzos pasados tiene patrones nodales mejor definidos.



Modo 1- Frecuencia 7.146 Hz  
4RXC\_6.3r\_Refuerzos recortados

Modo 1- Frecuencia 8.37 Hz  
4RX\_6.3r\_Refuerzos Pasados

Figura 5.9- Primer modo de vibración de una placa con refuerzos recortados y pasados.

### 5.6 Incremento de la cantidad de refuerzos “RX”

En la figura 4.8, se observó que el incremento en el número de refuerzos tiene un efecto importante en el aumento de rigidez de la placa. Ahora bien, otra consideración importante es que a partir de 16 refuerzos el incremento de la frecuencia es más homogénea, no se aprecian incrementos bruscos en las frecuencias naturales, como sucede de 4 a 14 refuerzos. En la figura 5.10 se muestran los tres primeros modos de vibración para las configuraciones con; 4, 6, 10, 16, 21 refuerzos horizontales con radio interno de 6.3mm, y se comparan con la placa lisa.

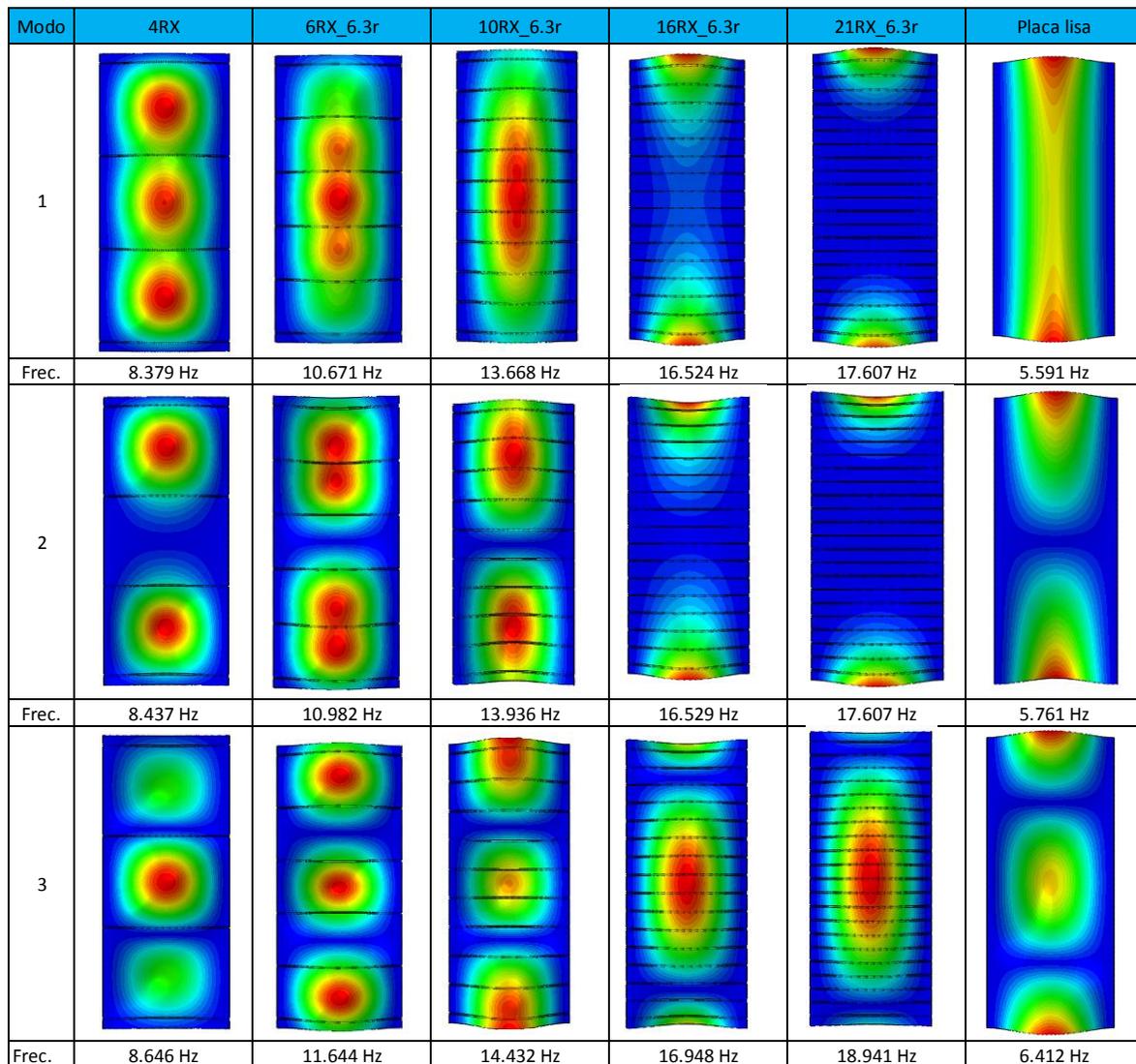


Figura 5.10-Secuencia de imágenes donde se muestra el efecto del incremento de los refuerzos en los tres primeros modos de vibración.

### 5.7 Variación del radio del dado

En el capítulo 4 de resultados, se puede observar en las figuras 4.9 a 4.12, que, al incrementar el radio del refuerzo, aumenta la distribución de rigidez en la placa y aleja las frecuencias naturales, esto sucede proporcionalmente al incrementar el radio del dado, para las placas con 16 y 21 refuerzos utilizando el dado de 9.5mm, se tiene un incremento de 22 y 23 Hz con respecto a la placa lisa, lo que se traduce a un incremento porcentual del 80%.

Para las configuraciones se utilizó la placa calibre 16, cabe destacar que mediante las relaciones de espesor y radio de embutido se pueden aplicar para distintos calibres de placas comerciales, sin embargo, para placas gruesas se recomienda no aplicar más de 16 refuerzos, pues se podrían presentar problemas de embutido al no existir material suficiente pues al aumentar el calibre de la placa se incrementa el radio del dado.

En la figura 5.11, se puede observar el primer modo de vibración para la configuración 16RX, con diferentes radios internos en el refuerzo. En la primera configuración de 6.3mm, se puede observar cómo se forma una mínima amplitud de desplazamiento en el centro de la placa, para la configuración de 7.5mm de radio, cambia el sentido de la amplitud de desplazamiento en los bordes inferior y superior de la placa y se muestra claramente un área nodal bien definida en el centro de la placa. Por ultimo para la placa con 9.5mm de radio interno, se muestra que la amplitud de desplazamiento se concentra igualmente en los bordes, pero con un área de menor amplitud de desplazamiento.

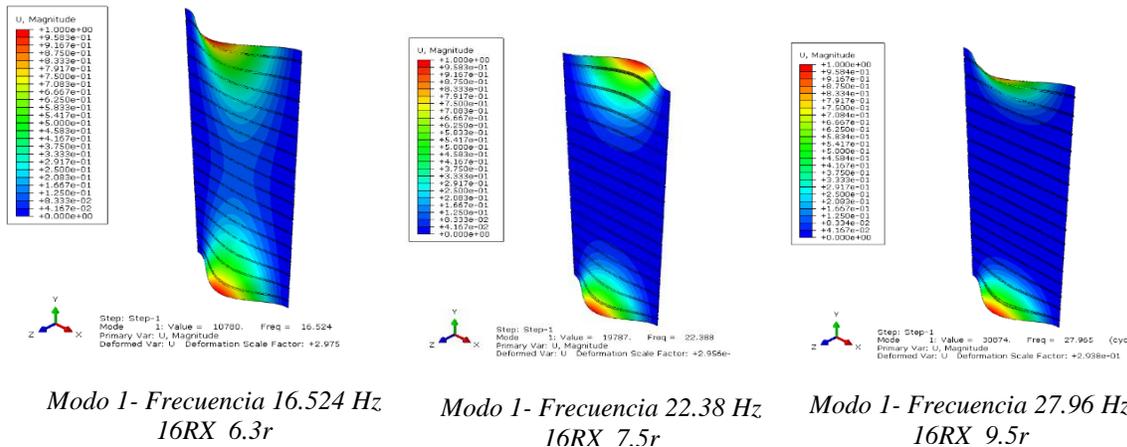


Figura 5.11-Primer modo de vibración placa con 16 refuerzos, radios 6.3mm, 7.5mm y 9.5mm.

---

## CAPÍTULO 6

---

### CASO DE ESTUDIO

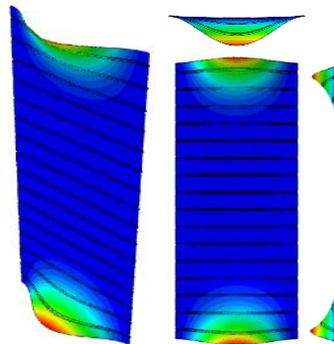
*En este capítulo se presenta el análisis de aislamiento acústico de la placa calibre 16 y se proponen nuevas configuraciones donde se cambia el espesor de la placa, hasta llegar a un caso donde la placa sea efectiva en la reducción de ruido para bajas, medias y altas frecuencias.*

#### **6.1 Análisis de aislamiento acústico de la placa 16RX\_9.5r, calibre 16**

Se selecciona la placa con 16 refuerzos horizontales y radio de 9.5 mm, puesto que para la configuración con 21 refuerzos se tiene un incremento muy pequeño de la frecuencia natural en compactación con la de 16 refuerzos, además de que una placa con 21 refuerzos, puede representar mayor complejidad para el proceso de conformado.

Ahora bien, para el análisis de aislamiento acústico, se puede realizar el cálculo para las tres zonas de acuerdo con la ley de masas, se realiza para una partición real:

**Zona 1:** Controlada por la rigidez: de acuerdo con la ley de masas el aislamiento está controlado por la rigidez del sistema y las frecuencias que inciden sobre el panel antes de la primera frecuencia natural no producen resonancia en la placa por lo tanto se tiene un buen aislamiento acústico, para la configuración 16RX\_9.5r la primera frecuencia de resonancia se encuentra a los 27.965 Hz.



*Figura 6.0- Primer modo de vibración placa 16RX\_9.5r, frecuencia 27.965 Hz.*

**Zona 2:** controlada por la masa, de acuerdo con la ecuación [2.51]:

$$Tl_{Real} = 20LogM + 20Lgf - 47dB$$

Donde M es la masa por unidad de superficie:

$$M = \frac{m}{A} = \frac{44.33Kg}{1.219m * 3.048m} = 11.931m^2$$

Para una frecuencia de incidencia de 31.5 Hz, que es la primera octava, se tiene:

$$Tl_{Real} = 20Log(11.931) + 20Log(31.5) - 47dB = 4.49 dB$$

A continuación, se muestra la tabla 5.0 donde se realizó el cálculo hasta la octava 2000 Hz.

Frecuencia de incidencia	TL, Pérdidas por transmisión
31.5 Hz	4.49 dB
63 Hz	10.52 dB
125 Hz	16.47 dB
250 Hz	22.49 dB
500 Hz	28.51 dB
1,000 Hz	34.53 dB
2,000 Hz	40.55 dB
4,000 Hz	46.57 dB
8,000 Hz	52.59 dB

Tabla 6.0-Análisis de aislamiento acústico de la configuración placa calibre 16.

**Zona 3:** controlada por el amortiguamiento interno, la frecuencia critica para la placa calibre 16 de acuerdo con la ecuación [2.52] es:

$$f_c = \frac{6.4 \times 10^4}{h} \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{B}} = \frac{6.4 \times 10^4}{0.00152m} \sqrt{\frac{7850 \frac{Kg}{m^3} (1 - (0.26)^2)}{17 \times 10^{10} \frac{Nw}{m^2}}} = 8630.12 Hz$$

Como se puede ver, la frecuencia critica se encuentra en el rango de muy altas frecuencias, cabe destacar que la frecuencia critica toma valores teóricos donde las perdidas por transmisión se suponen menores, pero en un caso real se necesitan tener condiciones ideales para que el aislamiento acústico en esta zona realmente sea nulo.

### 6.1.2 Conclusiones del análisis de aislamiento de la placa 16RX\_9.5r

Como se puede ver el aporte de este trabajo realmente se encuentra en el rango de las bajas frecuencias, sin embargo, utilizando una placa calibre 16, se logra llegar hasta 28Hz y se observa que el aislamiento es muy bajo. De acuerdo con la literatura, el ruido en frecuencias más bajas esta entre 15 y 100 Hz.

### 6.2 Placa calibre 13 y configuración 16RX\_15.87r

Para poder incrementar la primera frecuencia natural se analizó una placa calibre 13 de 2.29 mm de espesor, de acuerdo con la tabla 6.1, se elige el máximo radio del dado de 5/8", y en la tabla 5.2 se muestran los ajustes de longitud de la placa y la distancia entre refuerzos para el dado elegido.

$R_p(4 - 6)t$	Radios del Dado	Ajuste a perfiles comerciales	Pulg.
4X2.29mm	9.16 mm	9.5 mm	(3/8)
5X2.29mm	11.45 mm	12.6 mm	(1/2)
6X2.29mm	13.74 mm	15.87 mm	(5/8)

Tabla 6.1 -Radios del dado en base al espesor (h) de una Lámina calibre 13, con ajuste para perfiles comerciales.

Tabla de ajustes de longitud y de placa calibre 13, para dado de 5/8".				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
4	46.064046	933.9786513	3001.935954	66.79
10	115.160115	303.6488761	2932.839885	66.79
16	184.256184	266.3743816	2863.743816	66.79
21	241.8362415	162.8852349	2806.163759	66.79

Tabla 6.2- Ajuste de longitud de acuerdo a incremento de refuerzos, para placa calibre 13.

La primera frecuencia natural de la placa calibre 13 es de 8.42 Hz y con refuerzos de 5/8" de radio interior la primera frecuencia es de 54.71 Hz, el primer modo de ambas se muestra en la figura 6.1.

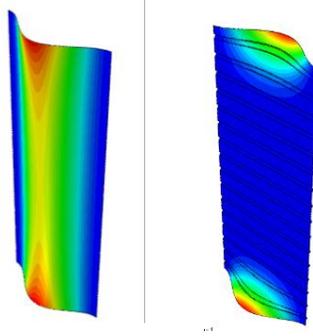


Figura 6.1-Primer modo de vibración placa lisa calibre 13 y 16RX\_15.87r

Utilizando la placa calibre 13, no se llega a la frecuencia deseada por lo tanto se duplica el espesor de la placa y se analiza una placa calibre 8.

### 6.3 Placa calibre 8 y configuración 16RX\_25.4r

Para tener un buen aislamiento acústico en el rango de las bajas, medias y altas frecuencias se duplica el calibre de la placa, utilizando así una placa calibre 8 con un espesor de 4.17mm. A continuación, se muestra las tablas para conformado de la placa y siguiendo la metodología anterior se selecciona el mayor calibre para el radio del dado y 16 refuerzos horizontales.

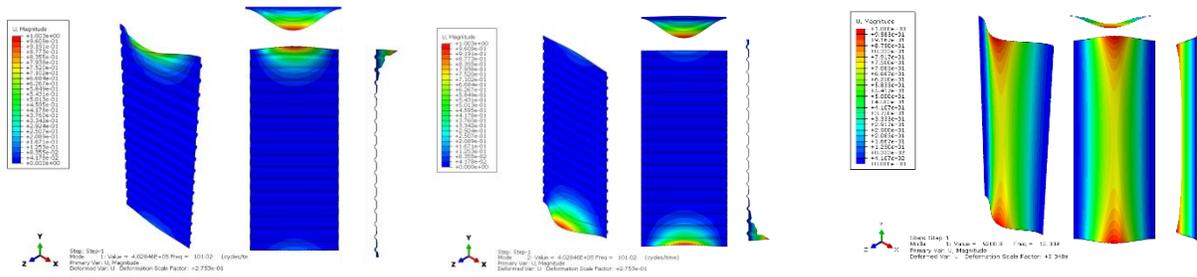
$R_p(4 - 6)t$	Radios para el dado	Ajuste a perfiles comerciales	Pulg.
<b>4X4.17mm</b>	16.08 mm	19.05 mm	(3/4)
<b>5X4.17mm</b>	20.85 mm	22.29mm	(7/8)
<b>6X4.17mm</b>	25.02 mm	25.4mm	(1)

Tabla 6.3 -Radios del dado en base al espesor (h) de una Lámina calibre 8, con ajuste para perfiles comerciales.

Tabla de reducción de longitud para placa calibre 8- Refuerzo de 25.4 mm				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos (mm)	Longitud Nueva de la placa(mm)	Masa en Kg
4	73.62836	924.7905467	2974.37164	121.63
10	184.0709	295.9921222	2863.9291	121.63
16	294.51344	170.2324373	2753.48656	121.63
21	386.54889	123.0725555	2661.45111	121.63

Tabla 6.4- Ajuste de longitud de acuerdo a incremento de refuerzos, para placa calibre 8.

Se realiza el análisis numérico para obtener modos y frecuencias naturales de la placa lisa y la placa 16RX\_25.4r.



Modo 1- Frecuencia 101.02 Hz  
16RX\_25.4r\_Refuertos Pasados

Modo 2- Frecuencia 101.02 Hz  
16RX\_25.4r\_Refuertos Pasados

Modo 1- Frecuencia 15.339 Hz  
Placa lisa calibre 8.

Figura 6.2-Dos primeros modos de vibración placa 16RX\_25.4r y Primer modo de placa calibre 8.

#### 6.4 Análisis de aislamiento acústico placa 16RX\_25.4r, calibre 8

Se analizan las 3 zonas de acuerdo con la ley de masas, para la primera zona la primera frecuencia de resonancia del panel se analizó previamente y es de 101.02 Hz, de la figura 5.2 se puede observar que el primer y segundo modo de vibración son una familia de formas modales, donde cambia el sentido de la amplitud, pero la frecuencia de resonancia es la misma para los dos primeros modos.

Para la zona controlada por la masa se calcula mediante la ecuación 2.8, y las frecuencias de incidencia se calculan hasta la octava de 2000 Hz.

Donde M es la masa por unidad de superficie:

$$M = \frac{m}{A} = \frac{121.63Kg}{1.219m * 3.048m} = 32.735m^2$$

Para una frecuencia de incidencia de 125 Hz

$$Tl_{Real} = 20Log(32.735) + 20Log(125) - 47dB = 25.23 dB$$

Frecuencia de incidencia	TL, Pérdidas por transmisión
125 Hz	25.23 dB
250 Hz	31.25 dB
500 Hz	37.27 dB
1,000 Hz	43.29 dB
2,000 Hz	49.31 dB

Tabla 6.5-Pérdidas por transmisión, de la configuración 16RX\_25.4r.

Para la zona controlada por el amortiguamiento se tiene:

$$f_c = \frac{6.4 \times 10^4}{h} \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu^2)}{B}} = \frac{6.4 \times 10^4}{0.00417m} \sqrt{\frac{7850 \frac{Kg}{m^3} (1 - (0.26)^2)}{17 \times 10^{10} \frac{Nw}{m^2}}} = 3,184Hz$$

#### 6.4.1 Conclusiones del análisis de aislamiento acústico 16RX\_25.4r\_ calibre 8

Se tiene una configuración efectiva para la reducción de ruido a bajas frecuencias, pues la primera frecuencia es superior a los 100Hz, también es efectiva para medias y altas frecuencias, por ejemplo, en la tabla 2.4 se citan las principales fuentes de contaminación acústica, para un espectro de ruido por tráfico en la octava de 500Hz el nivel de presión sonora es de 64 dB, con la configuración propuesta de acuerdo con la tabla 6.5, en la octava de 500 Hz se tiene una pérdida por transmisión de 37.27 dB, el nivel de ruido que se escucharía sería de 26.73 dB, la reducción es considerable y puede ser utilizado como barrera acústica, pero principalmente sería efectiva a bajas frecuencias, y se podría utilizar para aislar ruidos de compresores, o como un elemento estructural para fabricar cabinas acústicas, donde la principales fuentes de ruido se centran en las bajas frecuencias.

Ahora bien, este trabajo se delimito a el estudio de una barrera acústica. Sin embargo, se pueden tener muchas otras aplicaciones de utilidad. Por ejemplo; en los automóviles es muy común el ruido causado por el motor y partes de la suspensión hacia el interior del vehículo, el “Engine compartment” o compartimiento motor funciona como una barrera acústica que disminuye la transmisión de ruidos. Si se colocan refuerzos estampados se pueden tener un mejor control en la distribución de rigidez de la placa y así evitar problemas de coincidencia con las frecuencias de excitación del medio, teniendo así mejores perdidas por transmisión. De igual manera se puede utilizar para evitar la transmisión de ruido en carcasas de compresores o cualquier fuente de ruido a baja frecuencia como se explica el apartado (2.14) del capítulo 2.

---

## CAPÍTULO 7

---

### 7.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se evalúa numéricamente el efecto de refuerzos estampados en placas de calibre comercial con diferentes configuraciones de estampados.

Se determinaron parámetros dimensionales para modificar el radio del refuerzo sin afectar el espesor de la placa, teniendo un efecto de incremento en la distribución de rigidez de la placa y consecuentemente en sus frecuencias naturales. También se determinó que se puede afectar directamente cualquier modo de vibración, al colocar refuerzos en las zonas de mayor amplitud de desplazamiento. Se confirmó que la dirección de colocación adecuada de refuerzos está ligada estrechamente a las condiciones de frontera de la placa, esto se logró mediante el modelado de varias configuraciones de refuerzos. A continuación, se describen las conclusiones y recomendaciones obtenidas:

1. Se determinó que la colocación de refuerzos, verticales u horizontales, está ligada a las condiciones de frontera de la placa, por ejemplo, en el capítulo 5, se describe que los refuerzos verticales “RY” favorecen las amplitudes de desplazamiento en el centro de la placa, por esta razón las frecuencias son bajas para los primeros modos de vibración, caso contrario de los refuerzos horizontales que incrementan la distribución de rigidez en la placa y alejan sus frecuencias naturales.
2. Del análisis de placas con refuerzos variados que se muestra en el capítulo 4, se puede observar que las configuraciones donde los refuerzos se colocan cerca de los bordes inferior y superior de la placa tuvieron frecuencias naturales más altas, posteriormente se analizó la configuración 4RX donde se determinó que al colocar refuerzos cerca del borde se incrementa la distribución de rigidez en la placa, pues se afecta directamente al primer modo de vibración donde las amplitudes de desplazamiento se centran en los bordes superior e inferior de la placa. De este análisis se concluye que se puede afectar directamente un modo de vibración al colocar un refuerzo en el área de mayor amplitud de desplazamiento.

3. Se determinó que el alternar la posición del dado no tiene un efecto significativo sobre las frecuencias, al contrario, disminuyen muy ligeramente la distribución de rigidez de la placa, sin embargo, en los modos de vibración con número par, se puede observar que se alterna el sentido de la amplitud de desplazamiento de la placa, en comparación a la placa con refuerzos en una misma dirección, tal como se muestra en la figura 5.8.
4. Se determinó que al incrementar la cantidad de refuerzos en la placa (refuerzos horizontales), se incrementa la distribución de rigidez en la placa, teniendo así con cada refuerzo nuevo frecuencias naturales más altas. Si se observan los modos de vibración de placas con incremento de refuerzos se puede ver que se crean líneas nodales nuevas con cada refuerzo que se agrega.
5. Se determinó que, al combinar los radios mayores con mayor número de refuerzos, se obtienen los incrementos considerables en las frecuencias naturales de la placa. Por ejemplo, para la configuración 21RX\_9.5r se tienen para la primera frecuencia natural un incremento porcentual de 80% en comparación a la frecuencia natural de la placa lisa, este efecto se puede observar en la figura 4.12 del capítulo 4.
6. Se recomienda que para la colocación de refuerzos cercanos a los bordes de la placa se deje un claro entre el borde de la placa y el refuerzo como se muestra en el capítulo 3, figura 3.7. Esto con el objetivo de evitar problema de embutido, pues al colocar el refuerzo muy cercano al borde podría no contar con suficiente material para que fluya a través de la matriz.
7. Se recomienda que para tener mayor incremento en la distribución rigidez de la placa y alejar las frecuencias naturales, se coloquen refuerzos en las zonas de mayor amplitud de desplazamiento de la placa.
8. Se recomienda que para obtener resultados numéricos precisos se utilicen las tablas de reducción de longitud que se muestran en la sección de “anexos A”, donde se pueden encontrar para distintos calibres y se pueden combinar con las placas con refuerzos recortados.
9. Si se desean modelar geometrías más complejas se puede diseñar el producto mediante cualquier programa de diseño, extrayendo la superficie media del sólido e importarla en formato. IGES, al programa de elemento finito. Esto se traduce a un

elemento tipo Shell, donde el espesor se asigna en el programa de elemento finito. El tiempo de cálculo se reduce considerablemente si se sigue este método, el diagrama del procedimiento se encuentra en capítulo 3 de metodología.

### **7.1 Sugerencias para trabajos futuros**

- Evaluar el efecto de esfuerzos residuales al colocar los refuerzos, y el impacto que tiene en los modos y frecuencias naturales.
- Combinar las configuraciones propuestas con materiales compuestos.
- Realizar análisis acústico, para medir la difusión, refracción y pérdidas por inserción, del panel propuesto.
- Obtener experimentalmente las frecuencias naturales y modos de vibración.
- Medir la cantidad de radiación sonora producida por la placa, mediante un método estadístico de energía.
- Aplicar refuerzos a partes de carrocerías o chasis que presenten problemas de resonancia o ruidos.

REFERENCIAS

- Aguirre, Ureña .(2013). *Análisis del comportamiento acústico de paneles multicapa con chapa perforada*. Vasco.
- AHMSA, Altos. Hornos. (2013). Productos planos laminados en frío, lista de tablas.
- Altan, T. Gegel, G. (1983). *Metal Forming fundamentals and applications* . American Society for Metals .
- Campos Vázquez, Escamilla Nabarro, González López.(2013). Análisis experimental-numérico de la plantilla. *Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías*.
- Celigiüeta Lizarza, J. T. (2011). Método de los elementos finitos para análisis estructural. *Navarra*. Edificación, C. (2009). Documento Básico DB-HR Protección frente al Ruido. Environment, Department . (2001). *Report Low Frequency Noise Technical Research Support for DEFRA*. Northern Ireland.
- Felgar. (1950). Formulas for intergrals containing characteristic functions of a vibration beam. *Bureau of Engieneering Research, No.14*.
- Fernandez, Sanchez, Gil G. (2011). Anlisis diseño y aplicación de resonadores acusticos.
- Ferreira A.J.M., G.E. Fasshauer , R.C. Batra , J.D. Rodrigues.(2008). Static deformations and vibration analysis of composite and sandwich plates using, Elsevier
- Flores, P. (2003). *Manual de acústica, ruido y vibraciones*.
- Groover, Mikell. (2007)(1997). Fundamentos de manufactura moderna. *Ed. McGraw-Hill*.
- H. Felix, V. Bambill, A. Rossit. (2004). Desarrollo de un algoritom de cálculo para la implmentación del método Rayleighh Ritz en el calculo de frecuencias naturales de vibración de placas con complejidades diversas. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y diseño en Ingenieria*.
- Hacar, M. A. (1995). Frecuencias de vibración en placas planas.
- He, J. y Fu, Z. (2001). Modal análisis. *Butterworth Heinemann*.
- Honda Shinya, YoshihiroNarita, (2010), Natural frequencies and vibration modes of laminated composite, *Journal Sound and Vibration*
- Hull, A. J., Radcliffe, C. J., & Southward, S. C. (1993). Global active noise control of a one-dimensional acoustic duct using a feedback controller. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 488-494.
- Imtiaz, Shekh, Grondin . (2001). Plates, Stiffener Trapping In Stiffend Steel. *Structural Engineering*.
- Kirchhoff, G. (1976). *Fisica Mathematica*. The changing role of matematics .
- Leissa, Artur . (1969). Vibration of plates. *U.S. Government*.
- Mantari, J. (2012). A new trigonometric layerwise shear deformation theory for isotropic, laminated composite and sandwich plates. *International Journal Of Solids And Estructures*, 43-53.
- Mejía, Fernando . (2004). Modelamiento por elementos finitos de procesos de manufactura por deformación plástica. *Revista Ingenieria e Investigación No. 56*.
- Michel Moser, J. L. (2004). *Ingeniería Acústica , teoría y aplicaciones*. Berlin: Springer.
- Mindlin J. (1951). Influence rotatory inertia and shear in flextural motion of isotropic, elastic plates. *ASME Journal Of Applied Mechanics*, 31-38.
- Ordoñez, Jara. (2014). Study , design and implementation of an anechoic chamber for acoustic. *University, cececiiana*, 20-22.

- Oller, S Rita RAnge, Liz G Nallim, (2012), Análisis dinámico de placas laminadas mediante macro-elementos usando teoría trigonométrica de deformación por corte, *Mecánica computacional Vol XXXI*, 13-26.
- Osen, Lynn M. (1974). *Women in Mathematics*. MIT Press.
- P.Malekzadeh, A. (2014). Free vibration of quadrilateral laminated plates with carbon nanotube. *Thin-Walled Structures*, Elsevier .
- París Carballo, F. (2005). Teoría de la elasticidad. *Grupo de Elasticidad y Resistencia de*.
- Parra, P C. (1997). *Control activo del ruido: principios y aplicaciones*. Editorial CSIC-CSIC Press.
- Pedersen, C. B. (2002). Plate Theory. *Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering*.
- Polygal, Plazyt. (2013). Manual técnico de barreras acústicas . *The noise barriers*.
- Quintana M., G. O. (2012). Tratamiento variacional de placas laminadas con rótulas intermedias utilizando la teoría de primer orden. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mécanica. Volumen 16*, 41-56.
- Reddy J. (1993). *Finite Element Method*. Usa: McGraw Hill.
- Reissner (1945). The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plate. *American Society Of Mechanical Engineers Journal Of Applied Mechanics*, 69-76.
- Rodríguez, L. (2011). Fundamentos de conformado. *Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación*, 1-10.
- Serrano, Abad T., Magro A. (2009). Estudio de la tipología de pantallas acústicas. *Revista de ciencia y tecnología del medio ambiente*.
- Seung ho, Byung Hee Kim, Jin-Hyeong Kim , Nikola Vladimir , Tae Muk Choi. (2015). *Thin-Walled Structures*. Elsevier.
- Shimizu, Koyu.(2010). Conocimientos Prácticos de los Herramientales de Embutido. *Japan International Cooperation Agency*. 15-35.
- Simon, Peretzshner. (1997). Barreras acústicas y ruido de tráfico. *Instituto de acústica, Revista acústica*.
- Smaneh fard. (2013). Numerical study of noise barriers designs.
- TakashIshizuka, K. F. (2003). Performance of noise barriers with various edge. *Applied Acoustics* .
- Timosnko. (1959). *Theory of plates and Shells*. McGraw-Hill.
- Ullmann. (2007). Life and work of E.F.F. Chladni. *Eur. Phys. J*, 2-5.
- Urita. (2006). Fundamentos de acústica. *URSA*, 5-10.
- Valdés, J. G. (2010). Análisis aeroelástico de chimeneas de acero utilizando elementos no-lineales de lámina sin rotación. *Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería: Revista internacional*, 26(3), 233-240.
- Warbuton. (1974). The vibration of rectangular plates. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*.

## ANEXO A

### TABLAS

Propiedades físicas de algunos materiales:

Material	Densidad $Kg/m^3$	Módulo de Young $N/m^2 \times 10^{10}$	Módulo de cizallamiento $N/m^2 \times 10$	Módulo de Bulk $N/m^2 \times 10^{10}$	Relación de Poisson	Impedancia acústica, Ryls
	$\rho$	E	G	B	$\nu$	z
Aluminio	2700	7,1	2,4	7,5	0,33	13,0
Plomo	11000	1,65	0,55	4,2	0,44	13,6
Acero	7850	20,0	8.3	17,0	0,26	39,6

Lamina negra ASTM-A36:

Calibre	pulg.	mm.	3' x 6'	3' x 8'	3' x 10'	4' x 8'	4' x 10'	Kg./m. <sup>2</sup>
3	0.239	6.07	79.73	106.3	132.88	141.74	177.17	47.61
4	0.224	5.69	74.72	99.63	124.54	132.84	166.05	44.62
5	0.209	5.31	69.72	92.96	116.20	123.95	154.93	41.63
6	0.194	4.93	64.72	86.29	107.86	115.05	143.81	38.65
7	0.179	4.55	59.71	79.62	99.52	106.16	132.69	35.66
8	0.164	4.17	54.71	72.95	91.18	97.26	121.58	32.75
9	0.150	3.81	50.04	66.72	83.40	88.96	111.20	29.78
10	0.135	3.43	45.03	60.05	75.06	80.06	100.08	26.79
1/8	0.125	3.18	41.70	55.60	69.50	74.13	92.66	24.90
11	0.120	3.05	40.03	57.37	66.72	71.17	88.96	23.82
12	0.105	2.67	35.03	46.70	58.38	62.27	77.84	20.84
13	0.090	2.29	30.02	40.03	50.04	53.37	66.72	17.87
14	0.075	1.91	25.02	33.36	41.70	44.48	55.60	14.88
15	0.067	1.70	22.35	29.80	37.25	39.73	49.67	13.41
16	0.060	1.52	20.02	26.69	33.36	35.58	44.48	11.91
17	0.054	1.37	18.01	24.02	30.02	32.02	40.03	10.72
18	0.048	1.22	16.01	21.35	26.69	28.47	35.58	9.52
19	0.042	1.07	14.01	18.68	23.35	24.91	31.14	8.33
20	0.036	0.91	12.01	16.01	20.02	21.35	26.69	7.15
21	0.033	0.84	11.01	14.68	18.35	19.57	24.46	6.55
22	0.030	0.76	10.01	13.34	16.68	17.79	22.24	5.96
23	0.027	0.69	9.01	12.01	15.01	16.01	20.02	5.36
24	0.024	0.61	8.01	10.67	13.34	14.23	17.79	4.76
25	0.021	0.53	7.01	9.34	11.68	12.45	15.57	4.16
26	0.018	0.46	6.00	8.01	10.01	10.67	13.34	3.57
27	0.016	0.41	5.34	7.12	8.90	9.49	11.86	3.27
28	0.015	0.38	5.00	6.67	8.34	8.90	11.12	2.97
29	0.014	0.36	4.67	6.23	7.78	8.30	10.38	2.69
30	0.012	0.30	4.00	5.34	6.67	7.12	8.90	2.39
31	0.011	0.28	3.67	4.89	6.12	6.52	8.15	2.09
32	0.0097	0.25	3.24	4.31	5.39	5.75	7.19	1.93
33	0.009	0.23	3.00	4.00	5.00	5.34	6.67	1.79
34	0.0082	0.21	2.74	3.65	4.56	4.86	6.08	1.63

Tablas de reducción y aplicación de refuerzos para placa calibre 16:

Tabla de reducción para: (RXC) Refuerzo horizontal recortado				
cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos (mm)	Longitud Nueva de la placa(mm)	Masa en Kg
1	3.539322	N/A	3044.460678	44.3
2	7.078644	N/A	3040.921356	44.3
3	10.617966	N/A	3037.382034	44.3
4	14.157288	944.6142373	3033.842712	44.3
5	17.69661	707.5758475	3030.30339	44.3
6	21.235932	565.3528136	3026.764068	44.3
7	24.775254	470.5374577	3023.224746	44.3
8	28.314576	402.8122034	3019.685424	44.3
9	31.853898	352.0182628	3016.146102	44.3
10	35.39322	312.5118644	3012.60678	44.3
11	38.932542	280.9067458	3009.067458	44.3
12	42.471864	255.0480124	3005.528136	44.3
13	46.011186	233.4990678	3001.988814	44.3
14	49.550508	215.2653455	2998.449492	44.3
15	53.08983	199.6364407	2994.91017	44.3
16	56.629152	186.0913899	2991.370848	44.3
17	60.168474	174.2394704	2987.831526	44.3
18	63.707796	163.7818944	2984.292204	44.3
19	67.247118	154.4862712	2980.752882	44.3
20	70.78644	146.1691347	2977.21356	44.3
21	74.325762	138.6837119	2973.674238	44.3

Tabla de reducción para refuerzos con radio interno de 7.9mm				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
1	5.72504	N/A	3042.27496	44.3
2	11.45008	N/A	3036.54992	44.3
3	17.17512	N/A	3030.82488	44.3
4	22.90016	941.6999467	3025.09984	44.3
5	28.6252	704.8437	3019.3748	44.3
6	34.35024	562.729952	3013.64976	44.3
7	40.07528	467.9874533	3007.92472	44.3
8	45.80032	400.31424	3002.19968	44.3
9	51.52536	349.55933	2996.47464	44.3
10	57.2504	310.0832889	2990.7496	44.3
11	62.97544	278.502456	2985.02456	44.3
12	68.70048	252.6635927	2979.29952	44.3
13	74.42552	231.1312067	2973.57448	44.3
14	80.15056	212.9114954	2967.84944	44.3
15	85.8756	197.2946	2962.1244	44.3
16	91.60064	183.7599573	2956.39936	44.3
17	97.32568	171.917145	2950.67432	44.3
18	103.05072	161.4676047	2944.94928	44.3
19	108.77576	152.1791244	2939.22424	44.3
20	114.5008	143.8683789	2933.4992	44.3
21	120.22584	136.388708	2927.77416	44.3

Tabla de reducción para refuerzos con radio interno de 7.9mm				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
1	6.884516	N/A	3041.115484	44.3
2	13.769032	N/A	3034.230968	44.3
3	20.653548	N/A	3027.346452	44.3
4	27.538064	940.1539787	3020.461936	44.3
5	34.42258	703.394355	3013.57742	44.3
6	41.307096	561.3385808	3006.692904	44.3
7	48.191612	466.6347313	2999.808388	44.3
8	55.076128	398.9891246	2992.923872	44.3
9	61.960644	348.2549195	2986.039356	44.3
10	68.84516	308.7949822	2979.15484	44.3
11	75.729676	277.2270324	2972.270324	44.3
12	82.614192	251.3987098	2965.385808	44.3
13	89.498708	229.8751077	2958.501292	44.3
14	96.383224	211.6628289	2951.616776	44.3
15	103.26774	196.0523043	2944.73226	44.3
16	110.152256	182.5231829	2937.847744	44.3
17	117.036772	170.6852018	2930.963228	44.3
18	123.921288	160.2399242	2924.078712	44.3
19	130.805804	150.9552331	2917.194196	44.3
20	137.69032	142.6478779	2910.30968	44.3
21	144.574836	135.1712582	2903.425164	44.3

Tabla de reducción para placa calibre 13:

Tabla de reducción para refuerzos con radio interno de 15.87mm				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
1	11.5160115	N/A	3036.483989	66.79
2	23.032023	N/A	3024.967977	66.79
3	34.5480345	N/A	3013.451966	66.79
4	46.064046	933.9786513	3001.935954	66.79
5	57.5800575	697.6049856	2990.419943	66.79
6	69.096069	555.7807862	2978.903931	66.79
7	80.6120805	461.2313199	2967.38792	66.79
8	92.128092	393.6959869	2955.871908	66.79
9	103.6441035	343.0444871	2944.355897	66.79
10	115.160115	303.6488761	2932.839885	66.79
11	126.6761265	272.1323874	2921.323874	66.79
12	138.192138	246.3461693	2909.807862	66.79
13	149.7081495	224.8576542	2898.291851	66.79
14	161.224161	206.6750645	2886.775839	66.79
15	172.7401725	191.0899877	2875.259828	66.79
16	184.256184	177.5829211	2863.743816	66.79
17	195.7721955	165.7642378	2852.227805	66.79
18	207.288207	155.3359878	2840.711793	66.79
19	218.8042185	146.0664323	2829.195782	66.79
20	230.32023	137.7726195	2817.67977	66.79
21	241.8362415	130.3081879	2806.163759	66.79

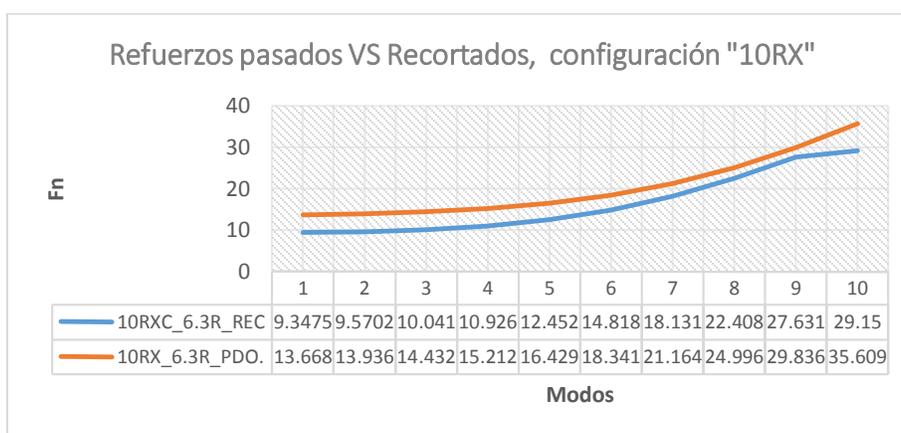
Tabla de reducción para placa calibre 8:

Tabla de reducción para refuerzos con radio interno de 25.4 mm				
Cantidad de refuerzos	Reducción en mm	Distancia entre Refuerzos en mm	Longitud Nueva de la placa en mm	Masa en Kg
1	18.4070902	N/A	3029.59291	121.63
2	36.8141804	N/A	3011.18582	121.63
3	55.2212706	N/A	2992.778729	121.63
4	73.6283608	924.7905464	2974.371639	121.63
5	92.035451	688.9911373	2955.964549	121.63
6	110.4425412	547.5114918	2937.557459	121.63
7	128.8496314	453.1917281	2919.150369	121.63
8	147.2567216	385.8204683	2900.743278	121.63
9	165.6638118	335.2920235	2882.336188	121.63
10	184.070902	295.992122	2863.929098	121.63
11	202.4779922	264.5522008	2845.522008	121.63
12	220.8850824	238.8286289	2827.114918	121.63
13	239.2921726	217.392319	2808.707827	121.63
14	257.6992628	199.2539029	2790.300737	121.63
15	276.106353	183.7066891	2771.893647	121.63
16	294.5134432	170.2324371	2753.486557	121.63
17	312.9205334	158.4424667	2735.079467	121.63
18	331.3276236	148.0395516	2716.672376	121.63
19	349.7347138	138.7925159	2698.265286	121.63
20	368.141804	130.5188524	2679.858196	121.63
21	386.5488942	123.0725553	2661.451106	121.63

## ANEXO B

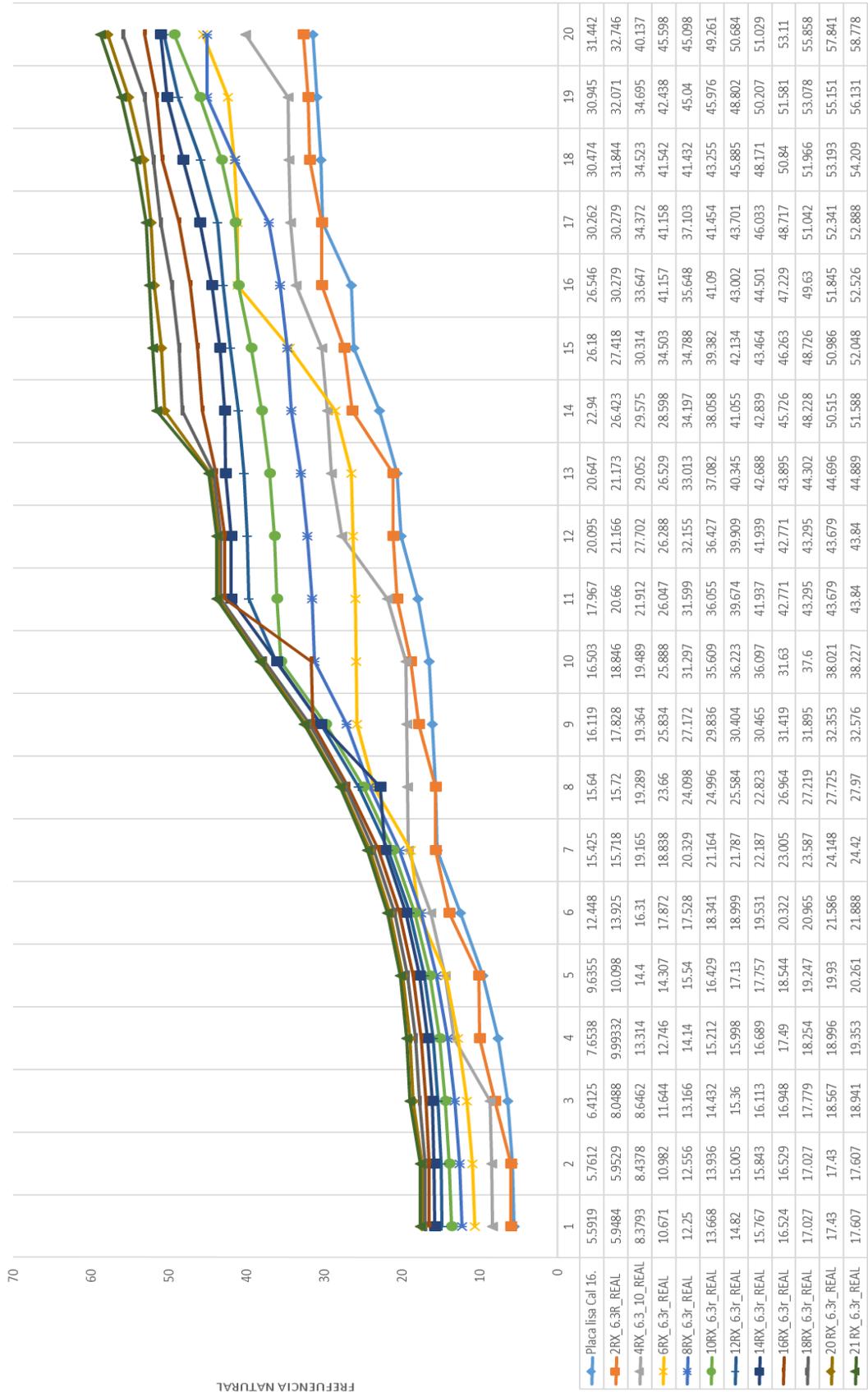
### GRAFICAS

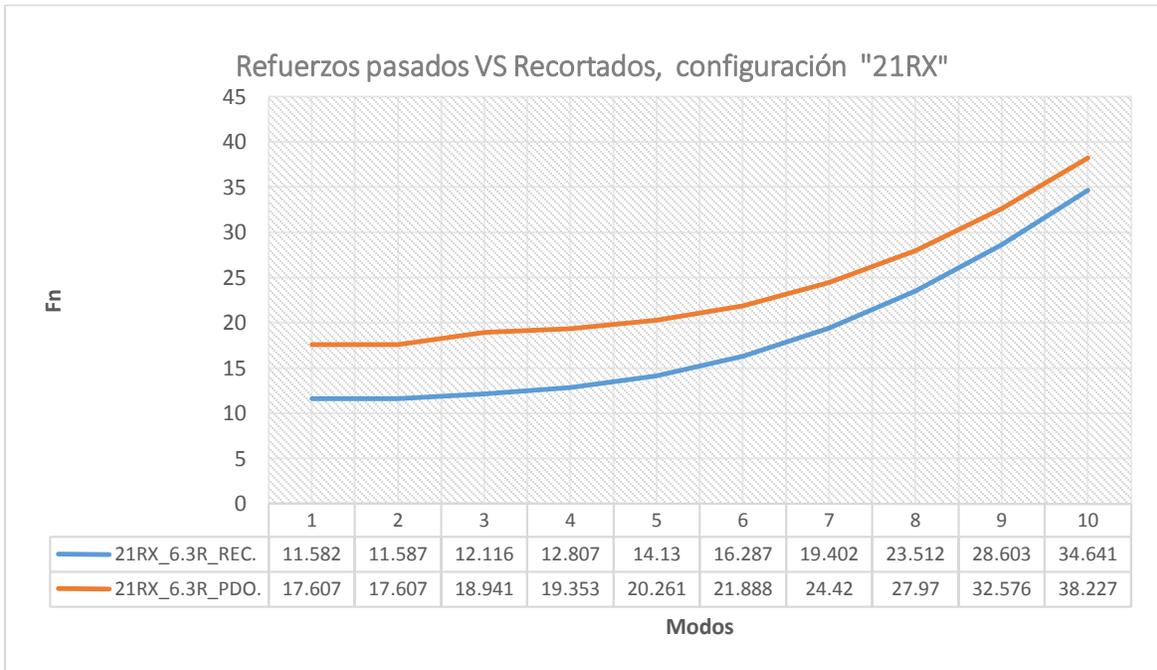
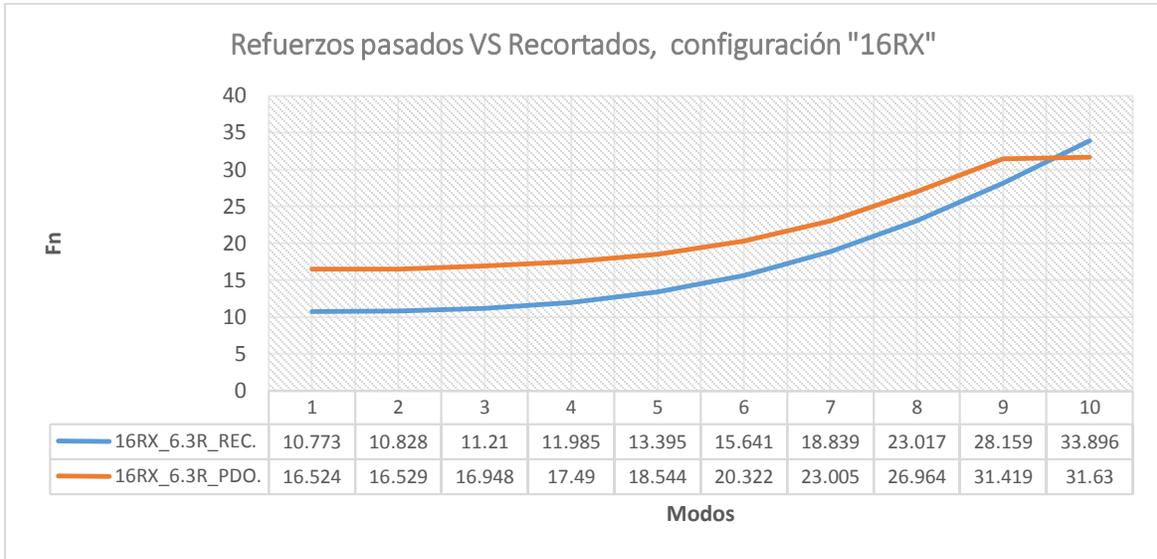
Se muestran las tablas de refuerzos pasados y refuerzos recortados para placa calibre 16, con incremento en el número de refuerzos:



En la siguiente grafica se muestra las 20 primeras frecuencias naturales en las placas con refuerzos variados, se incluye tabla de valores:

### PLACAS CON REFUERZOS VARIADOS






---

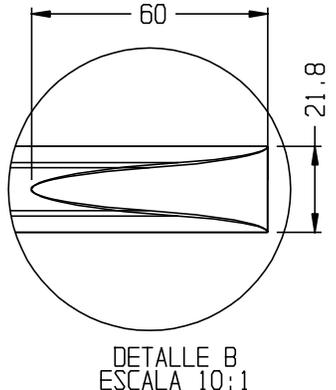
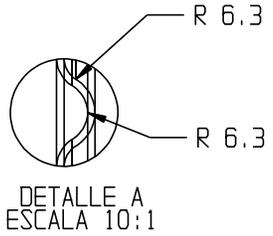
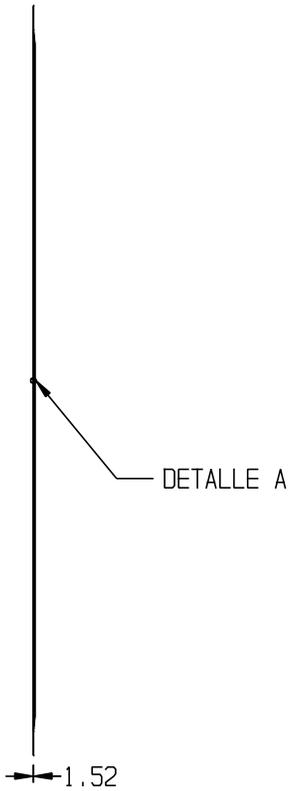
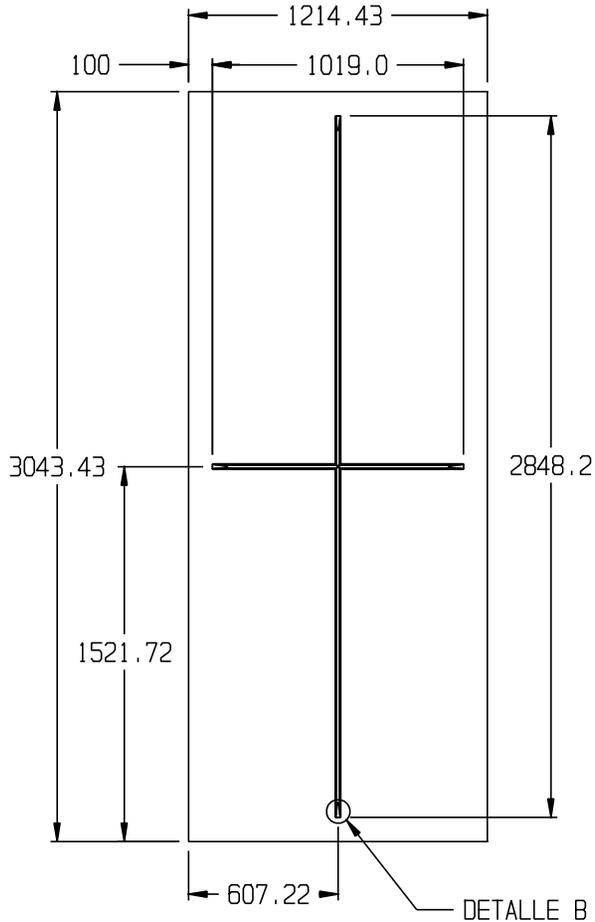
## ANEXO C

---

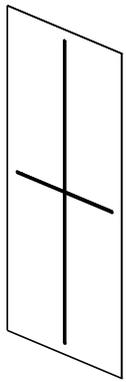
### SECCIÓN DE PLANOS

A continuación, se muestran los planos a detalle para cada configuración analizada.

PANEL CRUZ, RADIO DEL REFUERZO 6.3mm



CRUZ STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
PANEL CRUZ	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	CRUZ	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 200Gpa					Evaluación numerica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.
v: 0.26					
P: 7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n: 44.33Kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

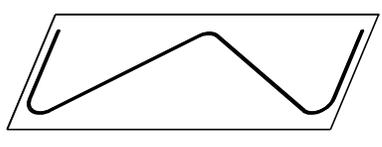
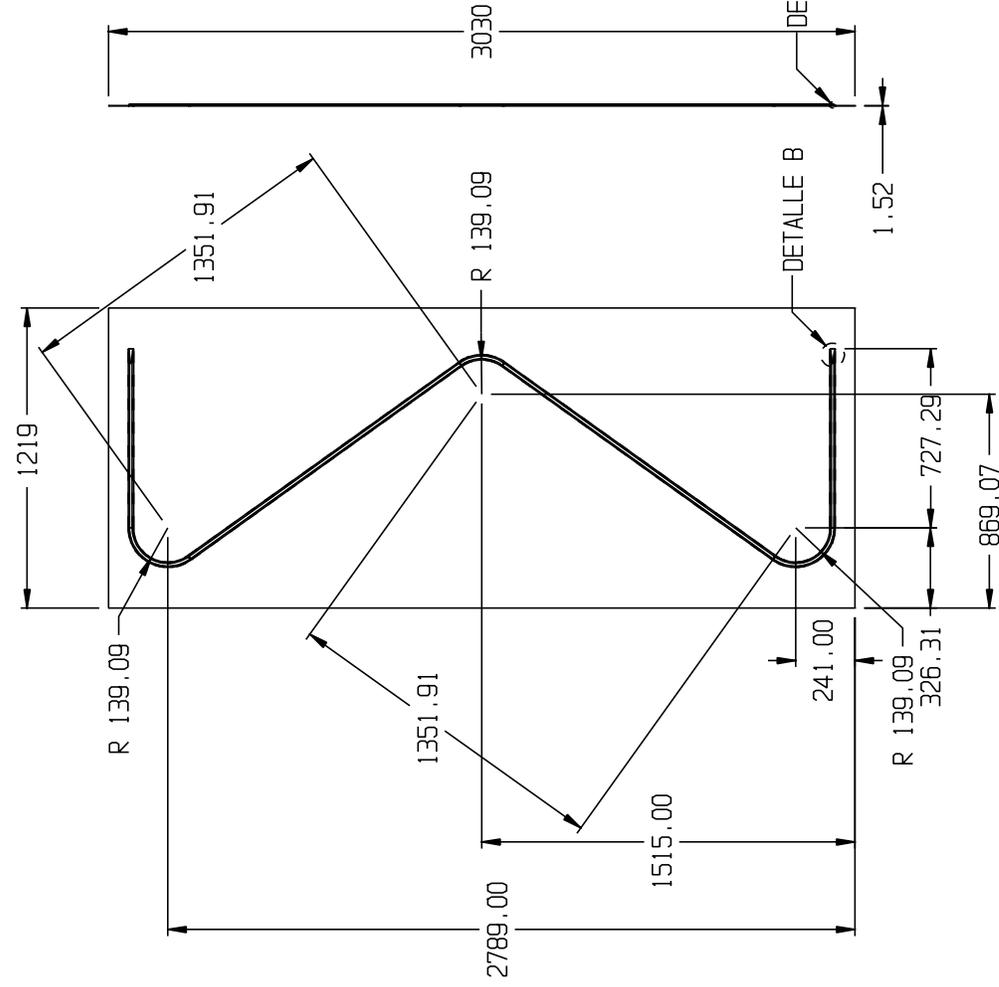


DISEÑO **I.H. ERICK JAIL ENRIQUEZ RUBIO**  
REVISO **DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN**

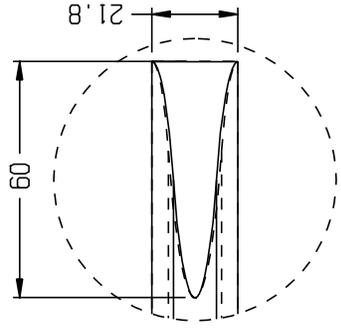
PANEL TIPO CRUZ

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0 ± 1.5 mm  
0.0 ± 0.25 mm  
0.000 ± 0.027 mm  
ANGULAR  
GRADOS: MIN. 30' ± 0.5"  
GRADOS: MIN. SEG. ± 0.5"

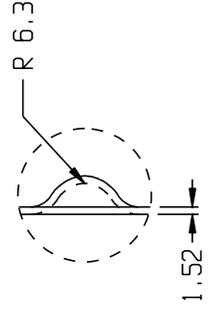
PANEL TIPO E, RADIO DEL REFUERZO 6.3 mm



ⓔ STK, LAMINA CAL, 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DETALLE B  
ESCALA 10:1



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
PANEL TIPO E	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	E	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 2005pa					
v:0.26					
P:7850 Kg/m3					
n:44.33kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

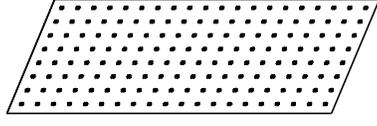
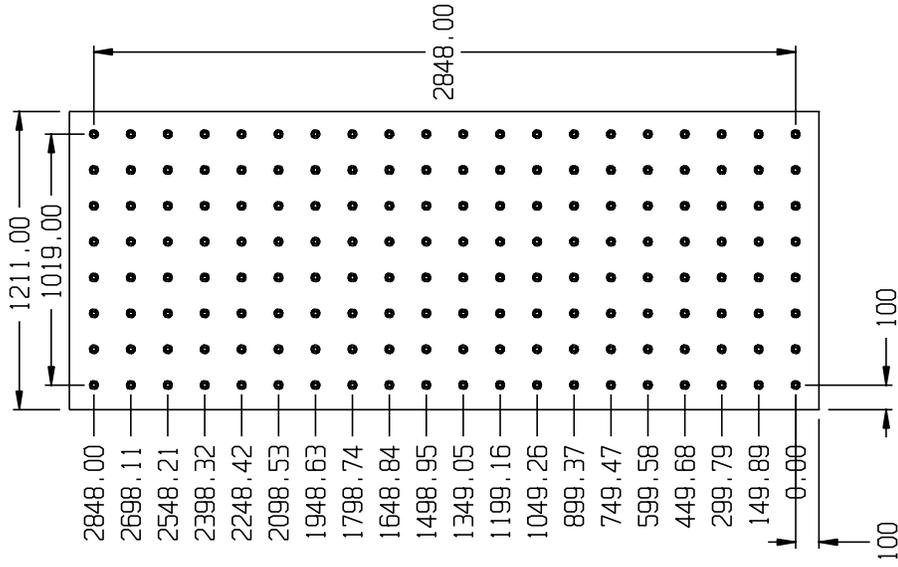
SEP  
Institutos Tecnológicos

DISEÑO	I. M. ERICK-JAEL ENRIQUÉZ RUBIO
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN

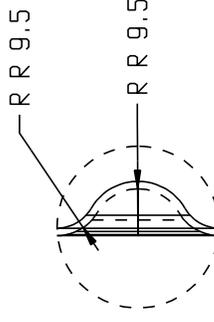
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
METRICO  
± 0.5 mm  
± 0.25 mm  
± 0.125 mm  
± 0.0625 mm  
± 0.03125 mm  
± 0.015625 mm  
± 0.0078125 mm  
± 0.00390625 mm  
± 0.001953125 mm  
± 0.0009765625 mm  
± 0.00048828125 mm  
± 0.000244140625 mm  
± 0.0001220703125 mm  
± 0.00006103515625 mm  
± 0.000030517578125 mm  
± 0.0000152587890625 mm  
± 0.00000762939453125 mm  
± 0.000003814697265625 mm  
± 0.0000019073486328125 mm  
± 0.00000095367431640625 mm  
± 0.000000476837158203125 mm  
± 0.0000002384185791015625 mm  
± 0.00000011920928955078125 mm  
± 0.000000059604644775390625 mm  
± 0.0000000298023223876953125 mm  
± 0.00000001490116119384765625 mm  
± 0.000000007450580596923828125 mm  
± 0.0000000037252902984619140625 mm  
± 0.00000000186264514923095703125 mm  
± 0.000000000931322574615478515625 mm  
± 0.0000000004656612873077392578125 mm  
± 0.00000000023283064365386962890625 mm  
± 0.000000000116415321826934814453125 mm  
± 0.0000000000582076609134674071765625 mm  
± 0.00000000002910383045673370358828125 mm  
± 0.000000000014551915228366851794140625 mm  
± 0.0000000000072759576141834258970703125 mm  
± 0.00000000000363797880709171294853515625 mm  
± 0.0000000000018189894035458564742676923125 mm  
± 0.00000000000090949470177292823713384615625 mm  
± 0.0000000000004547473508864619185673078125 mm  
± 0.00000000000022737367544323095928365390625 mm  
± 0.000000000000113686837721615479641826953125 mm  
± 0.0000000000000568434188608077398209134765625 mm  
± 0.0000000000000284217094304038699104578125 mm  
± 0.00000000000001421085471520193495522890625 mm  
± 0.000000000000007105427357600967477614453125 mm  
± 0.0000000000000035527136788004837388072265625 mm  
± 0.0000000000000017763568394002418694036328125 mm  
± 0.00000000000000088817841970012093470181640625 mm  
± 0.0000000000000004440892098500604673509078125 mm  
± 0.00000000000000022204460492503023367545390625 mm  
± 0.000000000000000111022302462515116837726953125 mm  
± 0.000000000000000055511151231255584188689765625 mm  
± 0.00000000000000002775557561562779209444238125 mm  
± 0.000000000000000013877787807813896047221190625 mm  
± 0.0000000000000000069388939039069480236105953125 mm  
± 0.00000000000000000346944695195347401180529765625 mm  
± 0.000000000000000001734723475976737005902648125 mm  
± 0.0000000000000000008673617379883685029513240625 mm  
± 0.0000000000000000004336808689941842514756623125 mm  
± 0.0000000000000000002168404344970921257378315625 mm  
± 0.0000000000000000001084202172485460628689178125 mm  
± 0.0000000000000000000542101086242730314444490625 mm  
± 0.00000000000000000002710505431213651572222453125 mm  
± 0.000000000000000000013552527156068258861112265625 mm  
± 0.000000000000000000006776263578034129430561328125 mm  
± 0.000000000000000000003388131789017064721528065625 mm  
± 0.0000000000000000000016940658945085323607640328125 mm  
± 0.0000000000000000000008470329472542661800382065625 mm  
± 0.00000000000000000000042351647362713309001910328125 mm  
± 0.000000000000000000000211758236813565450009551640625 mm  
± 0.00000000000000000000010587911840678272500477578125 mm  
± 0.00000000000000000000005293955920339136250238890625 mm  
± 0.000000000000000000000026469779601695681251194453125 mm  
± 0.0000000000000000000000132348898008478406255972265625 mm  
± 0.0000000000000000000000066174449004239203127868125 mm  
± 0.00000000000000000000000330872245021196015639440625 mm  
± 0.000000000000000000000001654361225105980078197223125 mm  
± 0.00000000000000000000000082718061255299003909860625 mm  
± 0.000000000000000000000000413590306276495019549303125 mm  
± 0.00000000000000000000000020679515313824750977465625 mm  
± 0.00000000000000000000000010339757656912375488873125 mm  
± 0.000000000000000000000000051698788284561877444365625 mm  
± 0.0000000000000000000000000258493941422809387222178125 mm  
± 0.00000000000000000000000001292469707114404936111090625 mm  
± 0.000000000000000000000000006462348535572024680555453125 mm  
± 0.0000000000000000000000000032311742677860123402777265625 mm  
± 0.000000000000000000000000001615587133893006170138865625 mm  
± 0.000000000000000000000000000807793566946503050069428125 mm  
± 0.0000000000000000000000000004038967834732515250347140625 mm  
± 0.0000000000000000000000000002019483917366257625017353125 mm  
± 0.000000000000000000000000000100974195868312876250086765625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000504870979341643812500433828125 mm  
± 0.000000000000000000000000000025243548967082190625002169140625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000126217744835410953125001084578125 mm  
± 0.000000000000000000000000000006310887241770547656250005422890625 mm  
± 0.000000000000000000000000000003155443620885237812500027114453125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000157772181044261890625000135572265625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000788860905221309453125000067786128125 mm  
± 0.0000000000000000000000000000003944304526106547656250000338930640625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000001972152263053273812500001694653203125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000098607613152663690625000008473266015625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000049303806576331845312500000423663303125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000002465190328816659265625000002118316515625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000123259516440832963281250000010591582578125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000006162975822041648164062500000052957912890625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000003081487911020824082265625000000264789564453125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000154074395551041204113281250000001323947822265625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000770371977755206020566406250000000661973911128125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000038518598887760301028320312500000003309869555625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000001925929944388015051416015625000000016549347778125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000096296497219440075270800781250000000082746738890625 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000004814824860972003763540039062500000000413733694453125 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000240741243048600188177001953125000000002068668472265625 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000001203706215243300094088500976562500000001034334236128125 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000060185310762165000470444250488125000000005171671180625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000030092655381082500023522212524406250000000025858355903125 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000015046327690541250001176110626220312500000000129291779515625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000007523163845270625000058805531310625000000000646458897578125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000000376158192263531250000294027656556250000000003232294487890625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000001880790961317656250000147013828278125000000000161614724394453125 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000000940395480658781250000073506914139062500000000080807362197265625 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000000004701977403293906250000036753457069531250000000004040368109865625 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000000002350988701646953125000001837672853476562500000000202018405493125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000000011754943508234765625000000918836426738125000000001010092027465625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000000005877471754117381250000004594182133690625000000000505046013728125 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000000002938735877058690625000000229709106684531250000000002525230068640625 mm  
± 0.0000000000000000000000000000000000000014693679385293453125000000114854553342265625000000001262615034328125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000000000073468396926467265625000000574272766711281250000000006313075171640625 mm  
± 0.000000000000000000000000000000000000000367341984632336906250000002871363833556250000000003156537585828125 mm  
± 0.00000000000000000000000000000000000000018367099231616845312500000014356819167781250000000015782687929128125 mm  
± 0.00918354961580842656250000000717840958389062500000000078913439645625 mm  
± 0.004591774807904213281250000003589204791695312500000000394567198228125 mm  
± 0.002295887403952106640625000000179460239584765625000000001972835991140625 mm  
± 0.00114794370197605332265625000000089730119792381250000000009864179955728125 mm  
± 0.00057397185098802666132812500000004486505989619062500000000049320899778640625 mm  
± 0.000286985925494013331640625000000022432529948095312500000000246604498893128125 mm  
± 0.0001434929627470066658203125000000112162649740476562500000000123302249444640625 mm  
± 0.007174648137350333291128125000000056081324870238125000000000616511247223128125 mm  
± 0.00358732406867516664556250000000280406624351190625000000000308255623611640625 mm  
± 0.0017936620343375833222812500000014020331217559531250000000015412781180728128125 mm  
± 0.00089683101716876661111406250000000701016560877976562500000000077063905903640625 mm  
± 0.000448415508584383305557281250000000350508280438988125000000000385319529518203128125 mm  
± 0.0002242077542921916652778125000000017525414021949406250000000001926597647591128128125 mm  
± 0.00011210387714609583261389062500000008762707010974765625000000000963298823795640625 mm  
± 0.005605193857304791630695312500000004381353505487381250000000004816494118978128125 mm  
± 0.00280259692865239581534765625000000021906767527436906250000000002408247059488128125 mm  
± 0.00140129846432619790767281250000001095338376371945312500000000120412352972440625 mm  
± 0.00070064923216309895378640625000000054766918818726562500000000060206176486228128125 mm  
± 0.0003503246160815494768931250000000273834594093690625000000000301030882431128128125 mm  
± 0.000175162308040774738446562500000013691729704684531250000000001505154412155640625 mm  
± 0.008758115402038736922328125000000068458648523422656250000000007525772060778128125 mm  
± 0.0043790577010193696111640625000000342293242617112812500000000037628860303890625 mm  
± 0.0021895288505096848055820312500000017114662130855625000000000188144301519453128125 mm  
± 0.00109476442525484240279112812500000008557331065278125000000000940721507597265625 mm  
± 0.00054738221262742120139556250000000427866553263890625000000000470360753798640625 mm  
± 0.00027369110631371060069778125000000021393327663194531250000000002351803768993128125 mm  
± 0.00013684555315685300034888906250000001069666383159765625000000001175901884496640625 mm  
± 0.00684227765784265001744445312500000005348331915798812500000000058795094224828128125 mm  
± 0.0034211388



PANEL PUNZON -160 REF. EN FORMA DE PUNZON  
RADIO DEL REF. 9.5mm

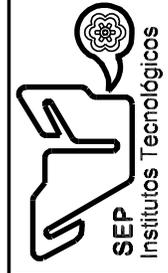


P9.5R STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
PANEL PUNZONADO 9.5R	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	P9.5R	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:10.26				estampados de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33Kg					



DISEÑO I. M. ERICK JAEI ENRIQUÉZ RUBIO  
REVISOR DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN

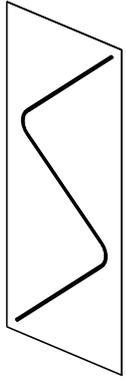
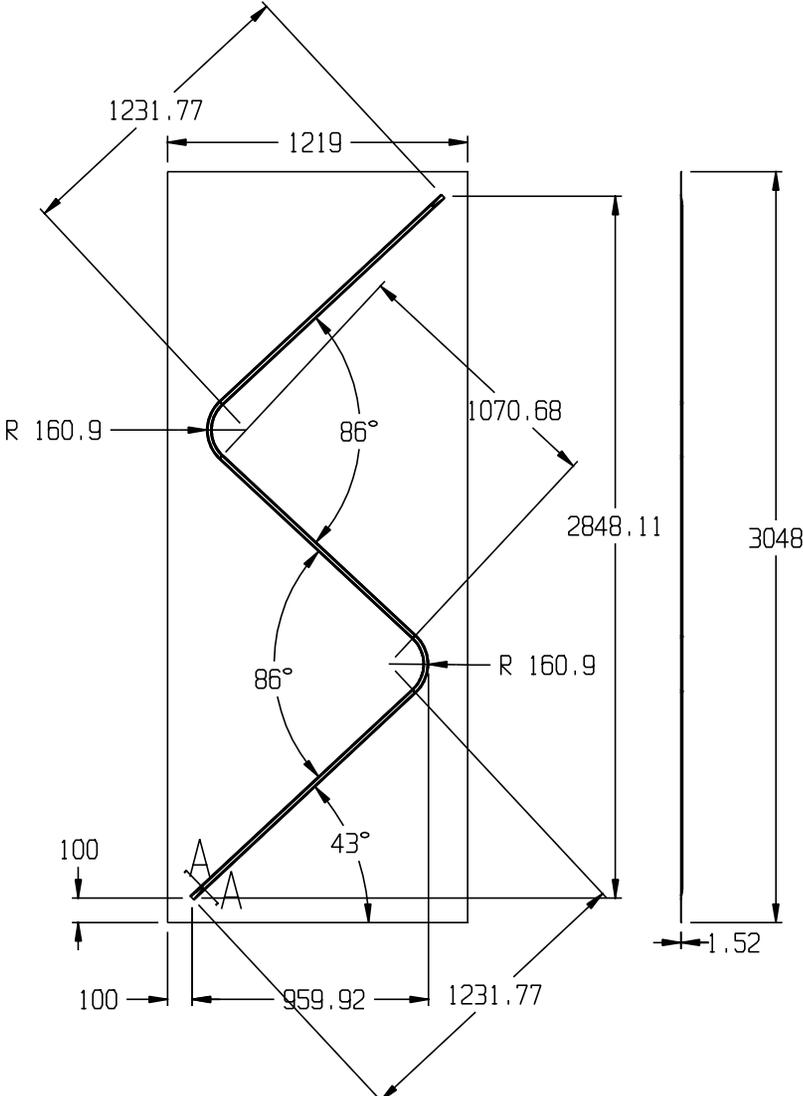
**PANEL TIPO PUNZON**

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
METRICO  
mm  
± 0.5  
± 0.25  
± 0.125  
± 0.0625  
mm  
ANGULOS  
ANGULOS: MIN. 30°  
MAX. 150°

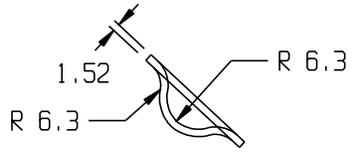




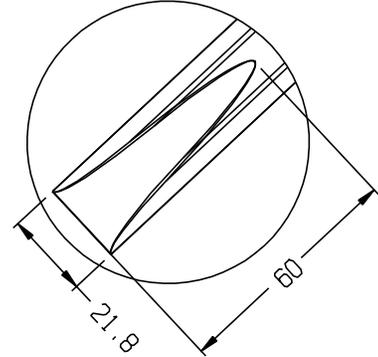
PANEL ZETA, RADIO DEL REFUERZO 6.3mm



⊙ Z STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



SECCIÓN A-A  
ESCALA 10:1



DETALLE B  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
PANEL ZETA	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	Z	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 200Gpa				Evaluación numerica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
v: 0.26					
P: 7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n: 44.33Kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



DISEÑO **I.H. ERICK JAIL ENRIQUEZ RUBIO**  
REVISO **DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN**

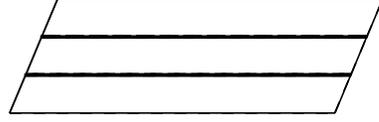
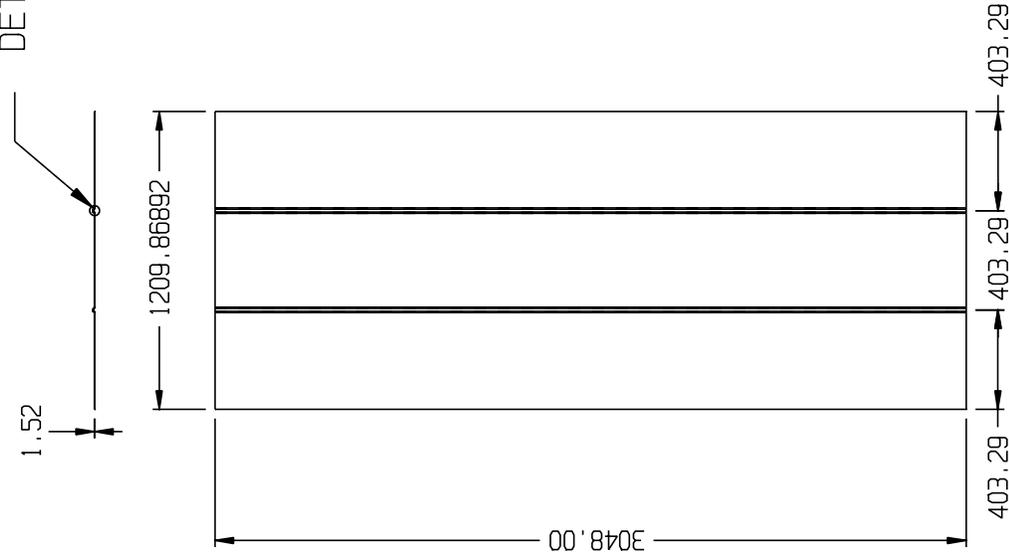
PANEL TIPO

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0 ± 1.5 mm  
0.0 ± 0.25 mm  
0.000 ± 0.027 mm  
ANGULAR  
GRADOS: MIN. 30' ± 0.5"  
GRADOS: MIN. SEG. ± 0.5"

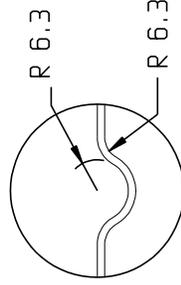


DETALLE A

(2RY) DOS REFLEJOS VERTICALES PASADOS  
RADIO DEL PUNZÓN 6.3mm



2RY LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1
2RY DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	2RY	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de esfuerzos	
v:10.26				esfuerzos de elementos estructurales laminados	
P: 7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

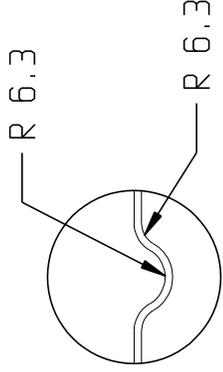
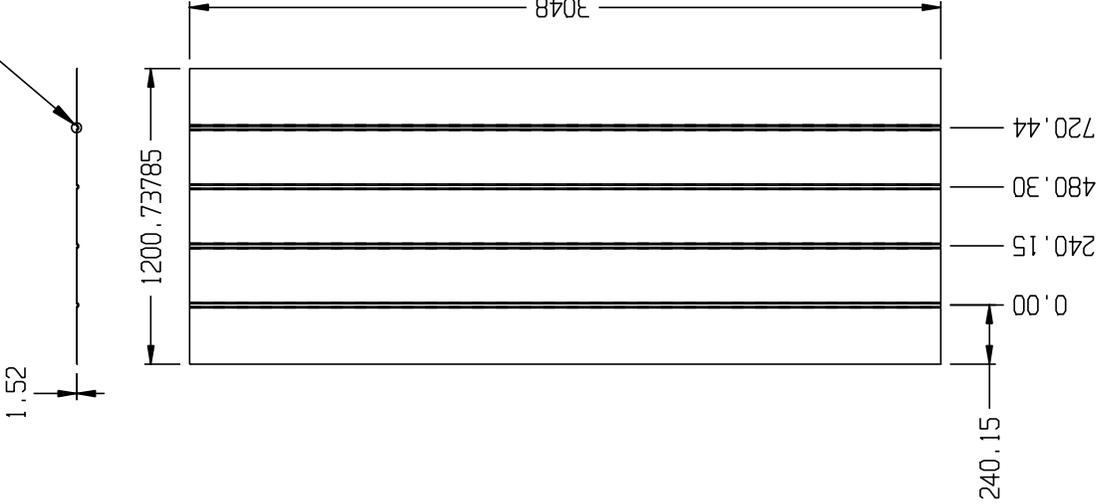


DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GONZALEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYON
PANEL TIPO RY	

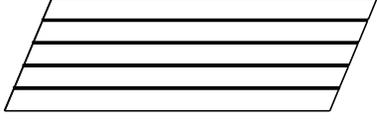
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
± 0.15 mm  
± 0.25 mm  
± 0.30 mm  
± 0.007 mm  
ANULAK  
BRUNNEN  
HIN. 350.  
1 1/2 2 1/2 3 1/2 4 1/2 5 1/2 6 1/2 7 1/2 8 1/2 9 1/2 10 1/2 11 1/2 12 1/2 13 1/2 14 1/2 15 1/2 16 1/2 17 1/2 18 1/2 19 1/2 20 1/2 21 1/2 22 1/2 23 1/2 24 1/2 25 1/2 26 1/2 27 1/2 28 1/2 29 1/2 30 1/2 31 1/2 32 1/2 33 1/2 34 1/2 35 1/2 36 1/2 37 1/2 38 1/2 39 1/2 40 1/2 41 1/2 42 1/2 43 1/2 44 1/2 45 1/2 46 1/2 47 1/2 48 1/2 49 1/2 50 1/2 51 1/2 52 1/2 53 1/2 54 1/2 55 1/2 56 1/2 57 1/2 58 1/2 59 1/2 60 1/2 61 1/2 62 1/2 63 1/2 64 1/2 65 1/2 66 1/2 67 1/2 68 1/2 69 1/2 70 1/2 71 1/2 72 1/2 73 1/2 74 1/2 75 1/2 76 1/2 77 1/2 78 1/2 79 1/2 80 1/2 81 1/2 82 1/2 83 1/2 84 1/2 85 1/2 86 1/2 87 1/2 88 1/2 89 1/2 90 1/2 91 1/2 92 1/2 93 1/2 94 1/2 95 1/2 96 1/2 97 1/2 98 1/2 99 1/2 100 1/2

DETALLE A

(4RY) CUATRO REFUREZOS VERTICALES PASADOS  
RADIO DEL PUNZON 6.3mm



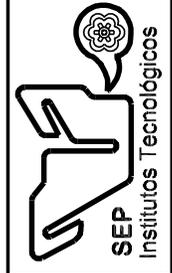
DETALLE A  
ESCALA 10:1



4RY LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1
4RY DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	4RY	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 2005pa					
v:10.26					
P:7850 Kg/m3					
n:44.33kg					

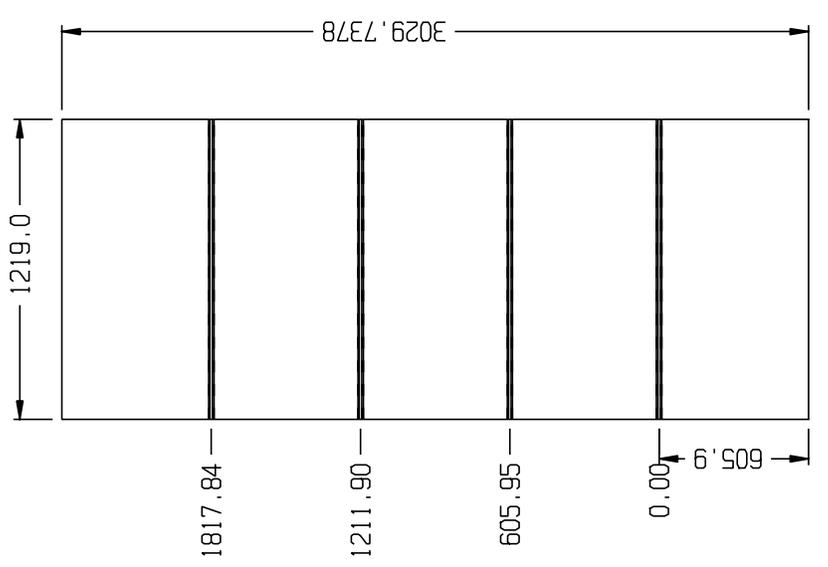
**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



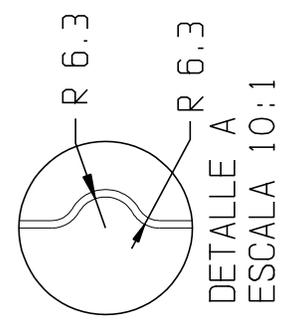
DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
PANEL TIPO RY	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0  
± 0.15  
± 0.30  
± 0.45  
± 0.60  
± 0.75  
± 0.90  
± 1.05  
± 1.20  
± 1.50  
± 1.80  
± 2.00  
± 2.25  
± 2.50  
± 2.75  
± 3.00  
± 3.25  
± 3.50  
± 3.75  
± 4.00  
± 4.25  
± 4.50  
± 4.75  
± 5.00  
± 5.25  
± 5.50  
± 5.75  
± 6.00  
± 6.25  
± 6.50  
± 6.75  
± 7.00  
± 7.25  
± 7.50  
± 7.75  
± 8.00  
± 8.25  
± 8.50  
± 8.75  
± 9.00  
± 9.25  
± 9.50  
± 9.75  
± 10.00  
± 10.25  
± 10.50  
± 10.75  
± 11.00  
± 11.25  
± 11.50  
± 11.75  
± 12.00  
± 12.25  
± 12.50  
± 12.75  
± 13.00  
± 13.25  
± 13.50  
± 13.75  
± 14.00  
± 14.25  
± 14.50  
± 14.75  
± 15.00  
± 15.25  
± 15.50  
± 15.75  
± 16.00  
± 16.25  
± 16.50  
± 16.75  
± 17.00  
± 17.25  
± 17.50  
± 17.75  
± 18.00  
± 18.25  
± 18.50  
± 18.75  
± 19.00  
± 19.25  
± 19.50  
± 19.75  
± 20.00  
± 20.25  
± 20.50  
± 20.75  
± 21.00  
± 21.25  
± 21.50  
± 21.75  
± 22.00  
± 22.25  
± 22.50  
± 22.75  
± 23.00  
± 23.25  
± 23.50  
± 23.75  
± 24.00  
± 24.25  
± 24.50  
± 24.75  
± 25.00  
± 25.25  
± 25.50  
± 25.75  
± 26.00  
± 26.25  
± 26.50  
± 26.75  
± 27.00  
± 27.25  
± 27.50  
± 27.75  
± 28.00  
± 28.25  
± 28.50  
± 28.75  
± 29.00  
± 29.25  
± 29.50  
± 29.75  
± 30.00  
± 30.25  
± 30.50  
± 30.75  
± 31.00  
± 31.25  
± 31.50  
± 31.75  
± 32.00  
± 32.25  
± 32.50  
± 32.75  
± 33.00  
± 33.25  
± 33.50  
± 33.75  
± 34.00  
± 34.25  
± 34.50  
± 34.75  
± 35.00  
± 35.25  
± 35.50  
± 35.75  
± 36.00  
± 36.25  
± 36.50  
± 36.75  
± 37.00  
± 37.25  
± 37.50  
± 37.75  
± 38.00  
± 38.25  
± 38.50  
± 38.75  
± 39.00  
± 39.25  
± 39.50  
± 39.75  
± 40.00  
± 40.25  
± 40.50  
± 40.75  
± 41.00  
± 41.25  
± 41.50  
± 41.75  
± 42.00  
± 42.25  
± 42.50  
± 42.75  
± 43.00  
± 43.25  
± 43.50  
± 43.75  
± 44.00  
± 44.25  
± 44.50  
± 44.75  
± 45.00  
± 45.25  
± 45.50  
± 45.75  
± 46.00  
± 46.25  
± 46.50  
± 46.75  
± 47.00  
± 47.25  
± 47.50  
± 47.75  
± 48.00  
± 48.25  
± 48.50  
± 48.75  
± 49.00  
± 49.25  
± 49.50  
± 49.75  
± 50.00  
± 50.25  
± 50.50  
± 50.75  
± 51.00  
± 51.25  
± 51.50  
± 51.75  
± 52.00  
± 52.25  
± 52.50  
± 52.75  
± 53.00  
± 53.25  
± 53.50  
± 53.75  
± 54.00  
± 54.25  
± 54.50  
± 54.75  
± 55.00  
± 55.25  
± 55.50  
± 55.75  
± 56.00  
± 56.25  
± 56.50  
± 56.75  
± 57.00  
± 57.25  
± 57.50  
± 57.75  
± 58.00  
± 58.25  
± 58.50  
± 58.75  
± 59.00  
± 59.25  
± 59.50  
± 59.75  
± 60.00  
± 60.25  
± 60.50  
± 60.75  
± 61.00  
± 61.25  
± 61.50  
± 61.75  
± 62.00  
± 62.25  
± 62.50  
± 62.75  
± 63.00  
± 63.25  
± 63.50  
± 63.75  
± 64.00  
± 64.25  
± 64.50  
± 64.75  
± 65.00  
± 65.25  
± 65.50  
± 65.75  
± 66.00  
± 66.25  
± 66.50  
± 66.75  
± 67.00  
± 67.25  
± 67.50  
± 67.75  
± 68.00  
± 68.25  
± 68.50  
± 68.75  
± 69.00  
± 69.25  
± 69.50  
± 69.75  
± 70.00  
± 70.25  
± 70.50  
± 70.75  
± 71.00  
± 71.25  
± 71.50  
± 71.75  
± 72.00  
± 72.25  
± 72.50  
± 72.75  
± 73.00  
± 73.25  
± 73.50  
± 73.75  
± 74.00  
± 74.25  
± 74.50  
± 74.75  
± 75.00  
± 75.25  
± 75.50  
± 75.75  
± 76.00  
± 76.25  
± 76.50  
± 76.75  
± 77.00  
± 77.25  
± 77.50  
± 77.75  
± 78.00  
± 78.25  
± 78.50  
± 78.75  
± 79.00  
± 79.25  
± 79.50  
± 79.75  
± 80.00  
± 80.25  
± 80.50  
± 80.75  
± 81.00  
± 81.25  
± 81.50  
± 81.75  
± 82.00  
± 82.25  
± 82.50  
± 82.75  
± 83.00  
± 83.25  
± 83.50  
± 83.75  
± 84.00  
± 84.25  
± 84.50  
± 84.75  
± 85.00  
± 85.25  
± 85.50  
± 85.75  
± 86.00  
± 86.25  
± 86.50  
± 86.75  
± 87.00  
± 87.25  
± 87.50  
± 87.75  
± 88.00  
± 88.25  
± 88.50  
± 88.75  
± 89.00  
± 89.25  
± 89.50  
± 89.75  
± 90.00  
± 90.25  
± 90.50  
± 90.75  
± 91.00  
± 91.25  
± 91.50  
± 91.75  
± 92.00  
± 92.25  
± 92.50  
± 92.75  
± 93.00  
± 93.25  
± 93.50  
± 93.75  
± 94.00  
± 94.25  
± 94.50  
± 94.75  
± 95.00  
± 95.25  
± 95.50  
± 95.75  
± 96.00  
± 96.25  
± 96.50  
± 96.75  
± 97.00  
± 97.25  
± 97.50  
± 97.75  
± 98.00  
± 98.25  
± 98.50  
± 98.75  
± 99.00  
± 99.25  
± 99.50  
± 99.75  
± 100.00

(4RXU 6.3r) 4 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS DISTRIBUIDOS UNIFORME DE 6.3mm RADIO



4RXU STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1
4RX UNIFORMES DE 6.3mm de radio	ASTM A36	1	4RX	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:10.26				ejemplares de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

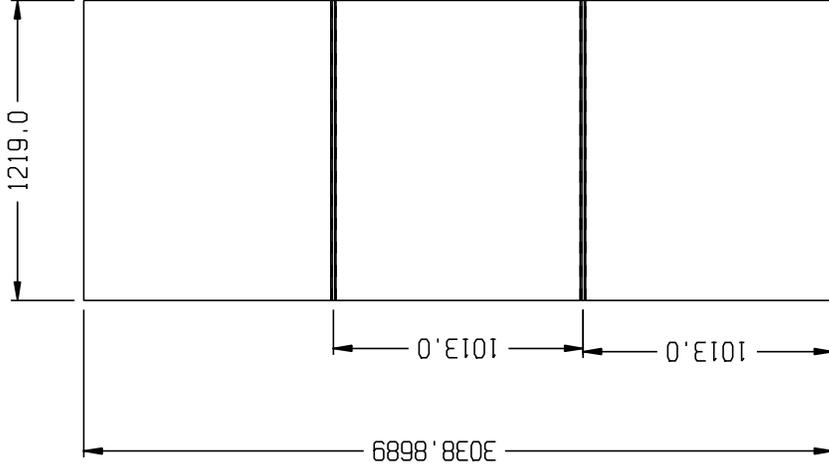
SEP  
Institutos Tecnológicos

DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GONZALEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYON

PANEL TIPO RXU

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0.5 mm  
1.0 mm  
0.000 mm  
0.000 mm  
ANULAK  
BRUNN: HIN: 350: 10 0 0.5

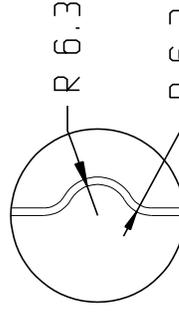
(2RX 6.3r) DOS REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
6.3mm DE RADIO



2RX

STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm

DETALLE A



R 6.3  
R 6.3  
DETALLE A  
ESCALA 10:1

1.52

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-10
2RX DE 6.3mm de radio	ASTM A36	1	2RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 200Gpa v:0.28				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P: 7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n: 44.33Kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

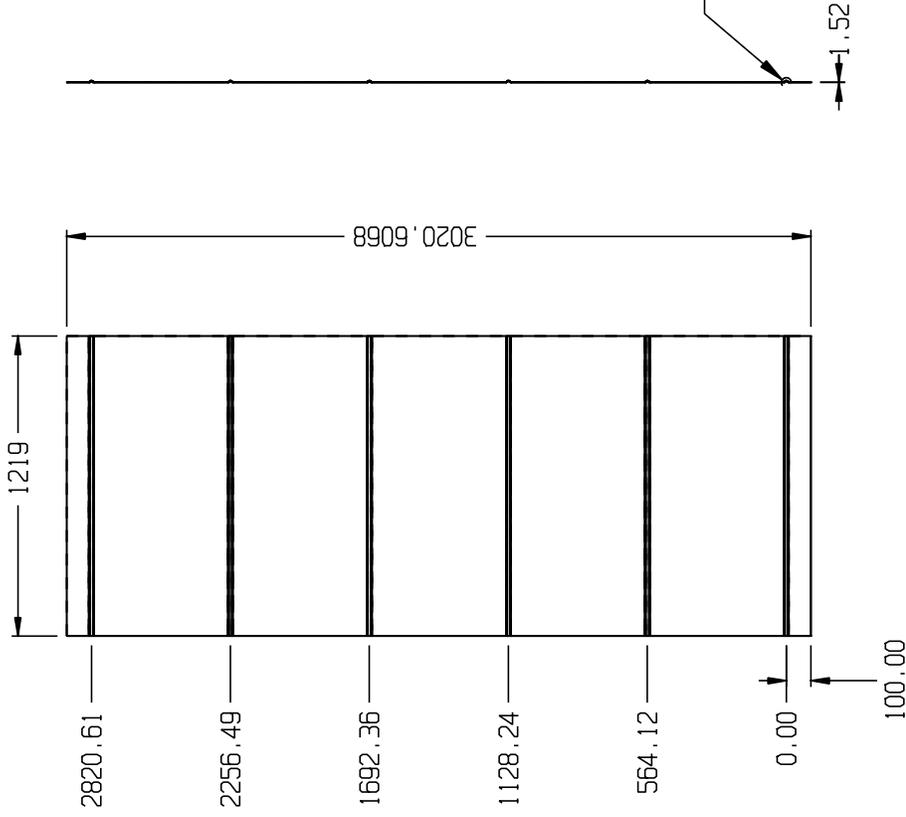
SEP  
Institutos Tecnológicos

DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
PANEL TIPO RX	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0.50 mm  
1.00 mm  
1.50 mm  
2.00 mm  
3.00 mm  
4.00 mm  
5.00 mm  
6.00 mm  
7.00 mm  
8.00 mm  
9.00 mm  
10.00 mm  
12.00 mm  
15.00 mm  
20.00 mm  
25.00 mm  
30.00 mm  
40.00 mm  
50.00 mm  
63.00 mm  
80.00 mm  
100.00 mm  
125.00 mm  
160.00 mm  
200.00 mm  
250.00 mm  
315.00 mm  
400.00 mm  
500.00 mm  
630.00 mm  
800.00 mm  
1000.00 mm

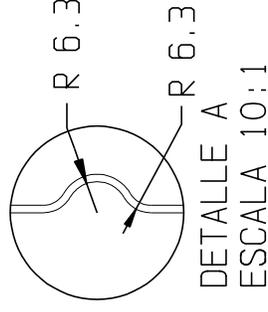


(6RX 6.3r) SEIS REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
RADIO 6.3mm



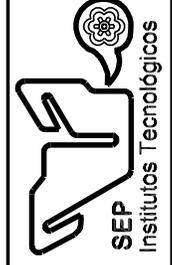
6RX

STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	3-10
6RX DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	6RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:10.26				ejemplares de elementos estructurales laminados	
P: 7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n: 44.33kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

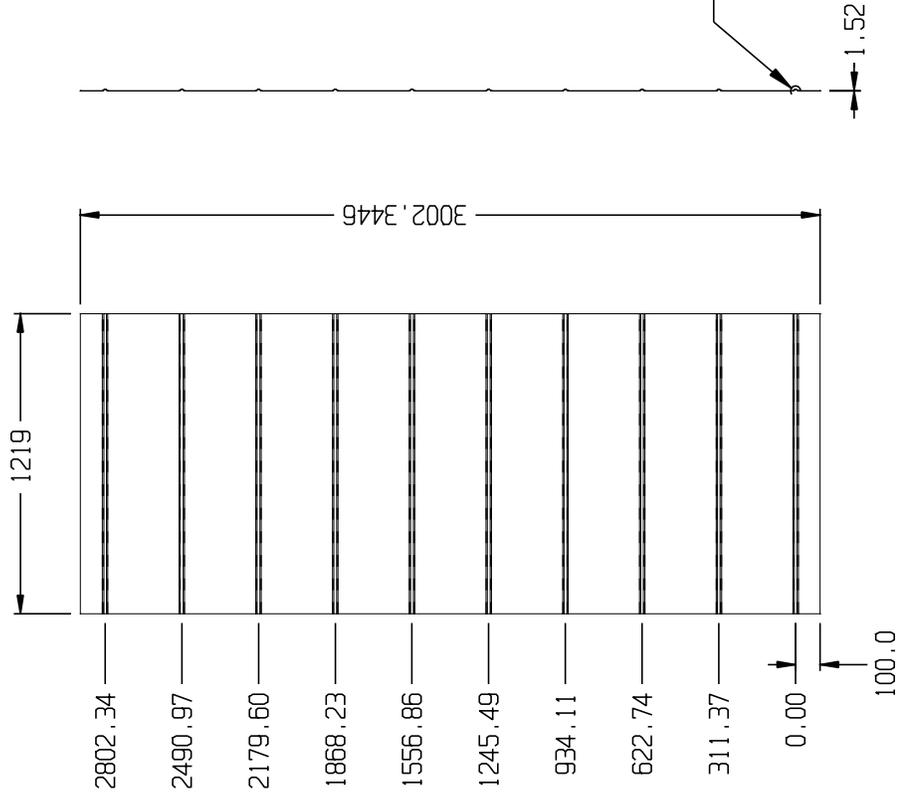


DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GONZALEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYON
PANEL TIPO RX	

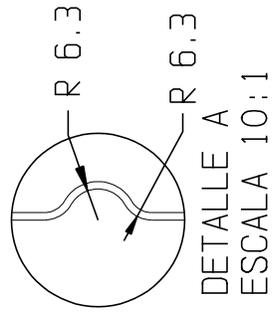
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
± 1.5 mm  
± 0.25 mm  
± 0.00 mm  
± 0.002 mm  
ANULOS  
BRUNES. MIN. 300.  
BRUNES. MAX. 305.



(10RX 6.3r) DIEZ REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ULTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
RADIO 6.3mm

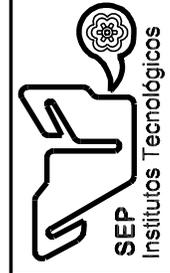


10RX STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	5-10
10RX DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	10RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:0.26				ejemplares de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44,33kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

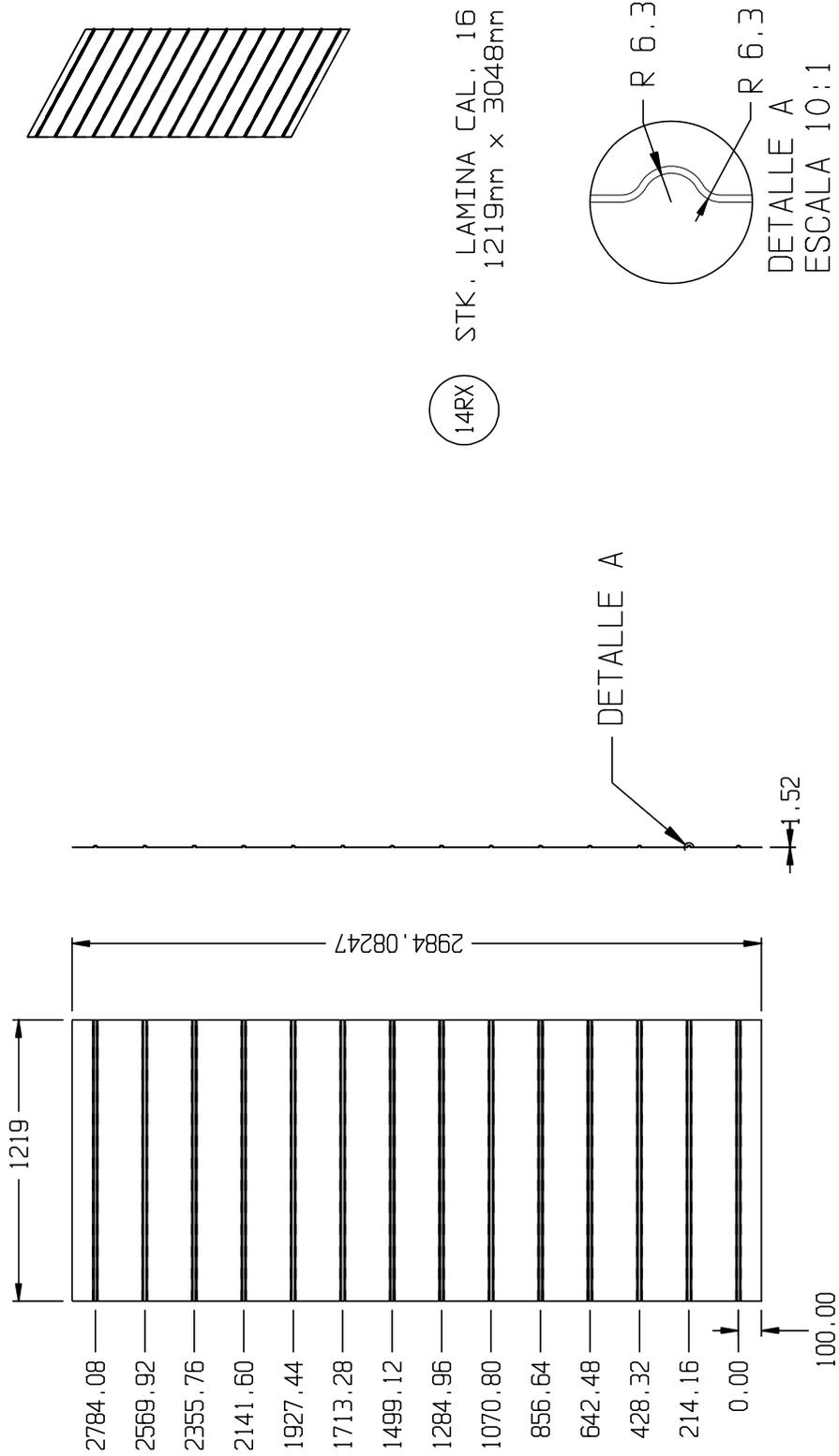


DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GONZALEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYON
PANEL TIPO RX	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
± 0.5 mm  
± 0.25 mm  
± 0.15 mm  
± 0.10 mm  
± 0.075 mm  
± 0.05 mm  
± 0.025 mm  
± 0.015 mm  
± 0.01 mm  
± 0.005 mm  
± 0.0025 mm  
± 0.0015 mm  
± 0.001 mm  
± 0.0005 mm  
± 0.00025 mm  
± 0.00015 mm  
± 0.0001 mm



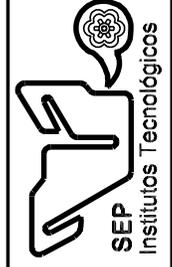
(14RX 6,3r) 14 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
 PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
 RADIO 6,3mm



14RX STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	7-10
14RX DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	14RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:0,26				esquejes de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44,33kg					

**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico

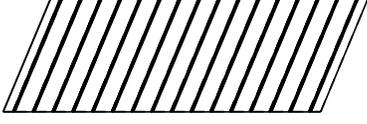
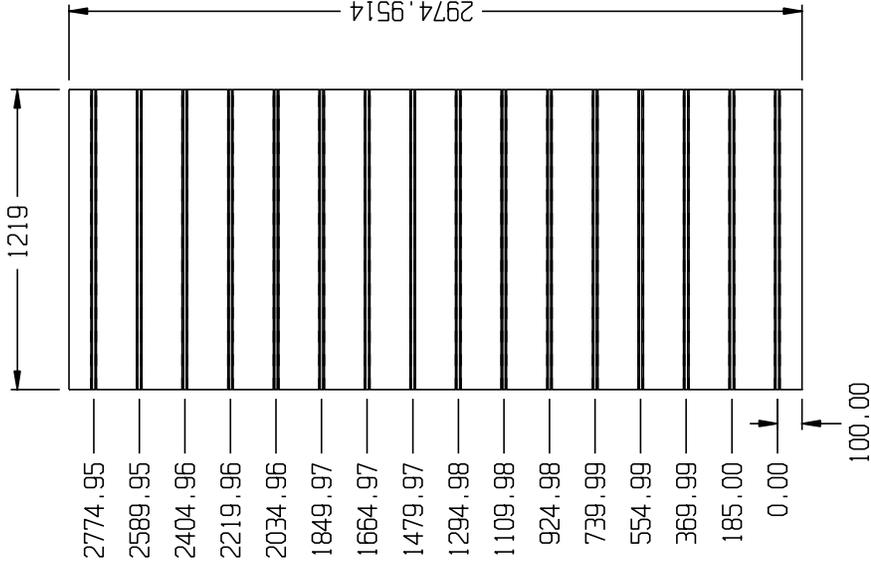


DISEÑO	1. H. ERICK JUEL GARCÍA RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN

PANEL TIPO RX

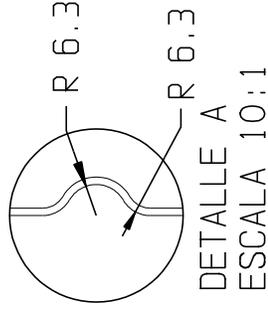
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
 METRICO  
 ± 0,5 mm  
 ± 0,25 mm  
 ± 0,125 mm  
 ± 0,0625 mm  
 ± 0,03125 mm  
 ± 0,015625 mm  
 ± 0,0078125 mm  
 ± 0,00390625 mm  
 ± 0,001953125 mm  
 ± 0,0009765625 mm  
 ± 0,00048828125 mm  
 ± 0,000244140625 mm  
 ± 0,0001220703125 mm  
 ± 0,00006103515625 mm  
 ± 0,000030517578125 mm  
 ± 0,0000152587890625 mm  
 ± 0,00000762939453125 mm  
 ± 0,000003814697265625 mm  
 ± 0,0000019073486328125 mm  
 ± 0,00000095367431640625 mm  
 ± 0,000000476837158203125 mm  
 ± 0,0000002384185791015625 mm  
 ± 0,00000011920928955078125 mm  
 ± 0,000000059604644775390625 mm  
 ± 0,0000000298023223876953125 mm  
 ± 0,00000001490116119384765625 mm  
 ± 0,000000007450580596923828125 mm  
 ± 0,0000000037252902984619140625 mm  
 ± 0,00000000186264514923095703125 mm  
 ± 0,000000000931322574615478515625 mm  
 ± 0,00000000046566128730773928125 mm  
 ± 0,000000000232830643653869640625 mm  
 ± 0,0000000001164153218269348203125 mm  
 ± 0,00000000005820766091346741015625 mm  
 ± 0,000000000029103830456733705078125 mm  
 ± 0,0000000000145519152283668525390625 mm  
 ± 0,00000000000727595761418342626953125 mm  
 ± 0,000000000003637978807091713131928125 mm  
 ± 0,0000000000018189894035458565659640625 mm  
 ± 0,00000000000090949470177292828298203125 mm  
 ± 0,000000000000454747350886464141491015625 mm  
 ± 0,000000000000227373675443232070745578125 mm  
 ± 0,0000000000001136868377216160353727890625 mm  
 ± 0,00000000000005684341886080801768639453125 mm  
 ± 0,000000000000028421709430404008843197265625 mm  
 ± 0,0000000000000142108547152020044215986328125 mm  
 ± 0,00000000000000710542735760100221099831640625 mm  
 ± 0,0000000000000035527136788005011054996578125 mm  
 ± 0,00000000000000177635683940025055274982890625 mm  
 ± 0,000000000000000888178419700125276249914453125 mm  
 ± 0,0000000000000004440892098500626381249572265625 mm  
 ± 0,00000000000000022204460492503131907247890625 mm  
 ± 0,000000000000000111022302462515659537489453125 mm  
 ± 0,00000000000000005551115123125297976972265625 mm  
 ± 0,0000000000000000277555756156263988848631640625 mm  
 ± 0,00000000000000001387778780781319944243197265625 mm  
 ± 0,00000000000000000693889390390659972121986328125 mm  
 ± 0,00000000000000000346944695195329986060931640625 mm  
 ± 0,000000000000000001734723475976649930304697265625 mm  
 ± 0,00000000000000000086736173798832496515234890625 mm  
 ± 0,000000000000000000433680868994162482576194453125 mm  
 ± 0,000000000000000000216840434497081241288072265625 mm  
 ± 0,0000000000000000001084202172485406206444141491015625 mm  
 ± 0,000000000000000000054210108624270310322207265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000271050543121351516111036328125 mm  
 ± 0,0000000000000000000135525271560675758055516640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000677626357803378790277582890625 mm  
 ± 0,000000000000000000003388131789016893951387914453125 mm  
 ± 0,000000000000000000001694065894508446975693957265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000008470329472542234878346986328125 mm  
 ± 0,0000000000000000000004235164736271117391672441491015625 mm  
 ± 0,0000000000000000000002117582368135558695836372265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000001058791184067778497916836328125 mm  
 ± 0,00000000000000000000005293955920338892489958416640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000026469779601694462449972265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000132348898008472312249986328125 mm  
 ± 0,000000000000000000000006617444900423615612249914453125 mm  
 ± 0,00000000000000000000000330872245021180780612249572265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000016543612251059039030612247890625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000008271806125029519515306122439453125 mm  
 ± 0,00000000000000000000000041359030625014759757653061222265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000206795153125073798788288265306121131640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000001033975765625036899394141491015625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000005169878828125184496972265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000025849394140625092248486328125 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000129246970703146224243197265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000006462348535157112121986328125 mm  
 ± 0,000000000000000000000000003231174267578556060931640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000016155871337892780304697265625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000080779356689639015234890625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000403896783448195076194453125 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000201948391724097525372265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000001009741958620487626836328125 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000504870979310243813416640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000025243548965512190672265625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000001262177448275609533816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000006310887241378047669072265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000003155443620689023834536328125 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000157772181034451191726816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000078886090517225595863416640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000394430452586127929316640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000019721522629306396465816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000009860761314653198232816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000493038065732769911640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000024651903286639955816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000001232595164333199779072265625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000616297582166599889536328125 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000003081487910832999447816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000015407439554164999723816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000770371977708249986328125 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000003851859888541249914453125 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000019259299442706249572265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000096296497213531249572265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000048148248606766249572265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000240741243033831249572265625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000001203706215169156249572265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000006018531075845781249572265625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000030092655379228906249572265625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000000150463276896144531249572265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000752316384480722656249572265625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000376158192240361276816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000188079096120180636816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000000009403954806009031840816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000000470197740300451592040816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000023509887015022579602040816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000000001175494350751128980102040816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000000058774717537556449005102040816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000002938735876877822450025102040816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000000014693679384389112250125102040816640625 mm  
 ± 0,000000000000000000000000000000000000000734683969219455612500625102040816640625 mm  
 ± 0,00000000000000000000000000000000000000036734198460972778125003125102040816640625 mm  
 ± 0,0000000000000000000000000000000000000001836709923048638906250015625102040816640625 mm  
 ± 0,0091835496152431945312500078125102040816640625 mm  
 ± 0,004591774807621597265625000390625102040816640625 mm  
 ± 0,00229588740381079863281250001953125102040816640625 mm  
 ± 0,00114794370190539931664062500009765625102040816640625 mm  
 ± 0,00057397185095269965816640625000048828125102040816640625 mm  
 ± 0,000286985925476349829078166406250000244140625102040816640625 mm  
 ± 0,0001434929627381749145390781664062500001220703125102040816640625 mm  
 ± 0,0071746481369087457271953907816640625000006103515625102040816640625 mm  
 ± 0,00358732406845437286359769539078166406250000030517578125102040816640625 mm  
 ± 0,001793662034227186432798847695390781664062500000152587890625102040816640625 mm  
 ± 0,000896831017113593216399438476953907816640625000000762939453125102040816640625 mm  
 ± 0,00044841550855679660819971922384769539078166406250000003814697265625102040816640625 mm  
 ± 0,000224207754278398304099859619223847695390781664062500000019073486328125102040816640625 mm  
 ± 0,0001121038771391991520499859619223847695390781664062500000009536716640625102040816640625 mm  
 ± 0,0056051938569599576024998596192238476953907816640625000000047683583203125102040816640625 mm  
 ± 0,002802596928479978801249985961922384769539078166406250000000238417916015625102040816640625 mm  
 ± 0,001401298464239989400624998596192238476953907816640625000000011920928955078125102040816640625 mm  
 ± 0,00070064923211999450031249985961922384769539078166406250000000059604644775390625102040816640625 mm  
 ± 0,00035032461605999725001562499859619223847695390781664062500000000298023223876953125102040816640625 mm  
 ± 0,00017516230802999862500078124998596192238476953907816640625000000001490116119384765625102040816640625 mm  
 ± 0,0087581154014999931250003906249985961922384769539078166406250000000007450580596923828125102040816640625 mm  
 ± 0,0043790577007499965625000195312499859619223847695390781664062500000000037252902984619140625102040816640625 mm  
 ± 0,0021895288503749982812500009765624998596192238476953907816640625000000000186264514923095703125102040816640625 mm  
 ± 0,00109476442518749991406250000488281249985961922384769539078166406250000000000931322574615478515625102040816640625 mm  
 ± 0,0005473822125937499957265625000024414062499859619223847695390781664062500000000004656612873077392828125102040816640625 mm  
 ± 0,0002736911062968749997890625000012207031249985961922384769539078166406250000000000232830643653869640625102040816640625 mm  
 ± 0,0001368455531484374999894531250000061035156249985961922384769539078166406250000000000116415321826934828125102040816640625 mm  
 ± 0,006842277657421874999472656250000030517578124998596192238476953907816640625000000000058207660913467410625102040816640625 mm  
 ± 0,00342113882871087499973632812500000152587890624998596192238476953907816640625000000000029103830456733705078125102040816640625 mm  
 ± 0,0000000000

(16RX 6.3r) 16 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
 PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
 RADIO 6.3mm



16RX

LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	8-10
16RX DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	16RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:10.26				estampados de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33kg					

**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico

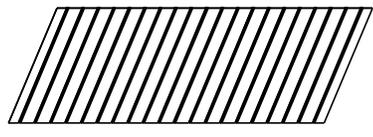
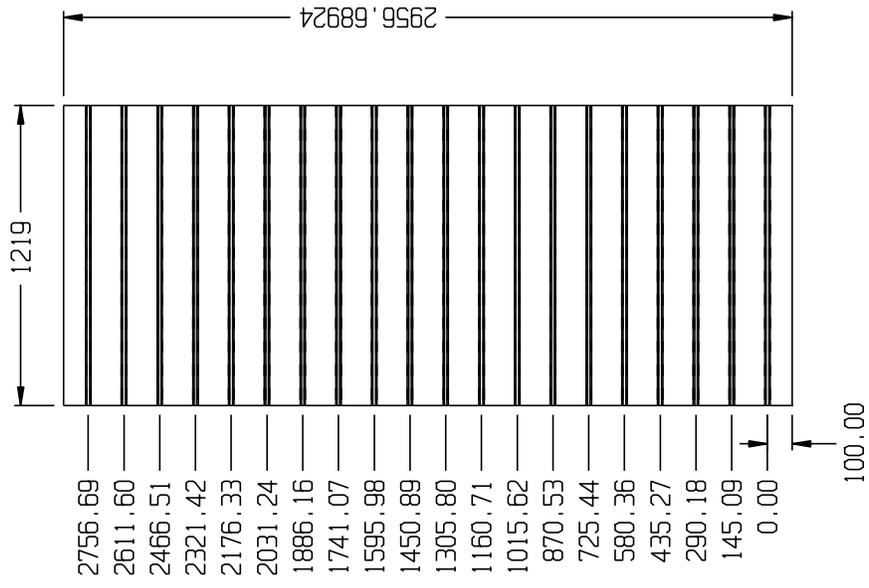
**SEP**  
 Institutos Tecnológicos

DISEÑO	<b>I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED</b>
REVISO	<b>DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN</b>
<b>PANEL TIPO RX</b>	

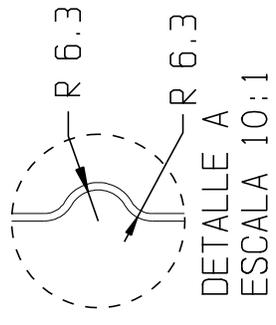
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERAN:  
 METRICO  
 0.15 mm  
 0.30 mm  
 0.50 mm  
 1.00 mm  
 1.50 mm  
 2.00 mm  
 3.00 mm  
 4.00 mm  
 5.00 mm  
 6.00 mm  
 8.00 mm  
 10.00 mm  
 15.00 mm  
 20.00 mm  
 30.00 mm  
 40.00 mm  
 50.00 mm  
 60.00 mm  
 80.00 mm  
 100.00 mm



(20RX6.3R) 20 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
 PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
 RADIO 6.3mm

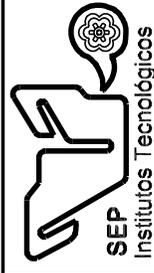


20RX LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm



DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	10-10
20RX DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	20RX	CANTIDAD DE HOJAS	10
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:0.26				estampados de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33kg					

**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico



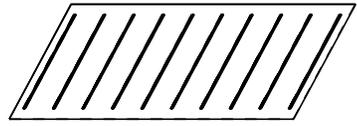
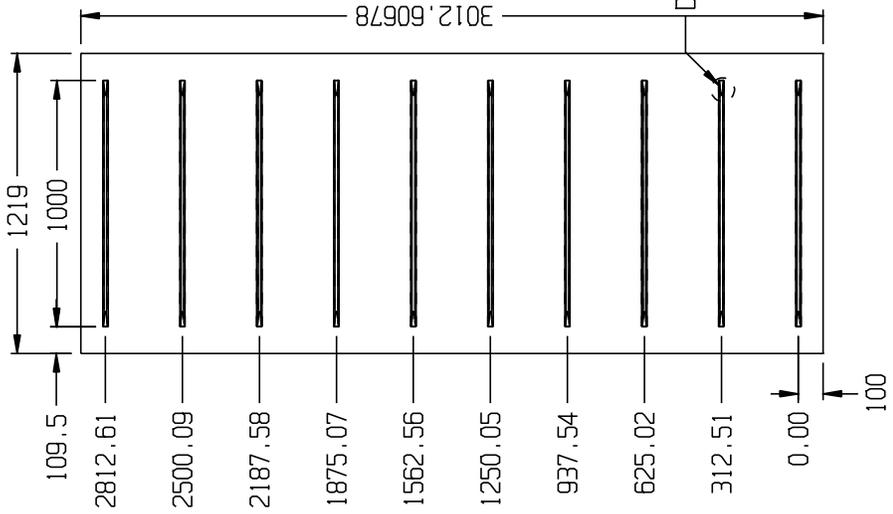
DISEÑO	<b>I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED</b>
REVISO	<b>DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN</b>
<b>PANEL TIPO RX</b>	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
 METRICO  
 0 mm  
 ± 0.5 mm  
 ± 0.25 mm  
 ± 0.125 mm  
 ± 0.062 mm  
 ANGULOS  
 ± 0.2°  
 ± 0.1°  
 ± 0.05°  
 BRUNES. MIN. 300.  
 BRUNES. MIN. 300.

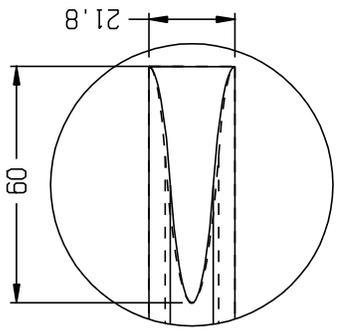




( 10RXC 6.3R ) DIEZ REFUERZOS HORIZONTALES 1m DE LONGITUD  
 PUNZON DE 6.3mm DE RADIO



10RXC STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm



DETALLE B  
 ESCALA 10:1

DETALLE A

DETALLE A  
 ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	2-4
10RXC DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	10RXC	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 2005pa				Evaluación numérica del efecto de refuerzos	
v:10.26				estampados de elementos estructurales laminados	
P:7850 Kg/m3				en sus formas y frecuencias naturales.	
n:44.33Kg					

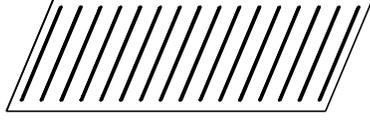
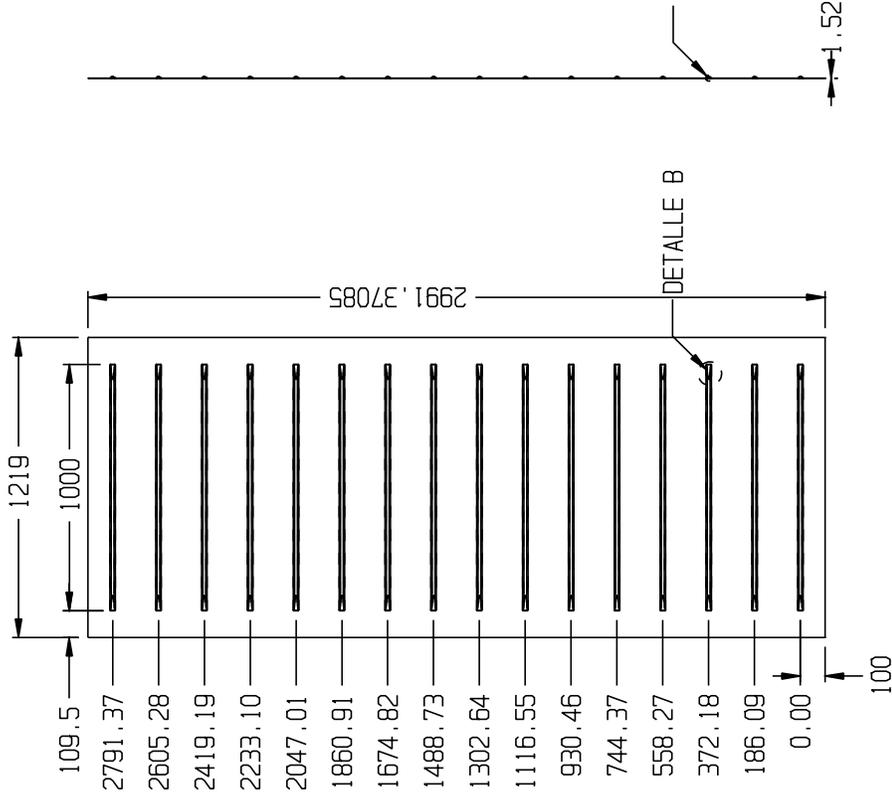
**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico



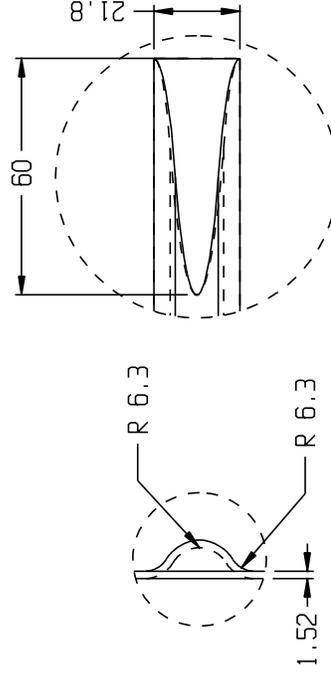
DISÑO	I. H. BROCK JUEL GARCÍEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
PANEL TIPO RXC	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
 METRICO  
 ± 0.5 mm  
 ± 0.25 mm  
 ± 0.15 mm  
 ± 0.10 mm  
 ± 0.075 mm  
 ± 0.05 mm  
 ± 0.025 mm  
 ± 0.015 mm  
 ± 0.01 mm  
 ± 0.005 mm  
 ± 0.0025 mm  
 ± 0.0015 mm  
 ± 0.001 mm  
 ± 0.0005 mm  
 ± 0.00025 mm  
 ± 0.00015 mm  
 ± 0.0001 mm

( 16RXC 6.3R ) 16 REFUERZOS HORIZONTALES 1m DE LONGITUD  
 PUNZON DE 6.3mm DE RADIO



16RXC STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm

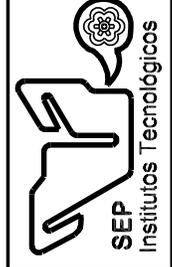


DETALLE B  
 ESCALA 10:1

DETALLE A  
 ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	3-4
16RXC DE 6.3mm de radio	LAMINA CAL. 16 ASTM-A36	1	16RXC	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 2005pa					
v:10.26					
P: 7850 Kg/m3					
n:44.33kg					

**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico



DISÑO	I. H. ERICK JEL. GONZALEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYON
PANEL TIPO RXC	

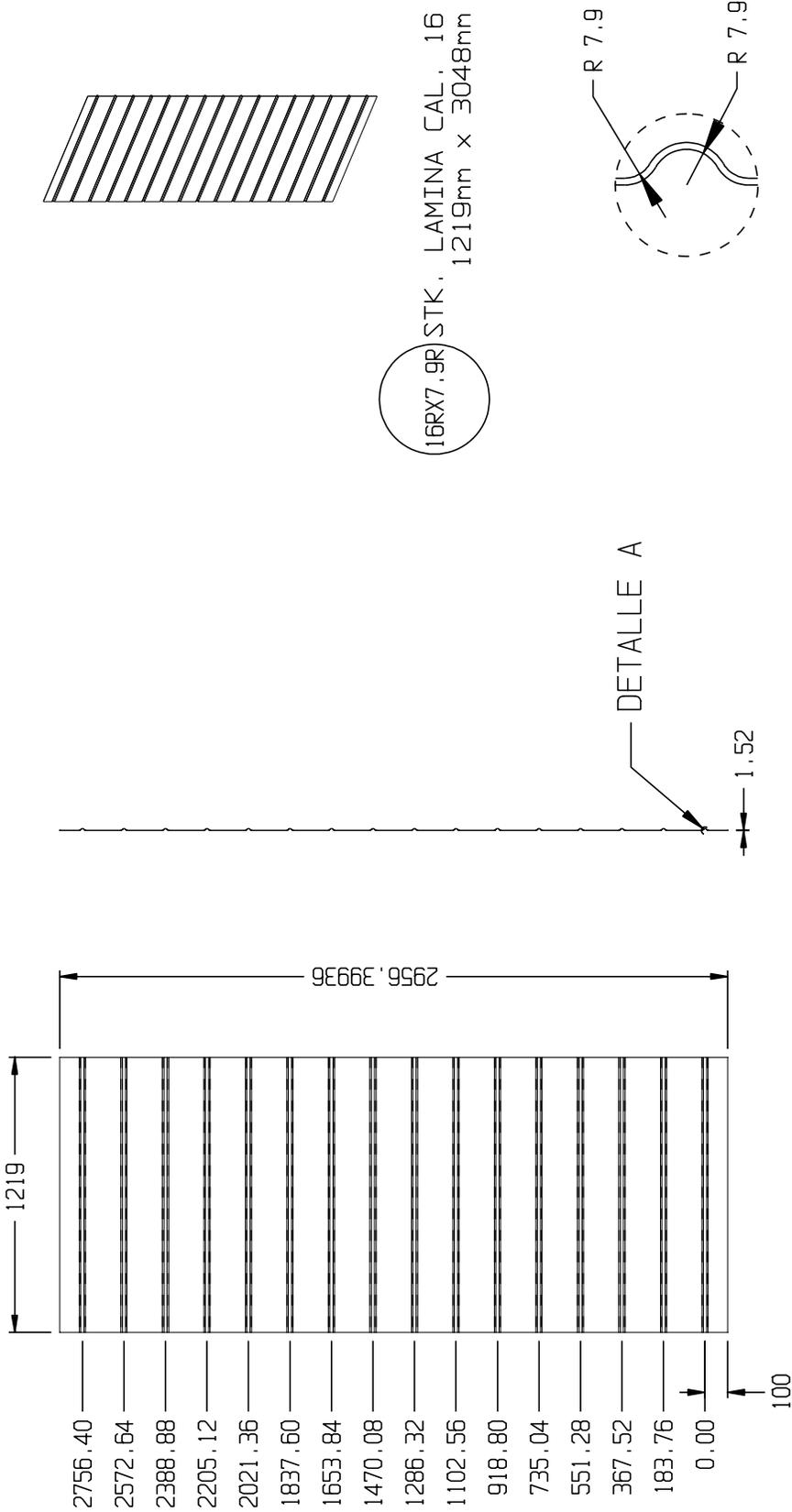
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERAN:  
 METRICO  
 ± 0.5 mm  
 ± 0.25 mm  
 ± 0.15 mm  
 ± 0.10 mm  
 ± 0.075 mm  
 ± 0.05 mm  
 ± 0.025 mm  
 ± 0.015 mm  
 ± 0.01 mm  
 ± 0.005 mm  
 ± 0.0025 mm  
 ± 0.0015 mm  
 ± 0.001 mm  
 ± 0.0005 mm  
 ± 0.00025 mm  
 ± 0.00015 mm  
 ± 0.0001 mm







(16RX 7.9R) 16 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
 PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
 RADIO 7.9mm

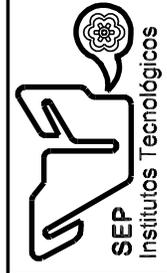


16RX7.9R) STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm

DETALLE A  
 ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	3-4
16RX7.9 DE 7.9mm de radio	ASTM A36	1	16RX7.9	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 200Gpa v:0.28				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P: 7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n: 44.33Kg					

**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico

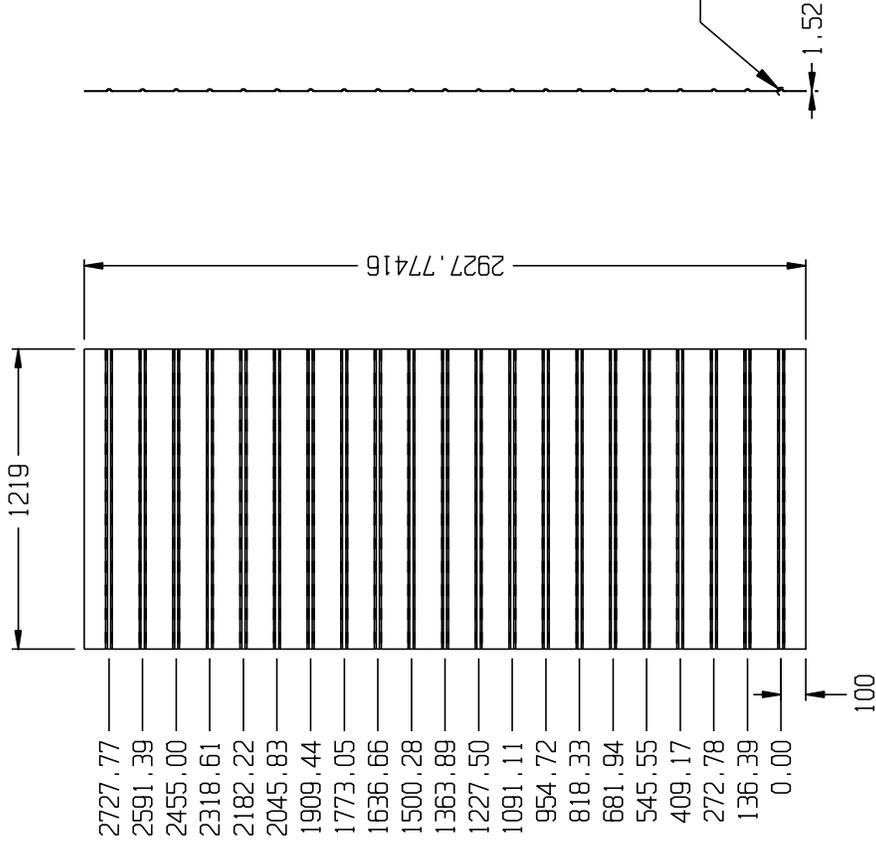


DISEÑO	REVISO
I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN

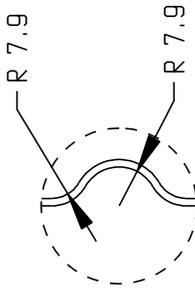
PANEL TIPO RX

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
 METRICO  
 0.50 mm  
 1.00 mm  
 1.50 mm  
 2.00 mm  
 3.00 mm  
 4.00 mm  
 5.00 mm  
 6.00 mm  
 8.00 mm  
 10.00 mm  
 15.00 mm  
 20.00 mm  
 30.00 mm  
 40.00 mm  
 50.00 mm  
 60.00 mm  
 80.00 mm  
 100.00 mm

(21RX 7.9R) 21 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
 PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA  
 RADIO 7.9mm



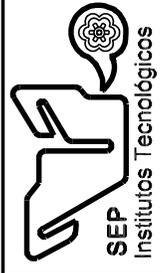
21RX7.9R) STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
 1219mm x 3048mm



DETALLE A  
 ESCALA 20:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	4-4
21RX7.9 DE 7.9mm de radio	ASTM A36	1	21RX7.9	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 200Gpa v:10.26				Ejemplación numerada del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P:7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n:44.33Kg					

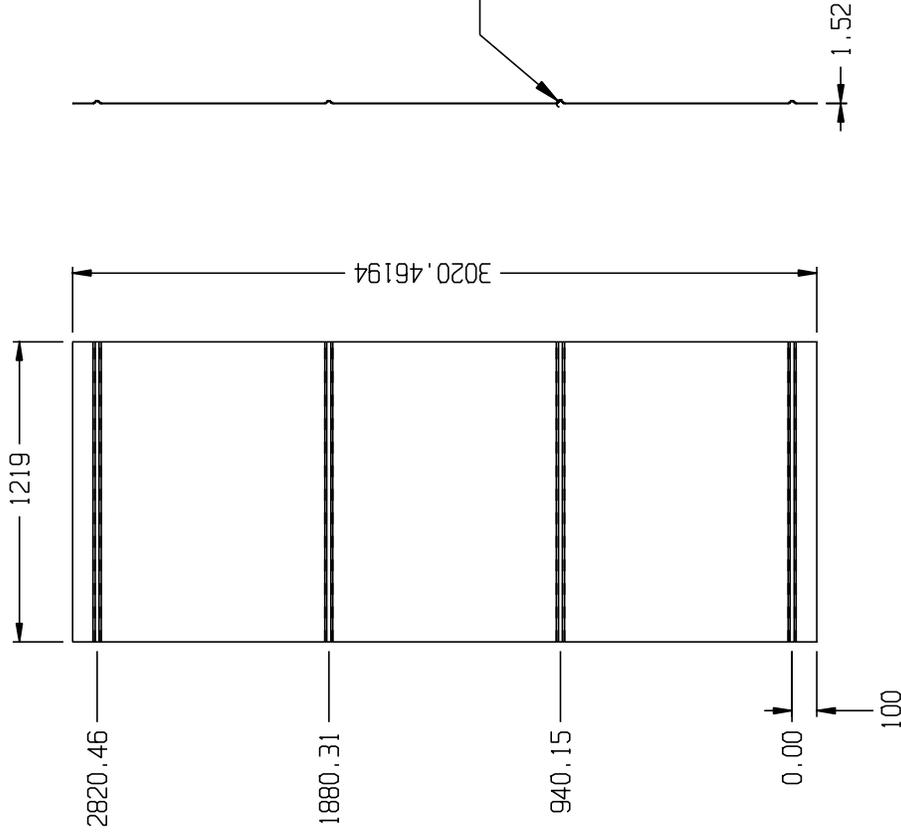
**cenidet**  
 Centro Nacional de Investigación  
 y Desarrollo Tecnológico



DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
PANEL TIPO RX	

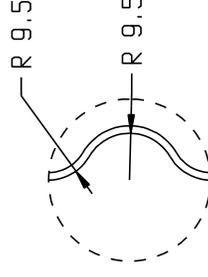
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
 LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
 METRICO  
 ± 0.5 mm  
 ± 0.25 mm  
 ± 0.125 mm  
 ± 0.0625 mm  
 ANGULOS  
 ± 0.2°  
 ± 0.1°  
 ± 0.05°  
 BRUNES. MIN. SEG. I.C.P. 0.5°

(4RX 9.5 R) 4 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA



4RX9.5R STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm

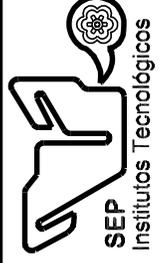
DETALLE A



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-4
4RX9.5 DE 9.5mm de radio	ASTM A36	1	4RX9.5	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 200Gpa v:0.28				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P:7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n:44.33Kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

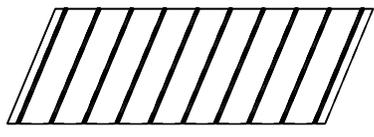
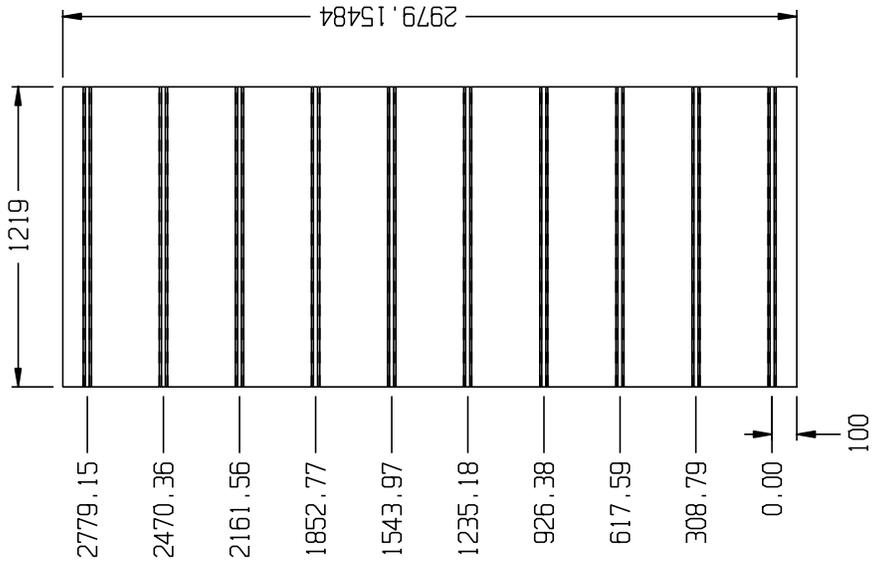


DISEÑO: I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED  
REVISO: DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN

PANEL TIPO RX

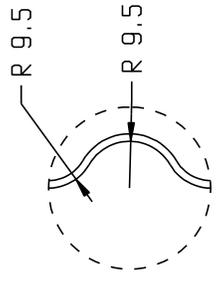
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
METRICO  
0  
± 0.5  
± 0.25  
± 0.125  
± 0.0625  
ANULOS  
BRUNES: H7/g6  
BRUNES: H8/g7

(10RX 9.5r ) 10 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA



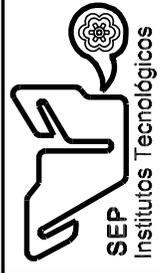
10RX9.5R) STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm

DETALLE A



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	2-4
10RX 9.5R	ASTM A36	1	1000x.5	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 200Gpa v:0.26				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P:7850 Kg/m <sup>3</sup> n:44.33Kg					



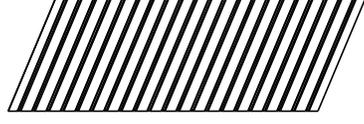
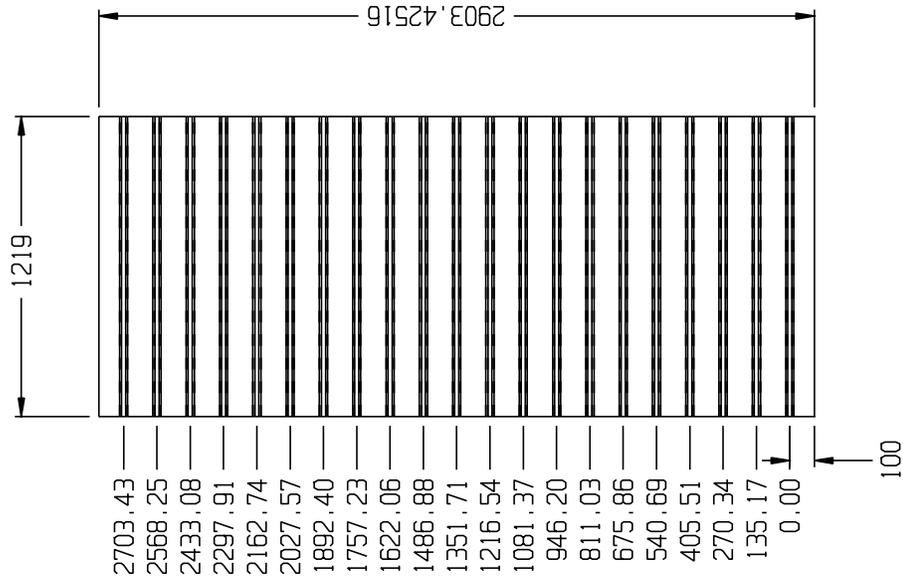
**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

DISEÑO	<b>I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBTO</b>
REVISO	<b>DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN</b>
<b>PANEL TIPO RX</b>	

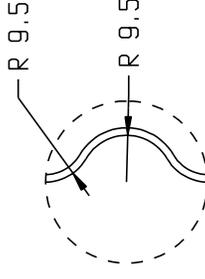
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
0.5 mm  
± 0.05 mm  
0.00 ± 0.02 mm  
ANULAK  
BRUNN. MIN. 300.  
10 0 0.5



(21RX 9.5r ) 21 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA



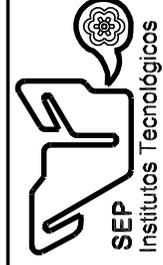
21RX9.5R) STK. LAMINA CAL. 16 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DETALLE A  
ESCALA 10:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	4-4
21RX 9.5R	ASTM A36	1	21RX9.5	CANTIDAD DE HOJAS	4
E: 200Gpa v:0.28				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P:7850 Kg/m <sup>3</sup> n:44.33Kg					

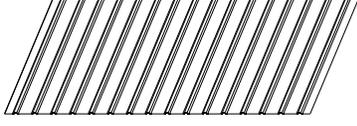
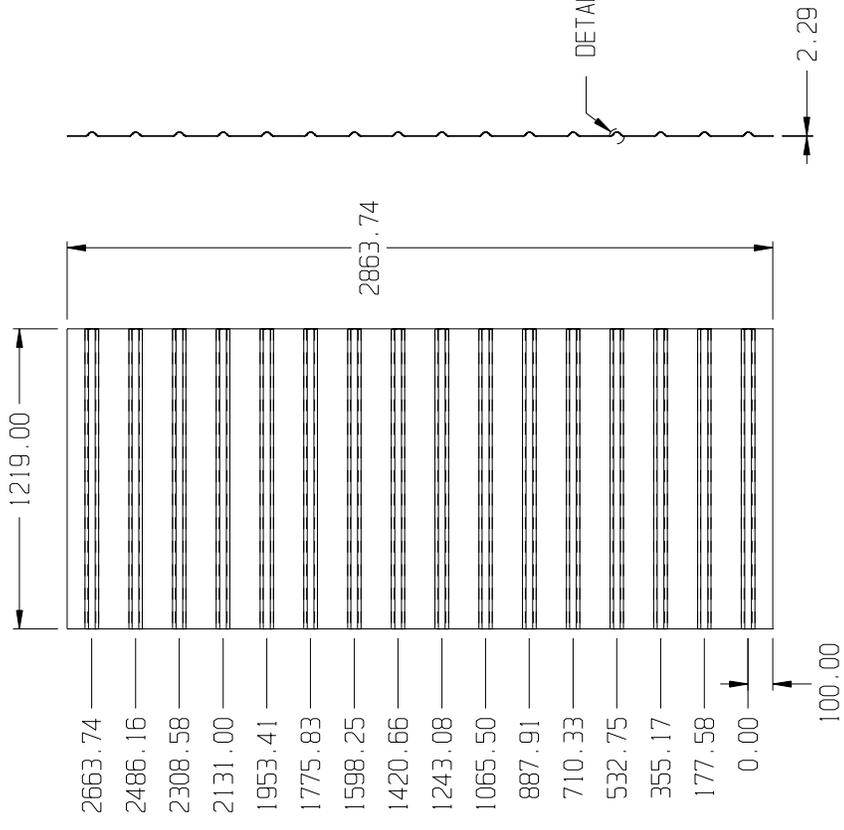
**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



DISEÑO	I. H. ERICK JUEL GARCÍEZ RIBED
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
PANEL TIPO RX	

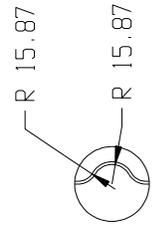
ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICIÓN METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERÁN:  
METRICO  
0.5 mm  
1.5 mm  
3.0 mm  
6.0 mm  
ANULAK  
BRUNNEN  
HIN. 350.  
10 0 0.5

(16RX 15.87r) 16 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA



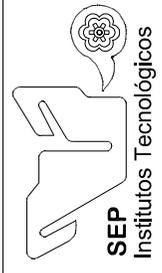
16RX15.8R

STK. LAMINA CAL. 13 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



DETALLE A  
ESCALA 5:1

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
16RX 15.8r	ASTM A36	1	16RX15.8R	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 200Gpa v: 0.26				Evaluación numérica del efecto de refuerzos estampados de elementos estructurales laminados en sus formas y frecuencias naturales.	
P: 7850 Kg/m <sup>3</sup>					
n: 44.33Kg					

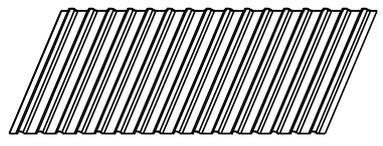
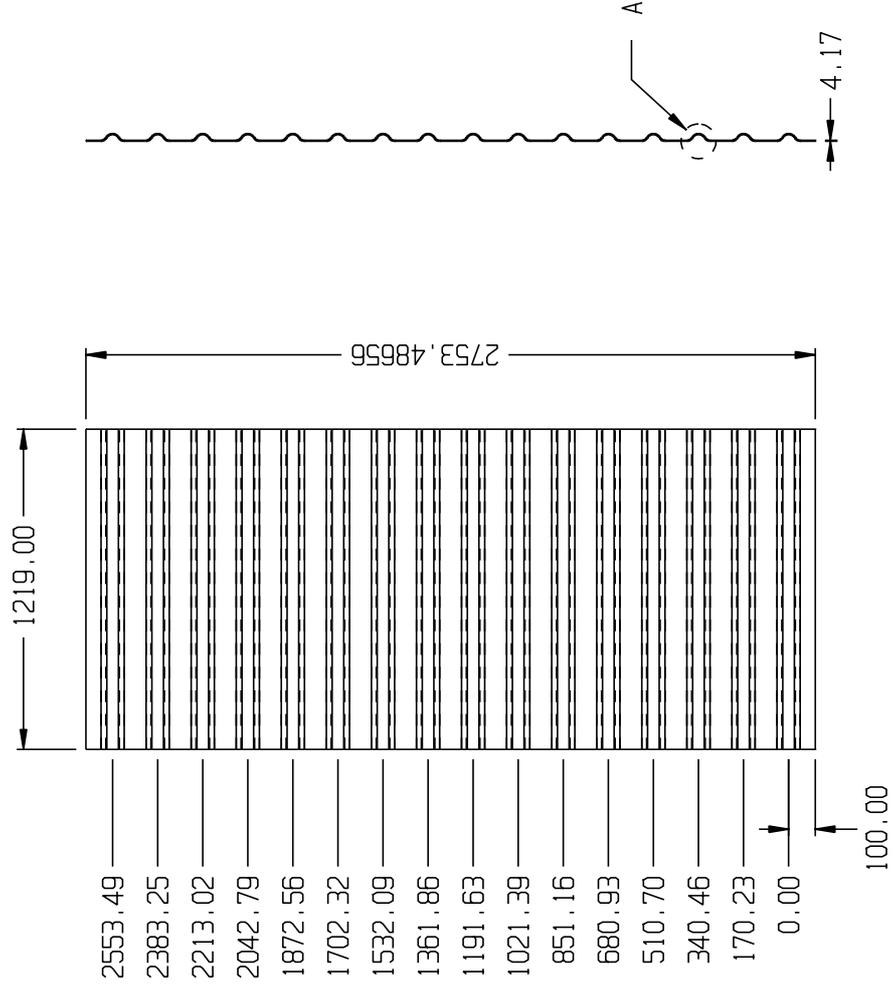


**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

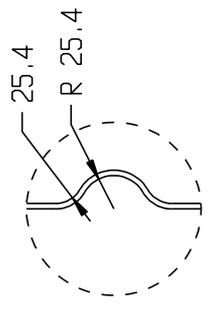
DISEÑO	I. M. ERICK JAEI ENRIQUEZ RUBIO
REVISO	DR. ELADIO MARTÍNEZ RAYÓN
<b>PANEL TIPO RX</b>	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
0 METRICO  
± 1.5 mm  
± 0.25 mm  
0.00 ± 0.025 mm  
AN GUL A R  
GRADOS: MIN. SEC.  
INCHAS: 1/8 3/16 1/4 5/16 3/8 1/2 5/8 3/4 7/8

(16RX 25.4r) 16 REFUERZOS HORIZONTALES PASADOS  
PRIMER Y ÚLTIMO REFUERZO A 10cm DEL BORDE DE LA PLACA



16RX25.4RSTK. LAMINA CAL. 8 ASTM-A36  
1219mm x 3048mm



Detalle A  
Escala 5:1

2553.49	1219.00	2753.48656
2383.25		
2213.02		
2042.79		
1872.56		
1702.32		
1532.09		
1361.86		
1191.63		
1021.39		
851.16		
680.93		
510.70		
340.46		
170.23		
0.00	100.00	

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	DET.	HOJA	1-1
16RX 25.4r	ASTM A36	1	16RX-4r	CANTIDAD DE HOJAS	1
E: 200Gpa					
v:0.26					
P:7850 Kg/m3					
n:44.33Kg					

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



DISEÑO	I. H. ERICK JUEL ENRIQUEZ RUBIO
REVISO	DR. ELADIO MARTINEZ RAYÓN
PANEL TIPO RX	

ESTE DIBUJO USA SISTEMA DE MEDICION METRICO.  
LAS TOLERANCIAS SERAN:  
METRICO  
mm  
±0.25  
±0.50  
±0.75  
±1.00  
A.M.G.U.L.A.  
GRADOS MIN. SEG.  
±0' 30"  
±0' 00"  
±0' 00"