



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EFFECTOS DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA SOBRE LAS PROPIEDADES  
SONORAS DE LOS PLATILLOS DE PERCUSIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MANUEL ALEJANDRO DÍAZ SOTOMAYOR

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VIVIANA MERUANE NARANJO  
DIEGO PIÑA JUSTO

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: MANUEL ALEJANDRO DÍAZ SOTOMAYOR  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

## EFFECTOS DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA SOBRE LAS PROPIEDADES SONORAS DE LOS PLATILLOS DE PERCUSIÓN

En este trabajo de título se estudia la variación sonora de los platillos de percusión frente a los procesos a los que es sometido a lo largo de la fabricación. Esto con miras a desarrollar un proceso de fabricación de platillos moderno y de calidad, y abrir la posibilidad de creación de nuevos sonidos.

Sabiendo *a priori* que los procesos de manufactura particulares en la fabricación de platillos alteran la forma y a su vez generan esfuerzos residuales en la pieza trabajada, se plantea en este trabajo una metodología de construcción y experimentación que permita separar las variables de cambio de forma y esfuerzos residuales que afectan en el sonido.

Se construyeron cuatro prototipos de platillo, uno de prueba y tres funcionales de distintas medidas y sometidos a diferentes combinaciones de procesos. Entre cada proceso de cambio de forma se realizó un tratamiento térmico de alivio de tensiones con el objetivo de eliminar esfuerzos residuales internos en la pieza. Antes y después de cada sesión de alivio de tensiones se realizaron mediciones de dureza y digitalización de la forma en 3D para verificar que la forma ni las propiedades mecánicas no variaron significativamente por causa del tratamiento térmico.

Se realizaron mediciones acústicas vía micrófono al término de cada proceso de manufactura y tratamiento térmico. Las mediciones acústicas fueron tratadas en código Python para obtener espectrogramas comparables entre sí. Además, luego de cada proceso se realizó un análisis cualitativo de la percepción del sonido.

Los resultados obtenidos comprueban que la metodología de medición es válida, y sugieren que el sonido se vuelve más complejo a medida que se trabaja el platillo.

En particular, el embutido de campana genera peaks aislados en las frecuencias altas y una zona extra de percusión en el mismo platillo de sonido más brillante. Los procesos de martillado, repujado y torneado cambian la forma y complejizan el espectrograma, lo que se traduce en un sonido más articulado, complejo (mayor cantidad de armónicos percibibles) y oscuro. Los tratamientos térmicos de alivio de tensiones complejizan aún más el espectro, activando una amplia gama de frecuencias bajas a altas y que perduran por más tiempo vibrando.

Los resultados sugieren que los procesos de deformación plástica producen estados de esfuerzos residuales complejos que afectan en la rigidez y amortiguamiento de la pieza, lo que se traduce en variaciones de amplitud, permanencia en el tiempo del sonido y frecuencias dominantes. En particular, la aplicación de procesos de tratamiento de alivio de tensiones modifican las características vibratorias, produciendo un sonido más brillante, complejo, potente y que perdura por más tiempo. Debido a esto, el tratamiento térmico de alivio de tensiones tiene el potencial de utilizarse directamente como proceso de manufactura en la fabricación de nuevos sonidos de platillos.





*A la música*



# Agradecimientos

A mi familia, a mis grandes amigos que conservo de la infancia, a mis grandes amigos y amigas que he conocido en mi vida adulta. A mis profesores, en especial al prof. Rubén Fernández que me brindó apoyo y confianza constante. Al equipo del Taller de Molina, al equipo del Fablab. A mi banda. A mis compañeros y maestros de karate. A mis mascotas. A la música y el arte en general.

# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Platillos de Percusión . . . . .	3
1.1.1. Características Generales . . . . .	3
1.1.2. Métodos de Fabricación . . . . .	4
1.1.3. Timbre y comportamiento acústico de los platillos . . . . .	6
1.2. Espectro de Frecuencias y Espectrograma . . . . .	7
1.3. Propiedades mecánicas y Tratamientos Térmicos . . . . .	8
1.3.1. Dureza . . . . .	9
1.3.2. Tratamiento Térmico de Alivio de Tensiones . . . . .	10
1.4. Efecto de los Esfuerzos Residuales en las Propiedades acústicas . . . . .	11
<b>2. Metodología</b>	<b>13</b>
2.1. Diagrama de Flujo . . . . .	13
2.2. Diseño de Prototipo . . . . .	14
2.3. Selección y adquisición del material . . . . .	14
2.4. Proceso de Construcción . . . . .	15
2.4.1. Descripción de los procesos de manufactura . . . . .	15
2.4.2. Procesos para metodología experimental . . . . .	19
2.5. Mediciones acústicas . . . . .	20
2.6. Mediciones de Dureza . . . . .	22
<b>3. Manufactura de Platillos</b>	<b>23</b>
3.1. Prototipo 1 . . . . .	23
3.1.1. Embutido . . . . .	23
3.1.2. Martillado . . . . .	25
3.1.3. Torneado . . . . .	25
3.2. Prototipo 2 . . . . .	26
3.2.1. Embutido de Campana . . . . .	26
3.2.2. Martillado . . . . .	27
3.2.3. Torneado . . . . .	27
3.3. Prototipo 3 . . . . .	28
3.3.1. Embutido de Campana . . . . .	28
3.3.2. Martillado . . . . .	28
3.3.3. Torneado . . . . .	29

3.4. Prototipo 4 . . . . .	29
3.4.1. Repujado . . . . .	30
3.4.2. Martillado . . . . .	30
3.4.3. Torneado . . . . .	31
<b>4. Resultados</b>	<b>32</b>
4.1. Escáner de Forma . . . . .	32
4.2. Mediciones de Dureza . . . . .	34
4.3. Efecto de los Procesos en el Espectrograma y el Sonido . . . . .	35
4.3.1. Espectrograma Platillo comercial . . . . .	35
4.3.2. Efecto del Embutido de Campana . . . . .	36
4.3.3. Efecto del repujado . . . . .	37
4.3.4. Efecto del alivio de tensiones luego del repujado . . . . .	38
4.3.5. Efecto del Martillado . . . . .	38
4.3.6. Efecto del alivio de tensiones luego del martillado . . . . .	41
4.3.7. Efecto del Torneado . . . . .	44
4.3.8. Efecto del alivio de tensiones luego del torneado . . . . .	45
<b>5. Discusión y Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

# Índice de Ilustraciones

1.1. Sección transversal platillo de percusión genérico. . . . .	4
1.2. Vista de superior platillo comercial Zildjian ZBT Crash 14 pulgadas. . . . .	4
1.3. Esquema Transformada de Fourier. . . . .	7
1.4. Espectro de Fourier de señal periódica. . . . .	8
1.5. Espectrograma de una señal acústica. . . . .	8
1.6. Esquema de etapas para la medida de la dureza. . . . .	9
1.7. Efecto del trabajo en frío sobre la resistencia y ductilidad del cobre y el latón. . . . .	10
1.8. Diagrama de fases Cu-Zn . . . . .	11
1.9. Comparación espectro frecuencias versus presión sonora . . . . .	12
2.1. Diagrama de flujo para la metodología . . . . .	14
2.2. Diagrama diseño prototipo de platillo. . . . .	14
2.3. Composición Química latón UNS C23000. . . . .	15
2.4. Propiedades mecánicas latón UNS C23000. . . . .	15
2.5. Troqueles para embutido . . . . .	16
2.6. Sistema de pretensión. . . . .	16
2.7. Llave de torque CDI modelo 2502ldin . . . . .	16
2.8. Esquema patrón primera etapa de martillado Prototipo 1. . . . .	17
2.9. Esquema patrón segunda etapa de martillado Prototipo 1. . . . .	17
2.10. Esquema patrón primera etapa de martillado Prototipo 2. . . . .	18
2.11. Esquema patrón segunda y tercera etapa de martillado Prototipo 2. . . . .	18
2.12. Esquema patrón de martillado Prototipo 4. . . . .	19
2.13. Molde macho para torneado. . . . .	20
2.14. Molde macho para torneado. . . . .	20
2.15. Molde hembra para torneado. . . . .	20
2.16. Molde hembra para torneado. . . . .	21
2.17. Diagrama Montaje para mediciones acústicas . . . . .	21
2.18. Espectrograma platillo comercial hihat. . . . .	22
3.1. Diagrama construcción Prototipo 1 y 2 . . . . .	23
3.2. Prueba de embutido fallida . . . . .	24
3.3. Embutido Prototipo 1 . . . . .	24
3.4. Martillado Prototipo 1 . . . . .	25
3.5. Torneado Prototipo 1 . . . . .	26
3.6. Embutido de campana Prototipo 2 . . . . .	26
3.7. Martillado Prototipo 2 . . . . .	27

3.8. Torneado Prototipo 2 . . . . .	27
3.9. Diagrama construcción Prototipo 3 . . . . .	28
3.10. Embutido de campana Prototipo 3 . . . . .	28
3.11. Martillado Prototipo 3 . . . . .	29
3.12. Torneado Prototipo 3 . . . . .	29
3.13. Diagrama procesos Prototipo 4 . . . . .	29
3.14. Repujado Prototipo 4 . . . . .	30
3.15. Martillado Prototipo 4 . . . . .	30
3.16. Torneado Prototipo 4 . . . . .	31
4.1. Escáner 3D cara superior Prototipo 3 . . . . .	32
4.2. Alineación Prototipo 3-M versus 3-R1 . . . . .	33
4.3. Escáner 3D cara superior Prototipo 3 . . . . .	33
4.4. Alineación Prototipo 4-R versus 4-AT1 . . . . .	33
4.5. Escáner 3D cara superior Prototipo 2 . . . . .	34
4.6. Alineación Prototipo 2-M versus 2-AT2 . . . . .	34
4.7. Espectrograma platillo comercial hihat. . . . .	36
4.8. Efecto del embutido. Comparación espectrogramas 3-D versus 3-E. . . . .	37
4.9. Efecto del repujado. Comparación espectrogramas 4-D versus 4-R . . . . .	38
4.10. Efecto del alivio de tensiones luego del repujado. Comparación espectrogramas 4-R versus 4-AT1 . . . . .	39
4.11. Efecto del martillado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-E versus 2-M . . . . .	39
4.12. Efecto del martillado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-E versus 3-M . . . . .	40
4.13. Efecto del martillado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-AT1 versus 4-M . . . . .	41
4.14. Efecto del alivio de tensiones luego martillado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-M versus 2-AT2 . . . . .	42
4.15. Efecto del alivio de tensiones luego del martillado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-M versus 3-AT2 . . . . .	43
4.16. Efecto del alivio de tensiones luego del martillado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-M versus 4-AT2 . . . . .	43
4.17. Efecto del torneado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-AT2 versus 2-T . . . . .	44
4.18. Efecto del torneado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-AT2 versus 3-T . . . . .	45
4.19. Efecto del torneado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-AT2 versus 4-T . . . . .	46
4.20. Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-T versus 2-AT3 . . . . .	46
4.21. Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-T versus 3-AT3 . . . . .	47
4.22. Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-T versus 4-AT3 . . . . .	48





# Introducción

Los platillos, platos o címbalos son instrumentos musicales que forman parte de la mayoría de los estilos musicales. Los modelos más utilizados actualmente por bateristas comenzaron a aparecer durante la primera mitad del siglo XX, en paralelo al desarrollo de la batería. Con la aparición y evolución de estilos musicales, las exigencias e intereses de los músicos con respecto a las características de los platillos fueron aumentando, lo que incentivó y continúa incentivando la producción industrial de este instrumento.

Los platillos son instrumentos de percusión de altura, es decir, no vibran con una nota definida como lo sucede por ejemplo con una tecla de piano o una cuerda de guitarra. En su lugar para diferenciar entre platillos se asocia un carácter a su sonido: oscuro, brillante, seco, etc. Un platillo consta básicamente de un disco cóncavo de metal, normalmente de bronce o latón, y que en su centro presenta una cúpula llamada campana.

Si bien existen empresas que fabrican platillos a nivel masivo, en mayor medida el proceso es artesanal realizado por expertos artesanos. Se sabe que el sonido de un platillo se ve afectado por su material, forma y tamaño, pero también por el proceso por el que ha pasado hasta convertirse en instrumento [6] [7] [11].

Resulta interesante medir la sonoridad a lo largo de la fabricación de un platillo y comparar las variaciones sonoras entre cada proceso. La motivación e interés reside en utilizar lo concluído con miras a poder establecer un proceso moderno de fabricación de platillos que apunte a una gran calidad, control de los procesos y la posibilidad de crear sonidos de platillos completamente nuevos. En este trabajo de título se plantea el estudio del efecto de los procesos de manufactura en el sonido de un platillo. Además, a medida que la pieza es manufacturada sus propiedades mecánicas, en particular la dureza, también se verá afectada, por tanto su estudio es complementario.

# Objetivos

## Objetivo General

Estudiar y relacionar el efecto que cada proceso de manufactura tiene en las propiedades sonoras de los platillos de percusión.

## Objetivos Específicos

El objetivo general se desarrolla por medio de los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar y construir prototipos de platillos funcionales
2. Eliminar tensiones internas en el material luego de los procesos a través de tratamientos térmicos
3. Comprobar la estabilidad de la forma luego de tratamientos térmicos vía digitalización 3D.
4. Analizar la dureza en el prototipo al término de cada proceso
5. Comparar la variación acústica a través de espectrogramas al término de cada proceso de manufactura
6. Analizar cualitativamente el sonido

## Alcances

El alcance de este trabajo de título consiste en la construcción de prototipos de platillos funcionales y mediciones acústicas para determinar espectrogramas y realizar comparaciones en la variación acústica. Incluye el análisis de dureza, escáner 3D de la forma del platillo y la reducción de esfuerzos residuales internos vía tratamientos térmicos.

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1. Platillos de Percusión

Los platillos, platos o címbalos son instrumentos que forman parte de la mayoría de los estilos musicales. Los modelos más utilizados actualmente por bateristas comenzaron a aparecer durante la primera mitad del siglo XX, en paralelo al desarrollo de la batería. Con la aparición y evolución de diferentes estilos musicales, las exigencias e intereses de los músicos con respecto a las características de los platillos fueron aumentando, lo que incentivó y continúa incentivando la producción industrial de este instrumento. La apariencia geométrica de este instrumento no evidencia la complejidad de la gama de los diferentes sonidos que pueden ser producidos. Sonido que se ve afectado por el material del que está constituido, de la forma y donde es percutido, donde es escuchado y por supuesto del modelo de platillo. F. Kuratani [7] relaciona los modos de vibraciones y las frecuencias naturales de un platillo de bronce con los esfuerzos residuales producidos en los procesos. Por lo tanto, el sonido de un platillo se ve afectado además por los procesos de manufactura a los que es sometido hasta convertirse en instrumento musical. Todos estos factores hacen que el timbre de un plato sea una variable multidimensional y debe ser analizada considerando tal nivel de complejidad.

#### 1.1.1. Características Generales

En general, un platillo de percusión consiste en un disco metálico fino (espesor considerablemente menor a su radio) agujereado en el centro. La mayoría de los platos tienen una deformación vertical que aumenta en la dirección positiva del radio formando un ángulo en la sección transversal conocido como perfil. La parte central se asemeja a una semiesfera, llamada cúpula, copa o campana, pero existen algunos modelos prácticamente sin perfil y sin campana, conocidos como tipo flat. La figura 1.3 muestra la sección transversal de un plato general y en la figura 1.4 se muestra la vista superior de un platillo comercial. Los términos utilizados para denominar las diferentes partes corresponden a los conceptos utilizados por fabricantes.

Con base en la experiencia, un (buen) platillo debiese caracterizarse por un sonido fuerte, du-

radero y vibrar con una alta gamas de frecuencias desde graves hasta agudas, que se realzan y se mezclan entre sí.

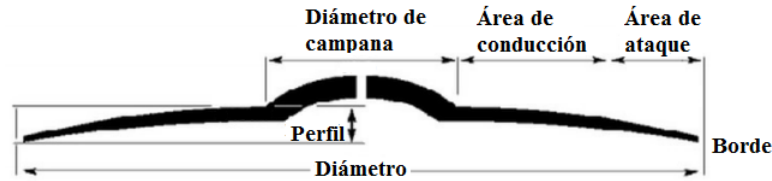


Figura 1.1: Sección transversal platillo de percusión genérico.  
Adaptado de [6]



Figura 1.2: Vista de superior platillo comercial Zildjian ZBT Crash 14 pulgadas.  
Fuente: [15]

### 1.1.2. Métodos de Fabricación

Los métodos utilizados actualmente para la fabricación de platillos no siguen un único patrón. Mientras que algunos fabricantes se adaptan a los desarrollos tecnológicos, como el control y automatización de los procesos, otros todavía utilizan métodos manuales aplicados desde principios del siglo XX. La mayoría de los platillos están hechos de bronce (CuSn) o latón (CuZn), aunque dependiendo del fabricante, pequeños porcentajes de otros elementos son añadidos a fin de alterar las características del material como el módulo de elasticidad, dureza, resistencia, tamaño de grano. Estas características influyen en el timbre del instrumento. Dentro de estos elementos aleantes se encuentran plata, níquel y fósforo.

Cada fabricante siguen un orden de procesos característicos en su línea de producción, sin embargo algunas de las etapas son comunes en gran parte de las fábricas:

1. Fundición y laminado: algunas fábricas producen su propia aleación que luego moldean en laminadoras para obtener una hoja delgada de metal. Otras fábricas adquieren el material listo en forma de placa delgada para los posteriores procesos.
2. Moldeado: creación de la forma de la campana y del perfil. Este paso puede ser realizado utilizando un proceso de embutido, como también un proceso de repujado (spin-forming).
3. Martillado: es un tipo de proceso característico en la fabricación de platillos. Se realizan impactos continuos a lo largo de la superficie del plato provocando deformación plástica.

Puede ser realizado manualmente o con máquinas. A través de este proceso se producen esfuerzos residuales que afectan el sonido del platillo [7]. Con este proceso también es posible moldear la forma del arco (perfil) del platillo e incluso la campana.

4. Torneado: la pieza es montada en un torno para desvastar la superficie. El desvaste le otorga el sonido final y la apariencia del platillo.
5. Tratamientos térmicos: en algunos casos los fabricantes realizan tratamientos térmicos entre procesos o al finalizar la fabricación. Los tratamientos térmicos tienen como objetivo modificar las propiedades mecánicas del material utilizado para facilitar ciertos procesos. Consisten en mezclar procesos de calentamiento, mantenimiento de la temperatura durante cierto tiempo y enfriamientos. Variando la forma de calentamiento y enfriamiento del material se pueden obtener diferentes combinaciones de las propiedades mecánicas. Los factores que se tienen en cuenta en cada tratamiento térmico son la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a la temperatura de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Además se debe considerar la composición del bronce o latón, la forma y tamaño de la pieza a tratar térmicamente, y las características que se desean obtener. Los tratamientos más comunes son:
  - Temple: consiste en un calentamiento a una temperatura suficientemente elevada bajo la temperatura de fusión por cierta cantidad de tiempo, seguido de un enfriamiento suficientemente rápido. El tamaño de la pieza y el medio de enfriamiento (agua, aceite, etc.) afecta la velocidad de enfriamiento, factor que influye en las propiedades al final del proceso.
  - Revenido: tratamiento que se da a los materiales que han sido sometidos a temple. Se procede con un calentamiento de la pieza a una temperatura moderada por un periodo de tiempo (normalmente una hora) seguido de un enfriamiento al aire.
  - Recocido: consiste en calentar la pieza por un cierto periodo de tiempo seguido de un enfriamiento lento dentro del mismo horno o al aire.

Los efectos de estos tratamientos en el latón (CuZn) y bronce (CuSn) se enlistan a continuación [8]:

- Respecto al temple, conforme se aumenta el tiempo de mantenimiento del temple se aumenta el tamaño de grano y con ello disminuye la dureza.
- Con el revenido en los bronce y latones se obtienen piezas más duras que las templadas, pero más frágiles que el material inicial.
- Los procesos de recocido son útiles para aliviar tensiones internas (ver sección 1.3.2), homogeneizar las piezas químicamente y aumentar ductilidad.
- Tanto el temple como el revenido no mejoran las propiedades mecánicas notablemente. En la industria del bronce se prefiere utilizar la deformación en frío para aumentar la dureza y la resistencia. A menudo se realiza un posterior recocido a la deformación en frío para aumentar ductilidad y poder seguir deformando.

Entre cada proceso y finalizada la fabricación normalmente se realiza un control de calidad observando las características geométricas y la masa de la pieza. Algunas fábricas utilizan un control de calidad realizado por un técnico especialista que compara la sonoridad del plato teniendo como referencia un modelo estándar.

### 1.1.3. Timbre y comportamiento acústico de los platillos

Se habla de timbre en función de aquella cualidad que permite diferenciar un sonido de otro, sea este musical o no. Algunas definiciones se refieren al timbre como una cualidad o parámetro más del sonido, equiparable a la frecuencia (tono), amplitud (intensidad) y duración. Pero en realidad no se trata de un parámetro en sí mismo sino de la combinación de varios, entre los que podemos mencionar como determinantes a:

- El espectro: distribución de la energía en función de los parciales (armónicos o inarmónicos) de un sonido complejo.
- La envolvente dinámica: variación de la amplitud en el tiempo.
- La formante: el pico de intensidad o concentración energética en una determinada frecuencia en el espectro de un sonido.

Entiéndase el término “armónico” como las frecuencias que componen el espectro de presión sonora después del impacto. Con respecto al proceso de martillado, patrones de martillado diferentes causan efectos diferentes: patrones simétricos generan una mezcla uniforme de armónicos en las frecuencias medias y medias-agudas, mientras que los patrones aleatorios producen armónicos con cuerpo dentro de la banda de frecuencias graves [13].

En un sistema de clasificación sugerido por la el fabricante PAISTE [10], las características sonoras pueden ser separadas en algunos tópicos. La nomenclatura utiliza adjetivos que definen los extremos de las escalas:

- Coloración Sonora: *brillante - oscuro*. Esta característica está relacionada con la intensidad de bajas o altas frecuencias. Es importante entender que, en gran parte, los platos de percusión presentan un rango de frecuencias muy amplio. A la sensación general de más agudo o más grave se le conoce como coloración sonora. Mayor intensidad de frecuencias altas generan la sensación brillante, mayor intensidad de frecuencias bajas la sensación oscura.
- Ataque / Sonido de baqueta: *pronunciado - esparcido*. Estos términos se refieren al sonido inicial, inmediatamente después del impacto con la punta de la baqueta en la superficie del plato. Cuando esta característica se vuelve definida se utiliza el término pronunciado, en el caso contrario se utiliza el término esparcido.
- Sustain: *alto - bajo*. Tiempo de permanencia del sonido luego de la percusión.

Otra nomenclatura más simplificada para el timbre de los platillos es presentado por Werner [13], donde son identificadas algunas palabras utilizadas en el lenguaje entre músicos y fabricantes juntos con sus significados:

- Oscuro: timbre grave.
- Brillante: timbre agudo.
- Seco: mínimo de armónicos.
- Con cuerpo: muchos armónicos.
- Articulado: conducción precisa, pronunciado.

SABIAN [11], reconocida empresa fabricante de platillos, afirma que el timbre de un plato

se ve afectado por las diferencias entre ciertas dimensiones de la estructura. El tamaño de la campana (altura y espesor) es responsable de la aparición de una frecuencia tonal perceptible, creando un peak en el espectro de sonido generado. La variación del diámetro externo afecta la coloración del platillo. Cuanto mayor sea el diámetro, más grave(oscuro); cuanto menor el diámetro externo, más agudo (brillante). El diámetro también afecta el *sustain*. Cuanto mayor es el diámetro externo, mayor sustain.

## 1.2. Espectro de Frecuencias y Espectrograma

Una fuente de ondas sonoras es una superposición de frecuencias diferentes. Cuando escuchamos una onda sonora con una frecuencia dominante (fundamental) escuchamos una nota. En cambio, en el caso de los platillos, el sonido producido al ser percutidos es complejo, ya que contiene frecuencias en todo el rango audible, y no existe una sola que se destaque significativamente [6] [7] [13]. Una forma de separar cada componente de la señal es mediante el análisis espectral, en donde se estudian las señales en el dominio de frecuencias. El matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

En la figura 1.3 se observa un esquema de este método. Un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier [9] captura una señal, calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra de forma individual en una gráfica de espectro. La captura de la señal puede ser realizada con transductores [9], dispositivos que transforman vibraciones mecánicas en señales eléctricas analógicas; o bien directamente con micrófonos. El cálculo de la transformada rápida de Fourier y la gráfica generada es producida en base a softwares especializados. En la figura 1.4 se muestra como sería el espectro de Fourier de una señal periódica.

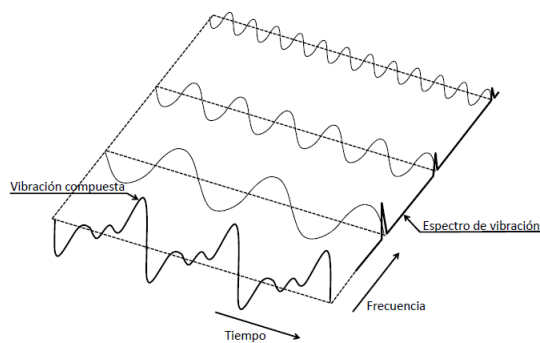


Figura 1.3: Esquema Transformada de Fourier.  
Fuente: [9]

Sin embargo, en una fuente sonora real los parámetros de amplitud y frecuencia no suelen ser estables, sino que evolucionan a lo largo de su duración. Por tanto para analizar un sonido nos interesa obtener una representación que muestre la evolución de la amplitud y la frecuencia a lo largo del tiempo. Esta representación recibe el nombre de [3]. En la figura



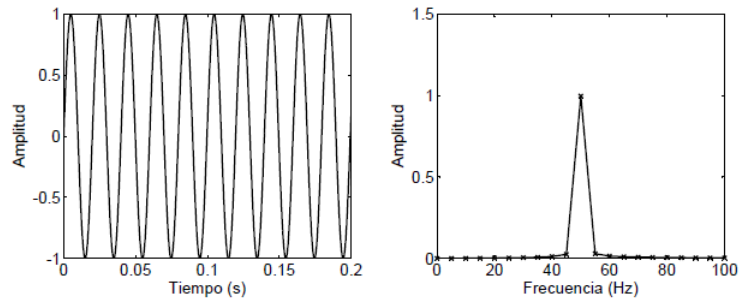


Figura 1.4: Espectro de Fourier de señal periódica.  
Fuente: [9]

1.5 se observa un espectrograma de una señal acústica. El eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, las frecuencias están representadas en el eje de las ordenadas en Hz, y la variación de energía en dB (amplitud) en el plano tridimensional está representada mediante una gama de colores donde los colores más calidos representan mayor amplitud.

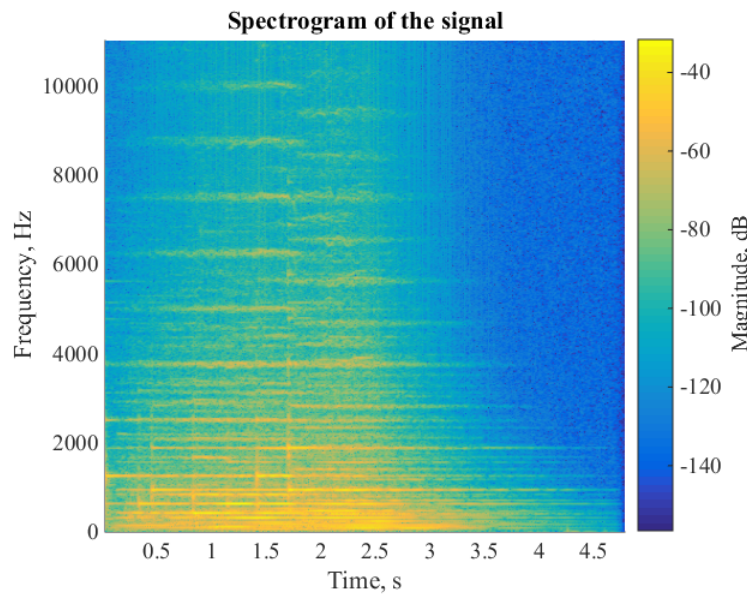


Figura 1.5: Espectrograma de una señal acústica.  
Fuente: [14]

### 1.3. Propiedades mecánicas y Tratamientos Térmicos

Los metales se elaboran en formas funcionales aplicando una amplia gama de operaciones de conformado de metal, tanto en frío como en caliente. En el caso de la fabricación de platillo los métodos de fabricación alteran las propiedades del material base utilizado.

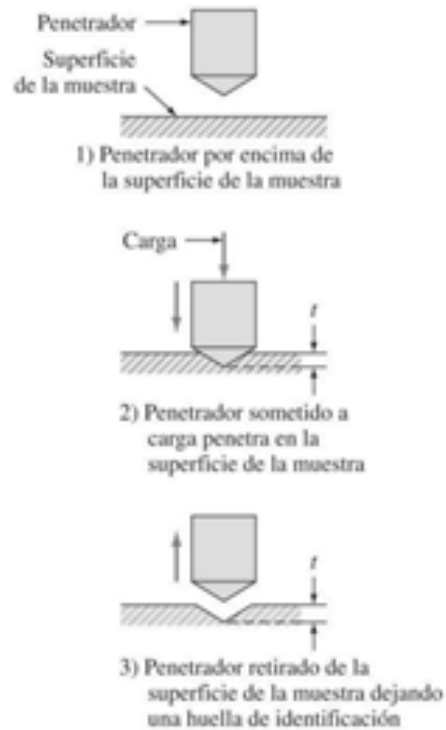


Figura 1.6: Esquema de etapas para la medida de la dureza. La profundidad  $t$  determina la dureza del metal. A menor valor de  $t$ , mayor dureza del material. Fuente: Adaptado de [12]

### 1.3.1. Dureza

#### Ensayo de Dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un metal a la deformación plástica. Se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados, se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta. Después de producir la indentación, se retira el penetrador. A continuación se calcula o lee un número empírico de dureza basado en el área de corte transversal de la huella producida, o en su profundidad. Ver figura 1.6 como esquema del procedimiento

#### Endurecimiento por trabajo en frío

En la fabricación de platillos se utilizan procesos de trabajo en frío. La deformación plástica producida no solo cambia permanentemente la forma de la pieza, si no que también su microestructura. El cambio en la estructura interna puede ser un cambio de forma y tamaño

de los granos, generación de imperfecciones de red, desarrollo de una textura entre otros [12]. El principal tipo de imperfecciones de red generadas durante el trabajo en frío son las dislocaciones. Todas estas imperfecciones producen una gran distorsión de la red y aumentan la energía interna del metal o aleación [1]. El tipo de distorsión producida puede variar con el tipo de proceso como forjado, laminado, embutido, etc.

Del total de energía gastado en la deformación en frío (trabajo en frío), alrededor de un 10 % permanece almacenada dentro del metal cristalino y el remanente se disipa como calor. El mayor contribuidor a la energía almacenada (llamada energía inherente) es el aumento de la densidad de dislocaciones.

Todas las imperfecciones dan lugar a esfuerzos internos [1]. El aumento de la energía interna vuelve al metal termodinámicamente inestable a cualquier temperatura. La energía libre en un metal como este estado es mayor que la de un estado Recocido.

El cambio en el tamaño y forma de los granos durante la deformación plástica ocurre principalmente por deslizamiento de planos densos [12]. Multiplicación de dislocaciones en ciertos sistemas de deslizamiento sobre la deformación plástica lleva a la interacción entre las mismas dislocaciones, lo cual restringe su movimiento. La consecuencia de esto es que para que más deformación plástica tenga lugar, una mayor magnitud de carga o esfuerzo es requerido. Se dice entonces que el material se ha endurecido por trabajo en frío. En consecuencia el trabajo en frío resulta en un aumento de la dureza, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción; pero también una reducción en la ductilidad (o porcentaje de elongación) y tenacidad (resistencia) de un material dúctil. La figura 1.7 ilustra el efecto del porcentaje de trabajo en frío en resistencia y ductilidad del cobre y latón.

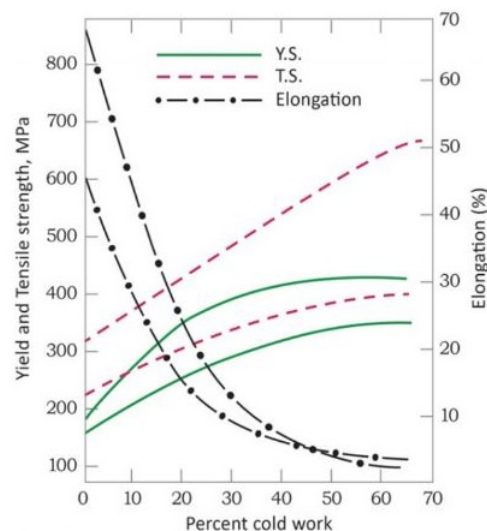


Figura 1.7: Efecto del trabajo en frío sobre la resistencia y ductilidad del cobre y el latón. La curvas inferiores corresponden al cobre y las superiores al latón. Fuente: Adaptado de [1]

### 1.3.2. Tratamiento Térmico de Alivio de Tensiones

Como su nombre lo indica, el Tratamiento de Alivio de Tensiones es aplicado a piezas en donde esfuerzos internos son introducidos durante el procesos de fabricación. Estos esfuerzos llamados Esfuerzos Residuales son con frecuencia de naturaleza de tracción, y pueden ser

introducidos mediante maquinado, cortado, soldado, forjado, etc.

En el contexto del cobre y sus aleaciones, este tratamiento es comunmente usado para aliviar esfuerzos residuales de piezas trabajadas en frío [1]. El trabajo en frío es utilizado para aumentar resistencia y dureza de las piezas o componentes mediante deformación plástica, pero al mismo tiempo la ductilidad se ve reducida.

El tratamiento de alivio de tensiones es llevado a cabo por calentamiento de la pieza, generalmente bajo la temperatura de Recocido, lo cuál no causa recristalizacion ni por tanto ablandamiento del metal. Las propiedades derivadas del trabajo en frío no deberían verse afectadas significativamente. La temperatura del tratamiento de alivio de tensiones debe mantenerse baja, pero el tiempo de mantenimiento debe ser lo suficientemente prolongado para lograr un alivio de los esfuerzos residuales.

El tratamiento de alivio de tensiones permite la aplicación de mayores cargas externas en la pieza, aumenta la resistencia a la fatiga y al impacto, baja la susceptibilidad a la fractura frágil y a la corrosión intercrystalina. En la figura 1.8 se observa el diagrama de fases Cu-Zn (latón) y la zona del Tratamiento de Alivio de Tensiones.

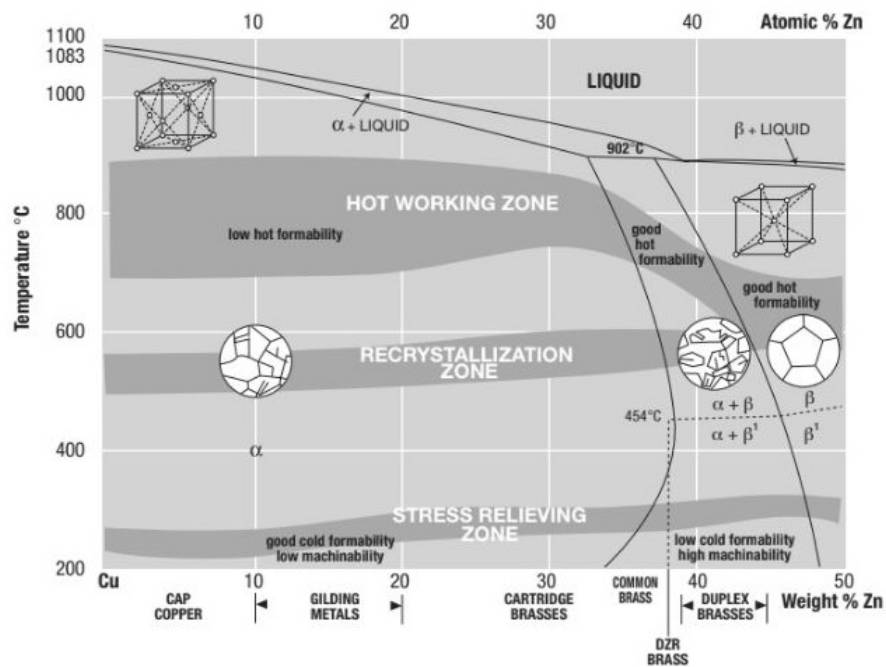


Figura 1.8: Diagrama de fases Cu-Zn  
 . Fuente: Adaptado de [2]

## 1.4. Efecto de los Esfuerzos Residuales en las Propiedades acústicas

Como se ha mencionado, los procesos de formado en frío no solo cambian la forma de la pieza, si no que también generan imperfecciones de red como dislocaciones, y esfuerzos

residuales en la microestructura del material. En particular los procesos de repujado y martillado característicos en la fabricación de platillos generan esfuerzos residuales que alteran la propiedades vibratoriales.

Osamura y Kuratani en [6] muestran los esfuerzos residuales y la deformación presentes en un platillo luego de estos procesos. Los esfuerzos residuales y la deformación aumenta luego de realizar un proceso de martillado después de un proceso de repujado.

Acústicamente, una distribución inhomogénea de esfuerzo/deformación producida por el martillado, afecta fuertemente la distribución de frecuencias. En la figura 1.9 se observa la comparación del espectro de frecuencias versus presión sonora de un platillo en dos etapas consecutivas: luego someterse a repujado y luego de un proceso de martillado sobre la pieza repujada. La figura 1.9 muestra los peaks de frecuencias en común entre ambos platos representados mediante un triángulo blanco. Las intensidades de estos peaks son mayores en un 29 % en promedio para el plato martillado. El segundo símbolo, triángulo negro apuntado hacia arriba, indica los peaks que aparecen durante el repujado, pero que desaparecen en el martillado. El tercer símbolo, triángulo negro apuntado hacia abajo, indica los peaks de frecuencia que aparecen luego del martillado. En general, la intensidad de los peaks es mayor para el plato martillado. Luego, el martillado aumenta la intensidad del sonido y modifica la distribución de frecuencias, particularmente realzando los componentes de altas frecuencias, generando intensidad y un sonido artístico más complejo.

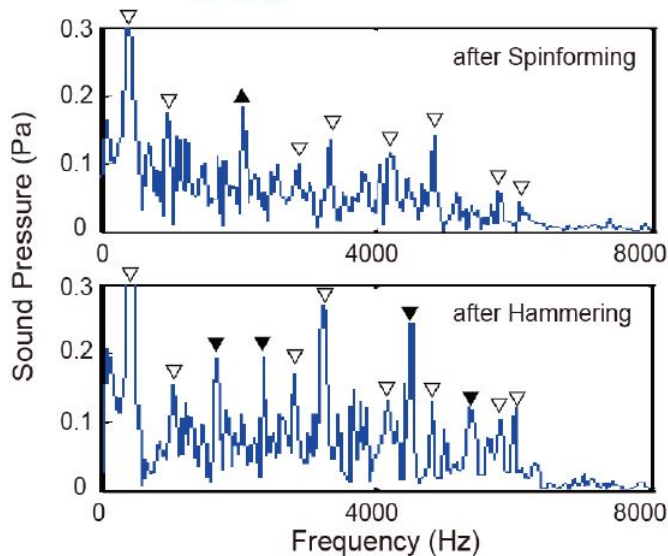


Figura 1.9: Comparación espectro frecuencias versus presión sonora . El gráfico superior corresponde al platillo luego de ser sometido a repujado. El gráfico inferior corresponde al platillo martillado luego del repujado. Fuente: [6]

Un estudio similar realizado por Kuratani [7] muestra la sensibilidad de la variación de las características vibratorias de un plato respecto a los esfuerzos residuales generados durante el martillado. Mediante análisis de elementos finitos se muestra que, cada modo de vibración del platillo posee una sensibilidad a los esfuerzos residuales diferente. Esta diferencia se traduce en que dependiendo del nivel de esfuerzos, ciertos modos de vibración se destaquen mas que otros y se mezclen entre sí generando variaciones en frecuencias naturales.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Diagrama de Flujo

Como se menciona en el capítulo de Antecedentes, el sonido del platillo se ve afectado por el material, por la forma y por los procesos de manufactura a los que se ve sometido hasta convertirse en instrumento. En particular, los procesos de manufactura como el martillado generan esfuerzos residuales internos que cambian los modos de vibraciones del plato y por tanto las frecuencias naturales emitidas [6] [7] y el timbre percibido. El problema que se presenta es el siguiente: los procesos de manufactura varían la forma del platillo la cuál influye en el sonido, pero a su vez los procesos son capaces de generar esfuerzos residuales internos que también afectan en el sonido. Entonces, cómo saber qué el sonido que se está percibiendo es consecuencia de la forma o de los esfuerzos residuales. Para responder a esta problemática se muestra la metodología realizada (figura 2.1):

- Se inicia la manufactura.
- Luego del primer proceso se realiza una tanda de mediciones de dureza, espectro de frecuencias naturales del prototipo, y escáner de forma 3D.
- A continuación, se realiza un tratamiento térmico de alivio de tensiones. De esta forma se eliminan los esfuerzos residuales que estén afectando en el sonido.
- Luego del tratamiento térmico se realiza una segunda tanda de mediciones donde nuevamente se mide dureza, espectro de frecuencias y se escanea la forma.
- Si la dureza varía significativamente, significa que el tratamiento térmico fue mal implementado. Por tanto el efecto del sonido no se puede asociar directamente a la eliminación de esfuerzos residuales, invalidando el experimento.
- Si la forma varía, el sonido no puede asociarse al cambio de forma por proceso anterior. Por tanto el experimento es inválido.
- Si la dureza y la forma no varía, entonces el espectro de frecuencias naturales se asocia al cambio de forma realizado en el proceso de manufactura, y a la eliminación de esfuerzos residuales. A partir de este punto se puede continuar con el siguiente proceso hasta terminar el prototipo.

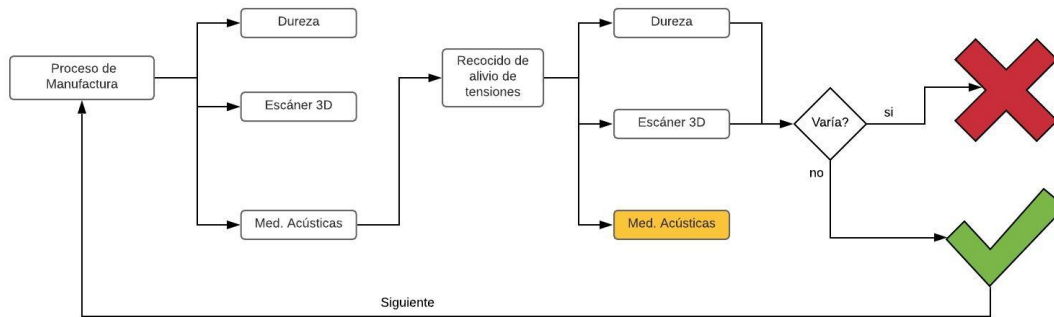


Figura 2.1: Diagrama de flujo para la metodología

## 2.2. Diseño de Prototipo

El diseño se basa en los platillos comerciales. En la figura 2.2 se muestra un diagrama con el diseño del platillo y sus medidas. La campana se diseña en base a formas típicas, sin embargo la forma final de la campana está dada por la técnica del maestro tornero (ver sección 2.4, moldeado de campana). Las dimensiones de esta campana corresponden a una cúpula semiesférica de diámetro 100 mm y altura de 17 mm. El diámetro total del plato corresponde a 360 mm, con una curvatura de perfil igual a 10 mm (ver capítulo de Antecedentes, sección 1.1.1). Este diseño se reproduce en dos versiones de 3 mm de espesor, una de 2 mm y una de 1.5 mm de espesor.

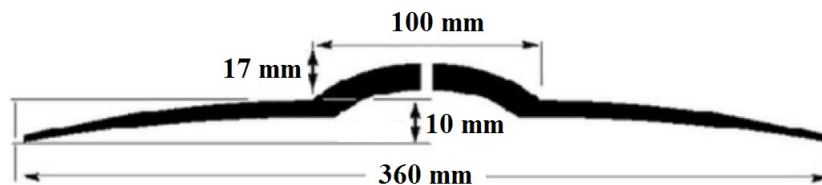


Figura 2.2: Diagrama diseño prototipo de platillo.

En la imagen se observa un espesor variable, sin embargo en los prototipos reales el espesor es constante en toda la pieza.

## 2.3. Selección y adquisición del material

El criterio de selección del material se basa en la investigación de los materiales de uso común en la construcción de platillos y en la disponibilidad y costo en el mercado chileno. Se optó por utilizar el latón UNS C23000 (CuZn15) temple semiduro (H02); latón de fase alfa caracterizado por su resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y ductilidad a temperatura ambiente, lo cuál permite ser extensamente deformado por laminación, embutido, doblado, repujado, etc. La composición química y propiedades mecánicas de este material

se detalla en las figuras 2.3 y 2.4. Otra característica de este tipo de latón es que posee un atractivo color dorado que otorga valor estético sumado a una larga vida útil [2].

El formato del material consiste en placas de 400mm x 610mm de 3mm, 2mm y 1.5mm de espesor.

	Elemento			
	Cu(1)	Pb	Fe	Zn
Min. (%)	84.0			
Max. (%)	86.0	0.05	0.05	Rem.
(1) Cu + suma de los elementos nombrados = 99.8% min.				

Figura 2.3: Composición Química latón UNS C23000.

Fuente: Adaptado de [4]

Form	Temper	Temper Code	Tensile Strength (ksi)	YS-0.5% Ext. (ksi)	Elongation (%)	Rockwell B scale	Rockwell F scale	Rockwell 30T scale	Shear Strength (ksi)
Flat Products	1/2 Hard	H02	57 Typ	49 Typ	12 Typ	65 Typ		60 Typ	37 Typ
	1/4 Hard	H01	49 Typ			45 Typ		48 Typ	
	1/8 Hard	H00	43 Typ	16 Typ	44 Typ		66 Typ	28 Typ	32 Typ
	Extra Hard	H06	78 Typ	61 Typ	4 Typ	83 Typ		72 Typ	44 Typ
	Hard	H04	70 Typ	47 Typ	5 Typ	77 Typ		68 Typ	42 Typ

Figura 2.4: Propiedades mecánicas latón UNS C23000.

Fuente: Adaptado de [4]

## 2.4. Proceso de Construcción

En total se realizaron cuatro prototipos; dos en espesor de 3mm (prototipo 1 y prototipo 2), uno en 2 mm de espesor (prototipo 3) y uno en 1.5 mm de espesor (prototipo 4).

### 2.4.1. Descripción de los procesos de manufactura

1. **Corte recto:** Placa de 610x400 es cortada en cuadrado de 400x400 mm mediante guillotina. El resto de la placa es utilizada para pruebas de las posteriores etapas del proceso. En esta etapa el disco es también perforado en su centro para los posteriores procesos.
2. **Corte circular:** Como su nombre lo dice, esta etapa consiste en convertir la placa cuadrada en un disco. Para esto se utiliza un torno, siendo el proceso realizado por personal del Taller.
3. **Moldeado de campana:** Para esta etapa se optó por el moldeado vía embutido. Para ello primero se construye el par de troqueles macho y hembra para llevar a cabo el prensado. Los troqueles se observan en la figura 2.5. La construcción de los troqueles fue llevado a realizada en torno por personal del taller. Se utilizó la prensa manual para primeras aproximaciones y pruebas, y para realizar el proceso definitivo se utilizó



la prensa hidráulica del taller. Para llevar a cabo el embutido fue necesario pretensar la pieza mediante un sistema de pretensión (ver figura 2.6). El sistema corresponde a dos placas de madera de 1 pulgada de espesor, agujereadas en su centro con el mismo diámetro de los troqueles de embutido. La plancha de latón se ubica entre las placas de madera, para luego ser tensada vía pernos, tuercas y abrazaderas. El aparataje se monta en la prensa hidráulica permitiendo el embutido. Para tener una distribución de tensiones pareja, el torque de cada tuerca y perno fue seteado en 5Nm mediante la llave de torque CDI modelo 2502ldin mostrada en la figura 2.7.

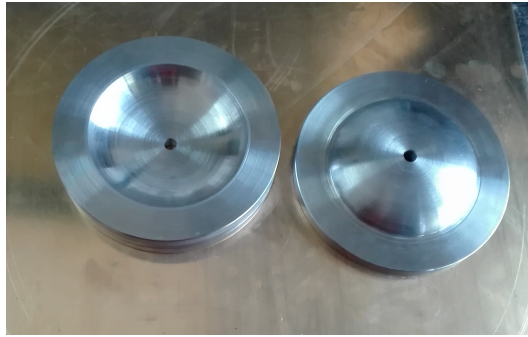


Figura 2.5: Troqueles para embutido



Figura 2.6: Sistema de pretensión.



Figura 2.7: Llave de torque CDI modelo 2502ldin

4. **Moldeado por Martillado:** Este proceso se utiliza para dar la curvatura del cuerpo del platillo. Como herramientas se utiliza un yunque clásico pulido y un martillo de mecánico.

Para cada prototipo se utiliza una secuencia de martillado particular. A continuación se detalla el proceso de martillado realizado en cada prototipo.

**Prototipo 1:** Platillo a partir de plancha de 3 mm de espesor. En las figuras 2.8 y 2.9 se observa un diagrama del martillado para el Prototipo 1. El proceso se divide en tres etapas, la primera consiste en martillar un área en forma de aro hasta un radio de 55 mm desde el borde de la campana, por ambas caras del disco. Este proceso curva el disco en una primera aproximación. La segunda etapa consiste en dar la curvatura final al plato martillando un área en forma de aro desde los 55 mm desde la campana a los 110 mm, por ambas caras del disco. La tercera y última etapa consiste en aplicar un martillado severo en ciertas zonas para nivelar el platillo. El patrón de martillado en esta última etapa es el mismo que la etapa anterior.

En este prototipo la cantidad de martillazos por unidad de superficie es de alrededor de 6 a 7 golpes por  $\text{cm}^2$ .

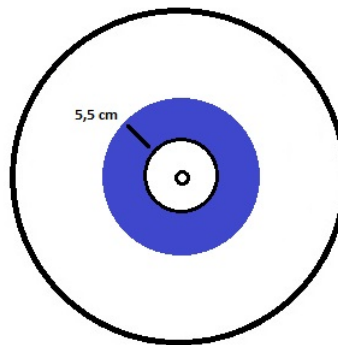


Figura 2.8: Esquema patrón primera etapa de martillado Prototipo 1.  
La zona coloreada corresponde al área de martillado.

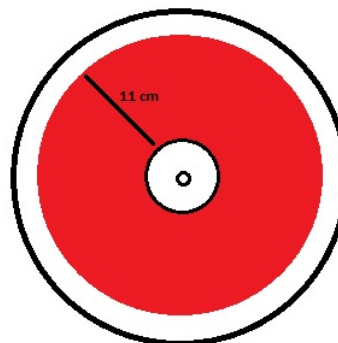


Figura 2.9: Esquema patrón segunda etapa de martillado Prototipo 1.  
La zona coloreada representa un área de martillado mayor que en la primera etapa.

**Prototipo 2:** A partir de plancha de 3 mm de espesor. En este caso el martillado también se divide en tres etapas, pero ahora siguiendo el patrón mostrado en el esquema

de las Figura 2.10 y 2.11. El patrón de martillado consiste en golpear líneas radialmente, desde el borde de la campana hasta el borde exterior del disco. Las zonas de martillado se indican con los líneas de colores y el orden numérico indica el orden del martillado. La segunda y tercera etapa se muestra en el esquema de la Figura 2.10, donde la segunda etapa llega hasta el número 4, para continuar hasta el número 8 en la tercera etapa. Se repite cada esquema de martillado en el lado superior e inferior del plato. Cabe destacar que en este prototipo la cantidad de golpes es controlada, contando con seis golpes por zona de martillado en el lado superior del plato, y con veinte golpes por cada zona de martillado en el lado inferior.

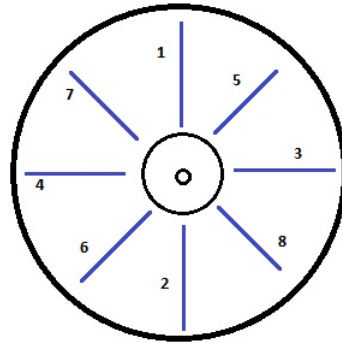


Figura 2.10: Esquema patrón primera etapa de martillado Prototipo 2. Las líneas azules indican las zonas de martillado, y el número el orden del martillado.

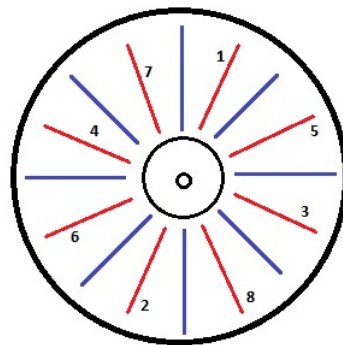


Figura 2.11: Esquema patrón segunda y tercera etapa de martillado Prototipo 2. Las líneas rojas indican las nuevas zonas de martillado, y el número el orden.

**Prototipo 3:** A partir de plancha de latón de 2 mm de espesor. El martillado en este prototipo se divide en tres etapas, siguiendo un patrón de franjas circulares, similar al Prototipo 1 (figuras 2.8 y 2.9). En este caso el martillado es en franjas circulares solo por la parte inferior del disco; primero hasta los 85 mm desde el centro, luego hasta los 120mm del centro, y finalmente hasta los 145mm del centro. La densidad de golpes es de 3 a 4 golpes por cm<sup>2</sup>.

**Prototipo 4:** A partir de platillo repujado de 1.5 mm de espesor. En este caso la curvatura del cuerpo del platillo ya está dada por el repujado, sin embargo esta curvatura no resulta ser pareja en todo el cuerpo del platillo. El martillado en este prototipo

nivela la curvatura y da la forma final. El patrón de martillado se observa en la figura 2.12. Consiste en martillar por zonas de 1/4 del área de la cara inferior de cuerpo hasta completar toda la superficie inferior. El orden numérico (1, 2, 3, 4) de la figura indica el orden de las zonas de martillado. La densidad de golpes corresponde a 2-3 golpes por cm<sup>2</sup>.

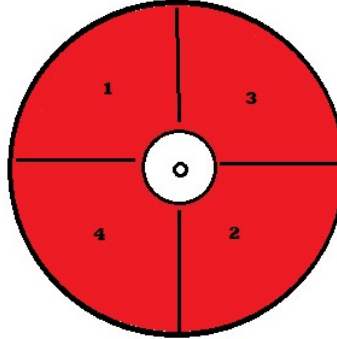


Figura 2.12: Esquema patrón de martillado Prototipo 4.

Las zonas de martillado corresponden a cuartos de toda la superficie inferior del cuerpo del plato. Los números indican el orden de las zonas de martillado.

5. **Moldeado por Repujado:** Para el moldeado de la forma de la campana y del cuerpo del Prototipo 4 se opta por un proceso de repujado. Este proceso es realizado por un externo, convirtiendo el disco plano en la forma básica del platillo.
6. **Torneado:** El torneado del prototipo se realiza de forma manual. Para ello primero fue necesario construir un molde con la curvatura final del platillo para el anverso y reverso (ver figuras 2.13 a 2.16). Este molde es diseñado en el software Fusion360 de Autodesk y es manufacturado en CNC en las instalaciones del FabLab de la Facultad. El material escogido para este molde corresponde a madera MDF; material de bajo costo, fácil de pegar y de maquinar, y resistente bajo compresión. En el proceso el molde se monta en el torno, y luego el Prototipo se adhiere al molde mediante pernos y tuercas. A continuación, se desvasta la superficie del platillo siguiendo la forma. Se repite con la cara inferior.

#### 2.4.2. Procesos para metodología experimental

1. **Tratamiento de Alivio de Tensiones:** Con el objetivo eliminar los esfuerzos residuales producidos durante los procesos de manufactura, se realiza un tratamiento térmico de Alivio de Tensiones. El tratamiento es llevado a cabo en una mufla Mlab modelo MDO-125NB , a 250 grados Celcius por 30 minutos, en congruencia con lo especificado en la figura 1.8 con un latón de composición de 85 % Cu y 15 % Zn [2].
2. **Escáner de Forma:** Para determinar si la forma del prototipo varía al realizar el tratamiento de Alivio de Tensiones, se realiza una digitalización 3D de la forma del platillo antes y después de cada tratamiento térmico. Para ello se utiliza un Kinect de Xbox junto al software ReconstructMe, escaneando el lado superior e inferior del platillo. Las imagenes 3D obtenidas son comparadas utilizando el software MeshLab.



Figura 2.13: Molde macho para torneado.  
Vista superior.

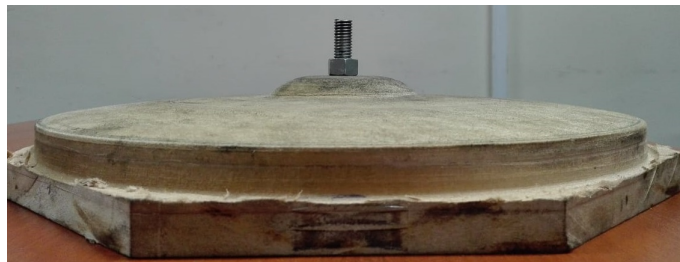


Figura 2.14: Molde macho para torneado.  
Vista de perfil.

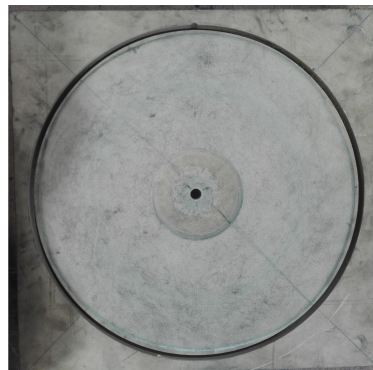


Figura 2.15: Molde hembra para torneado.  
Vista de superior.

## 2.5. Mediciones acústicas

Para el desarrollo de esta memoria, se realiza la medición del sonido del prototipo para determinar el Espectrograma a lo largo de su proceso de construcción. Las mediciones se realizan utilizando la tarjeta de adquisición YE6231 Dynamic Signal Analyzer del fabricante SINOCERA Piezoelectrics, INC. y el micrófono preamplificador YG-201 de BAST Ltd. en

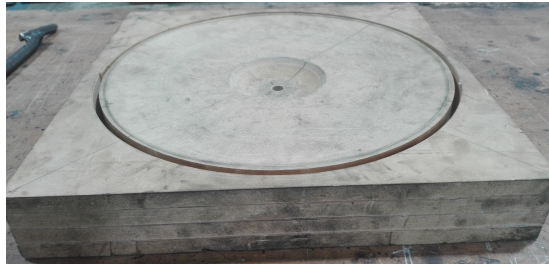


Figura 2.16: Molde hembra para torneado.  
Vista de perfil.

conjunto con el software YE600. El montaje consiste en ubicar el prototipo de plato en un atril diseñado para este tipo de instrumentos, y a continuación ubicar el micrófono a 5 cm del borde del plato, estando el borde del plato y el micrófono en el mismo plano (ver figura 2.17), para luego percutir el plato en tres zonas: campana, cuerpo y borde. El software recibe como inputs la diferencia de presión causada por la percusión del plato, y como output entrega un archivo MATLAB. Este archivo se procesa mediante un código Python, el cuál entrega como output gráficos de la forma de la onda (amplitud v/s tiempo) y el espectrograma con la variación temporal de amplitud y frecuencia, y el audio con en archivo de extensión wav. La frecuencia de muestreo corresponde a 48 khz, y un ancho de ventana para la STFT (short time fourier transform) del espectrograma de 24khz.

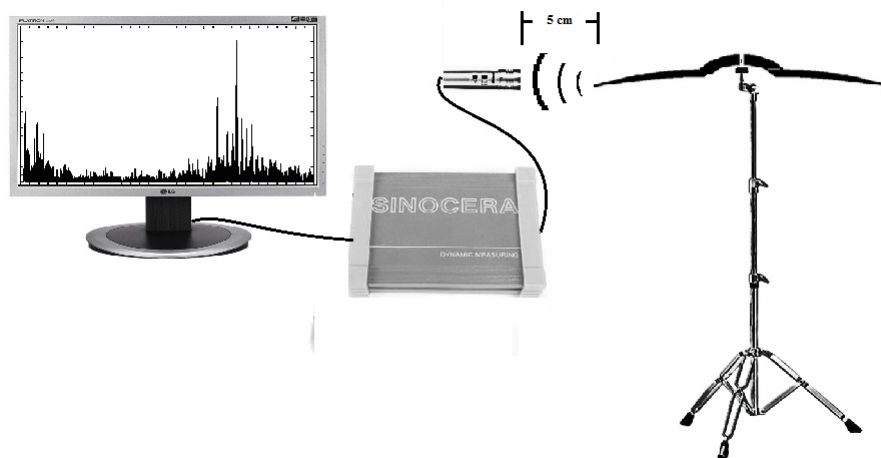


Figura 2.17: Diagrama Montaje para mediciones acústicas

Dentro de las mediciones acústicas también se realiza un análisis cualitativo del sonido del platillo a través del proceso. Este análisis se realiza por el autor de este trabajo de título. Para realizar las comparaciones, en el espectrograma se definen cualitativamente tres zonas de análisis:

- Ataque: Inicio del impulso sonoro hasta alcanzar la amplitud máxima. Fracción temporal donde se activan todas las frecuencias. Usualmente un período de tiempo muy corto y difícil de diferenciar para el oído humano en lo que a platillos se refiere.
- Desarrollo: Banda temporal en donde vibran todas las frecuencias excitadas.



- Sostenimiento: Decrecimiento de la amplitud. Continúan sonando algunas frecuencias hasta lo inaudible.

De esta misma manera, se definen tres zonas de análisis con respecto a las frecuencias:

- Frecuencias bajas: 0 - 8 khz
- Frecuencias medias: 8 - 16 khz
- Frecuencias altas 16 - 24 khz

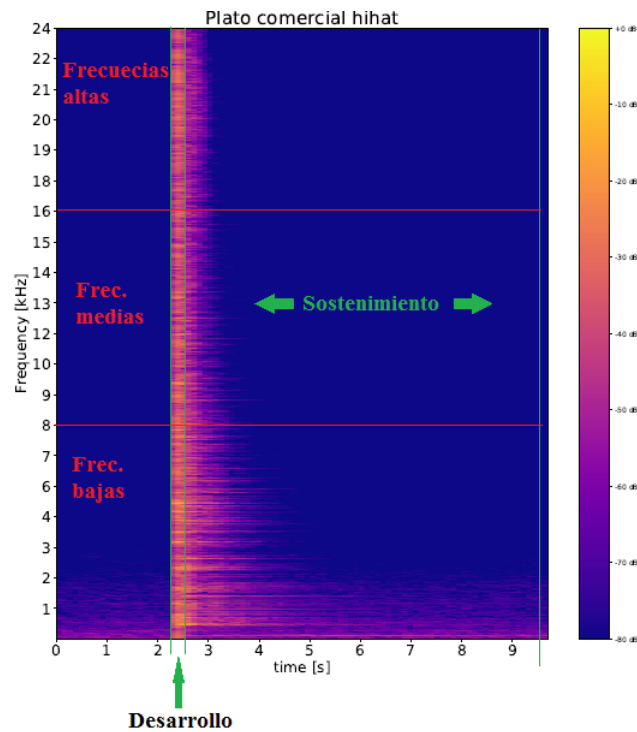


Figura 2.18: Espectrograma platillo comercial hihat.

Se observa en esta figura las zonas de desarrollo y sostenimiento, además de las zonas de frecuencias altas, medias y bajas. La amplitud está representada con la gama de colores: color más cálido implica mayor amplitud (variación de energía en dB) color más frío implica menor amplitud.

## 2.6. Mediciones de Dureza

Para complementar el estudio se analiza la dureza del material en bruto, y luego de cada proceso de manufactura. La dureza medida corresponde a unidades de Dureza Rockwell B (HRB), utilizando para ello el equipo LECO Wilson Model 103R del Taller Mecánico. Las mediciones se realizan directamente sobre los prototipos, y en las zonas de importancia: campana, cuerpo y marcas de martillado. En cada sesión de medición de dureza se realizan variadas mediciones las cuáles se promedian.

# Capítulo 3

## Manufactura de Platillos

En este capítulo se muestran los resultados de la construcción de cada Prototipo, indicando fallos, complicaciones y las soluciones implementadas.

### 3.1. Prototipo 1

Este prototipo se construye como modo de prueba para los procesos de los prototipos posteriores. A continuación se muestra un diagrama general con los procesos realizados.

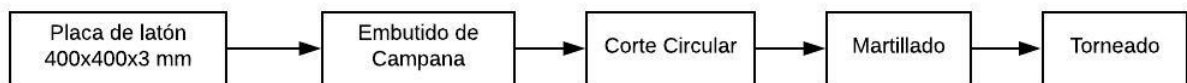


Figura 3.1: Diagrama construcción Prototipo 1 y 2

#### 3.1.1. Embutido

La manufactura se inicia con una placa de latón de 400x400x3 mm. Se opta por este espesor para amortiguar posible complicaciones a lo largo de todo el proceso. Una primera complicación recae en un correcto embutido. Se observa en la figura 3.2 una prueba de embutido fallida.



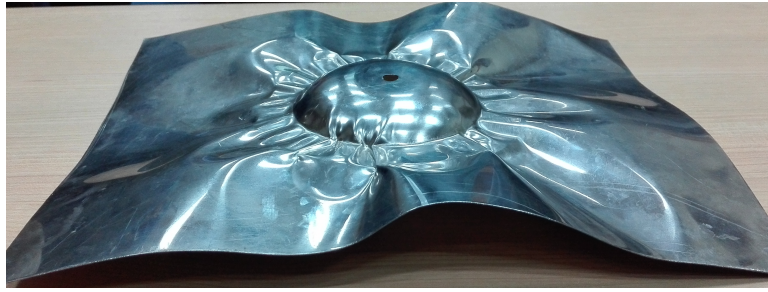
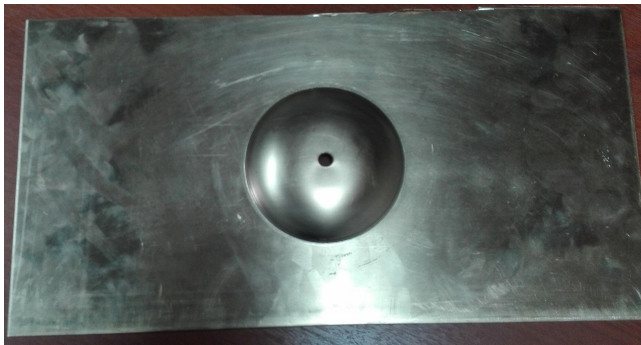


Figura 3.2: Prueba de embutido fallida

Este problema se soluciona tensando la placa antes de embutido. Esto permite que el material se estire y deforme solo en la zona deseada. Para ello se implementó el sistema de pretensión mostrado en el capítulo de Metodología. Los resultados correctos se muestran en la figura 3.3.



(a) Embutido en placa de prueba



(b) Placa con campana embutida

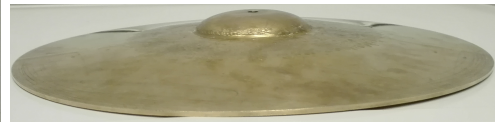
Figura 3.3: Embutido Prototipo 1

### 3.1.2. Martillado

El martillado se utiliza para dar la curvatura al platillo. En este caso el martillado producido genera una forma no deseada, el prototipo se curva más en algunas zonas que en otras. El problema se soluciona en parte martillando en zonas específicas, sin embargo no se logra nivelar por completo la curvatura del prototipo. Esto pone en evidencia la complejidad de la técnica del martillado.



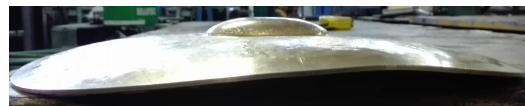
(a) Vista superior primera fase de martillado



(b) Vista de perfil primera fase de martillado



(c) Vista superior segunda fase de martillado



(d) Vista de perfil segunda fase de martillado

Figura 3.4: Martillado Prototipo 1

### 3.1.3. Torneado

El último proceso de manufactura que se somete el prototipo corresponde al torneado. En un principio el torneado se realiza por medio del carro móvil del torno. Sin embargo, al estar el prototipo más curvado en ciertas zonas el torneado desvasta el espesor de forma dispereja produciendo zonas muy delgadas o otras muy gruesas. Por este motivo se opta por el torneado manual para los prototipos siguientes.

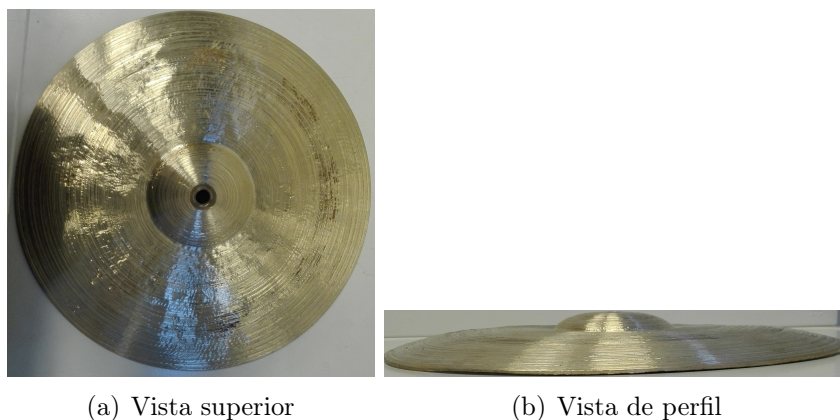


Figura 3.5: Torneado Prototipo 1

## 3.2. Prototipo 2

Este prototipo corresponde al primero destinado para mediciones sonoras. Los procesos por los que pasa corresponden a los mismos que el prototipo 1 (ver figura 3.1) sujetos a variaciones, y partiendo nuevamente de una placa de latón de dimensiones 400x400x3 mm.

### 3.2.1. Embutido de Campana

En esta etapa no ocurren mayores complicaciones.

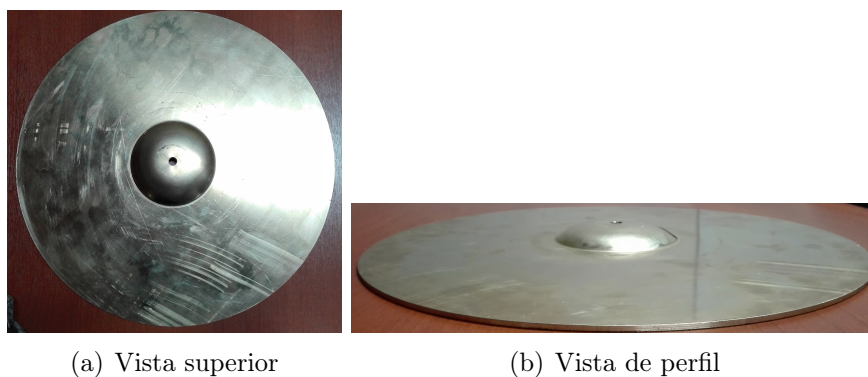


Figura 3.6: Embutido de campana Prototipo 2

### 3.2.2. Martillado

A pesar de utilizar otra metodología para el martillado de este prototipo que la utilizada con el prototipo 1, el resultado obtenido es un platillo disparejo, más curvado en ciertas zonas.



(a) Vista superior



(b) Vista de perfil

Figura 3.7: Martillado Prototipo 2

### 3.2.3. Torneado

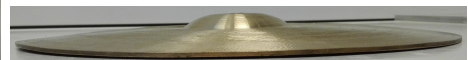
Para evitar problemas de desgaste desigual del espesor, se opta por el torneado manual utilizando las herramientas descritas en el capítulo de Metodología. Como con el caso del martillado, la principal dificultad recae en no tener la experiencia necesaria para realizar un correcto torneado y en no poseer las herramientas idóneas, sin embargo el objetivo de disminuir el espesor y de crear surcos en la superficie es logrado sin mayores complicaciones. El espesor varía de 3 mm a 2.7 mm.



(a) Vista superior



(b) Vista inferior



(c) Vista de perfil

Figura 3.8: Torneado Prototipo 2

### 3.3. Prototipo 3

En este modelo, el diagrama varía con respecto a los prototipos anteriores. Partiendo de una placa de latón de 400x400x 2 mm, en este caso el corte circular es realizado antes del embutido de la campana.

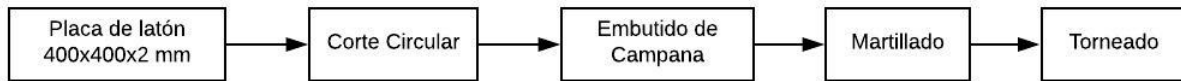


Figura 3.9: Diagrama construcción Prototipo 3

#### 3.3.1. Embutido de Campana

Una vez cortada la placa en un disco de diámetro 390 mm, la campana es embutida sin dificultades. Sin embargo el disco se dobla ligeramente (ver figura 3.10 b), posiblemente debido a una distribución de tensiones desiguales en el sistema de pretensión. Este problema no afecta a los posteriores procesos.

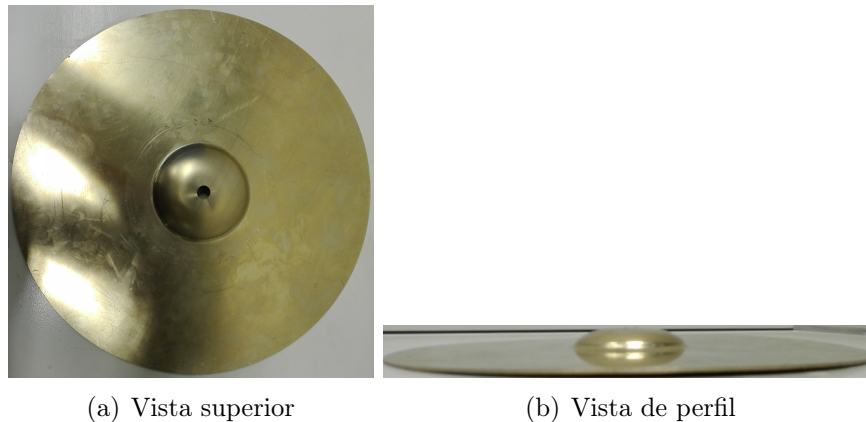
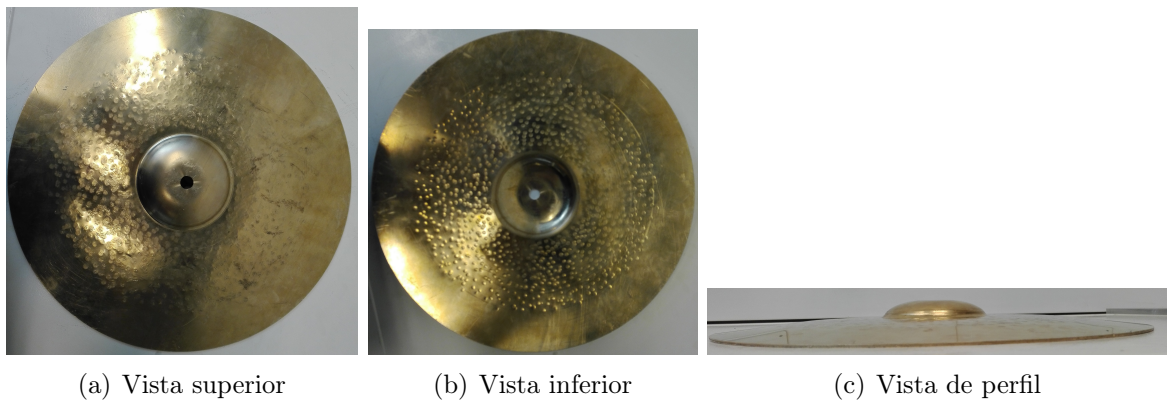


Figura 3.10: Embutido de campana Prototipo 3

#### 3.3.2. Martillado

En este caso el objetivo de dar la forma a la curvatura del disco es alcanzado. El platillo completamente nivelado se observan las siguientes figuras.





(a) Vista superior

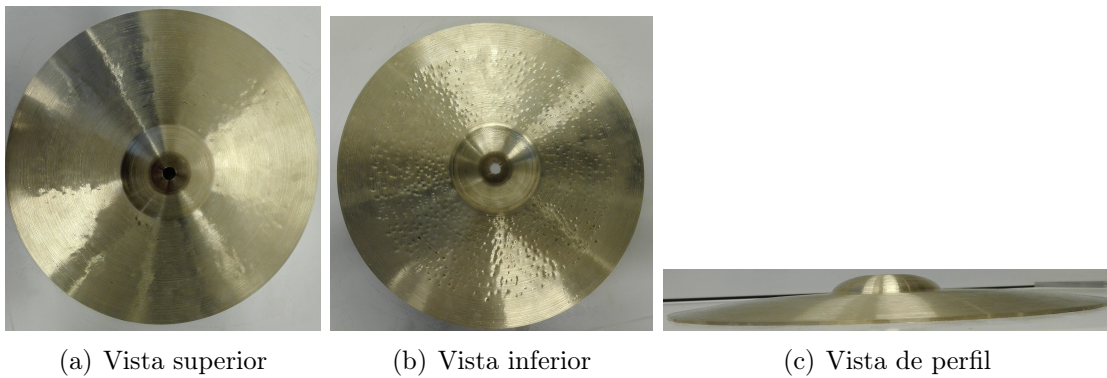
(b) Vista inferior

(c) Vista de perfil

Figura 3.11: Martillado Prototipo 3

### 3.3.3. Torneado

Proceso llevado a cabo sin dificultades. El espesor disminuye de 2 mm a 1.8 mm.



(a) Vista superior

(b) Vista inferior

(c) Vista de perfil

Figura 3.12: Torneado Prototipo 3

## 3.4. Prototipo 4

En el caso de este modelo, la forma inicial de la campana y el arco es dada vía repujado manual, para seguir con los siguientes procesos de la misma forma que el prototipo 3. Se inicia la manufactura a partir de plancha de 400x400x 1.5 mm.

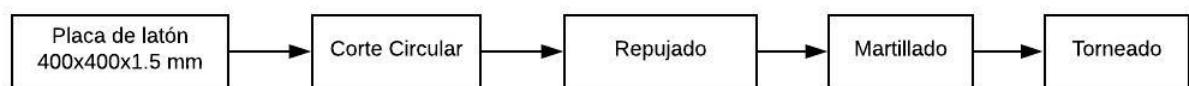


Figura 3.13: Diagrama procesos Prototipo 4

### 3.4.1. Repujado

En este prototipo el moldeado de la forma es realizado por un tornero repujador externo. De esta forma se moldea la campana y el cuerpo del plato. Sin embargo el trabajo no deja al plato completamente nivelado, lo cuál se observa en la vista de perfil (figura 3.14 b).

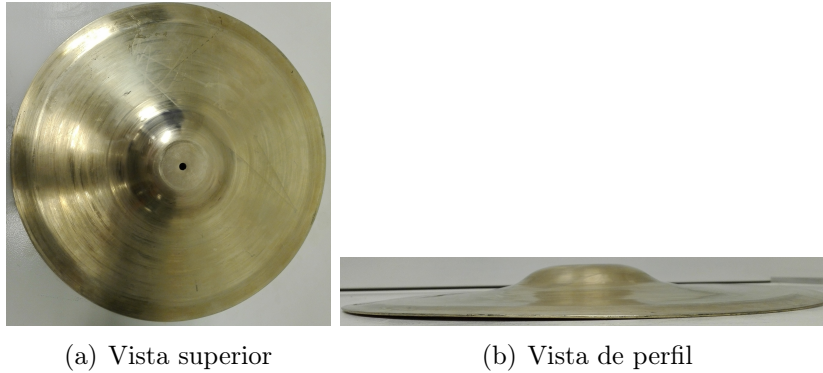


Figura 3.14: Repujado Prototipo 4

### 3.4.2. Martillado

Para nivelar el disco se procede con un proceso de martillado. La forma del cuerpo del plato varía, pero la campana permanece inalterada.

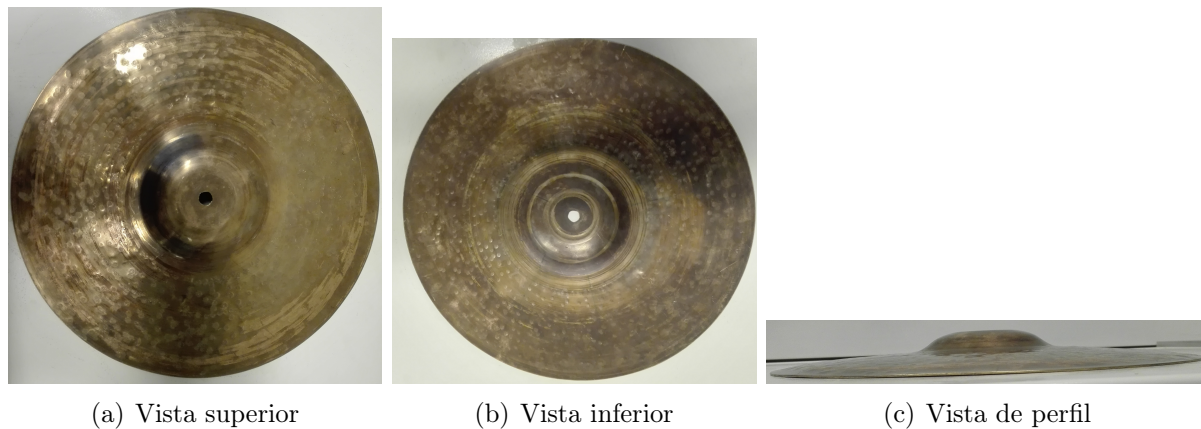


Figura 3.15: Martillado Prototipo 4

### 3.4.3. Torneado

Proceso sin mayores dificultades. Reducción de espesor de 1.5 mm a 1.2 mm.

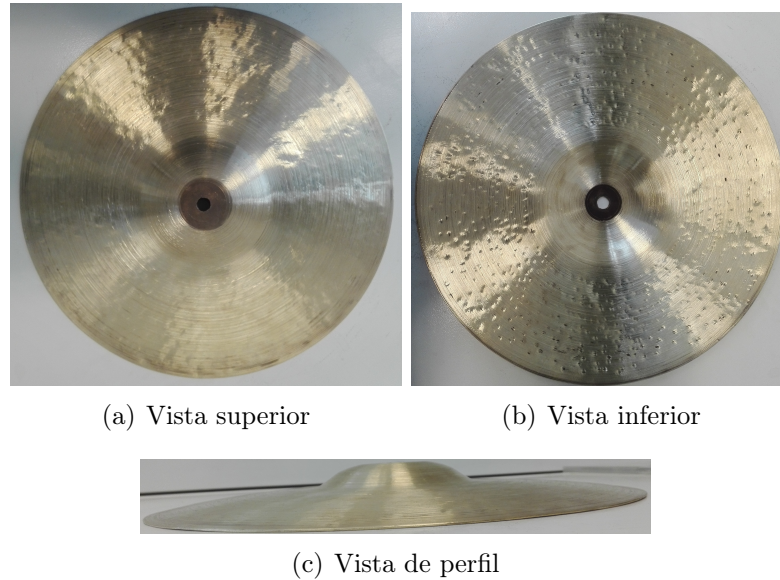


Figura 3.16: Torneado Prototipo 4

Como se indica en el capítulo de Metodología, luego de cada proceso de manufactura se realiza un tratamiento térmico de alivio de tensiones con el objetivo de determinar el efecto de los esfuerzos residuales y el cambio de forma en el sonido.

Para identificar con mayor facilidad la etapa en la manufactura, se asocia un código que identifica prototipo, proceso de manufactura y tratamiento térmico. La tabla 3.1 resume esta información, en donde las celdas sin código indican que dicho proceso no aplica o no se realizó en el prototipo correspondiente. Para el caso del prototipo 1 y 2 el corte circular se realizó después del embutido, luego no se encuentran en la etapa de 'Disco Plano'. Para los prototipos 1, 2 y 3 no se realizó tratamiento térmico de alivio de tensiones después del embutido, por tanto no se encuentran en la etapa de 'alivio de tensiones 1'. Esta decisión se justifica en que los procesos más influyentes en términos de esfuerzos residuales corresponden al martillado, repujado y torneado [6] [7].

Tabla 3.1: Códigos de identificación para etapa de manufactura.

Prototipo	Etapa						
	Disco Plano	Embutido/ Repujado	Alivio de Tensiones 1	Martillado	Alivio de Tensiones 2	Torneado	Alivio de Tensiones 3
1	-	1-E	-	1-M	1-AT2	1-T	-
2	-	2-E	-	2-M	2-AT2	2-T	2-AT3
3	3-D	3_E	-	3-M	3-AT2	3-T	3-AT3
4	4-D	4-R	4-AT1	4-M	4-AT2	4-T	4-AT3



# Capítulo 4

## Resultados

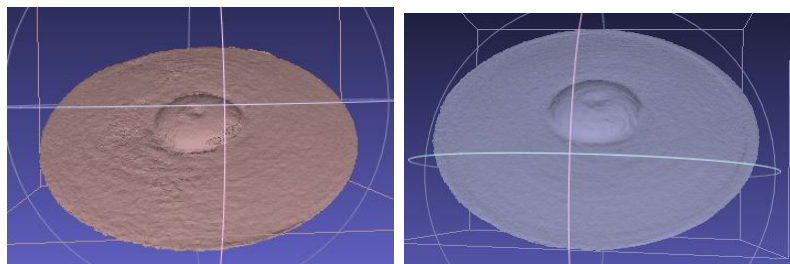
### 4.1. Escáner de Forma

Debido a la dificultad de disponer del equipamiento y personal necesario para realizar digitalización para todos los prototipo y casos, con el escáner Kinect solo fue posible digitalizar imagenes 3D del lado superior y del lado inferior de los siguientes prototipos:

- Prototipo 4-R versus Prototipo 4-AT1
- Prototipo 3-M versus Prototipo 3-AT2
- Prototipo 2-M versus Prototipo 2-AT2

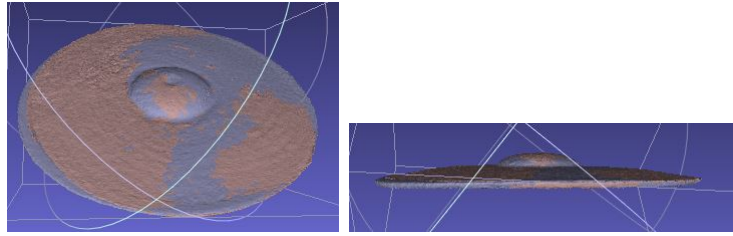
Estos procesos son los más severos en lo que a esfuerzos residuales se refiere [6][7]. Por tanto si la forma no cambia luego de disminuir los esfuerzos residuales en esta etapa, la forma no cambiará debido a la reducción de esfuerzos en ninguna etapa. Con respecto a la comparación, ésta consiste en alinear parte superior con parte superior, y/o parte inferior con parte inferior respectivamente, ya que el formato de la imagen escaneada no permite tener un modelo 3D total del platillo (el transformar la imagen en un cuerpo 3D total del platillo implica variar la forma). Luego de la alineación se procede a una inspección visual del modelo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se muestran en la figuras 4.1 a 4.6 los resultados del escáner de forma.



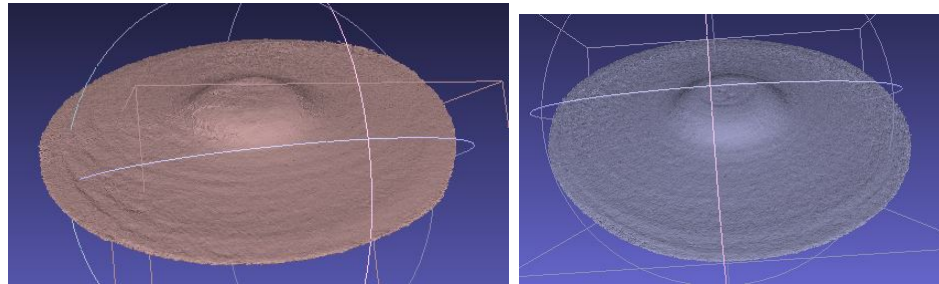
(a) Vista superior Prototipo 3 luego del martillado (b) Vista superior Prototipo 3 luego del tratamiento de alivio de tensiones que sigue al martillado

Figura 4.1: Escáner 3D cara superior Prototipo 3



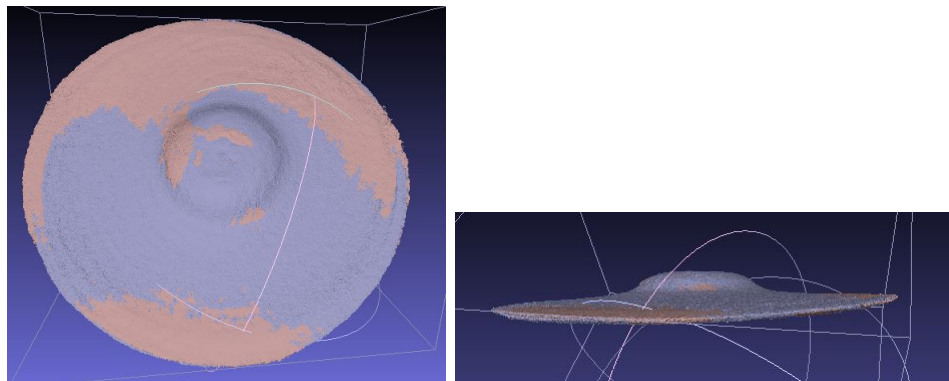
(a) Vista superior alineación Prototipo 3-M versus 3-R1 (b) Vista de perfil alineación Prototipo 3-M versus 3-R1

Figura 4.2: Alineación Prototipo 3-M versus 3-R1



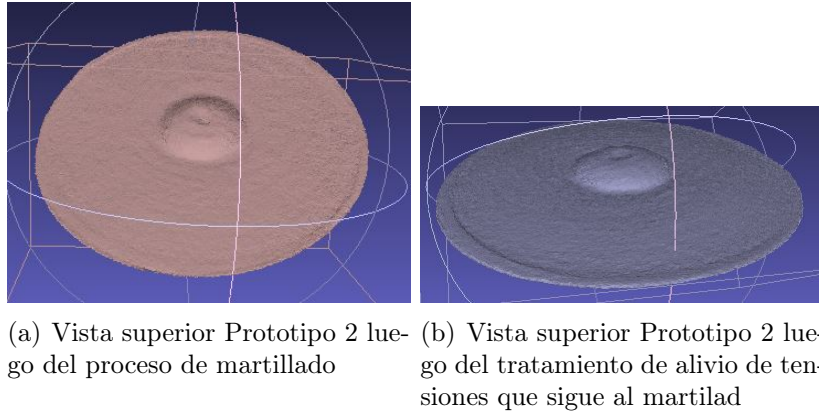
(a) Vista superior Prototipo 4 luego del proceso de repujado (b) Vista superior Prototipo 4 luego del tratamiento de alivio de tensiones que sigue al repujado

Figura 4.3: Escáner 3D cara superior Prototipo 3



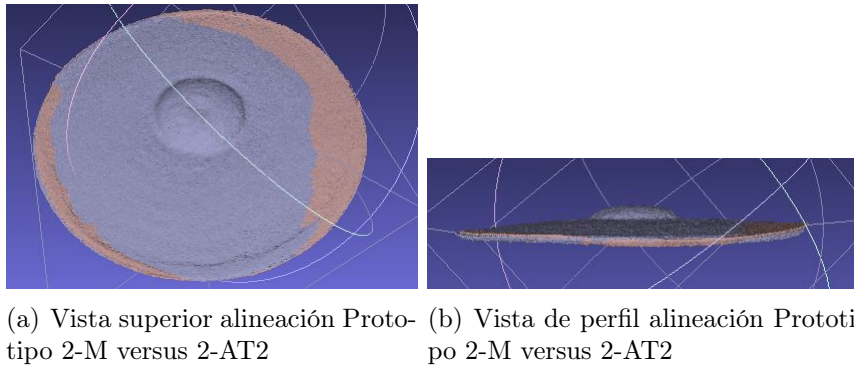
(a) Vista superior alineación Prototipo 4-R versus 4-AT1 (b) Vista de perfil alineación Prototipo 4-R versus 4-AT1

Figura 4.4: Alineación Prototipo 4-R versus 4-AT1



(a) Vista superior Prototipo 2 luego del proceso de martillado (b) Vista superior Prototipo 2 luego del tratamiento de alivio de tensiones que sigue al martillado

Figura 4.5: Escáner 3D cara superior Prototipo 2



(a) Vista superior alineación Prototipo 2-M versus 2-AT2 (b) Vista de perfil alineación Prototipo 2-M versus 2-AT2

Figura 4.6: Alineación Prototipo 2-M versus 2-AT2

En todos los test realizados se comprueba que la forma del platillo no cambia significativamente luego del tratamiento térmico de alivio de tensiones. Luego, todos los test antes mostrados son válidos.

## 4.2. Mediciones de Dureza

A continuación se muestra una tabla resumen 4.1 con las mediciones de dureza promedio para cada etapa de los prototipo 2,3 y 4; donde la casilla 'Marcas' indica mediciones de dureza realizadas sobre los impactos producidos por el martillado. La escala de dureza utilizada corresponde a Rockwell B (HRB).

Cabe aclarar que las mediciones de dureza para embutido solo son realizadas sobre la campana, ya que el resto del material no es afectado. Caso distinto es con el prototipo 4 luego del repujado, donde la dureza es medida en todo el prototipo. Cabe destacar que la medición de dureza en la zona no martillada del prototipo 4 luego del alivio de tensiones que sigue al martillado (valor subrayado en tabla 4.1) no corresponde a una medición legítima, ya que se aleja demasiado de los valores estimados, siendo incluso menor que el del material sin trabajar.

Tabla 4.1: Dureza HRB para cada etapa del proceso.

Prototipo	Etapas del proceso										
	Disco plano	Embutido/ Repujado	Alivio de tensiones 1	Martillado		Alivio de tensiones 2		Torneado		Alivio de tensiones 3	
				Marcas	No marcas	Marcas	No marcas	Marcas	No marcas	Marcas	No marcas
<b>2</b>	71,2	71,7	-	76,8	71,2	76,5	71	81,4	73,4	81,3	72,7
<b>3</b>	75,9	83,5	-	81,2	76	80,6	76,3	81,5	77,5	80,8	76,6
<b>4</b>	64,3	71,4	71,2	74,4	71,2	74,2	<u>52,3</u>	75,0	72,1	74,6	71,7

Las mediciones de dureza cumplen con lo esperado. Los procesos de deformación plástica en frío producen un aumento de la dureza, ya sea localizado o en toda la pieza. Los tratamientos de alivio de tensiones producen un ablandamiento poco significativo. Por tanto todos los test de dureza son válidos, exceptuando el valor subrayado en la tabla 4.1.

### 4.3. Efecto de los Procesos en el Espectrograma y el Sonido

En este capítulo se muestran las variaciones en frecuencia, amplitud a través de tiempo para los procesos de manufactura realizados en la construcción de platillos. Esto se realiza comparando los espectrogramas de las mediciones sonoras realizadas luego de cada proceso. Como se menciona en el capítulo de Antecedentes, el espectrograma es una potente herramienta que permite representar gráficamente la variación de amplitud sonora y las frecuencias a través del tiempo.

#### 4.3.1. Espectrograma Platillo comercial

A modo de comparación, se presenta a continuación el espectrograma (figura 4.2) de un platillo comercial tipo Hihat. El rango de frecuencias abarca de los 0 a los 24khz (sample rate = 48khz), el tiempo en el eje de las abscisas abarca todo el tiempo de medición de 0 a 10 segundos. La amplitud se representa mediante variación cromática, donde el color más cálido representa mayor amplitud, versus el color más frío que representa amplitud menor.

Al analizar es espectrograma se observa que luego del ataque el desarrollo muestra frecuencias en todo el rango de medición. Las frecuencias en la fase de desarrollo se concentran en las bajas y medias, con mayor amplitud en las frecuencias bajas. En la etapa de sostenimiento las frecuencias se concentran en el rango bajo, siendo además éstas la que más duran en el tiempo, seguidas por las medias y las altas. Si hablamos de como se percibe el sonido, el carácter de este platillo es medianamente brillante (entre grave y agudo); complejo y con cuerpo, es decir, con muchos armónicos perceptibles sonando al unísono; y de una duración extendida. Para mayor detalle del carácter de un platillo, revisar la sección 1.1.3 del capítulo Antecedentes.

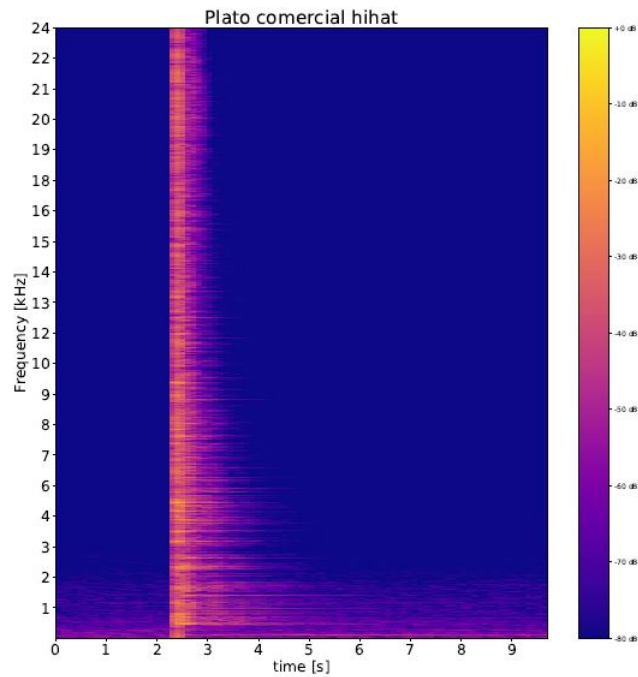


Figura 4.7: Espectrograma platillo comercial hihat.

### 4.3.2. Efecto del Embutido de Campana

En esta sección se compra el efecto de moldear una campana en un disco plano. Para ello, el prototipo de análisis es el Prototipo 3.

**Espectrograma 3-D versus 3-E:** En la figura 4.8 se muestra el espectrograma del Prototipo 3 antes y después del embutido de la campana (etapa 3-D y 3-E).

Con respecto a las similitudes, ambos presentan frecuencias hasta los 24 kHz inmediatamente al ser percutidos, habiendo una mayor concentración de frecuencias y de mayor amplitud para las frecuencias medias-bajas, y una concentración menor para frecuencias altas. El desarrollo es corto para ambos, mientras que en el sostenimiento decrece considerablemente la concentración de todas las frecuencias, presentando una mayor duración las frecuencias bajas. El sostenimiento es casi nulo para frecuencias altas y medias.

Con respecto a las diferencias, 3-D presenta una concentración mayor en frecuencias más bajas que 3-E, lo cual se repite en el desarrollo y sostenimiento. Además 3-E presenta la aparición de peaks aislados en la zona alta durante el sostenimiento.

**Sonido:** Con respecto a como suena, el sonido en ambos casos es de poco cuerpo (pocos armónicos percibibles) y de corta duración. El prototipo 3-E presenta un sonido más brillante (agudo) que 3-D.

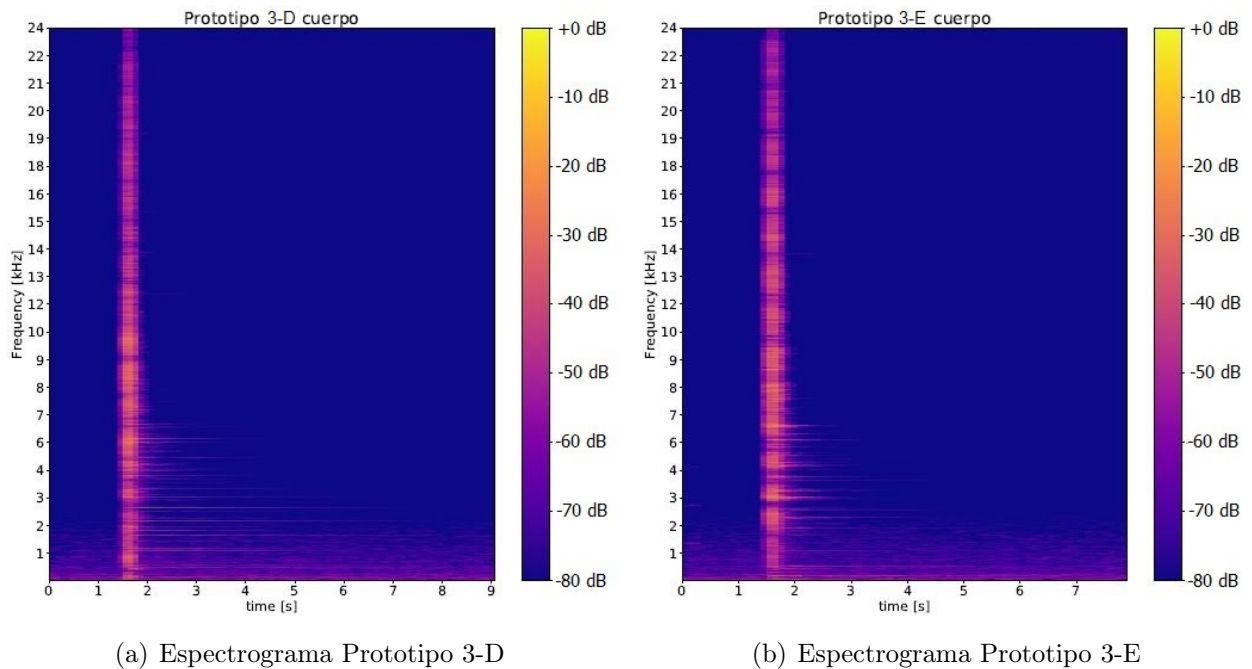


Figura 4.8: Efecto del embutido. Comparación espectrogramas 3-D versus 3-E.

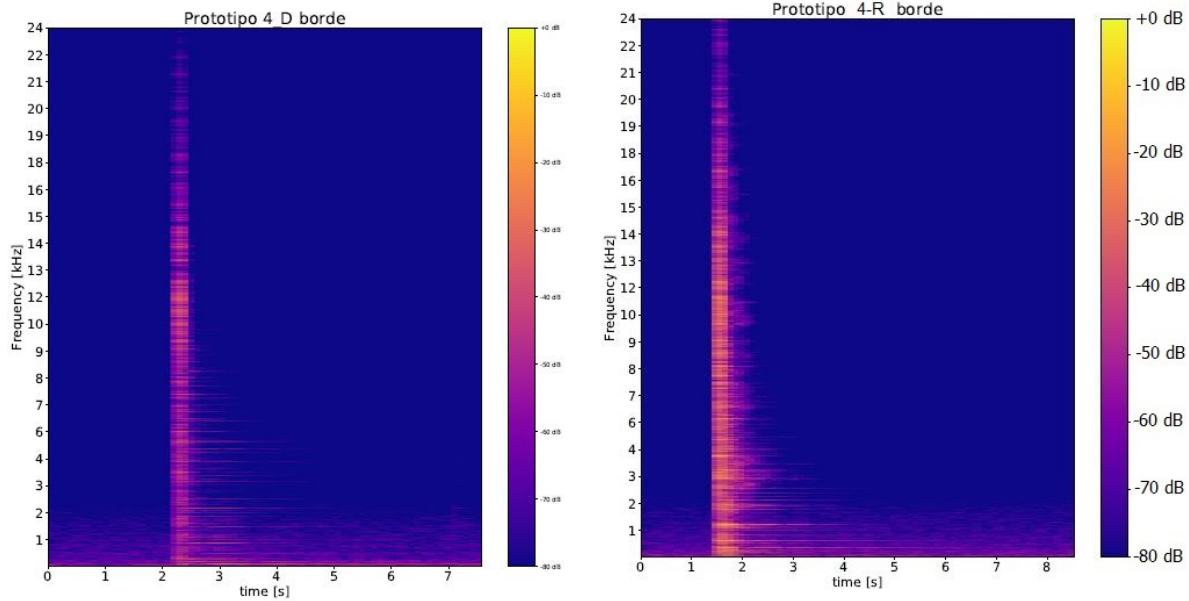
### 4.3.3. Efecto del repujado

En este caso se compara el prototipo 4-D con el 4-R (figura 4.9), prototipo repujado desde un disco plano.

**Espectrograma:** El 4-D presenta mayor concentración y amplitud en las frecuencias medias, seguido por las frecuencias bajas y con menor concentración en las altas. En el sostenimiento la mayor duración es de las frecuencias bajas y la menor para las altas, las cuáles son casi nulas en esta zona.

El prototipo 4-R presenta un espectro más denso (rico) que su predecesor, con una concentración y amplitud mayor en las frecuencias medias y bajas. En el sostenimiento se observa una mayor concentración de frecuencias bajas y medias, y casi nula concentración para las altas. El espectrograma de 4-D es similar al de 4-R, pero siendo este último más complejo y rico en frecuencias en todas sus etapas.

**Sonido:** El prototipo 4-R tiene un sonido más oscuro (grave) que 4-D y de mayor complejidad, es decir, con mayor presencia de armónicos percibibles. Al escuchar la campana ésta presenta un sonido más brillante, menos complejo y de menor duración que el resto del cuerpo.



(a) Espectrograma Prototipo 4-D

(b) Espectrograma Prototipo 4-R

Figura 4.9: Efecto del repujado. Comparación espectrogramas 4-D versus 4-R

#### 4.3.4. Efecto del alivio de tensiones luego del repujado

**Espectrograma:** Comparación prototipo 4-R versus 4-AT1 (figura 4.10). El espectrograma de 4-AT1 se vuelve mucho más rico, con mayor concentración de frecuencias en todas las zonas con respecto a 4-R. Las frecuencias se concentran con mayor amplitud en las bajas y medias, en ambos prototipos. El sostenimiento es menor para las frecuencias altas, aumentando gradualmente para las bajas. Con respecto al espectrograma específico de las campanas, no se observa mayores diferencias, y solo hay pequeñas variaciones en las frecuencias bajas del sostenimiento.

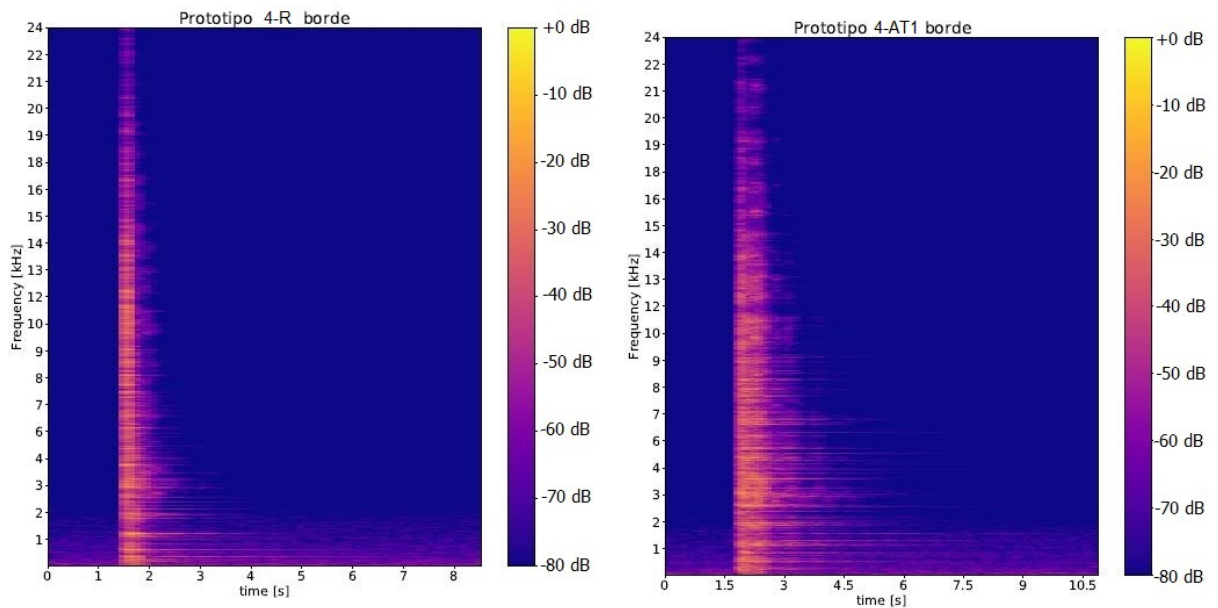
**Sonido:** La percepción del sonido arroja que 4-AT1 presenta un sonido más brillante, complejo y de mayor duración que 4-R al ser percutido en el cuerpo y/o borde. Al percutir la campana no hay mayores variaciones en timbre, pero si existe una duración mayor por parte de 4-AT1.

#### 4.3.5. Efecto del Martillado

**Espectrograma 2-E versus 2-M:** Se observa (figura 4.11) un espectro más rico en frecuencias por parte de 2-M en toda la banda de frecuencias, concentrándose con una amplitud mayor en las frecuencias bajas. En ambos casos existe un sostenimiento corto, siendo mayor para frec. bajas y practicamente nulo para las altas. Para 2-M se observa un espectrograma más rico, pero similar a 2-E.

**Sonido:** Prototipo 2-M ligeramente más complejo que 2-E. Ambos poseen un carácter



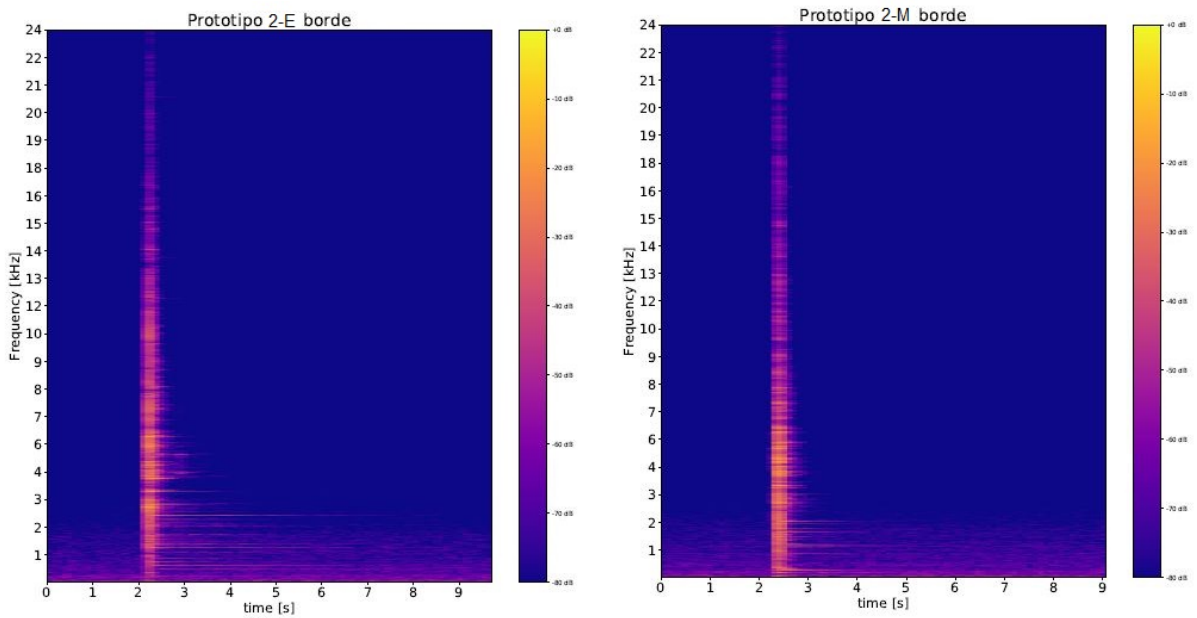


(a) Espectrograma Prototipo 4-R

(b) Espectrograma Prototipo 4-AT1

Figura 4.10: Efecto del alivio de tensiones luego del repujado. Comparación espectrogramas 4-R versus 4-AT1

oscuro y de corta duración. La campana no exhibe variación sonora.



(a) Espectrograma Prototipo 2-E

(b) Espectrograma Prototipo 2-M

Figura 4.11: Efecto del martillado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-E versus 2-M



**Espectrograma 3-E versus 3-M:** Ver figura 4.12. Ocurre algo similar al caso 2-E versus 2-M. El espectrograma se vuelve más rico en las frecuencias medias-bajas, pero la figura en general no cambia. Sostenimiento corto para ambos prototipos, con mayor concentración en las frecuencias bajas, siendo casi nulo para frecuencias altas y medias.

**Sonido:** Al percutir en el cuerpo y en el borde de los prototipos 3-E y 3-M el sonido cambia de un carácter brillante (agudo) a uno más oscuro (grave), pero de menor duración. La campana no presenta variación.

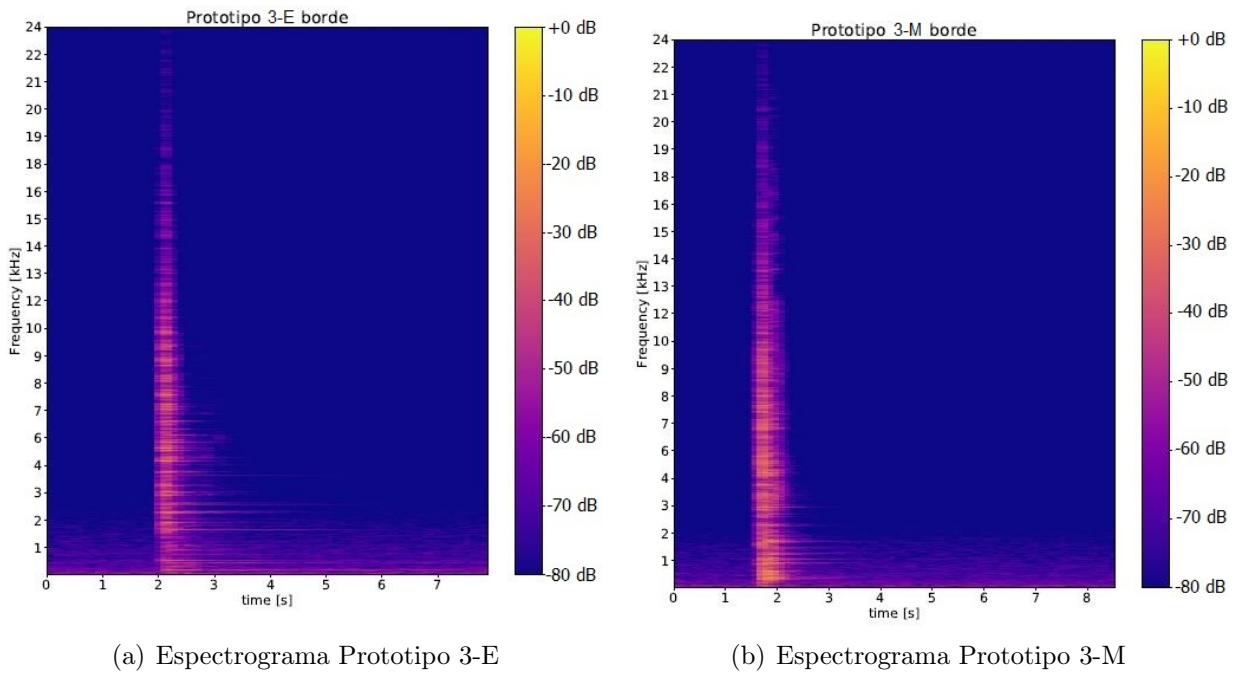
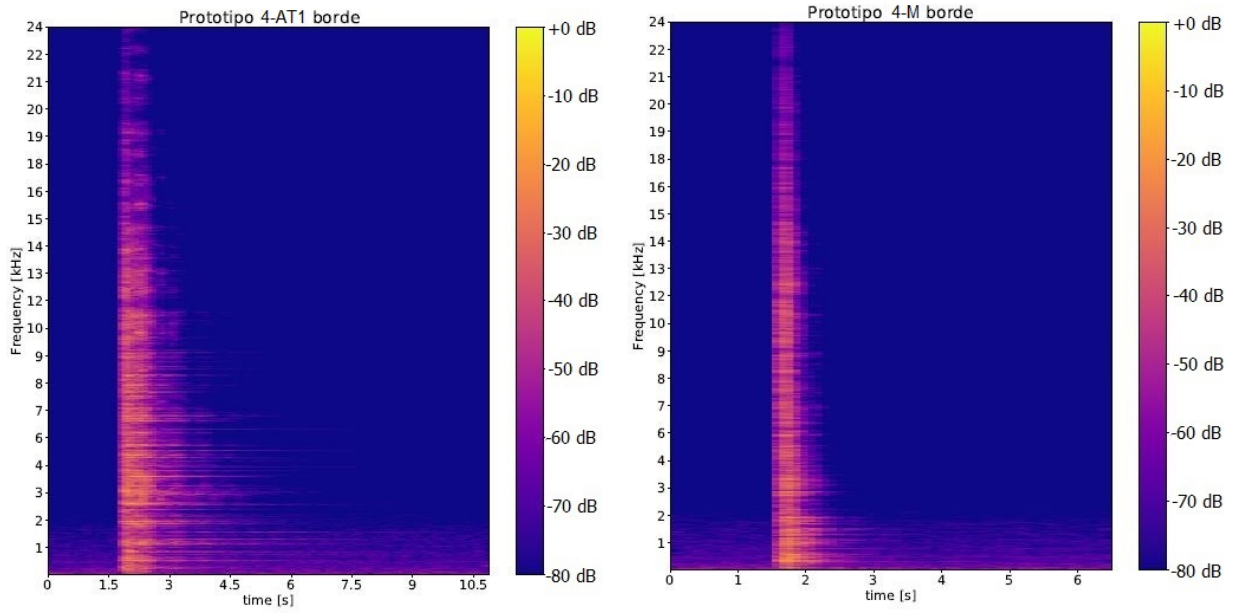


Figura 4.12: Efecto del martillado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-E versus 3-M

**Espectrograma 4-AT1 versus 4-M:** Al analizar la percusión en el borde de los prototipos se observa que el martillado vuelve menos rico al espectro (figura 4.13). El prototipo 4-AT1 posee un mayor sostenimiento para todas las frecuencias en comparación a 4-M, destacándose principalmente las frecuencias bajas y media-bajas. 4-AT1 se observa más complejo, de mayor sostenimiento que 4-M, pero con una concentración de frecuencias altas menor. Al analizar la percusión en el cuerpo se observa que ocurre el mismo comportamiento que en el borde: martillado produce un espectrograma de menor sostenimiento y menor complejidad. Si comparamos cuerpo con borde, hay una menor concentración de frecuencias en todo el espectro en ambos prototipos. La campana presenta poca variación en el desarrollo. Sostenimiento de menor duración.

**Sonido:** El sonido del prototipo 4-M no posee cuerpo ni permanencia en el tiempo, se percibe más oscuro con respecto a 4-AT1.



(a) Espectrograma Prototipo 4-AT1

(b) Espectrograma Prototipo 4-M

Figura 4.13: Efecto del martillado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-AT1 versus 4-M

#### 4.3.6. Efecto del alivio de tensiones luego del martillado

**Espectrograma 2-M versus 2-AT2:** Ver figura 4.14. Al percutir en el borde o en el cuerpo se observa en el desarrollo que el espectrograma se vuelve más complejo hacia las frecuencias medias y bajas, con baja concentración para las frecuencias altas. El sostenimiento en 2-AT2 es mucho mayor que 2-M concentrándose en las frecuencias medias-bajas y bajas, y con la aparición de peaks aislados en las frecuencias altas (15.4 khz y 17.5 khz aproximadamente) Al percutir la campana ocurre lo mismo descrito para el borde y el cuerpo del prototipo, y además se observa que las mayores amplitudes están en frecuencias más altas con respecto a 2-M.

**Sonido:** Tanto si es percutido en el borde, en el cuerpo o en la campana el prototipo 2-AT2 se percibe más complejo, brillante (agudo) y con mayor duración que 2-M.

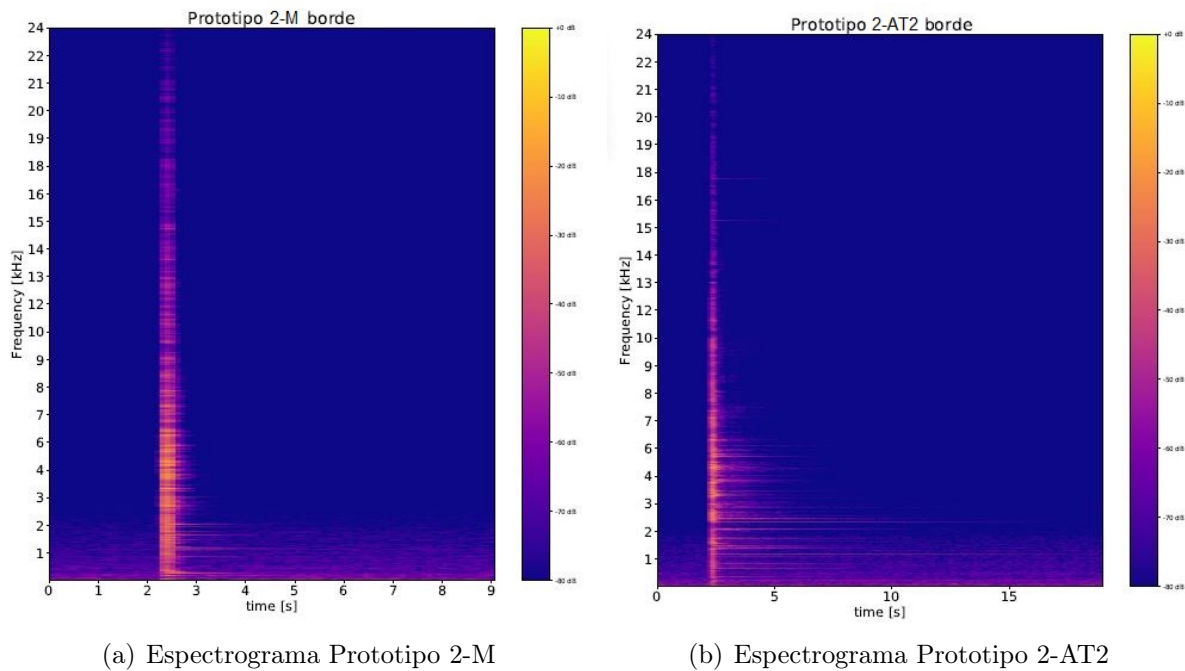


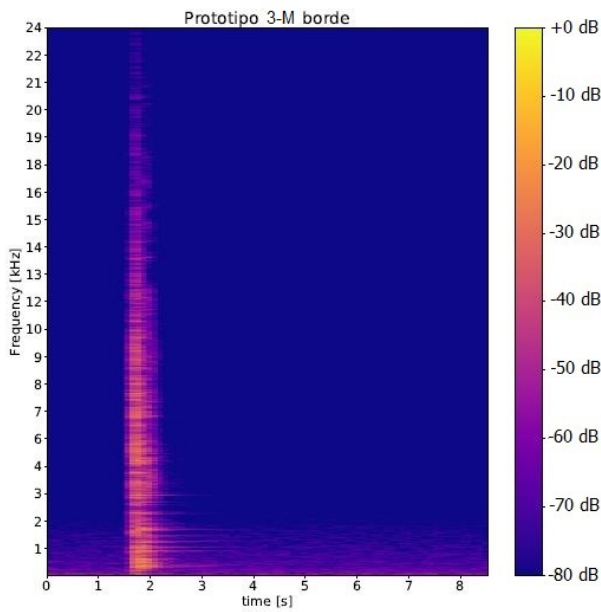
Figura 4.14: Efecto del alivio de tensiones luego martillado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-M versus 2-AT2

**Espectrograma 3-M versus 3-AT2:** Ver figura 4.15. Tal como el caso anterior, el espectrograma se vuelve más rico y complejo. El sostenimiento es considerablemente de mayor duración y se concentra para las frecuencias bajas y medias-bajas con un par de peaks aislados de corto sostenimiento en las frecuencias altas. Esto ocurre al ser percutido en el borde, cuerpo y campana.

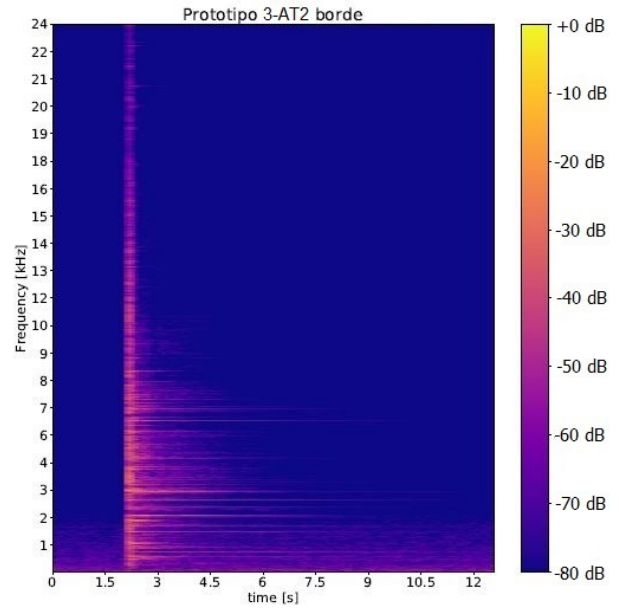
**Sonido:** El prototipo 3-AT2 presenta un sonido más complejo, brillante y de mayor duración que 3-M.

**Espectrograma 4-M versus 4-AT2:** Ver figura 4.16. El prototipo 4-AT2 presenta alta concentración de frecuencias medias y bajas en el desarrollo y sostenimiento, y baja concentración de frecuencias altas. El sostenimiento mejora considerablemente su duración destacándose en las frecuencias medias y bajas. Espectrograma se complejiza y aumenta el sostenimiento, independiente si es percutido en el borde, cuerpo o campana.

**Sonido:** El sonido pasa de un carácter oscuro a un sonido brillante, complejo y de mayor duración en el tiempo.

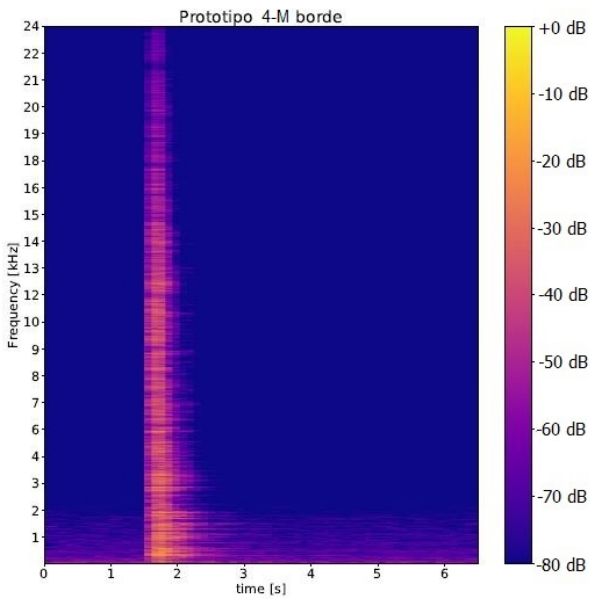


(a) Espectrograma Prototipo 3-M

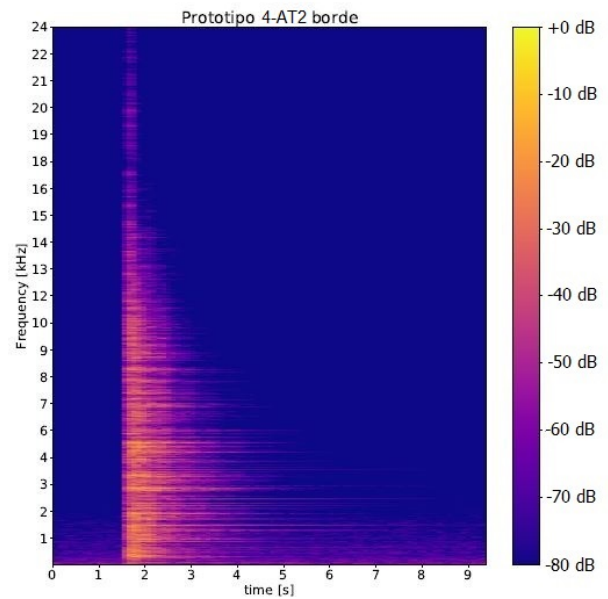


(b) Espectrograma Prototipo 3-AT2

Figura 4.15: Efecto del alivio de tensiones luego del martillado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-M versus 3-AT2



(a) Espectrograma Prototipo 4-M



(b) Espectrograma Prototipo 4-AT2

Figura 4.16: Efecto del alivio de tensiones luego del martillado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-M versus 4-AT2

### 4.3.7. Efecto del Torneado

**Espectrograma 2-AT2 versus 2-T:** A simple vista (figura 4.17), en todos los casos donde se percute el prototipo (borde, cuerpo, campana), la concentración de frecuencias y la duración en la zona de sostenimiento es menor para 2-T siendo las frecuencias bajas las que más persisten. Además, los peaks aislados en las frecuencias altas que aparecen en la zona de sostenimiento en 2-AT2, desaparecen para 2-T.

**Sonido:** Para el caso de ser percutido en el borde y/o en el cuerpo, el prototipo 2-T presenta un sonido más oscuro (grave) y menos duradero comparado con 2-AT2. En el caso de la campana el sonido es más oscuro para 2-T, pero su duración es similar.

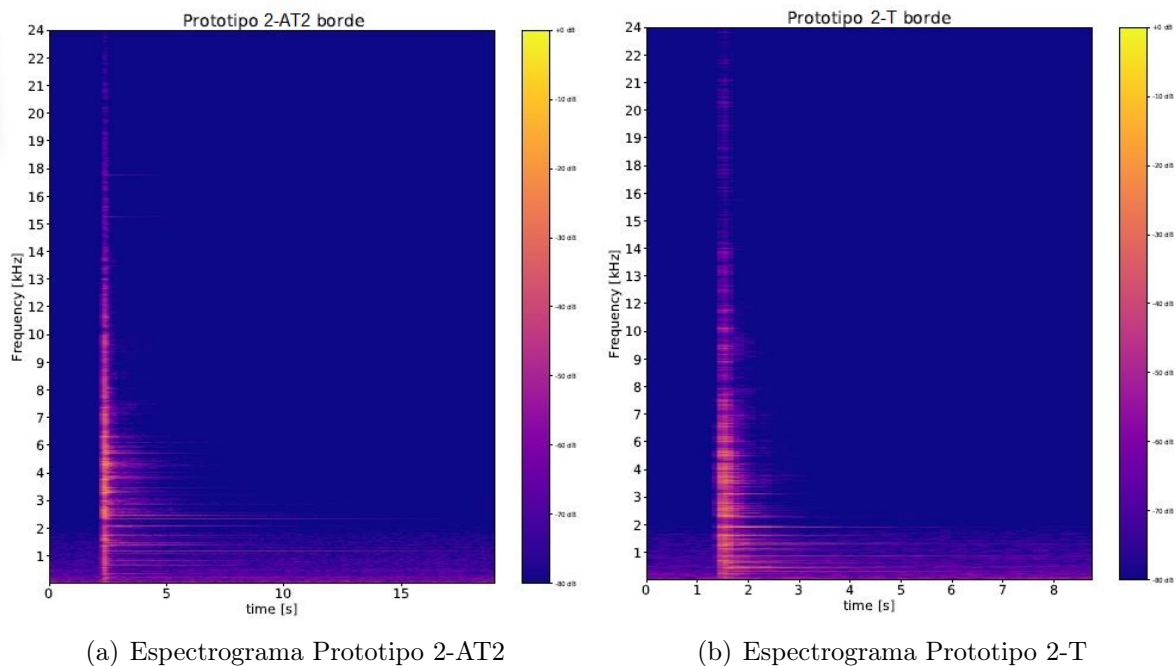


Figura 4.17: Efecto del torneado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-AT2 versus 2-T

**Espectrograma 3-AT2 versus 3-T:** El espectro de 3-T se observa menos complejo que 3-AT2 (figura 4.18), disminuyendo la concentración de frecuencias altas en el desarrollo, no así con las frecuencias medias y bajas. En el sostenimiento las frecuencias altas no se muestran, y las frecuencias bajas y medias disminuyen su concentración y duración. Esto ocurre en el borde, cuerpo y campana de los prototipos comparados.

**Sonido:** El prototipo 3-T suena más oscuro y presenta una menor duración que 3-AT2; esto para borde, cuerpo y campana. En este caso el torneado oscurece el sonido y acorta la duración de éste, pero no lo vuelve menos complejo (no hay una diferencia significativa en la cantidad de armónicos perceptibles).

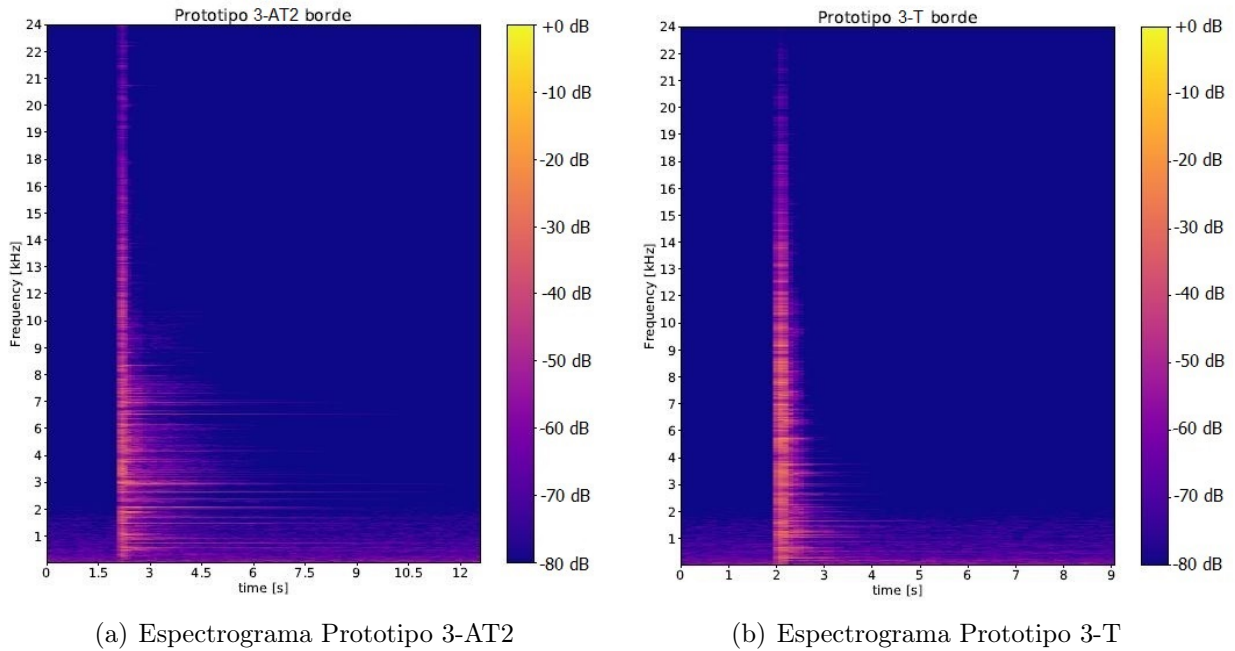


Figura 4.18: Efecto del torneado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-AT2 versus 3-T

**Espectrograma 4-AT2 versus 4-T:** Ver figura 4.19. Para cuerpo, borde y campana se observa que en el sostenimiento la duración y concentración disminuye considerablemente para todas las frecuencias de 4-T, al punto de no presentarse frecuencias altas al percudir en el cuerpo o campana. En el borde se observa que en el desarrollo, la concentración y amplitud aumenta para las frecuencias media-altas, pero decayendo de igual forma en el sostenimiento. Frecuencias bajas persisten por mas tiempo en todos los casos.

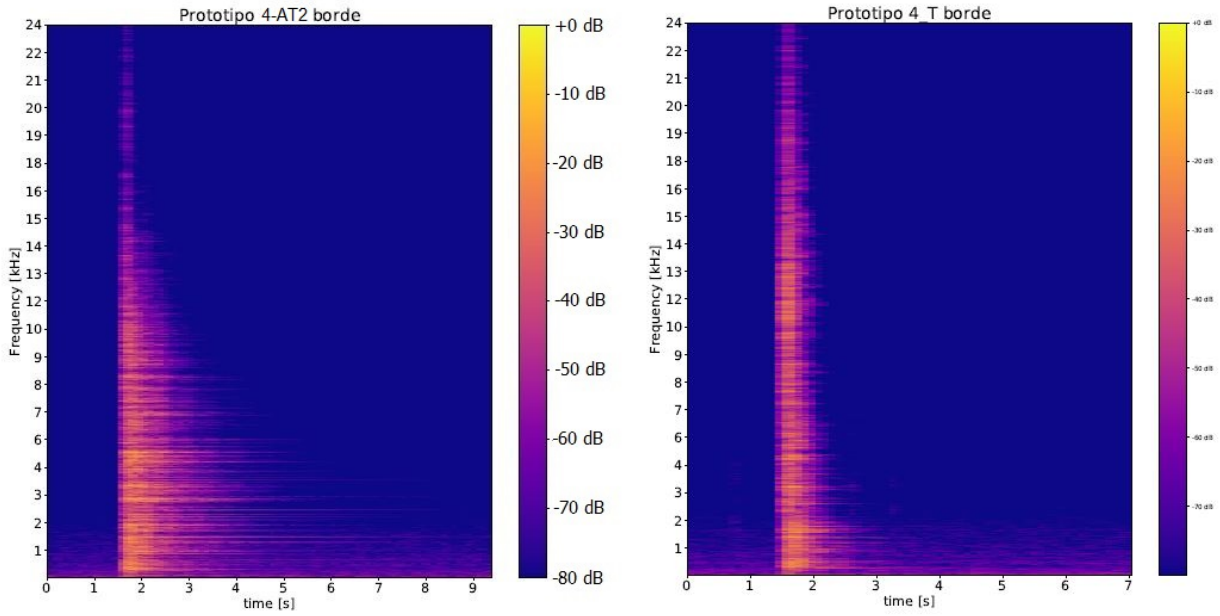
**Sonido:** Tanto en el borde, cuerpo o campana; al percudir el prototipo 4-T éste se percibe menos complejo, más oscuro y menos duradero que su predecesor 4-AT2.

#### 4.3.8. Efecto del alivio de tensiones luego del torneado

**Espectrograma 2-T versus 2-AT3:** Espectrograma (figura 4.20) se observa más rico en el desarrollo en comparación con 2-T. Mayor amplitud y concentración en las frecuencias bajas. Sostenimiento se muestra considerablemente más denso en frecuencias y más duradero que 2-T, siendo las frecuencias bajas las más duraderas. En 2-AT3 aparecen peaks aislados en las frecuencias altas durante el sostenimiento. Esto se repite para el borde, cuerpo y campana.

**Sonido:** El 2-AT3 presenta un sonido de carácter más brillante que 2-T, con un sonido más complejo y de mayor duración, tanto si comparamos bordes, cuerpos o campanas.

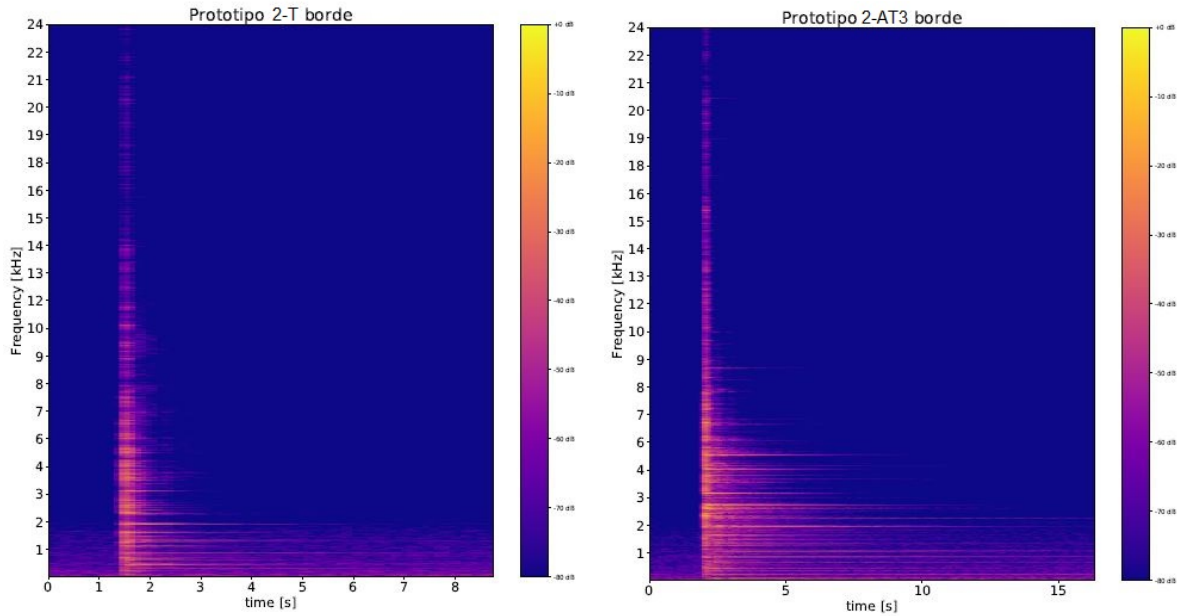




(a) Espectrograma Prototipo 4-AT2

(b) Espectrograma Prototipo 4-T

Figura 4.19: Efecto del torneado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-AT2 versus 4-T



(a) Espectrograma Prototipo 2-T

(b) Espectrograma Prototipo 2-AT3

Figura 4.20: Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 2. Comparación espectrogramas 2-T versus 2-AT3

**Espectrograma 3-T versus 3-AT3:** Prototipo 3-AT3 presenta un espectro más complejo que 3-T (figura 4.21), con concentración y amplitud mayor para frecuencias bajas, y poca concentración de frecuencias altas. Sosténimiento es considerablemente de mayor concentración y duración que 3-T para todos los rangos de frecuencias, destacándose más las frecuencias bajas. Ocurre lo mismo independiente de donde se percuta el platillo, sea borde, cuerpo o campana.

**Sonido:** Como sucede con el caso anterior, el tratamiento térmico en 3-AT3 agrega complejidad al sonido, lo vuelve de carácter más brillante y alarga su duración, independiente de donde se percuta el platillo.

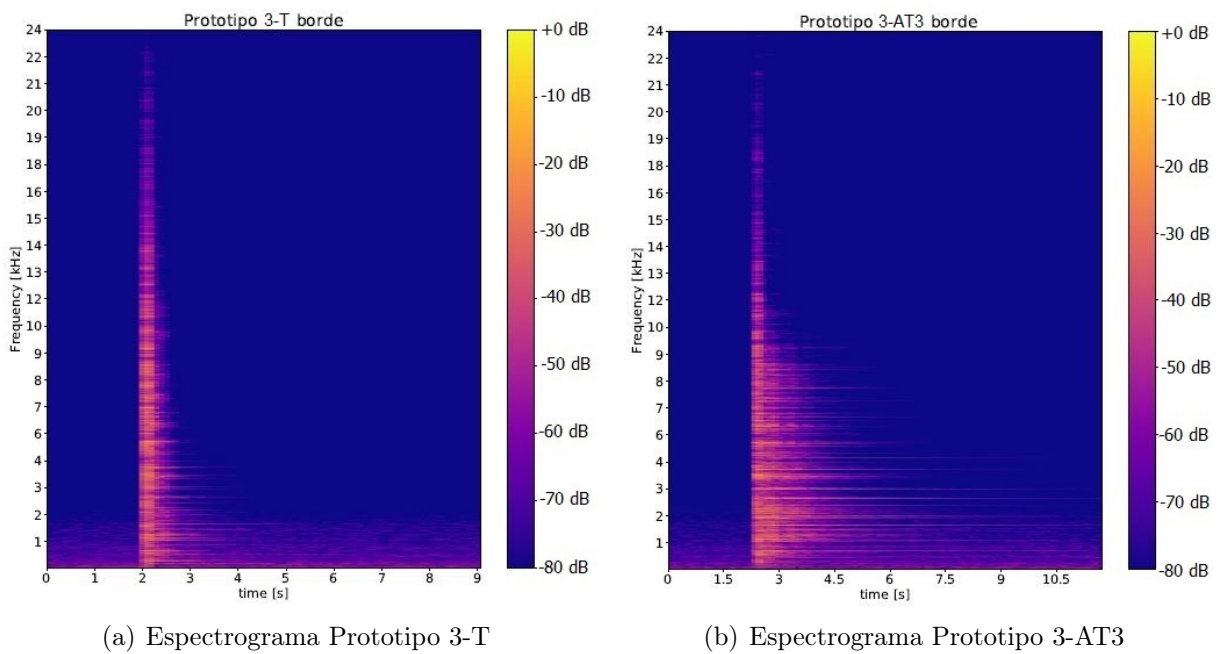
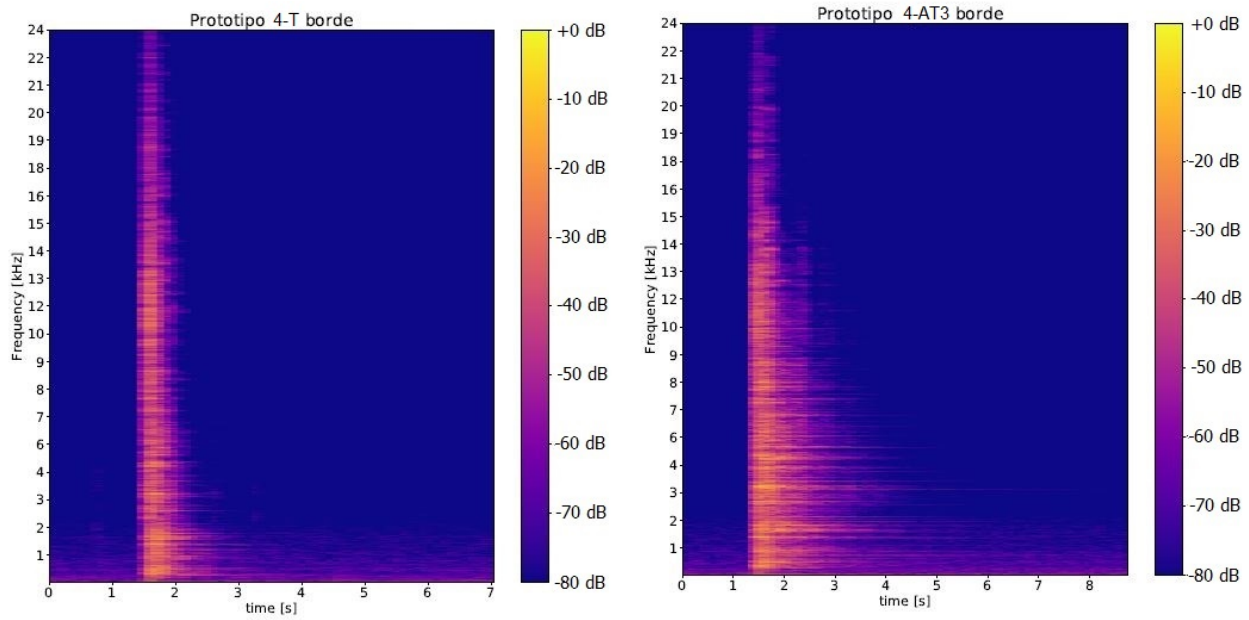


Figura 4.21: Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 3. Comparación espectrogramas 3-T versus 3-AT3

**Espectrograma 4-T versus 4-AT3:** Ver figura 4.22. El prototipo 4-AT3 presenta una alta concentración y amplitud de frecuencias bajas y medias durante el desarrollo, similar a 4-T. A diferencia de 4-T, en el sostenimiento de 4-AT3 aumenta considerablemente la concentración y duración de las frecuencias medias y bajas, siendo estas últimas las más duraderas. Prácticamente las frecuencias altas no se presentan durante el sostenimiento, fenómeno que se repite en cuerpo, campana y borde de ambos prototipos.

**Sonido:** Independiente de donde el platillo es percutado, el sonido de 4-AT3 con respecto a 4-T se percibe más complejo (mayor cantidad de armónicos percibibles), más brillante y de mayor duración.





(a) Espectrograma Prototipo 4-T

(b) Espectrograma Prototipo 4-AT3

Figura 4.22: Efecto del alivio de tensiones luego del torneado en el prototipo 4. Comparación espectrogramas 4-T versus 4-AT3

# Capítulo 5

## Discusión y Conclusiones

Lo primero en la discusión es identificar si la metodología implementada permite el cumplimiento de los objetivos planteados y la resolución del problema: si se sabe que los procesos de manufactura producen cambios de forma que influyen en el sonido, y a la vez los procesos producen esfuerzos residuales que también influyen en el sonido [6] [7], se debe separar estas variables e identificar si el sonido percibido es producido por el cambio de forma o por los esfuerzos residuales.

La metodología implementada pone en juego distintas variables tratadas a lo largo de este trabajo de título. Respecto a las mediciones de dureza, se logra medir después de cada proceso de manufactura. Al analizar los resultados (tabla 4.1) se observa que los procesos que afectan la forma también afectan la dureza del material, consecuencia de la deformación plástica. Con respecto a las mediciones luego del tratamiento térmico de alivio de tensiones, se observa que la dureza disminuye ligeramente (menos de una unidad de dureza). En general el comportamiento de la dureza está dentro de lo esperado, excepto por la medición (casilla subrayada en tabla 4.1) en la zona no martillada del prototipo 4 luego del recocido (prototipo 4-AT2), medición que entrega un valor mucho menor al esperado. Como la medición en la zona martillada de 4-AT2 no presenta problemas, se concluye que los datos erróneos corresponden a mediciones mal realizadas. La máquina utilizada para la medición de dureza requiere que entre la pieza testeada y la base exista contacto pleno. Al tener el prototipo una curvatura, se requiere de más prolijidad para realizar correctamente la medición, factor que puede haber influido en los datos erróneos.

Respecto al escáner 3D, el análisis pone en evidencia que la forma no varía luego del tratamiento de alivio de tensiones. El objetivo buscado con este procedimiento se logra.

En lo que a la construcción de platillos respecta, se logra lo deseado: un prototipo inicial de prueba para el desarrollo de los siguientes y tres prototipos funcionales capaces de analizar. El éxito de la construcción se logró en gran medida en base a prueba y error, utilizando ingenio y trabajo en equipo para la resolución de los problemas que se iban presentando. Cabe destacar en esta área el estrecho lazo que se genera al trabajar con los técnicos y gente externa, aprovechando la experiencia y tomando en cuenta la opinión, necesaria para formar una cosmovisión del proceso y de la ingeniería. El objetivo de la construcción se logra, es más,

el mismo desarrollo de la construcción trae consigo nuevas ideas para combinar las técnicas aprendidas y crear nuevos procesos para la construcción de platillos.

Hablando de los tratamientos térmicos de alivio de tensiones implementados, es necesario identificar si son válidos los experimentos realizados: Al realizar el recocido de alivio de tensiones correctamente, los esfuerzos residuales disminuyen. Se asume que los pequeños cambios en dureza luego del recocido no son relevantes (variación de menos de una unidad de dureza). Luego, las variaciones en sonido (espectrogramas y análisis auditivo por parte del autor) se pueden asociar a los cambios de forma del proceso analizado y cambios en los esfuerzos residuales. Se asume que si la dureza no varía significativamente, el tratamiento de alivio de tensiones ha sido exitoso [1]. El análisis de escáner de forma arroja que la forma no varía luego del tratamiento de alivio de tensiones. Se concluye por tanto que el experimento es válido.

Con respecto a las mediciones acústicas, se logra lo buscado. La metodología para la medición no arroja mayores complicaciones, y el código implementado en Python para el tratamiento de los datos entrega espectrogramas lo suficientemente precisos para describir gráficamente el sonido y realizar comparaciones. Al percutir cada prototipo en tres zonas (campana, cuerpo y borde) es posible observar el comportamiento sonoro y comparar cualitativamente dos prototipos. Sin embargo, la metodología de medición acústica puede ser mejorada al implementar un sistema que pueda percutir un platillo con la misma carga y en el mismo lugar cuantas veces sea necesario, obteniendo comparaciones cuantitativas.

Respecto al efecto en sonido de los procesos de manufactura, el efecto del embutido de campana se traduce en la generación de peaks aislados en las frecuencias altas. Peaks que generan un sonido definido (poco complejo) y de corta duración al percutir la campana. La creación de la campana produce otro lugar de percusión (otro instrumento) dentro del mismo platillo dando versatilidad artística.

El efecto del repujado se traduce en un enriquecimiento del espectro: aparición de más frecuencias que se traduce en un sonido más complejo. La vibración el plato se extiende por más tiempo y el sonido es más intenso.

El tratamiento de alivio de tensiones produce un ablandamiento muy bajo de la pieza, menor a una unidad de dureza, y elimina esfuerzos residuales internos [1]. El tratamiento térmico de alivio de tensiones luego del repujado provoca que sonido se enriquezca: más frecuencias excitadas en todo el rango de medición, que duran por más tiempo y de sonido más intenso.

El proceso de martillado produce deformación plástica localizada, y por tanto endurecimiento de la zona. A los prototipos no sometidos a alivio de tensiones el martillado enriquece la concentración de frecuencias en las zona media-baja y la vuelve más intenso al sonido, pero acorta su tiempo de duración. Para un platillo luego de pasar por un tratamiento de alivio de tensiones, el martillado vuelve el espectro menos complejo, frecuencias vibran por menos tiempo.

El alivio de tensiones luego del martillado, enriquece el sonido al igual que para el repujado: mayor duración de las frecuencias destacadas, pero en general con una intensidad sonora

similar (en algunos casos aumenta la energía como con prototipo 4-M). Más frecuencias se activan en la banda y permanecen vibrando por más tiempo. Además se activan frecuencias altas aisladas en la zona de sostenimiento. El sonido se traduce en mayor cuerpo, carácter más brillante (agudo) y mayor duración de la vibración para todas las frecuencias, en especial las bajas.

El torneado reduce la cantidad de masa que vibra y produce deformación plástica en la superficie que se traduce en mayor dureza. El efecto en el espectrograma se resume en un aumento de la concentración y amplitud frecuencias medias y bajas, y en un descenso en la concentración de frecuencias altas. El torneado además, reduce la duración de todas las frecuencias. Auditivamente se traduce en un sonido más oscuro (grave) y de menor duración. El tratamiento de alivio de tensiones después del torneado ocurre lo mismo que los tratamientos térmicos anteriores. El espectrograma se vuelve más complejo, aumentando la concentración de frecuencias en las zonas bajas y medias, aumentando la intensidad de éstas y el tiempo de duración de la vibración. El sonido se traduce en un carácter más brillante, potente y de mayor duración.

Los procesos de manufactura de martillado, repujado y torneado complejizan el sonido al cambiar la forma y agregar esfuerzos residuales. Si seguimos lo especificado por Kuratani y Osamura [6][7], y los fabricantes de platillos [10] [11] [15], un correcto repujado, martillado y torneado debería complejizar aun más el sonido, aumentar la potencia sonora y el tiempo de duración del platillo vibrando. Características que no se consiguen del todo durante la manufactura de los prototipos. En el proceso no se alcanza un sonido fuerte y de larga duración.

Sin embargo, los tratamientos de alivio de tensiones ponen al descubierto que al eliminar los esfuerzos residuales internos el sonido cambia notablemente; aumentan las frecuencias percibibles, aumenta la intensidad y permanencia del sonido en el tiempo. Por tanto el efecto de cambio de forma resulta ser en este caso más relevante que el de los esfuerzos residuales.

Las características sonoras están esencialmente determinadas por sus propiedades de masa, rigidez, y amortiguamiento [5]; matemáticamente representadas por matrices. A través de la revisión bibliográfica se puede establecer que una distribución compleja de esfuerzo/deformación afecta sensiblemente la distribución de frecuencias. Se puede conjeturar además que la generación de esfuerzos residuales complejos produce un cambio en la matriz de rigidez del sistema, afectando también a la matriz de amortiguamiento que se relaciona proporcionalmente a la rigidez mediante el factor de pérdida, medida de energía disipada constante al material [5] [7].

Un prototipo que ha sufrido deformación plástica y por tanto, en un estado de esfuerzos residuales complejos, reacciona distinto al prototipo que supone no tener esfuerzos residuales internos. Una mayor rigidez implica que a un mismo impacto el platillo vibrará con amplitud menor; un platillo con menor rigidez vibrará con amplitud mayor. Como el amortiguamiento es directamente proporcional a la rigidez, a mayor rigidez la pieza no solo vibrará con menos amplitud, sino que disipará más energía, lo que se traduce en un sostenimiento más corto. Esto se observa claramente al martillar o torner los prototipos de platillo que previamente han sido tratados térmicamente. En estos casos el prototipo suena más despacio y por menos tiempo que su predecesor.

El estado de esfuerzo provocado por la deformación plástica es complejo y sensible a los

cambios. El estado de esfuerzos provocado puede aumentar o disminuir la rigidez de la pieza. Sin embargo, un estado de mayor energía como el de deformación plástica, es inestable y al someterse a temperatura, los esfuerzos se relajan, volviendo la rigidez del sistema al estado anterior. Lo que explica que las características sonoras varíen luego del tratamiento de alivio de tensiones.

Para explicar las diferencias entre los prototipos construidos con los platillos analizados en [6] y [7], se conjetura que los procesos que agregan esfuerzos residuales y otorgan características sonoras superiores han sido implementados de forma insuficiente, ya que son técnicas que necesitan de una gran experiencia para poder ser realizadas con éxito, además de necesitar herramientas específicas para cada proceso. Un buen martillado, un buen repujado, y un buen torneado y combinación de estas podrían otorgar características sonoras superiores a las obtenidas luego del tratamiento de alivio de tensiones.

De todas formas, el tratamiento térmico de alivio de tensiones pasa de ser un proceso de la metodología experimental a un proceso de manufactura nunca antes usado y capaz de entregar sonidos novedosos. El estudio desarrollado en este trabajo de título es una base para poder seguir la investigación del sonido de los platillos, en miras a la posibilidad de fabricar estos instrumentos con gran calidad, control de los procesos y la creación de sonidos completamente nuevos.

# Bibliografía

- [1] MK Barnejee AK Bhangava. *Heat-Treating Copper and Nicker Alloys*. Elsevier, 2017.
- [2] Copper Development Association. *The Brasses, Properties and Applications*. CDA, Publication No. 117, 1996.
- [3] Luis Colomer Blasco. *Acústica Musical*. Creative Commons, 2016.
- [4] Latón UNS C23000. Sitio web: <https://alloys.copper.org/alloy/C23000>. Visita noviembre 2018.
- [5] M. Carfagni, E. Lenzi, and M. Pierini. The loss factor as a measure of mechanical damping. *Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze*.
- [6] F. Kuratani, K. Osamura, T. Koide, W. Ogawa, H Taniguchi, Y. Monjyu, T. Mizuta, and T. Shoubu. The correlation between the percussive sound and the residual stress/strain distributions in a cymbal. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016.
- [7] F. Kuratani, T. Yoshida, T. Koide, T. Mizuta, and K. Osamura. Understanding the effect of hammering process on vibration characteristics of cymbals. *Journal of Physics*, 2016.
- [8] María Bravo Lázaro. *Análisis de las propiedades mecánicas del bronce dependiendo del tratamiento térmico*. Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza,, 2011.
- [9] Viviana Meruane. *Vibraciones Mecánicas- Apunte para el curso ME4701*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, 2015.
- [10] PAISTE. Sitio web: [www.paiste.com](http://www.paiste.com). Visita julio 2018.
- [11] SABIAN. Sitio web: <https://www.sabian.com>. Visita julio 2018.
- [12] William Smith and Javad Hashemi. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. McGraw-Hill, 4. ed, 2006.
- [13] Kaue Werner. *Caracterização de aspectos do timbre de pratos de percussão através de análises psicoacústicas*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

- [14] Sound Analysis with Matlab Implementation. Sitio web: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38837-sound-analysis-with-matlab-implementation>. Visita abril 2019.
- [15] ZILDJIAN. Sitio web: <https://zildjian.com>. Visita julio 2018.