

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN IMPULSE HAMMER PARA LA EXCITACIÓN DE
VIBRACIONES EN UNA BANDA ANCHA DE FRECUENCIAS EN ESTRUCTURAS
INDUSTRIALES

German Orlando Salcedo Sarmiento

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Heller Guillermo Sánchez Acevedo

PhD en Ingeniería Mecánica, Aplicada y Computacional

Codirector

Jens Jensen

Prof. Dr.-Ing. en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2019



AGRADECIMIENTOS

Al profesor Heller Guillermo Sánchez Acevedo por su orientación en el desarrollo del proyecto de grado.

A la Corporación para la investigación de la corrosión, por su confianza y soporte, en especial al Dr. Jens Jensen por su enseñanza.

A mis padres y a toda mi familia por todo el apoyo que me han brindado en mi vida.

A todos mis amigos de carrera y de la selección de atletismo, por acompañarme durante todo este proceso

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi padre, porque con él no solo concluye mi sueño,
sino el de ambos, Gracias eternas a mi viejo.

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. Justificación	20
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. Corporación para la investigación de la corrosión – CIC	22
3.1 Generalidades de la empresa	22
3.2 Misión	23
3.3 Visión	24
3.4 Servicios que ofrece actualmente la CIC	24
3.5 Certificaciones	25
4. Marco teórico	25
4.1 Caracterización dinámica	25
4.2 Análisis modal	25
4.2.1 Función de respuesta de frecuencia FRF.	26
4.2.2 Análisis modal teórico.	26

4.2.3 Análisis modal experimental EMA.	27
4.3 Transformada discreta de Fourier	28
4.6 Excitación	29
4.7 Impact testing	30
4.8 Impact Hammer	31
4.9 Tolerancias geométricas	32
 5. Diseño	 33
5.1 Despliegue de la función calidad	33
5.1.1 Objetivo de la ejecución QFD.	34
5.1.2 Requerimientos del consumidor.	34
5.1.3 Diagrama de Mudge.	35
5.1.4 Requerimientos del experto.	36
5.2 Matriz de calidad QFD.	37
5.2.1 Comparación competitiva del cliente.	37
5.2.2 Matriz de correlación.	40
5.2.3 Matriz de relacionamiento.	42
5.2.4 Cuantificación de los requisitos del proyecto.	43
5.3 Propuestas del martillo	46
5.3.1 Primer Propuesta.	47
5.3.2 Segunda Propuesta.	47
5.3.3 Tercer propuesta.	48

5.3.4 Matriz de decisión.	49
5.4 Alternativa ganadora	50
5.4.1 Cabeza y Mango.	51
5.4.3 Tornillo	54
5.5 Materiales y diseño de tratamientos térmicos	55
5.5.1 Acero Inoxidable Böhler M303 EXTRA.	57
5.6 Presentación de Diseño final	60
5.7 análisis de esfuerzos bajo cargas máximas de funcionamiento mediante el método de elementos finitos FEM	61
5.7.1 Especificaciones de uso del hammer.	61
6. Fabricación	65
7. Evaluación del desempeño	67
7.1 Modelo matemático	68
7.2 método de elementos finitos (FEM)	71
7.2.1 Configuración de ANSYS Workbench 19.0	72
7.2.2 Mallado	74
7.2.3 Element type.	77
7.3 Resultado del estudio FEM en el hammer.	77
7.4 Modelo experimental EMA	78

7.5 Caracterización dinámica del impulse hammer a través del análisis modal experimental (EMA)	79
7.6 Sistema de adquisición y tratamiento de señales para la aplicación del análisis modal experimental	80
7.7 Empotrado en un extremo	81
7.7.1 Parámetros de control usados en el software modal.	82
7.7.2 Análisis de resultados EMA.	82
7.8 Análisis libre	85
7.8.1 Análisis de resultados EMA.	86
7.9 Resultados obtenidos mediante el análisis modal experimental EMA	89
8. Contrastación de resultados: frecuencias naturales determinadas de forma matemática, analítica y experimental	89
9. Conclusiones	92
10. Recomendaciones	93
11. Líneas futuras	93
Bibliografía	94
Apéndices	96

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Requerimientos del cliente</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Requerimientos ingenieriles.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3. Resultados para el análisis del método de Pareto.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4. Asignación de peso de acuerdo con valores obtenidos en la matriz QFD.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5. Matriz de decisión para tres diferentes propuestas para diseño de impulse hammer.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6. Propiedades del acero M303 EXTRA del catálogo de Böhler.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 7. Resultados de las primeras frecuencias fundamentales encontradas por medio del método de elementos finitos.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 8. Equipos utilizados en los ensayos de EMA para el análisis del hammer</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 9. Parámetros de control para el software modal MV Gate.</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 10. Resultados de las primeras frecuencias fundamentales del hammer obtenidos mediante el uso EMA.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 11. Frecuencias naturales a través del método matemático, numérico y experimental.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 12. Porcentaje de error entre los modelos analítico y real.</i>	<i>90</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Logo de la Corporación.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2. Organigrama de la corporación.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. Concepto de la transformada discreta de Fourier.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4. Diferentes métodos de excitación, usados en la industria.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5. Diagrama de un impulse hammer y las respuestas de sus puntas de acuerdo con el material..</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6. Diagrama de Mudge.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7. Despliegue de la función calidad QFD.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8. Matriz de requerimientos del cliente y análisis de competencia.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9. Matriz de correlación.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10. Símbolos de correlación para la QFD.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11. Matriz de relacionamiento.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12. Cuantificación de los requisitos del proyecto.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13. Diagrama de Pareto, para los Requerimientos técnicos.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14. Primera propuesta tipo soldadura de mango tipo tornillo y tuerca de sujeción. ..</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15. Propuesta de hammer con unión horizontal mediante pasador.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16. Tercera propuesta tipo mango roscado y tornillo comercial.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17. Render cabeza hammer, modelado en Autodesk Inventor.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18. Render mango hammer, modelado mediante Autodesk Inventor</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19. Caja cuadrada del mango para evitar torques en unión cabeza- mango, representados con la flecha azul.....</i>	<i>53</i>

<i>Figura 20. Render del Tornillo del hammer, modelado en Autodesk Inventor.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 21. Familias de aceros Inoxidables. Nota: Gráfico representativo de la ubicación de las familias de aceros inoxidables en el diagrama de %níquel vs % cromo presente en su composición química.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 22. Tabla de esfuerzo deformación para las diferentes familias de aceros inoxidable.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23. Tabla 2. De la norma ASTM A370-17, proporciona las interrelaciones aproximadas de los valores de dureza y resistencia a la tracción en aceros Inoxidables no austeníticos, no debe usarse para alambre estirado</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24. Tabla S12.1 Norma ASTM A743, se encuentran los valores de resistencia ultima a la tracción, resistencia a la fluencia, elongación, y reducción de área para el acero de interés CA28MWV.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 25. Impulse hammer, ensamble modelado mediante Autodesk Inventor.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26. Condiciones de contorno y cargas presentes en el hammer</i>	<i>63</i>
<i>Figura 27. mallado fino, elaborado mediante el software Ansys.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 28. Resultados del análisis de estrés equivalente mediante el método de Von Misses.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 29. Resultados acerca del factor de seguridad de la pieza.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 30. Fase de maquinado del mango del hammer mediante Torno CNC.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 31. Fase de maquinado de la cabeza del hammer en el Torno CNC.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 32. Fase del maquinado de la cabeza en la Fresadora de cuatro ejes de RAMBAL...</i>	<i>66</i>
<i>Figura 33. Mapa conceptual de la ejecución de la evaluación de desempeño con el hammer diseñado y construido.</i>	<i>67</i>

<i>Figura 34. Diferentes planos de vibración, plano en T y plano de cabeceo.</i>	68
<i>Figura 35. Representación del hammer por medio de una viga empotrada en un extremo....</i>	69
<i>Figura 36. Mapa conceptual de los pasos fundamentales al momento de la ejecución del método de elementos finitos sobre el estudio de las frecuencias naturales en el impulse hammer.</i>	72
<i>Figura 37. Bloques donde se encuentran configurados los diferentes analisis en la interfaz de ANSYS.</i>	73
<i>Figura 38. Tabla de inserción de datos mecánicos del material de construccion de las piezas.</i>	73
<i>Figura 39. distribución de número de elementos de acuerdo con el tamaño y al tipo de elemento.</i>	74
<i>Figura 40. Elementos con menor calidad de mallado.</i>	75
<i>Figura 41. Calidad de los elementos de la malla.</i>	76
<i>Figura 42. Mallado final obtenido después del refinamiento.</i>	76
<i>Figura 43. Representación gráfica del elemento SOLID 187.</i>	77
<i>Figura 44. Mallado generado en el software modal, en forma de T con ocho nodos, para las condiciones de empotrado en un extremo.</i>	81
<i>Figura 45. Montaje del hammer empotrado en un extremo mediante una prensa mecánica, en las instalaciones de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.</i>	82
<i>Figura 46. Grafica de función de respuesta de frecuencia FRF, acompañada de la gráfica de fase.</i>	83
<i>Figura 47. Graficas superpuestas de FRF y fase, para la medición individual de cada nodo del mallado.</i>	84

<i>Figura 48. Función de coherencia.</i>	85
<i>Figura 49. Montaje sobre ligas del hammer en el laboratorio de vibraciones de ingeniería mecánica.</i>	86
<i>Figura 50. Mallado generado en el software modal, en forma de T con nueve nodos, para las condiciones de libre soportado.</i>	86
<i>Figura 51. Grafica de función de respuesta de frecuencia FRF, acompañada de la gráfica de fase, para las condiciones de libre soportado.</i>	87
<i>Figura 52. Graficas superpuestas de FRF y fase, para la medición individual de cada nodo del mallado, para las condiciones de libre soportado.</i>	87
<i>Figura 53. Grafica de coherencia para las condiciones de libre soportado.</i>	88
<i>Figura 54. Representación gráfica de la primera y segunda frecuencia natural por medio del método BroBand, para las condiciones de libre soportado.</i>	88
<i>Figura 55. Resultados obtenidos mediante los métodos numérico y real, de las primeras frecuencias fundamentales del hammer, mediante diferentes condiciones de frontera.</i>	91

Lista de anexos

Apéndice A. Planos del impulse hammer para su construcción.	97
Apéndice B. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer empotrado en el laboratorio de vibraciones mecánicas UIS	102
Apéndice C. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer libremente soportado en el laboratorio de vibraciones mecánicas UIS.....	108
Apéndice D. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer empotrado en el laboratorio de análisis dinámico CIC.	112
Apéndice E. Modos de vibración en hammer empotrado ANSYS	118
Apéndice F. Modos de vibración en hammer libremente soportado ANSYS	120

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN IMPULSE HAMMER PARA LA EXCITACIÓN DE VIBRACIONES EN UNA BANDA ANCHA DE FRECUENCIAS EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES *

AUTOR: GERMAN ORLANDO SALCEDO SARMIENTO**

PALABRAS CLAVE: Análisis modal experimental, impulse hammer, matriz QFD, Casa de la calidad, método de elementos finitos, Vibraciones mecánicas.

DESCRIPCION:

El siguiente trabajo tiene por objeto el diseño y la construcción de un impulse hammer como solución a la implementación de una nueva técnica no destructiva en la inspección de la adhesión en recubrimientos de estructuras industriales, desarrollada en conjunto con la Corporación para la Investigación de la Corrosión y la Universidad Industrial de Santander. Como fórmula metodológica de desarrollo, se realiza un acercamiento a los conceptos de análisis modal y diseño mecánico; seguidamente se realiza el desarrollo de la casa de calidad en respuesta a encontrar los criterios de mayor relevancia al momento de diseñar y lograr escoger entre diferentes propuestas la mejor, para realizar finalmente la construcción. Con la propuesta final elegida se realiza un estudio estructural estático bajo las cargas máximas de impacto para validar la integridad y seguridad del hammer diseñado; una vez finalizado este estudio se inicia con la validación del funcionamiento de la propuesta escogida mediante la búsqueda de las características modales del hammer mediante tres análisis: primero un análisis matemático, segundo un análisis mediante el método de elementos finitos FEM en el software Ansys y finalmente un análisis modal experimental EMA mediante pruebas de laboratorio realizadas con un shaker electromagnético al modelo ya construido en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la escuela de Ingeniería mecánica de la UIS; los resultados de los tres análisis son confrontados entre si con el fin de validar el correcto diseño del hammer.

* Proyecto de grado

** Facultad ingeniería Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, Ph D. Ingeniería Mecánica; Codirector: Jens Jensen, Prof. Dr.-Ing. en Ingeniería Mecánica.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN IMPULSE HAMMER FOR THE EXCITATION OF VIBRATIONS IN A BROADBAND OF FREQUENCIES IN INDUSTRIAL STRUCTURES*

AUTHOR: GERMAN ORLANDO SALCEDO SARMIENTO**

KEY WORDS: Experimental modal analysis, impulse hammer, QFD matrix, Quality house, finite element method, Mechanical vibrations

DESCRIPTION:

The following work is aimed at the design and construction of an impulse hammer as a solution to the implementation of a new non-destructive technique in the inspection of adhesion in coatings of industrial structures, developed in conjunction with the Corporación para la Investigación de la Corrosión and the Industrial University of Santander. As a methodological formula for development, an approach is made to the concepts of modal analysis and mechanical design; then the development of the quality house is carried out in response to finding the most relevant criteria at the moment of designing and choosing between different proposals the best, to finally carry out the construction. With the final proposal chosen, a static structural study is carried out under the maximum impact loads to validate the integrity and safety of the designed hammer; Once this study is completed, it begins with the validation of the operation of the chosen proposal by searching for the modal characteristics of the hammer through three analyses: first a mathematical analysis, second an analysis using the FEM finite element method in the Ansys software and finally an EMA experimental modal analysis by means of laboratory tests performed with an electromagnetic shaker on the model already built in the mechanical vibrations laboratory of the School of Mechanical Engineering at UIS; The results of the three analyses are compared with each other in order to validate the correct design of the hammer.

* Bachelor Thesis

** Physicomechanical Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, PhD. Mechanical Engineering; Codirector: Jens Jensen, Prof. Dr- Ing. Mechanical Engineering.

Introducción

La lucha entre el hombre y la corrosión data de siglos de existencia, en donde la corrosión ha logrado derribar puentes, destruir industrias y colapsar edificios; pero es su carácter que se encuentra ligado con la definición de entropía, donde el universo tiende a abandonar su estado de reposo y busca entrar en caos y desorden, lo que la sociedad trata de mitigar mediante la investigación y creación de nuevas tecnologías que logren controlar este proceso natural.

Solo en Colombia los daños producidos por corrosión rondan la cifra de los \$26.000.000.000 (Group, 2008) USD anuales, lo que corresponde al 4% del producto interno bruto PIB del país, lo que hace pensar, como entra el campo de la integridad en función de proteger los activos que adquiere una empresa? Pues resulta sencillo, mediante procesos que logren mitigar la velocidad de corrosión, algunos de estos son: la protección catódica CP, inhibidores de corrosión y recubrimientos de superficies; Los recubrimientos buscan aislar la superficie en una estructura o en una máquina de un ambiente corrosivo externo y en algunos casos internos, evitando la aparición de corrosión, además de brindar protección química, mecánica e incluso térmica.

Los procedimiento de recubrimientos suele ser costosos, por lo cual es crucial la implementación de pruebas que certifique la adhesión[†] del sustrato con el recubrimiento; los ensayos más usados en la industria son el ensayo pull off y el ensayo peel, los cuales mediante el desprendimiento del recubrimiento ya sea por una fuerza mecánica normal a la superficie o mediante una cinta especial, miden la fuerza de adhesión a la superficie, ambos ensayos son

[†] Adhesión: atracción molecular; enlace mecánico entre el recubrimiento y su sustrato.

destructivos, lo que genera que aunque una estructura se encuentre sana se genere un daño reparable; al momento de terminado un ensayo se realiza la preparación para la implementación del nuevo recubrimiento, la reparación suele ser costosa debido a los equipos, al peso de ellos y a la dificultad de transporte en sectores de difícil acceso.

Debido a lo anterior se encuentra una problemática donde es necesario implementar un nuevo método, el cual sea innovador y logre certificar que exista una adhesión confiable y segura en los recubrimientos de la industria colombiana y que al mismo tiempo cumpla con: ser un ensayo no destructivo, ser económico, adaptativo a estructuras tanto medianas como grandes, ser de fácil y rápida ejecución y finalmente ser ligero para lograr ser transportado largas distancias por un operario que se encuentre realizando inspecciones en campo.

1. Justificación

En la rama de las vibraciones mecánicas existe un campo llamado análisis modal en el cual por medio de la excitación de estructuras es posible encontrar: frecuencias naturales, modos de vibración y funciones de frecuencia de respuesta, los cuales permiten realizar estudios acerca del comportamiento de un objeto; una de las técnicas de análisis modal más usadas a nivel mundial es el uso de impulse hammers, los cuales por medio de un impacto logran excitar estructuras de diferentes tamaños, el problema de estos martillos comerciales es su pequeño tamaño y su diseño fino, debido a que su uso más frecuente son las pruebas en laboratorios, esto provoca una restricción al momento de realizar excitaciones de estructuras de tamaños medianos y grandes.

Es por lo anterior, que la Corporación para la Investigación de la Corrosión CIC en colaboración con la Universidad Industrial de Santander encuentra necesario la fabricación de un impulse hammer con el fin de implementar una nueva e innovadora técnica de inspección de adhesión de recubrimientos en Colombia donde mediante el análisis modal se logre llegar a un dictamen acerca del estado de integridad que posee el recubrimiento; este martillo debe ser robusto para lograr excitar estructuras de gran tamaño y soportar grandes cargas, al igual que debe presentar características resistentes a ambientes agresivos debido a su uso en campo, aspectos que no cumplen los impulsos hammers presentes en el mercado; el diseño de esta tecnología se adaptara a las problemáticas presentes en la industria colombiana para lo cual debe cumplir aspectos de bajo costo, una implementación práctica, ser un ensayo no destructivo y ser de fácil movilización en casos donde sea necesario ser transportado en sectores de difícil acceso de la geografía Colombiana.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar y construir un impulse hammer para la excitación de vibraciones mecánicas de banda ancha, que permita mediante el análisis modal la ejecución de ensayos de inspección de adhesión no destructivos de recubrimientos presentes en medianas y grandes estructuras de diferentes campos de la industria colombiana.

2.2 Objetivos Específicos

- Revisar el estado del arte de las aplicaciones y funcionamiento de impulse hammers basado en el concepto de análisis modal como método de desarrollo.
- Desarrollar un modelo matemático y numérico de calculo que permita analizar, mediante conceptos de resistencia de materiales, diseño y vibraciones mecánicos, el comportamiento de un impulse hammer sometido a cargas de impacto del orden de 5000 N (newtons).
- Construir un impulse hammer para análisis modal en estructuras industriales por medio del modelamiento y la elaboración de planos en el software Inventor, teniendo en cuenta aspectos como: normativa industrial, análisis de materiales y diseño mecánico.
- Validar el modelo numérico, mediante la implementación de ensayos modales en el laboratorio de ingeniería mecánica y el uso del análisis de elementos finitos FEA mediante el software ANSYS.

3. Corporación para la investigación de la corrosión – CIC

3.1 Generalidades de la empresa



Figura 1. Logo de la Corporación. Nota: Adaptado de <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/en/>.

La Corporación para la Investigación de la Corrosión - C.I.C. es un Centro de Desarrollo Tecnológico, enmarcado en la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación, dedicado a la prestación de servicios especializados, ejecución de proyectos y programas y desarrollo de productos tecnológicos para la gestión de corrosión e integridad, con el fin de ofrecer al sector productivo soluciones que contribuyan al fortalecimiento tecnológico, económico y sostenible del país.

Particularmente, en la constitución jurídica de la C.I.C. participaron seis entidades, a saber, la Empresa Colombiana de Petróleos - ECOPETROL, Occidental de Colombia, BP Exploration Company (Colombia), Sika Andina, la Universidad Industrial de Santander - UIS y el Centro Internacional de Física - CIF, quienes son sus Miembros Fundadores y, conjuntamente con el Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, conforman su Consejo Directivo. El Departamento Nacional de Planeación - DNP y Colciencias son miembros invitados permanentes de este consejo directivo.

Ubicada en el Km 2 vía Guatiguará en las instalaciones de la sede UIS Piedecuesta, la Corporación se organiza de la siguiente forma:

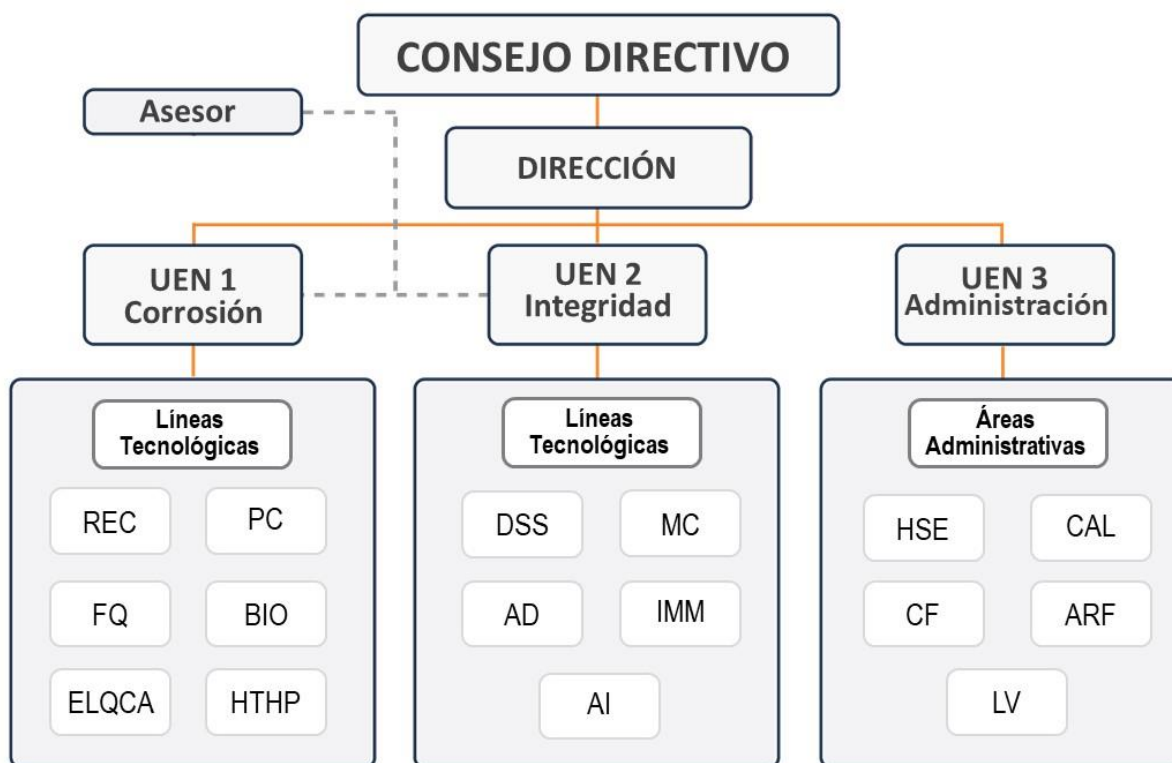


Figura 2. Organigrama de la corporación. Nota: Adaptado de <http://corrosion.uis.edu.co/webcic/index.php/en/>.

3.2 Misión

La Corporación para la Investigación de la Corrosión – C.I.C. es un Centro de Desarrollo Tecnológico, enmarcado en la Ley de Ciencia Tecnología e Innovación, dedicado a la prestación de servicios especializados, ejecución de proyectos y desarrollo de productos tecnológicos para la gestión de corrosión e integridad, que le aportan a la sociedad soluciones innovadoras para su desarrollo sostenible.

3.3 Visión

La Corporación para la Investigación de la Corrosión – CIC para el año 2021 tiene como objetivo ser un Centro de Desarrollo Tecnológico de Excelencia. Para alcanzar dicha meta se ha propuesto:

- Generar soluciones oportunas, confiables, innovadoras y sostenibles.
- Consolidar su equipo de trabajo como autoridad técnica.
- Promover el desarrollo integral del personal.
- Lograr su reconocimiento científico a nivel nacional e internacional.
- Generar rentabilidad.

3.4 Servicios que ofrece actualmente la CIC

Actualmente la CIC cuenta con Equipo de alto desempeño conformado por más de 100 funcionarios con diferentes competencias interdisciplinarias, niveles de formación académica y certificaciones técnicas con reconocimiento internacional; al igual ofrece una variedad de servicios para la industria en los siguientes campos:

- Gestión de integridad
- Inspección y análisis de materiales
- Biocorrosión
- Electroquímica y Alta Presión. Alta temperatura
- Protección catódica
- Recubrimientos
- Inspección interna en líneas de transporte de hidrocarburos
- Análisis dinámico

3.5 Certificaciones

La C.I.C. cuenta con la certificación de su Sistema Integrado de Gestión, bajo las normas ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001. Adicionalmente, la C.I.C. con el apoyo de COLCIENCIAS se encuentra en proceso de acreditación de las principales pruebas de laboratorio (físicoquímicas, electroquímica, biocorrosión y recubrimientos) requeridas por la industria del sector hidrocarburos.

4. Marco teórico

4.1 Caracterización dinámica

Por medio del estudio de las vibraciones mecánicas que ha evolucionado con el proceder de los años es posible realizar en estructuras cada vez más complejas, análisis dinámicos que permiten caracterizar su comportamiento dinámico con mayor exactitud y confiabilidad. Al conocer la caracterización dinámica de un objeto se puede evitar que se desarrolle el fenómeno de la resonancia donde la amplitud de las oscilaciones propias del objeto puede aumentar hasta generar daños catastróficos.

4.2 Análisis modal

El análisis modal comprende el estudio de las propiedades dinámicas en estructuras sometidas a excitación de vibraciones; el análisis modal busca encontrar los parámetros modales, los cuales son suficientes para formular un modelo matemático dinámico. Estos parámetros son los siguientes:

- Frecuencia modal
- Amortiguamiento modal

- Forma modal

Los parámetros modales de todos los modos junto con el rango de frecuencia de interés constituyen una completa descripción de la estructura

El análisis modal es el estudio de propiedades dinámicas en estructuras bajo excitación por medio de vibraciones. (Dossing & kjaer, Structural Testing- Part 1 Mechanical Mobility Measurements, 1988);

4.2.1 Función de respuesta de frecuencia FRF. Un modelo muy eficiente de un sistema lineal es un modelo en el dominio de la frecuencia, donde el espectro de salida se expresa como el espectro de entrada ponderado por un descriptor del sistema.

$$X(\omega) = H(\omega) * F(\omega) \quad (1)$$

Este descriptor del sistema $H(\omega)$ se denomina función de respuesta de frecuencia (FRF) y se define como:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)}$$

Representa la relación compleja entre la salida y la entrada, en función de la frecuencia ω . (Dossing & kjaer, Structural Testing- Part 1 Mechanical Mobility Measurements, 1988)

4.2.2 Análisis modal teórico. La construcción de un modelo modal teórico discretiza un sistema complejo permitiendo la construcción de un modelo matemático con el fin de describir las propiedades dinámicas del elemento en estudio. Estos modelos matemáticos generalmente no son modelos de la estructura en sí. En cambio, son modelos del comportamiento dinámico de la estructura, restringidos por un conjunto de supuestos y condiciones de contorno. (Dossing & kjaer, Structural Testing- Part 1 Mechanical Mobility Measurements, 1988)

Estos modelos se basan en el cálculo de masas y distribuciones de rigidez dependiendo de unas condiciones específicas de contorno, este proceso permite dar camino para una rápida ejecución de análisis como los de elementos finitos debido a que permite una rápida aproximación de la descripción modal del objeto.

4.2.2.1 Método de elementos finitos FEM. El método de elementos finitos es un método numérico que puede usarse para la solución precisa de problemas complejos de vibración mecánica y estructural (Zienkiewicz, 1987) En este método, la estructura real se reemplaza por varias piezas o elementos, cada uno de los cuales se supone que se comporta como un miembro estructural continuo llamado elemento finito. Se asume que los elementos están interconectados en ciertos puntos conocidos como uniones o nodos

Las matrices de masa y rigidez y los vectores de fuerza necesarios para el análisis de elementos finitos se derivan de los elementos unidimensionales básicos, como una barra en movimiento axial, una barra en movimiento torsional y una viga en movimiento de flexión. (Rao, 2004)

4.2.3 Análisis modal experimental EMA. El análisis modal experimental busca encontrar los parámetros modales de un sistema lineal e invariante en el tiempo, estos parámetros son determinados usualmente mediante métodos numéricos como los elementos finitos; uno de los principales usos del EMA es la verificación y corrección del modelo numérico; Usualmente este modelo numérico no existe y los parámetros experimentales funcionan para futuras evaluaciones de modelos. Principalmente el análisis experimental es usado para explicar modelos dinámicos cuya solución no es obvia intuitivamente, por modelos analíticos o por experiencias previas. (Harris & Piersol, 2002)

4.3 Transformada discreta de Fourier

El concepto de la serie de Fourier explica que cualquier señal físicamente realizable se puede separar de forma única en una suma de términos de seno y coseno en las frecuencias apropiadas. Si la elección de frecuencias se limita a un conjunto discreto de frecuencias, transformada discreta de Fourier describe la cantidad de cada termino seno y coseno a cada frecuencia discreta.

En forma simple la transformada puede transformar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, este proceso se puede apreciar en la figura 3.

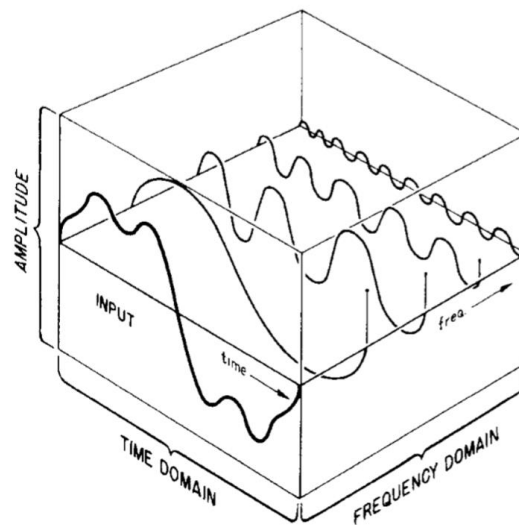


Figura 3. Concepto de la transformada discreta de Fourier. Nota: Adaptado de Shock & Vibration Handbook McGraw Hill.

El algoritmo de la transformada discreta de Fourier es la base para la formulación de cualquier función en el dominio de la frecuencia en sistemas de adquisición digital de datos. en mediciones los datos se deben encontrar en forma discreta durante un limitado periodo del tiempo. (Harris & Piersol, 2002)

4.6 Excitación

Para realizar un análisis modal es necesario excitar la estructura por medio de una fuerza dinámica medible, esta excitación no tiene restricciones teóricas en su forma de onda o como debe ser la excitación implementada.

Implementación de la excitación

Las fuerzas de excitación pueden ser generadas por medio de diferentes tipos de artefactos, para rangos de banda ancha se pueden clasificar en dos clases, adheridos y no adheridos.

Excitadores adheridos:

1. Shakers electromagnéticos
2. Shakers hidrohídraulicos
3. Masas rotativas excentricas

Excitadores no adheridos:

1. Hammers
2. Grandes péndulos de impacto
3. Cables suspendidos para producir “snap. Back”

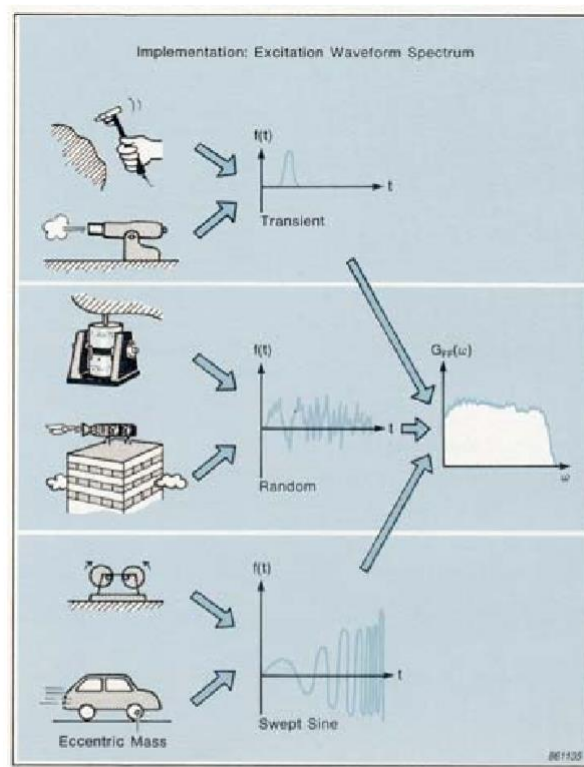


Figura 4. Diferentes métodos de excitación, usados en la industria. Nota: Adaptado de Structural Testing, Part 1. Mechanical Mobility Measurements Brüel &Kjaer. Dinamarca.

4.7 Impact testing

Como nombra Brown en su libro las pruebas de impacto son usadas alrededor del mundo y en una gran variedad de aplicaciones en pruebas de análisis modal, especialmente en la resolución de problemas y en pruebas en campo, debido a que son rápidas, sencillas y requieren un mínimo tiempo de configuración, equipos y tiempos de medición. (Brown & Halvorsen, 1977)

Las pruebas de impacto se pueden clasificar de dos tipos: trasladando el transductor de respuesta y manteniendo la locación del impacto fija ò trasladando el punto de impacto y fijando los transductores de respuesta (acelerómetros) conocido como prueba de impacto de múltiples referencias (MRIT) (Fladung, 1994).

4.8 Impact Hammer

Los martillos de impactos son herramientas ampliamente usadas en la ciencia y en la industria para pruebas modales en componentes y estructuras mecánicas interconectadas. Los hammers cuentan con un transductor de fuerza integrado para medir el estímulo de fuerza dinámica que excita la estructura mecánica bajo prueba. El objetivo principal de este tipo de pruebas experimentales es la determinación de las respuestas de impulso en estructuras, formas modales, resonancias y amortiguación mediante sensores de aceleración adicionales que detectan la respuesta de choque en puntos específicos de interés (Ewins, 2000).

Adicionalmente los hammer cuentan con diferentes puntas las cuales pueden variar el ancho de banda de frecuencias que se quiere estudiar, los materiales mas comunes utilizados son, el acero, el caucho y el plástico; el hammer y sus partes se puede apreciar en la figura 5.

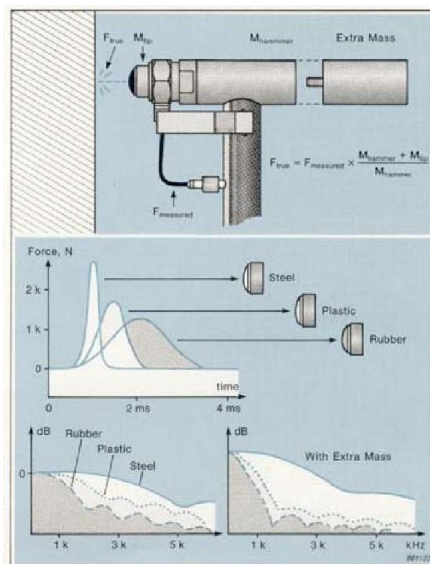


Figura 5. Diagrama de un impulse hammer y las respuestas de sus puntas de acuerdo con el material. Nota:

Adaptado de Structural Testing, Part 1. Mechanical Mobility Measurements Brüel &Kjaer. Dinamarca.

4.9 Tolerancias geométricas

La tolerancia es la cantidad total que una dimensión específica puede variar (ANSI/ASME Y14.5M-1994). Las tolerancias se asignan de manera que dos partes cualesquiera correspondiente se puedan ajustar entre sí; como una mayor precisión implica un alto costo, se recomienda especificar la tolerancia más adecuada posible que permita el funcionamiento necesario y satisfactorio de la parte. (Giesecke, Spencer, Dygdon, & Lockhart, 2006).

Ajustes entre partes correspondientes

El ajuste es el rango de ajuste u holgura de una combinación de márgenes y tolerancias en partes correspondientes (ANSI B4.1-1967 (R1964) y ANSI B4.2-1978 (R1974)).

Existen cuatro tipos generales de ajustes entre partes:

1. **Ajuste de holgura.** Cuando un miembro interno se ajusta a un miembro externo (como un eje en un orificio), siempre hay un espacio u holgura entre las partes.
2. **Ajuste de interferencia.** Donde el miembro interno siempre es más grande que el externo, se requiere forzar las partes para unirlos.
3. **Ajuste de transición.** Resulta de una condición de holgura o interferencia.
4. **Ajuste de línea.** Es aquel en donde se especifican los límites, de manera que resulte una holgura o un contacto de superficie al momento de ensamblar las partes correspondientes. (Giesecke, Spencer, Dygdon, & Lockhart, 2006)

5. Diseño

5.1 Despliegue de la función calidad

En el momento en el cual se identifica una problemática en donde se puede dar respuesta, entra en juego los involucrados a los cuales se presenta una idea de la solución del problema; así que es cuando inicialmente se debe identificar quienes son los involucrados, debido a que el problema anteriormente planteado presenta la falencia de un equipo capaz de realizar inspecciones no intrusivas en estructuras, y debido a que en la CIC más del 80% de sus clientes son el sector hidrocarburos (Oil & gas) se centra la atención en ellos ya que estos abarcan en Colombia la mayor parte de infraestructura industrial, donde el desarrollo tecnológico en curso llegará a actuar.

Durante años la idea de la técnica de despliegue de función de calidad a tomado gran importancia al momento de iniciar el diseño de una nuevas aplicaciones en productos, ya que permite como diseñador obtener un panorama amplio de la relación entre los requerimientos del cliente y la características ingenieriles que se pueden ofrecer; las principales ventajas en el uso de esta técnica radican en tres ejes, primero, nos permite incrementar la calidad, generar una rápida manufactura y obtener un bajo costo; segundo, lograr el producto impulsado por el cliente y finalmente se encuentra proveer un sistema de seguimiento para futuros diseños o mejoras en el proceso. (Group, 2008).

Durante los siguientes apartados se logrará elaborar y explicar el desenvolvimiento de la matriz QFD por sus siglas en inglés (Quality Function Deployment); y la explicación detallada de cada una de sus partes.

5.1.1 Objetivo de la ejecución QFD. La meta del despliegue de la función calidad aplicada a este proyecto radica en lograr encontrar los requerimientos ingenieriles con mayor peso, basados en la voz del consumidor, para enfocar los esfuerzos en trabajar principalmente en ellos y que funcionen como un factor decisorio al momento de desarrollar una matriz de decisión en base a las propuestas del diseño a construir; igualmente servirá para realizar un análisis del márketing presente en la industria y lograr comparar nuestras fortalezas y debilidades con las de la competencia presente en el mercado actual.

5.1.2 Requerimientos del consumidor. A continuación, se encuentran los requerimientos del consumidor recolectados, esta labor dista un poco del común debido a que el estudio se presenta en el desarrollo de una nueva tecnología la cual el consumidor desconoce; luego mediante herramientas como brainstorming y el dialogo directo con consumidores tanto externos como internos, los siguientes once requerimientos se consideraron los más importantes desde el punto de vista del consumidor y se encuentran tabulados en la tabla 1.

Tabla 1. Requerimientos del cliente

Requerimientos del proyecto	
1	Económico
2	Alta exactitud
3	Alta seguridad
4	Buena durabilidad
5	Facilidad de transportar el equipo
6	Alta calidad
7	Buena mantenibilidad
8	Plazo de Garantía
9	Producto innovador
10	Impacto ambiental
11	Ergonomía y buena imagen

5.1.3 Diagrama de Mudge. Al momento de ingresar los llamados “QUE” en la matriz QFD es necesario generar una jerarquía entre los requerimientos y saber cuál tiene un valor de mayor importancia para el cliente, y esto lo podemos realizar mediante la correlación entre ellos mismos.

La comparación en el diagrama de Mudge ha sido realizada atribuyendo un valor en cada evaluación de los requerimientos. El método consiste en responder dos preguntas cuando se hace una comparación entre dos requerimientos. 1) ¿Cuál de las dos funciones es más importante? 2) Dentro de una escala predefinida ¿cuál es el valor de importancia? La escala utilizada para definir el grado de importancia contempla valores entre 1 y 5, donde 5 es el mayor y 1 el menor grado de importancia. Estos valores son representados por las letras A, B, C, D, E con valores respectivos de 5,4,3,2,1. (Riaño, Peña, & Sánchez, 2018)

En la Figura 6. Se encuentra el desarrollo del diagrama de Mudge donde relacionada los requerimientos nombrados en la Tabla 1. Obteniendo como resultado la sumatoria de los valores obtenidos para cada requerimiento y el porcentaje correspondiente a cada uno, generando la jerarquía requerida.

Económico	Alta exactitud	Alta seguridad	Buena durabilidad	Facilidad de transportar el equipo	Alta calidad	Buena mantenibilidad	Plazo de Garantía	Producto innovador	Impacto ambiental	Ergonomía y buena imagen			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	SUM	%	Requerimientos del proyecto
1	2A	3C	1D	1E	1D	7B	1E	9D	1E	1C	6	4,92	Económico
	2	2A	2D	2E	2C	2D	2E	2D	2E	2E	23	18,85	Alta exactitud
		3	3C	3E	3B	3C	3D	9D	3E	3C	20	16,39	Alta seguridad
			4	4D	6B	7A	4C	4C	4E	4E	10	8,20	Buena durabilidad
				5	6E	7E	5E	9C	5D	11E	3	2,46	Facilidad de transportar el equipo
					6	6A	6C	9D	6C	6B	20	16,39	Alta calidad
						7	7B	7D	7E	7E	18	14,75	Buena mantenibilidad
		Eficiencia					8	9C	8E	11E	1	0,82	Plazo de Garantía
	A	5						9C	8E	11E	1	0,82	Plazo de Garantía
	B	4						9	9D	9B	18	14,75	Producto innovador
	C	3							10	11E	0	0,00	Impacto ambiental
	D	2								11	3	2,46	Ergonomía y buena imagen
	E	1								Total	122	100	

Figura 6. Diagrama de Mudge.

5.1.4 Requerimientos del experto. Los requerimientos del experto o ingenieriles se basan en el conocimiento y la experiencia que el diseñador maneje sobre el producto y así lograr ítems con los que logre cumplir la idea del cliente y que sean alcanzables por él, para el caso existen restricciones tanto económicas por parte de la CIC como de manufactura al momento de encontrar una empresa que cumpla con los requerimientos técnicos planteados.

En la Tabla 2. Se encuentran consignados los doce requerimientos técnicos relevantes en el proceso de diseño acompañados de la meta o el valor técnico que deben cumplir específicamente.

Tabla 2. Requerimientos ingenieriles.

Requerimientos Funcionales		
	Requerimiento	Especificaciones
1	Cumplimiento de su función planteada	excitación de frecuencia de banda ancha (1000-6000 Hz) $\pm 10\%$
2	Ajuste seguro de sus partes	ISO 286-1:2010 (H7/h7)
3	Resistencia a vibraciones	Primer modo de vibración abajo de 1000 Hz
4	Manufactura Económica	Costos < \$500. 000.00 COP $\pm 10\%$
5	Resistencia a la corrosión	resistencia a ambientes con: O ² , H ₂ S, CO ²
6	Resistencia al abuso y sobreuso	Security factor > 3
7	Fácil transporte	Distancias > 1 Km
8	Rápida manufactura	Tiempo < 1 semana Numero de Procesos < 4
9	Bajos costos de reproducción y mantenimiento	Mantenimiento < 15% Costo total de fabricación COP
10	Alta durabilidad	Tiempo de vida > 15 años $\pm 10\%$
11	Materiales de alta Resistencia	Resistencia a cargas > 5 kN $\pm 10\%$
12	Buena Imagen y presentación	Acabado fino y diseño innovador

5.2 Matriz de calidad QFD.

Mediante los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos que como ingeniero se pueden ofrecer se procede a realizar el desenvolvimiento de la casa de calidad, contenido en la Figura 7. Esta herramienta permite traducir la voz del cliente a la voz del ingeniero y así mejorar múltiples etapas de diseño, igualmente permite realizar una comparación entre diferentes productos del mercado que atiendan los mismos problemas que el martillo a diseñar realizará, y de esta manera generar rápidos y claros planes de acción.

5.2.1 Comparación competitiva del cliente. Esta primera matriz comprende los requerimientos del cliente establecidos en las secciones anteriores y que tan importantes son cada

uno de ellos para el cliente, es claro que algunos serán más importantes que otros, mediante el diagrama de Mudge se logra realizar esta cuantificación que se ve reflejada en la Figura 8.

La segunda parte que contiene expone como nuestro producto se califica respecto a otras compañías que presenten los mismos servicios, bajo este contexto, se incluyeron 4 de las más grandes compañías que fabrican y comercializan Impulse hammers para análisis modal, cabe aclarar que el producto a diseñar tendrá un uso en recubrimientos y análogamente puede ser usado para análisis modal.

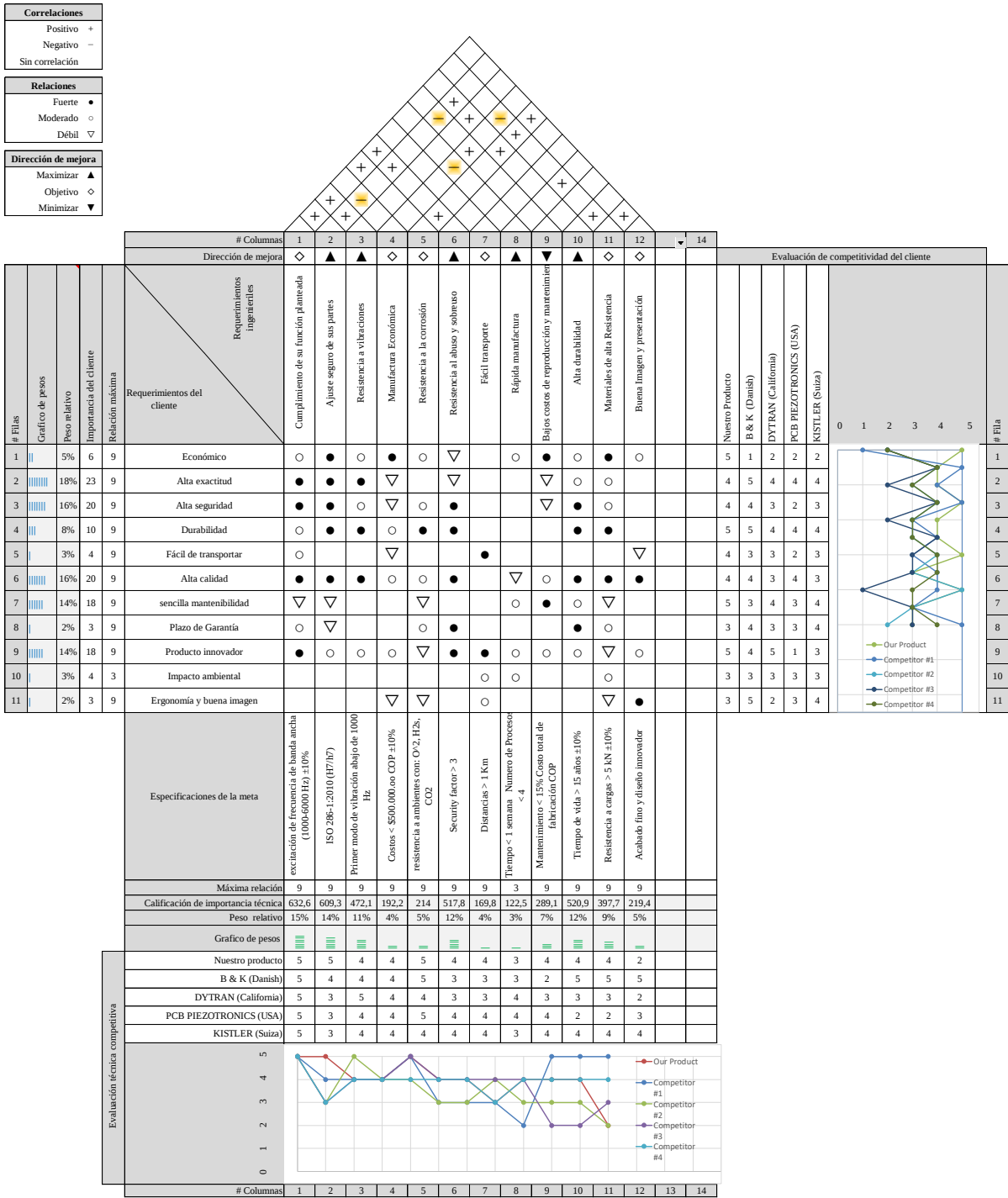


Figura 7. Despliegue de la función calidad QFD

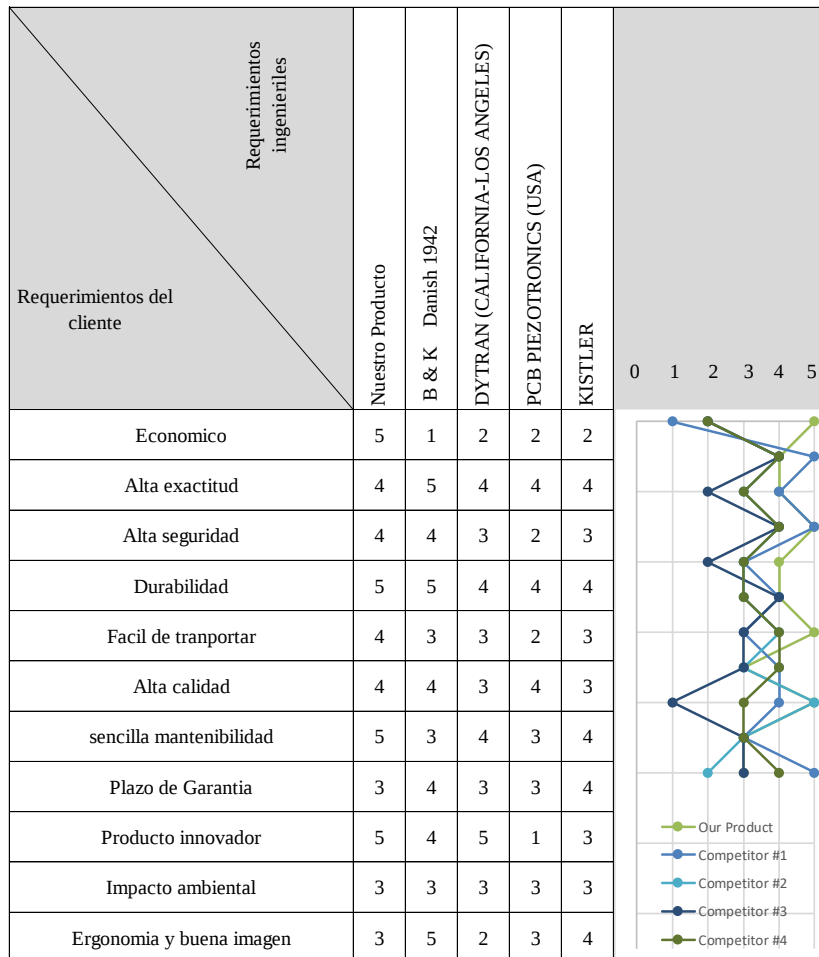


Figura 8. Matriz de requerimientos del cliente y análisis de competencia.

5.2.2 Matriz de correlación. Esta matriz triangular representa el techo de la casa de la calidad se puede apreciar en la Figura 9. y se distingue por presentar las relaciones entre los requerimientos técnicos y mediante simbología establecer el grado de relación presente entre ellos, ya que puede ser positivo, negativo o sin relación, y así atender posibles conflictos futuros que se puedan presentar, por ejemplo, es claro que una manufactura ágil y rápida tiende a ser más costoso debido

a que es necesario contar con maquinaria más avanzada y especializada. Al igual presenta en la base la dirección de mejora de los requerimientos técnico, ya sea necesario maximizar, minimizar o mantenerlo como objetivo, un claro ejemplo es que siempre se desea maximizar calidad y minimizar costos.

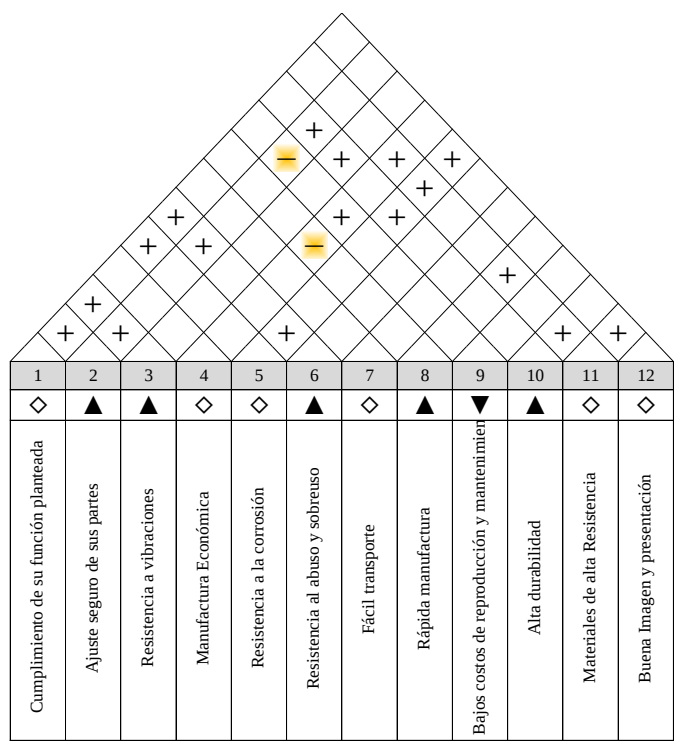


Figura 9. Matriz de correlación.

En la figura 10. Se distinguen los símbolos de correlación presentes en el desarrollo de la casa de la calidad, estas correlaciones pueden variar dependiendo del sector geográfico donde se realice el estudio; la metodología americana suele regirse más por las cifras matemáticas mientras la metodología oriental prefiere el uso de símbolos.

Correlaciones	
Positivo	+
Negativo	-
Sin correlación	

Relaciones	
Fuerte	●
Moderado	○
Débil	▽

Dirección de mejora	
Maximizar	▲
Objetivo	◇
Minimizar	▼

Figura 10. Símbolos de correlación para la QFD.

5.2.3 Matriz de relacionamiento. Es la matriz más robusta y se encuentra en todo el centro de la casa de la calidad y representa relación entre los requerimientos del consumidor y los requerimientos técnicos, mediante diferentes grados de peso de relación, los grados más comunes son la americana, que contiene numeración del 1 al 10, y la calificación japonesa que cuenta con 3 símbolos:

- Fuerte ● = 9
- Moderado ○ = 3
- Débil ▽ = 1

La matriz de relacionamiento se encuentra representada en la Figura 11.

Peso relativo	Importancia del cliente	Relación máxima	# Columnas												
				Dirección de mejora											
				Requerimientos del cliente Requerimientos ingenieriles											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
				◊	▲	▲	◊	◊	▲	◊	▲	▼	▲	◊	◊
				Cumplimiento de su función planteada	Ajuste seguro de sus partes	Resistencia a vibraciones	Manufatura Económica	Resistencia a la corrosión	Resistencia al abuso y sobreuso	Fácil transporte	Rápida manufatura	Bajos costos de reproducción y mantenimiento	Alta durabilidad	Materiales de alta Resistencia	Buena Imagen y presentación
5%	6	9	Económico	○	●	○	●	○	▽		○	●	○	●	○
18%	23	9	Alta exactitud	●	●	●	▽		▽			▽	○	○	
16%	20	9	Alta seguridad	●	●	○	▽	○	●			▽	●	○	
8%	10	9	Durabilidad	○	●	●	○	●	●				●	●	
3%	4	9	Fácil de transportar	○			▽			●					▽
16%	20	9	Alta calidad	●	●	●	○	○	●		▽	○	●	●	●
14%	18	9	sencilla mantenibilidad	▽	▽			▽			○	●	○	▽	
2%	3	9	Plazo de Garantía	○	▽			○	●				●	○	
14%	18	9	Producto innovador	●	○	○	○	▽	●	●	○	○	○	▽	○
3%	4	3	Impacto ambiental							○	○			○	
2%	3	9	Ergonomía y buena imagen				▽	▽		○				▽	●

Figura 11. Matriz de relacionamiento.

5.2.4 Cuantificación de los requisitos del proyecto. En esta matriz se encuentran las especificaciones meta que son diferentes de los requerimientos técnicos, los requerimientos técnicos reflejan el conocimiento del ingeniero en la forma de abordar el problema, mientras que las especificaciones meta reflejan la necesidad de asegurar la satisfacción del cliente. Para fijar estas especificaciones es útil nuevamente observar la competencia como una estrategia de benchmarking técnico, por ejemplo, el ancho de banda de frecuencia que puede ser excitada se encuentra en cualquier referencia de un impulse hammer. De esta manera es posible generar una matriz comparando la capacidad de cumplir con estas especificaciones y ver las dificultades, oportunidades de mejora y puntos de fortaleza. Se puede observar el desarrollo de la matriz de cuantificación en la figura 12.

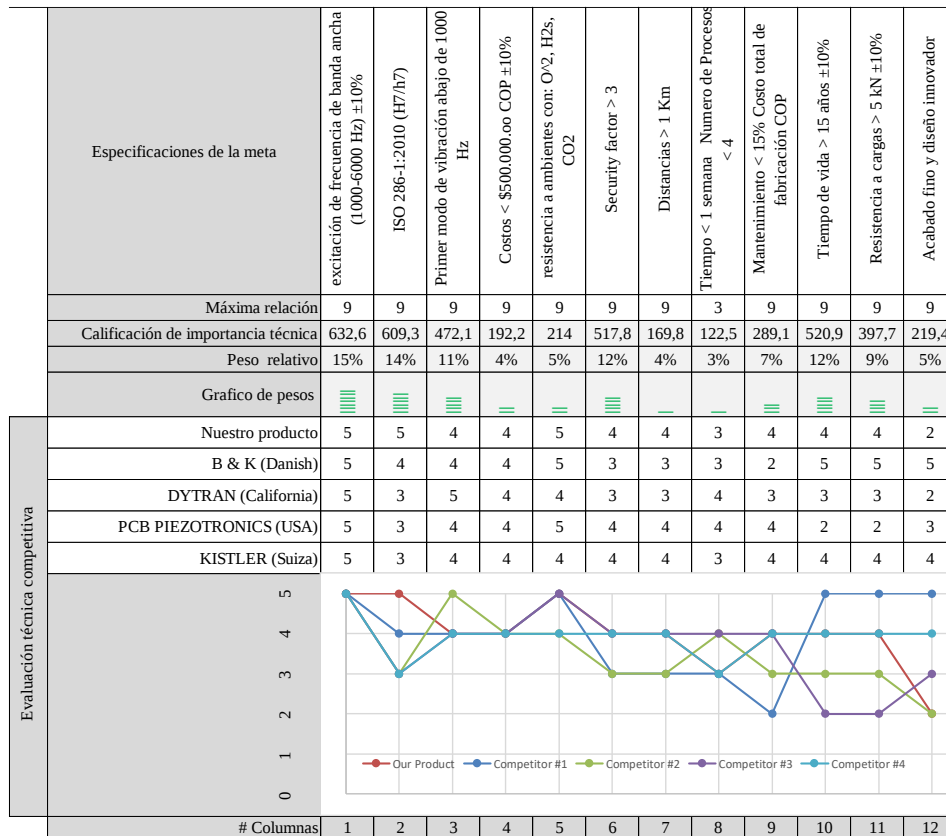


Figura 12. Cuantificación de los requisitos del proyecto.

Finalmente se presenta la cuantificación de los requerimientos técnicos, anteriormente se especificó que cada requerimiento de cliente posee una clasificación y una importancia, medida mediante pesos y en consecuencia mediante la matriz de correlación se construye el valor de cada requerimiento técnico, el resultado se puede entender mediante la siguiente operación:

$$\text{Cuantificacion de los R.T} = \sum_{R.C} (\text{Peso de cada R.C}) (\text{coeficiente de correlacion}) \quad (2)$$

En la Tabla 3. Se muestran los requerimientos técnicos ordenados en base al peso de porcentaje, esto permite evidenciar los requerimientos que son prioridad al momento del diseño.

Tabla 3. Resultados para el análisis del método de Pareto.

Requerimientos Funcionales					
	Requerimiento	Suma	Acumulado	%	Acumulado
1	Cumplimiento de su función planteada	632,6	661	14,52	14,62
2	Ajuste seguro de sus partes	609,3	1270,3	13,48	28,10
3	Alta durabilidad	520,9	1791,2	11,52	39,62
4	Resistencia al abuso y sobreuso	517,8	2309	11,46	51,08
5	Resistencia a vibraciones	472,1	2781,1	10,44	61,52
6	Materiales de alta Resistencia	397,7	3178,8	8,80	70,32
7	Bajos costos de reproducción y mantenimiento	289,1	3467,9	6,40	76,72
8	Buena Imagen y presentación	219,4	3687,3	4,85	81,57
9	Resistencia a la corrosión	214	3901,3	4,73	86,31
10	Manufactura Económica	192,2	4093,5	4,25	90,56
11	Fácil transporte	169,8	4263,3	3,76	94,32
12	Rápida manufactura	122,5	4385,8	2,71	97,03

Mediante la tabla 3. Se realiza un acumulado progresivo de cada valor de porcentaje con el fin de elaborar un Diagrama Pareto que permite identificar los requerimientos técnicos a los cuales prestar mayor atención, para el caso, se resuelve que al concentrar esfuerzos en los primeros 6 requerimientos se lograra resolver cerca del 70% de las metas a cumplir, este diagrama se presenta en la Figura 13.

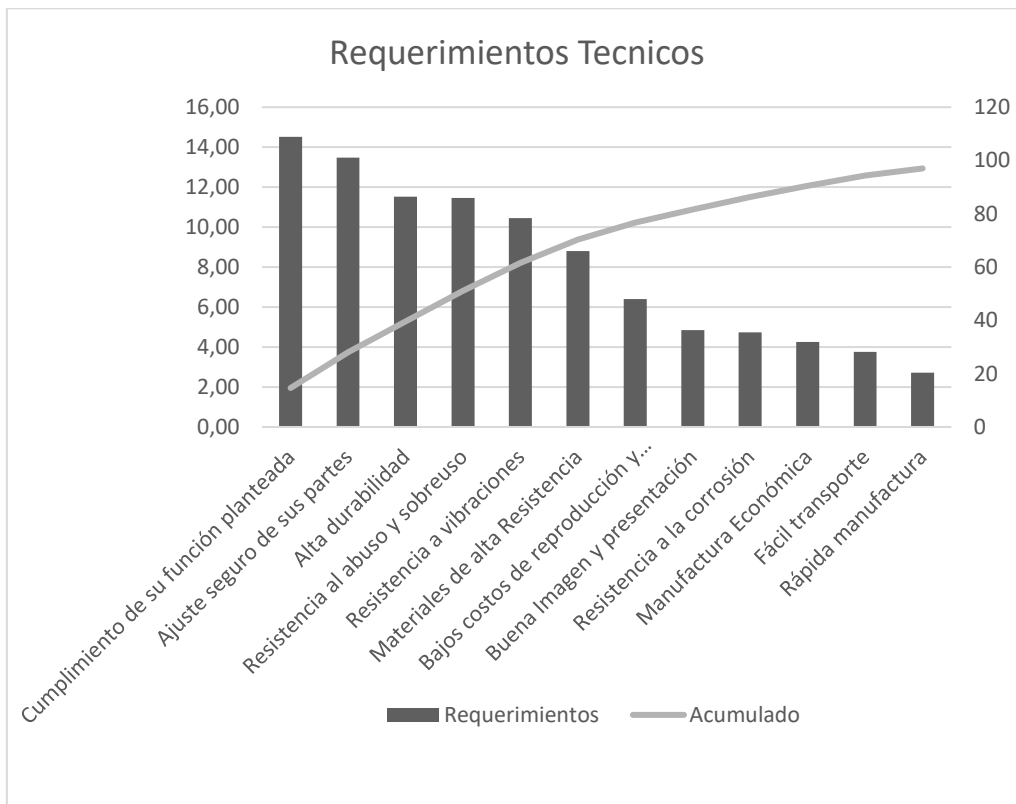


Figura 13. Diagrama de Pareto, para los Requerimientos técnicos.

5.3 Propuestas del martillo

Terminado el análisis del despliegue de la función calidad se procede a realizar la presentación de las propuestas para el hammer, estas propuestas deben estar basadas o proyectadas a cumplir los primeros seis requerimientos técnicos presentes en la sección anterior.

Al momento de plantear las alternativas es importante dirigirse en una sola dirección ya que el martillo cuenta con varias partes, así que es importante priorizar el enfoque en dirección general, para más adelante cuando se elija la alternativa ganadora, profundizar en los detalles, todas las siguientes propuestas fueron modeladas y renderizadas mediante el software inventor de AutoCad el cual se puede usar en toda su capacidad gracias a una licencia estudiantil de tres años.

5.3.1 Primer Propuesta. Esta primera propuesta presentada en la Figura 14. es planteada en base a los 6 primeros criterios de la Tabla 3. Se basa en un mango en tubería industrial de espesor considerable, unido mediante soldadura a una pieza que cuenta con un perfil roscado en forma de tornillo que permita la correcta unión entre cabeza y mango mediante una tuerca común y una arandela, es un diseño sencillo y pensado en la fácil fabricación, la cabeza es cilíndrica y cuenta con un aplanado superior para asentar la tuerca y asegurar su ajuste.

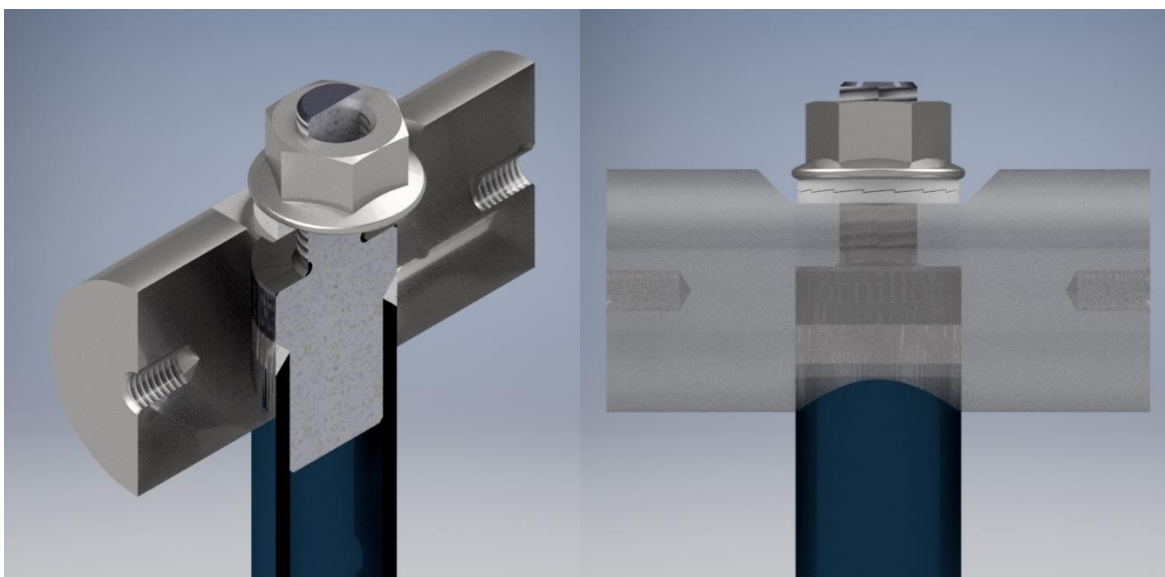


Figura 14. Primera propuesta tipo soldadura de mango tipo tornillo y tuerca de sujeción.

5.3.2 Segunda Propuesta. En la Figura 15. Se presenta la segunda propuesta la cual está constituida por un mango elaborado con tubería industrial unido mediante soldadura a una pieza cilíndrica maciza, la cual esta perforada permitiendo el ajuste de un pasador que logre unir la integridad de cabeza y mango, asegurando un ajuste seguro, este diseño es el más simple de los tres debido a la facilidad de la geometría de las partes; el inconveniente más evidente es una posible debilidad entre la unión debido a las tolerancias presentes en el pasador. Debido a que se requiere

un fácil mantenimiento y en el caso del reemplazo de alguna parte se perdería cualquier ajuste que se haya tenido con anterioridad.

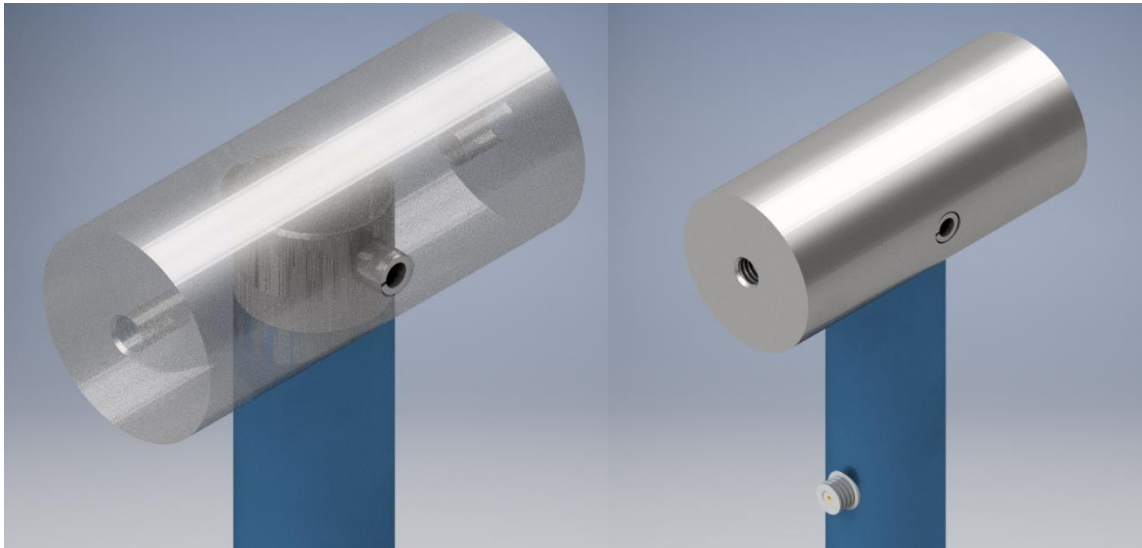


Figura 15. Propuesta de hammer con unión horizontal mediante pasador.

5.3.3 Tercer propuesta. En la Figura 16. Se expone la última propuesta que maneja un concepto ligado a la primera, la cual cuenta con un mango elaborado en tubería, soldado a una pieza que cuenta con un agujero roscado, el cual permita una unión cabeza / mango mediante un tornillo comercial, esto es una gran ventaja debido a que las piezas comerciales bajan el presupuesto de materiales y manufactura, en la imagen se aprecia el uso de un tornillo de cabeza plana con ranura, el cual es agradable a la vista debido a que esconde la cabeza, la debilidad encontrada es asegurar que las vibraciones al momento del uso no suelten el tornillo y debido a esto se realice una mala medición.

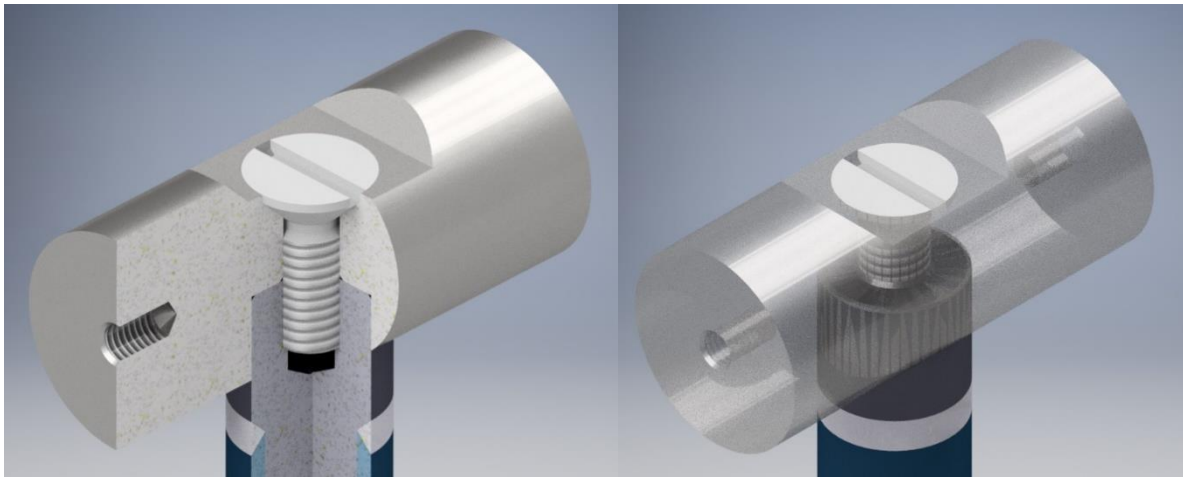


Figura 16. Tercera propuesta tipo mango roscado y tornillo comercial.

5.3.4 Matriz de decisión. La matriz de decisión permite elegir entre diferentes propuestas y de forma objetiva, la mejor y que más se ajuste a nuestras necesidades mediante criterios relacionados al producto, estos criterios serán los 6 requerimientos técnicos con mayor peso en la matriz QFD analizada previamente, en la Tabla. 4 se asignan los pesos de los criterios de acuerdo con una correlación con los valores de la matriz QFD.

Tabla 4. Asignación de peso de acuerdo con valores obtenidos en la matriz QFD.

Criterio	Sumatoria	Peso
Cumplimiento de su función planteada	632,6	2,0
Ajuste seguro de sus partes	609,3	1,9
Alta durabilidad	520,9	1,7
Resistencia al abuso y sobreuso	517,8	1,6
Resistencia a vibraciones	472,1	1,5
Materiales de alta Resistencia	397,7	1,3
	3150,4	10

En la Tabla. 5 está contenida la matriz de decisión, donde se establecen los criterios y los pesos, los valores de correlación son evaluados en una escala de 0 a 5, siendo 5 la relación más alta entre criterio y propuesta, finalmente se multiplica el peso del criterio con la evaluación de cada propuesta y se realiza una sumatoria.

Cuantificacion de la Propuesta

$$= \sum_{\text{criterio}} (\text{peso del criterio})(\text{coeficiente de la correlación}) \quad (3)$$

Tabla 5. Matriz de decisión para tres diferentes propuestas para diseño de impulse hammer.

Criterio	Peso	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Cumplimiento de su función planteada	2	4	3	4
Ajuste seguro de sus partes	1,9	3,5	2,5	4,5
Alta durabilidad	1,7	4	4,5	4
Resistencia al abuso y sobreuso	1,6	4	3,5	4,5
Resistencia a vibraciones	1,5	4	3,5	4
Materiales de alta Resistencia	1,3	4,5	4	4
		39,7	34,45	41,75

5.4 Alternativa ganadora

La matriz de decisión arroja como resultado la propuesta tres como mejor opción a diseñar, en las siguientes secciones se detallará a fondo el diseño ingenieril de cada una de las partes que componen el hammer.

5.4.1 Cabeza y Mango. Las características del impactador determina la magnitud y la duración del pulso de fuerza con el cual se determinará la magnitud y el contenido del pulso en el dominio de la frecuencia.

Al momento de diseñar el problema más grande que se encuentra y el cual asegure el correcto funcionamiento del martillo es la calidad de unión entre la cabeza y el mango debido a que esta unión permitirá mediciones más precisas y exactas, las siguientes características se estudiarán a con mayor profundidad:

- Anti-torque:
- Ajuste cabeza mango
- Método de sujetar la integridad
- Geometría

5.4.1.1 Ajuste cabeza mango. El ajuste hace referencia a la tolerancia entre el agujero de la cabeza y el mango que llamaremos eje para identificarlo mejor, el objetivo de un buen ajuste es evitar que exista una holgura demasiado grande y provoque resultados poco confiables al momento de una medición con el hammer, entre estos efectos a evadir se encuentran: doble golpeteo, desgaste de superficies, desprendimiento de partes, y generación de microgrietas por micro impactos en el material, en la teoría los ajustes relacionan las tolerancias entre ejes y agujeros y aunque algunas geometrías del martillo no sean cilíndricas se puede adaptar la norma de igual manera.

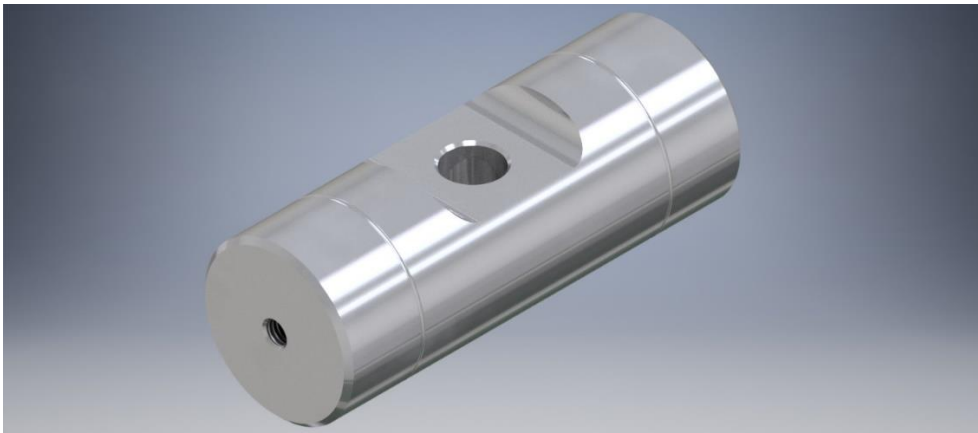


Figura 17. Render cabeza hammer, modelado en Autodesk Inventor.

La norma concerniente a los ajustes y la cual se aplica es la ISO 286-1:2010 Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. La cual despliega un procedimiento, minucioso donde explica la nomenclatura y el método de uso.

Tomando en cuenta el lugar de fabricación y el alcance de las maquinas que se tienen en la empresa se opta por realizar en ambos ajustes del martillo una tolerancia transitoria de tipo h7/H7 el cual maneja una holgura mínima y donde no es necesario ajustar con fuerza lo cual facilita el mantenimiento y el cambio de partes.



Figura 18. Render mango hammer, modelado mediante Autodesk Inventor

5.4.1.2 Anti-torque. En la Figura 11. Se presenta una unión cabeza mango mediante un ajuste cilíndrico, pero esto no asegura que la cabeza realice giros sobre el eje del mango, por esto es necesario realizar una modificación, la cual es una caja cuadrada con estricta tolerancia que evite el torque no deseado, esta caja contara con el roscado para un tornillo M8 modificado.



Figura 19. Caja cuadrada del mango para evitar torques en unión cabeza- mango, representados con la flecha azul.

5.4.1.3 Método de sujetar la integridad. Aunque el ajuste presente posee una tolerancia menor a $\pm 0,02$ mm continúa siendo un ajuste deslizante, así que es necesario asegurar que la cabeza no se salga del mango y para esto se inserta un tornillo que mantiene todo junto, este tornillo no es comercial debido a que es necesaria mayor precisión además cuenta con un tramo cilíndrico que ayudara a soportar las cargas de impacto.

5.4.1.4 Geometría. Las cabezas de los martillos suelen tener geometrías variadas dependiendo de la función que cumplen, debido a la facilidad de manufactura y análisis de benchmarking de la

competencia, la geometría adecuada es cilíndrica con una superficie aplanada para asentar la cabeza del tornillo.

En cuanto al mango se planteó el uso de tubería industrial pero debido a su mala calidad se decide maquinar desde un perfil cilíndrico macizo evitando de esta manera la soldadura que pueda generar un punto de concentración de esfuerzos.

5.4.3 Tornillo. Es una pieza clave al momento de diseño debido a que esta pieza debe soportar altas cargas de tensión ya que es la que mantiene sujeto todas las piezas del hammer, en la etapa de diseño se planteó una cabeza plana, pero debido a que un destornillador no puede generar el torque necesario requerido se postuló usar una cabeza tipo Bristol de 6 mm debido a su eficiencia y pequeño tamaño, el tornillo fue diseñado con una camisa circular de 10 mm de diámetro con un ajuste H7/h7 para evitar la holgura en la cabeza y daños por el impacto, se decidió fabricar el tornillo para asegurar mejores materiales de construcción y tolerancias de manufactura, debido a que el impulse hammer funcionara como un instrumento de medición con alta exactitud.

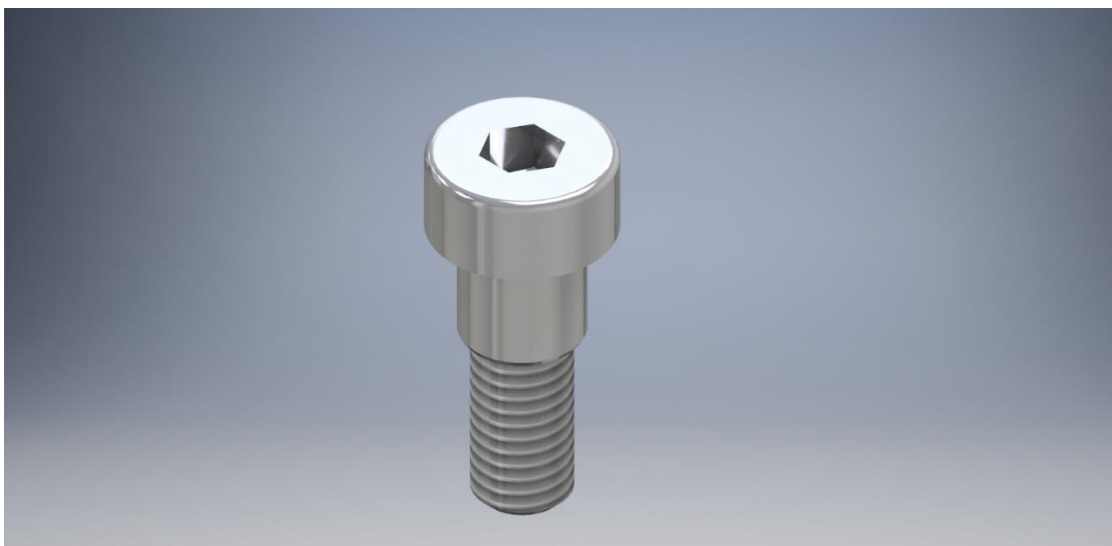


Figura 20. Render del Tornillo del hammer, modelado en Autodesk Inventor.

5.5 Materiales y diseño de tratamientos térmicos

Al momento de elegir el material adecuado para el hammer se deben tener en cuenta aspectos como el ambiente de trabajo, las cargas a las cual estará sujeto y la función que debe cumplir, debido a que el hammer estará sujeto a pruebas donde se ponga a consideración la adhesión en recubrimientos, estará presente el factor corrosión, por lo cual debe ser protegido, así que el material escogido es un acero inoxidable.

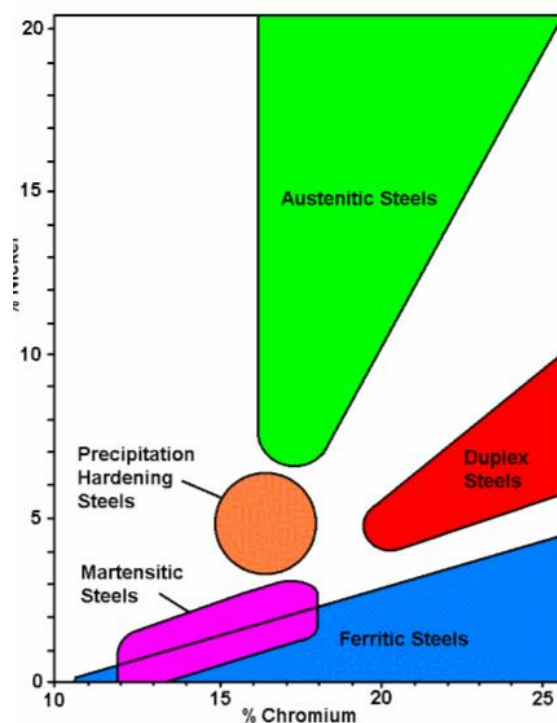


Figura 21. Familias de aceros Inoxidables. Nota: Gráfico representativo de la ubicación de las familias de aceros inoxidables en el diagrama de %níquel vs % cromo presente en su composición química. Nota: Adaptado de The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels. <http://www.atlassteels.com.au/>.

Los aceros inoxidable abarcan una familia de aleaciones caracterizadas por su elemento crítico el cromo Cr, cuya resistencia a la corrosión es notable, los aceros inoxidable se dividen en 3 principales ramas, aunque existen algunas derivaciones, pero las principales son:

- Austeníticos: constituyen la más grande familia en términos de usos, son aceros dúctiles, no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos, al igual que los ferríticos, poseen alta resistencia a la corrosión debido a sus altos niveles de níquel Ni, posee una estructura cubica centrada en las caras (bcc), es un acero no magnético, posee mala conductividad térmica y sus referencias más comunes son el 304 y 316.
- Ferríticos: en la familia de los aceros inoxidable son los que menos resistencia a la corrosión tienen, poseen altos contenidos de carbono y bajo níquel, igualmente son los más económicos y de más bajas propiedades mecánicas.
- Martensíticos: poseen una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct), son magnéticos, se caracterizan por su alta dureza y sus referencias más común es el 410 y 420; suelen ser endurecidos por tratamientos térmicos para mejorar propiedades como ductilidad y tenacidad

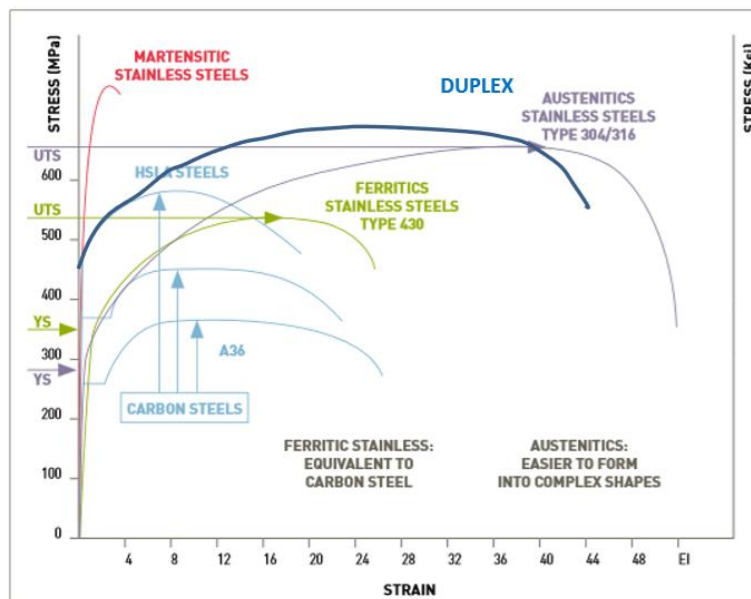


Figura 22. Tabla de esfuerzo deformación para las diferentes familias de aceros inoxidables. Nota: Adaptado de propiedades mecánicas, capítulo 6.

5.5.1 Acero Inoxidable Böhler M303 EXTRA. De acuerdo con los requerimientos se elige el acero inoxidable martensítico de la empresa Böhler referencia M303 EXTRA debido a su excelente tenacidad, resistencia a la corrosión y desgaste; debido a que la cabeza estará sometida a mayores esfuerzos se plantea un tratamiento térmico de temple y revenido en el cual obtendrá valores de dureza cercanos a los 45 HRC; las propiedades de este acero son:

Tabla 6. Propiedades del acero M303 EXTRA del catálogo de Böhler.

(Valores Promedio en %)							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Adiciones
0,27	0,30	0,65	14,50	0,85	1,00	+	Otros

Normas: No. Mat. - 1.2316; DIN x36CrMo17

Este acero especial aleado solo cuenta con la composición química de sus componentes y con la dureza Brinell de fábrica, para lo cual es necesario encontrar un acero equivalente y hallar las propiedades mecánicas fundamentales para realizar cálculos de un estudio de diseño estático; mediante la norma ASTM A310-17 en la tabla 2. Se halla una aproximación del valor del esfuerzo ultimo a la tracción para materiales no austeníticos por medio de la dureza Rockwell C

Fuente 1. Norma ASTM A370-17

 **A370 – 17**

TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^a (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale, 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	...	920	85.6	93.2	84.4	75.4	...
67	900	...	895	85.0	92.9	83.6	74.2	...
66	865	...	870	84.5	92.5	82.8	73.3	...
65	832	739	846	83.9	92.2	81.9	72.0	...
64	800	722	822	83.4	91.8	81.1	71.0	...
63	772	706	799	82.8	91.4	80.1	69.9	...
62	746	688	776	82.3	91.1	79.3	68.8	...
61	720	670	754	81.8	90.7	78.4	67.7	...
60	697	654	732	81.2	90.2	77.5	66.6	...
59	674	634	710	80.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	80.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	79.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	79.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	78.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	78.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	77.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)
52	544	512	576	76.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)
51	528	496	558	76.3	85.9	69.4	56.1	264 (1820)
50	513	482	542	75.9	85.5	68.5	55.0	255 (1760)
49	498	468	526	75.2	85.0	67.6	53.8	246 (1700)
48	484	455	510	74.7	84.5	66.7	52.5	238 (1640)
47	471	442	495	74.1	83.9	65.8	51.4	229 (1580)
46	458	432	480	73.6	83.5	64.8	50.3	221 (1520)
45	446	421	466	73.1	83.0	64.0	49.0	215 (1480)
44	434	409	452	72.5	82.5	63.1	47.8	208 (1430)
43	423	400	438	72.0	82.0	62.2	46.7	201 (1390)
42	412	390	426	71.5	81.5	61.3	45.5	194 (1340)
41	402	381	414	70.9	80.9	60.4	44.3	188 (1300)
40	392	371	402	70.4	80.4	59.5	43.1	182 (1250)
39	382	362	391	69.9	79.9	58.6	41.9	177 (1220)
38	372	353	380	69.4	79.4	57.7	40.8	171 (1180)
37	363	344	370	68.9	78.8	56.8	39.6	166 (1140)
36	354	336	360	68.4	78.3	55.9	38.4	161 (1110)
35	345	327	351	67.9	77.7	55.0	37.2	156 (1080)
34	336	319	342	67.4	77.2	54.2	36.1	152 (1050)
33	327	311	334	66.8	76.6	53.3	34.9	149 (1030)
32	318	301	326	66.3	76.1	52.1	33.7	146 (1010)
31	310	294	318	65.8	75.6	51.3	32.5	141 (970)

Figura 23. Tabla 2. De la norma ASTM A370-17, proporciona las interrelaciones aproximadas de los valores de dureza y resistencia a la tracción en aceros Inoxidables no austeníticos, no debe usarse para alambre estirado

Según la figura 23. Para un acero no austenítico con una dureza entre 290-330 HB presenta una resistencia ultima a la tracción (SUT) cercana a 1010 MPa (146 Ksi).

Teniendo la composición, mediante la página web “MatWeb Material Property Data” se introduce la composición del material para obtener materiales con las mismas características.

Se encuentra el material CA28MWV (J91422) el cual es un acero inoxidable para casing en perforaciones el cual consultando su normativa ASTM A743, en la tabla 2. Se encuentra que tiene una composición muy cercana al M303 que se quiere estudiar, en la tabla 12.1 se obtiene que el esfuerzo a la fluencia de este material es igual a $S_y = 760$ MPa (110 Ksi).


A743/A743M – 17

TABLE 2 *Continued*

Grade (UNS)	Type	Composition, %													
		Carbon, max	Man- ganese, max	Silicon, max	Phospho- rus, max	Sulfur, max	Chromium	Nickel	Molybde- num	Colum- bium	Sele- nium	Copper	Tung- sten, max	Vana- dium, max	Nitrogen
CA28MWV (J91422)	12 Chromium, with Molybdenum, Tungsten and Vanadium	0.20– 0.28	0.50– 1.00	1.0	0.030	0.030	11.0–12.5	0.50– 1.00	0.90–1.25	...	...	...	0.90– 1.25	0.20– 0.30	...

 **A743/A743M – 17**

TABLE S12.1 Tensile Requirements

Grade	Type	Tensile Strength, min		Yield Strength, min		Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^A	Reduction of Area, min, %
		ksi	[MPa]	ksi	[MPa]		
CA6N	11 Chromium, 7 Nickel	140	[965]	135	[930]	15	50
CA6NM	12 Chromium, 4 Nickel	110	[755]	80	[550]	15	35
CA15 and CA15M	12 Chromium	90	[620]	65	[450]	18	30
CA28MWV ^C	12 Chromium, with Molybdenum, Tungsten, and Vanadium	140	[965]	110	[760]	10	24

Figura 24. Tabla S12.1 Norma ASTM A743, se encuentran los valores de resistencia ultima a la tracción, resistencia a la fluencia, elongación, y reducción de área para el acero de interés CA28MWV.

De esta manera se obtiene una aproximación de las características mecánicas asociadas al acero martensítico M303, estas serán útiles en futuros capítulos donde se necesiten estos valores para caracterizar materiales y efectuar análisis de elementos finitos.

- SUT= 1010 MPa
- E= 218 GPa
- Sy= 760 MPa

5.6 Presentación de Diseño final

De acuerdo con el procedimiento presentado para el diseño del hammer durante el capítulo, finalmente se procede a realizar un ensamble y un render mediante el software Inventor, donde se aprecia la presentación final que puede tomar el proyecto al momento de ser fabricado, teniendo en cuenta aspectos como materiales y acabados superficiales.

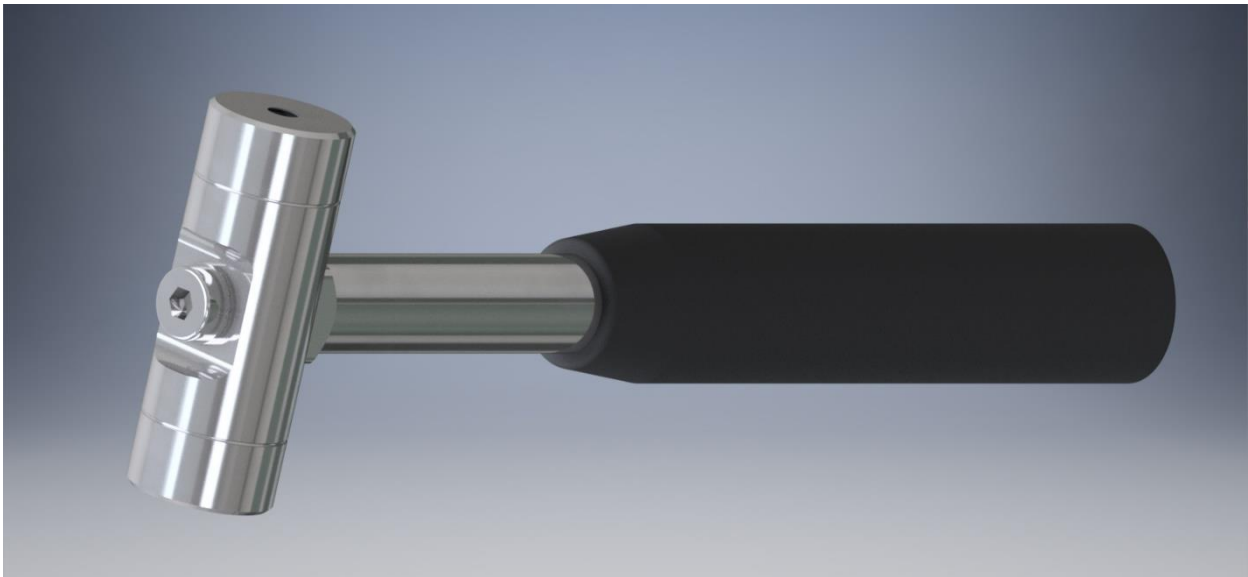


Figura 25. Impulse hammer, ensamble modelado mediante Autodesk Inventor.

5.7 análisis de esfuerzos bajo cargas máximas de funcionamiento mediante el método de elementos finitos FEM

Para realizar el análisis de esfuerzos y deformación del hammer, los modelos 3D se desarrollaron en el software Inventor 2019, se modeló y se ensambló cada pieza, y finalmente se realizó el análisis en el software ANSYS Workbench 19.1.

El cálculo de esfuerzo deformación de ANSYS se implementó mediante el método de Von Mises, el cual está basado en la teoría de falla elástica de un material dúctil a medida que la energía de distorsión elástica supera el valor predeterminado del material según su diagrama de esfuerzo deformación. (Vanegas,2004)

5.7.1 Especificaciones de uso del hammer. El hammer es un instrumento de medición mas no una herramienta, así que, aunque los martillos de uso común estén diseñados para carga considerables un hammer de impacto tendrá especificaciones puntuales, los requerimientos de diseño escogidos fueron los siguientes:

- **Soportar cargas de impacto máximo de 5000 N.** de acuerdo al estudio de mercado se encuentra que los hammer pequeños con cargas de entre 500 y 2000 N son usados en prácticas de laboratorios y en piezas como laminas medianas , mallas o piezas pequeñas; los hammer de capacidad de 5000 N son usados en pruebas de piezas medianas y grandes como carrocerías de carros la cual es un símil muy acertado para la piezas que se quieren estudiar en el hammer a diseñar, finalmente se encuentran hammer de capacidades de hasta 20 KN los cuales son usados en el estudio de estructuras civiles las cuales distan de los márgenes de piezas que este proyecto abarca.

- **Tamaño entre 20 y 40 cm de longitud.** Este margen cuenta como trasfondo el objetivo de ser un instrumento transportable por un operario y al mismo tiempo lo suficientemente robusto para soportar el abuso y generar suficiente energía para la excitación en estructuras.

Al momento del análisis es crucial tener en cuenta las propiedades del material elegido para la construcción halladas en la sección 5.6 de este capítulo.

A continuación, se presenta el análisis de elementos finitos realizado al hammer ensamblado, el hammer cuenta con diferentes clases de contactos repartidos entre bonded y friccionales, que asemejan un comportamiento real, además de una carga de pretensión el tornillo que sujeta la cabeza con el mango.

El hammer estará sometido a una carga máxima de 5000N en la cara donde se encontrará el sensor de fuerza sujetado, como condiciones de contorno se usó el mango y el otro extremo de la cabeza como soportes fijos, como se aprecia en la Figura 26.

Nota: el análisis de las condiciones de contorno se presta para una extensión del proyecto debido a que el soporte no es totalmente fijo debido a que la mano humana cuenta con diferentes coeficientes de amortiguación al momento del impacto.

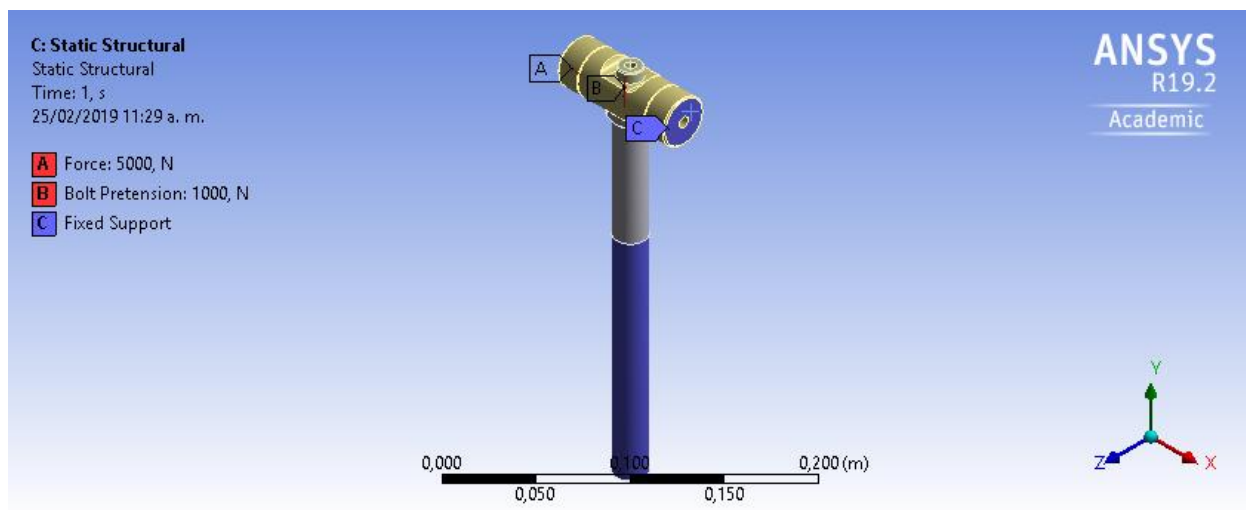


Figura 26. Condiciones de contorno y cargas presentes en el hammer. Nota: el símbolo A representa la carga distribuida sobre la cara de impacto del hammer, el símbolo B representa la carga de pretensión del tornillo y el símbolo C el soporte fijo, distribuido en una parte del mango del hammer

Se realizó un mallado fino con un total de 26231 nodos y 14989 elementos como se observa en la figura 27.

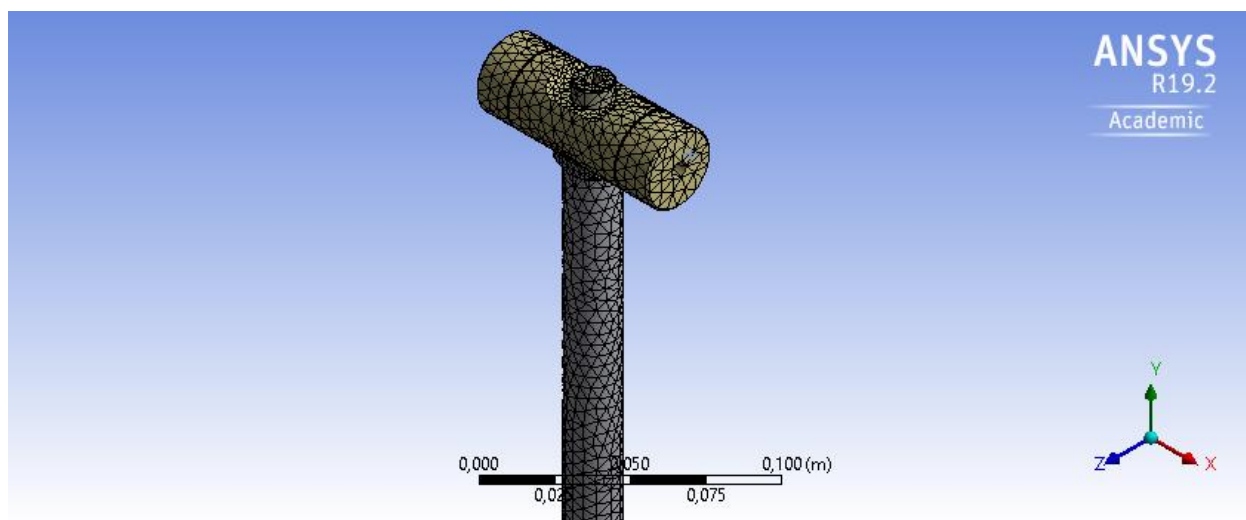


Figura 27. mallado fino, elaborado mediante el software ANSYS.

en la figura 28. se presenta el resultado de del esfuerzo máximo de Von Misses de 163,8 MPa presente en un extremo del mango, teniendo en cuenta que el martillo en un caso extremo alcance esta carga y que se encuentra en un sector fácil de remplazar se acepta el factor de seguridad calculado mediante ANSYS de 1.2634, presentado en la figura 29.

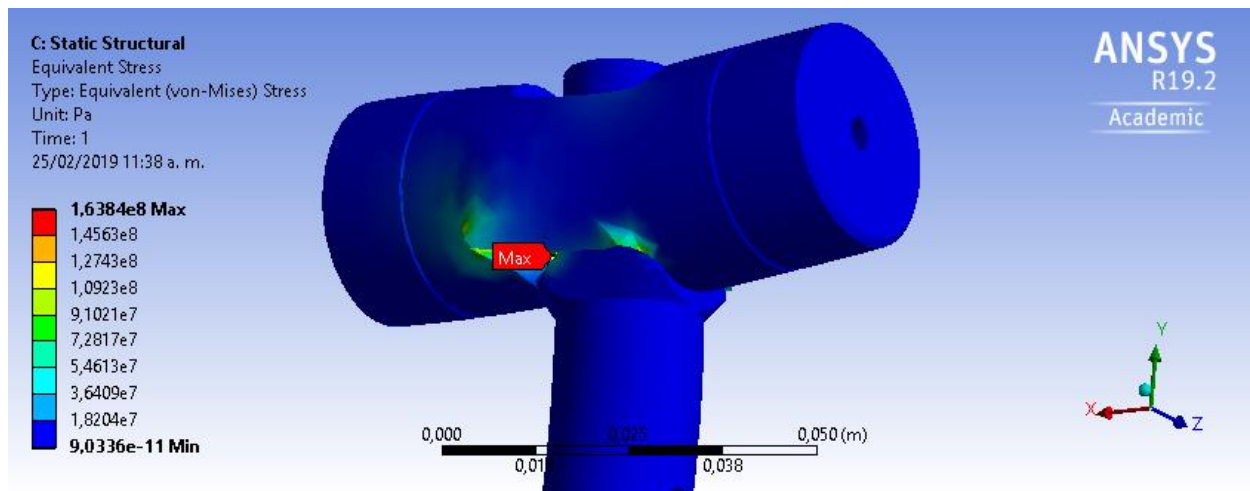


Figura 28. Resultados del análisis de estrés equivalente mediante el método de Von Misses. Nota: la zona de color naranja representa el lugar con mayor esfuerzo en el hammer

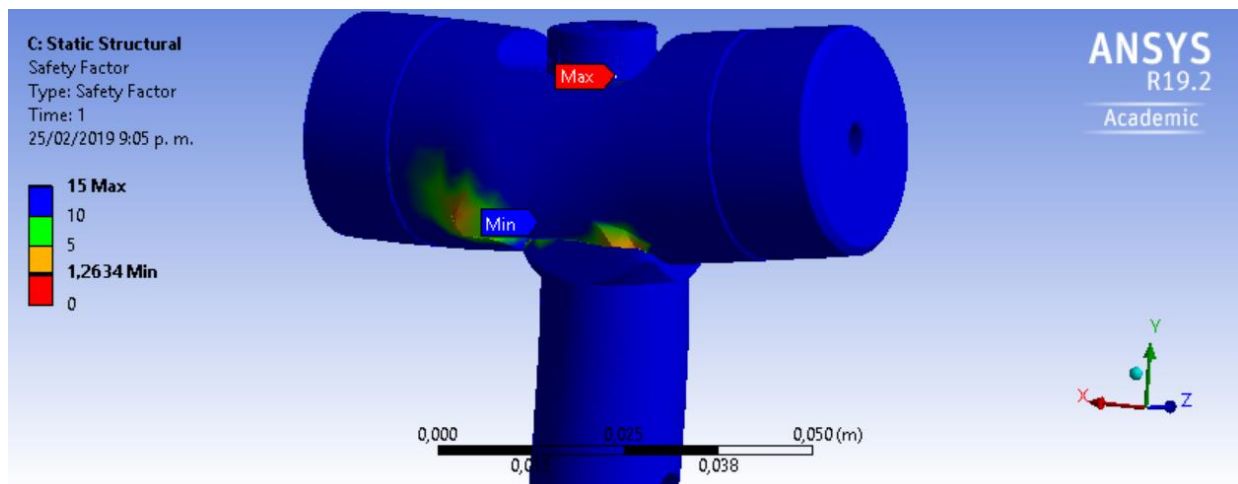


Figura 29. Resultados acerca del factor de seguridad de la pieza.

6. Fabricación

Terminada la fase de diseño, el siguiente paso es elaborar los planos de construcción en el lenguaje técnico adecuado, de la tal manera que sea posible la ejecución del diseño ingenieril en un taller de manufactura, debido a las altas tolerancias presentes en el martillo y acabado superficial en las partes que presentaban contactos, se decide recurrir a los servicios de la empresa RAMBAL S.A , la cual es una empresa de extrusión de plásticos ubicada en la zona industrial vía Girón-Café Madrid, la empresa cuenta con una alta gama de equipos debido a que ellos fabrican sus propios moldes de extrusión y prestan servicios de maquinado a la industria Santandereana.

Debido a que sugerencias tanto de RAMBAL SA como de la CIC se aprobó realizar la manufactura de dos diseños diferentes de hammer, lo que ofrecerá diferentes puntos de comparación, al igual que diferentes grados de uso, lo que se visualiza como una oportunidad de mejora y ampliación de conocimiento para el desarrollo del proyecto.

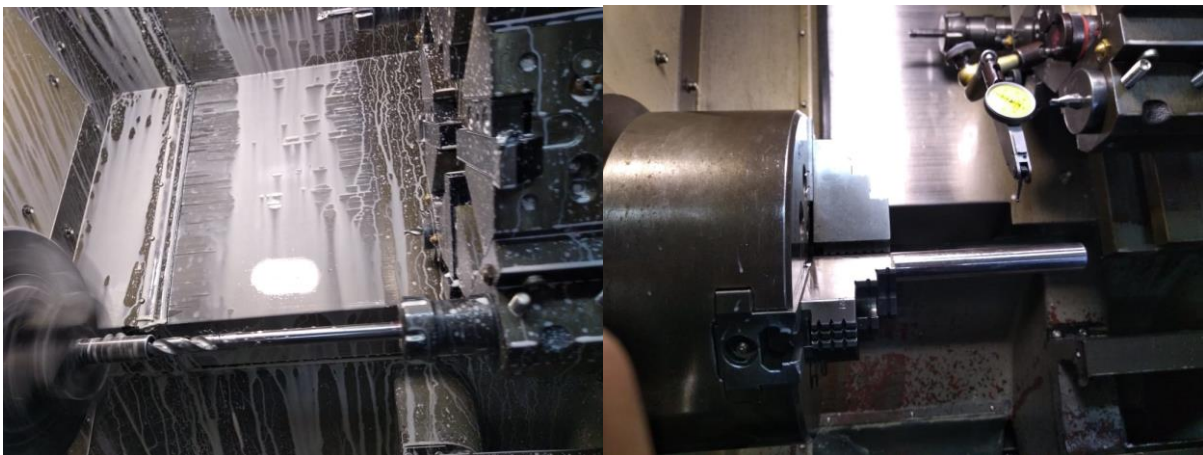


Figura 30. Fase de maquinado del mango del hammer mediante Torno CNC.

Cada una de las piezas conto primeramente con un trabajo en Torno CNC, y luego mediante Fresadora de 4 ejes, finalmente se rectificaron las caras que presentaban mayor importancia, las cabezas de los martillos fueron expuestas a tratamientos térmicos para mejorar su dureza y tenacidad; el tornillo de unión paso por fase de erosionado donde mediante un electrodo se realizó la forma del hexágono para la llave Bristol.



Figura 31. Fase de maquinado de la cabeza del hammer en el Torno CNC.



Figura 32. Fase del maquinado de la cabeza en la Fresadora de cuatro ejes de RAMBAL.

7. Evaluación del desempeño

Siguiendo los objetivos del proyecto, el impulse hammer debe tener la capacidad de excitar estructuras en un ancho de banda de: 1-5 (KHz); por lo cual es de interés encontrar las frecuencias naturales propias del hammer, debido que al momento del uso de este puede entrar en conflicto la resonancia con la medición.

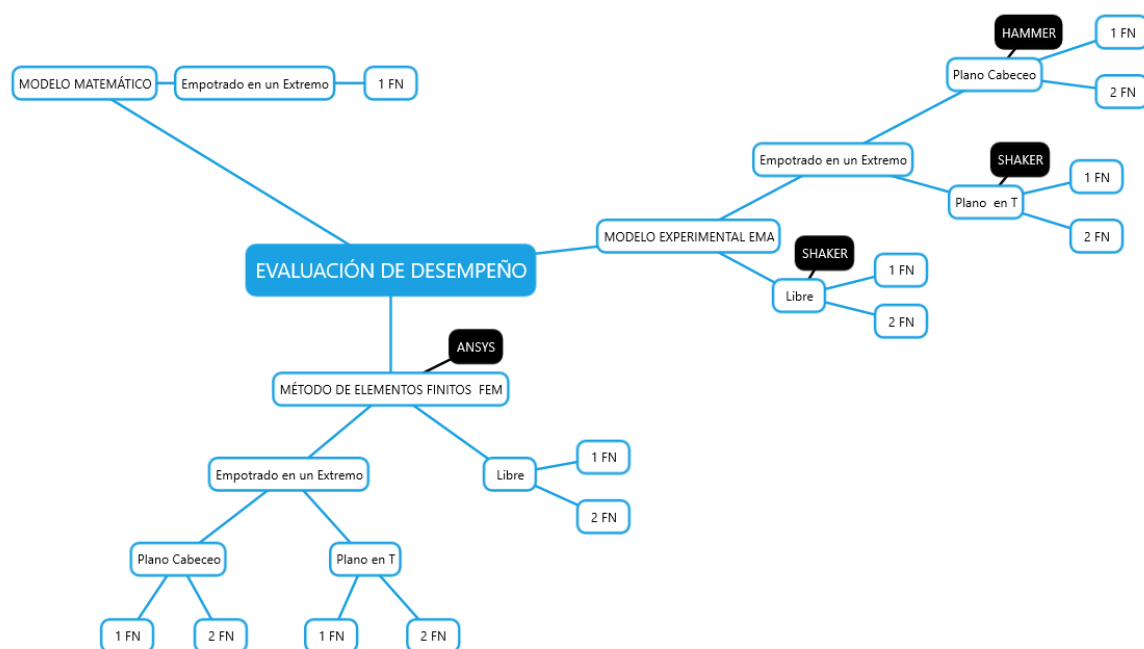


Figura 33. Mapa conceptual de la ejecución de la evaluación de desempeño con el hammer diseñado y construido.

Es necesario asegurar mediante un modelo numérico que el hammer no va a presentar resonancia en un ancho de frecuencia mayor a 1 KHz o menor a 5 KHz y si es así lograr realizar una modificación antes de la fabricación y evitar gastos innecesarios.

En la figura 33. Se hace referencia en el recuadro de empotrado en un extremo, dos posiciones, la primera es cabeceo y la segunda plano en T, estos son los dos diferentes planos en los cuales el hammer puede vibrar, este fenómeno se aprecia mejor en la figura 34.

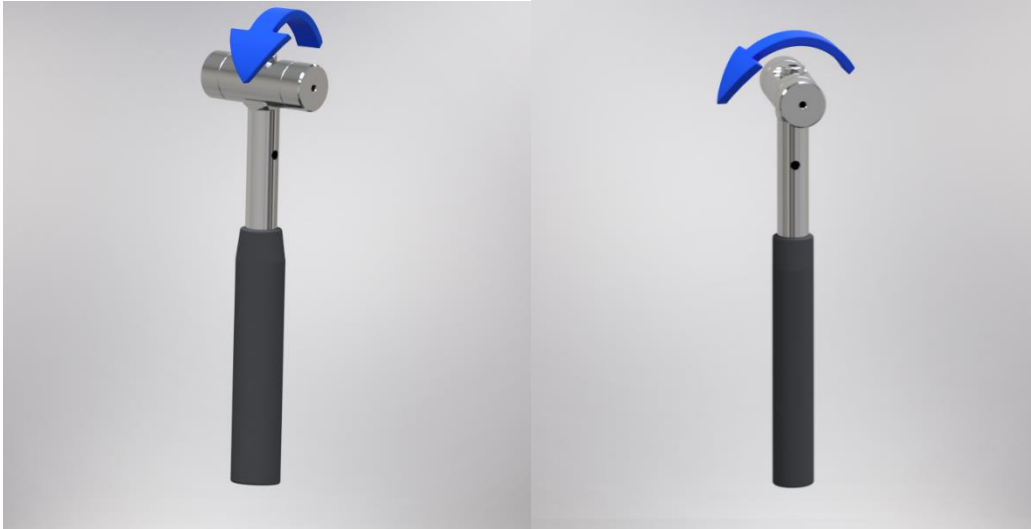


Figura 34. Diferentes planos de vibración, plano en T y plano de cabeceo.

Cabe resaltar que todos los estudios realizados serán con el fin de encontrar la primera frecuencia natural ya que esta es la que presenta mayor riesgo en cualquier sistema mecánico, en nuestro caso el martillo, al igual se ampliara la búsqueda para encontrar la segunda frecuencia natural; los sistemas mecánicos cuentan con infinitas frecuencias naturales.

7.1 Modelo matemático

Un modelo matemático permite mediante algún tipo de expresión matemática explicar o representar el comportamiento de algún modelo complejo o algún problema de la vida real, lo cual es una descripción matemática de una situación real.

Como medida de apropiación del conocimiento adquirido durante la carrera se presenta un modelo matemático de un grado de libertad del hammer como una primera aproximación a la primera frecuencia natural del sistema, la cual mediante el método de elementos finitos (MEF) será refinada en el siguiente capítulo.

El hammer se puede modelar como una viga empotrada en un extremo con una sección transversal constante, simulando la sujeción de la mano del usuario; y que posee una carga puntual en el extremo libre, relacionada a la masa de la cabeza, como se observa en la figura 35.

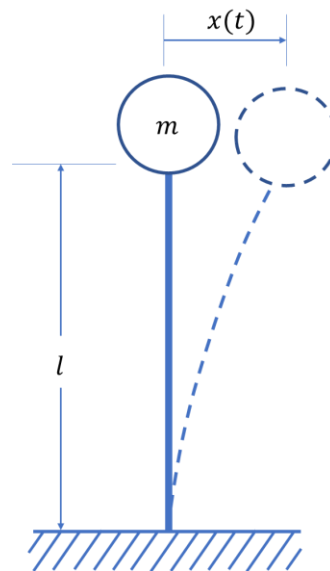


Figura 35. Representación del hammer por medio de una viga empotrada en un extremo.

Es conocido que la flexión de una viga ocasionada por una carga W esta dada por $\frac{Wl^3}{3EI}$ donde l es la longitud, E es el módulo de Young, e I es el momento de inercia del área transversal del mango, la rigidez de la columna (impulse hammer) está dada por:

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (4)$$

La longitud del mango del hammer es igual a $l = 202,5 \text{ mm}$, $E = 1,8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} (0,02^4 - 0,014^4) = 5,968 \times 10^{-9} \text{ m}^4 \quad (5)$$

De esta manera

$$k = \frac{3(1,8 \times 10^{11})(5,969 \times 10^{-9})}{0,2025} = 338119 \text{ N/m}$$

Debido a que la masa del mango es considerable con respecto a la cabeza se debe deducir una correlación para la masa equivalente mediante la equivalencia de la energía cinética; la deflexión estática de una viga en voladizo producida por una carga concentrada es la siguiente:

$$y(x) = \frac{Px^2}{6EI} (3l - x) = \frac{y_{max}x^2}{2l^3} (3l - x) = \frac{y_{max}}{2l^3} (3x^2l - x^3)$$

La energía cinética máxima de la viga ($T_{m\acute{a}x}$) es

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{m}{l} \{\dot{y}(x)\}^2 dx \quad (6)$$

Donde m es la masa total y (m/l) es la masa por longitud de la viga, se puede utilizar la ecuación

6. Para expresar la variación de la velocidad $\dot{y}(x)$, como

$$\dot{y}(x) = \frac{\dot{y}_{m\acute{a}x}}{2l^3} (3x^2l - x^3) \quad (7)$$

Por lo tanto, la ecuación 6 se escribe como

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{m}{2l} \left(\frac{\dot{y}_{m\acute{a}x}}{2l^3} \right)^2 \int_0^l (3x^2l - x^3)^2 dx = \frac{1}{2} \frac{m}{l} \frac{\dot{y}_{m\acute{a}x}^2}{4l^6} \left(\frac{33}{35} l^7 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{133}{140} m \right) \dot{y}_{m\acute{a}x}^2 \quad (8)$$

La energía equivalente máxima se podría expresar como

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m_{eq} \dot{y}_{m\acute{a}x}^2 \quad (9)$$

Si se igualan las ecuaciones 8 y 9, se obtiene:

$$m_{eq.} = \frac{33}{140} m \quad (10)$$

Por lo tanto, la masa efectiva total que actúa sobre el extremo de la viga en voladizo es

$$M_{efec} = M + m_{eq.} \quad (11)$$

Donde M es la masa de la cabeza del hammer; Por lo tanto, la frecuencia natural del hammer en la dirección transversal será

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_{efec}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{338119}{0,5221}} = 137,2 \text{ Hz} \quad (12)$$

Entonces la frecuencia natural para el modelo matemático que se adaptó al hammer es $\omega_n = 137,2 \text{ Hz}$, esta frecuencia entra en el rango permitido de diseño, por lo cual al momento de realizar el modelo experimental se espera encontrar resultados cercanos a este valor

7.2 método de elementos finitos (FEM)

Precediendo un análisis real del análisis modal del hammer es necesario realizar un modelo numérico donde se encuentren las primeras frecuencias naturales y sus modos propios, para este proceso se vale del uso del método de elementos finitos con el objetivo de predecir el comportamiento del hammer y en el momento de realizar un análisis con el shaker facilitar la configuración de los parámetros de la prueba.

Para este modelo numérico se usó el software ANSYS Worckbench 19.0 donde se simuló dos configuraciones de contorno:

- Empotrado en un extremo
- Libre

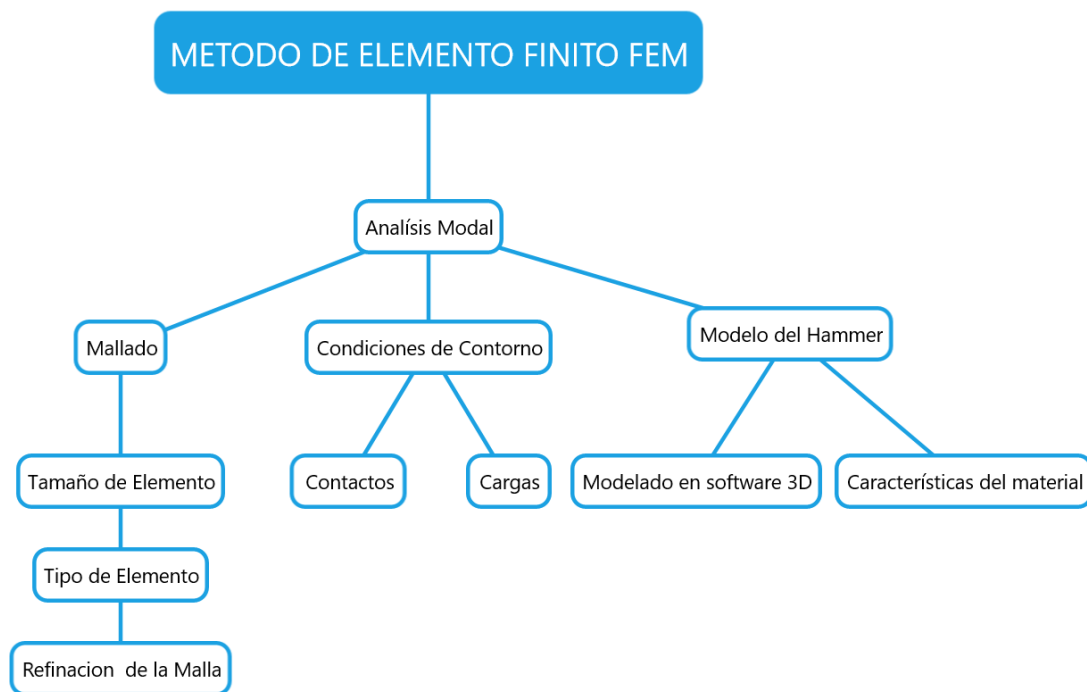


Figura 36. Mapa conceptual de los pasos fundamentales al momento de la ejecución del método de elementos finitos sobre el estudio de las frecuencias naturales en el impulse hammer.

7.2.1 Configuración de ANSYS Workbench 19.0. En la figura 37. Se visualiza los grupos de análisis que se realizaron, entre ellos un análisis estructural y tres análisis modales, correspondientes a las condiciones de frontera; con el fin de manejar el mismo modelo, se comparten las configuraciones de geometría y características mecánicas.

Como primera medida se configuran los parámetros en engineering data del material donde se insertan los valores para el acero inoxidable M303, obtenidos en la sección de materiales, como se indica en la figura 38.

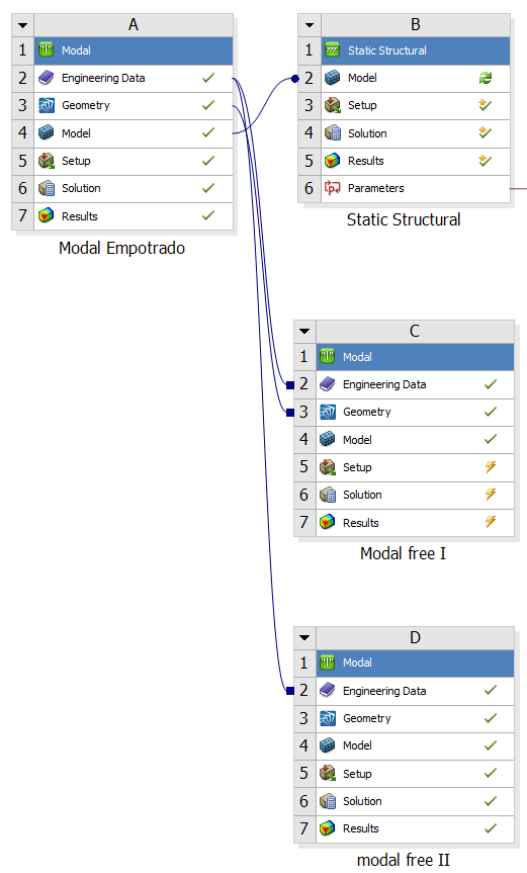


Figura 37. Bloques donde se encuentran configurados los diferentes analisis en la interfaz de ANSYS.

Properties of Outline Row 3: M303 Stainless Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7,7	g cm^-3	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,7E-05	C^-1	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
8	Young's Modulus	1,8E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,5E+11	Pa	
11	Shear Modulus	6,9231E+10	Pa	

Figura 38. Tabla de inserción de datos mecánicos del material de construccion de las piezas.

El siguiente paso es configurar la geometría la cual se exporta de un modelo previamente realizado en Inventor, y se configuran los parámetros como:

- Mallado
- Tipo de elemento y element size
- Cargas y condiciones de contorno

7.2.2 Mallado. El mallado es el apartado con mayor criticidad al momento de realizar un estudio por medio del método de elementos finitos, entre más refinada esta sea mayor convergencia a la solución se acerca el diseñador, sin embargo, los tiempos de cálculo se extienden demasiado y los costos computacionales aumentan. Existen diferentes métodos para llegar a resultados precisos, este análisis usara la malla adaptativa donde mediante el análisis de la calidad del elemento se encuentran las áreas críticas presentes en el cuerpo y se dispone a hacer uso de la herramienta de sizing donde se corrige el tamaño de los nodos.

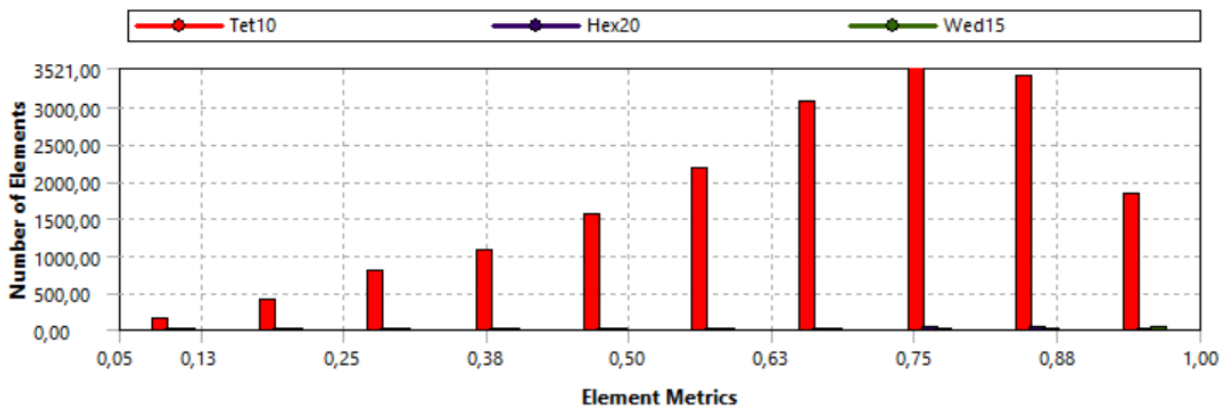


Figura 39. distribución de número de elementos de acuerdo con el tamaño y al tipo de elemento.

En la figura 39. Se muestra la distribución de la calidad de los elementos, mediante esta herramienta se encuentran los sectores con los nodos de menor calidad como se evidencia en la figura 40. Y se procede a realizar un sizing en las caras afectadas y así disminuir la cantidad de elementos con mala calidad.

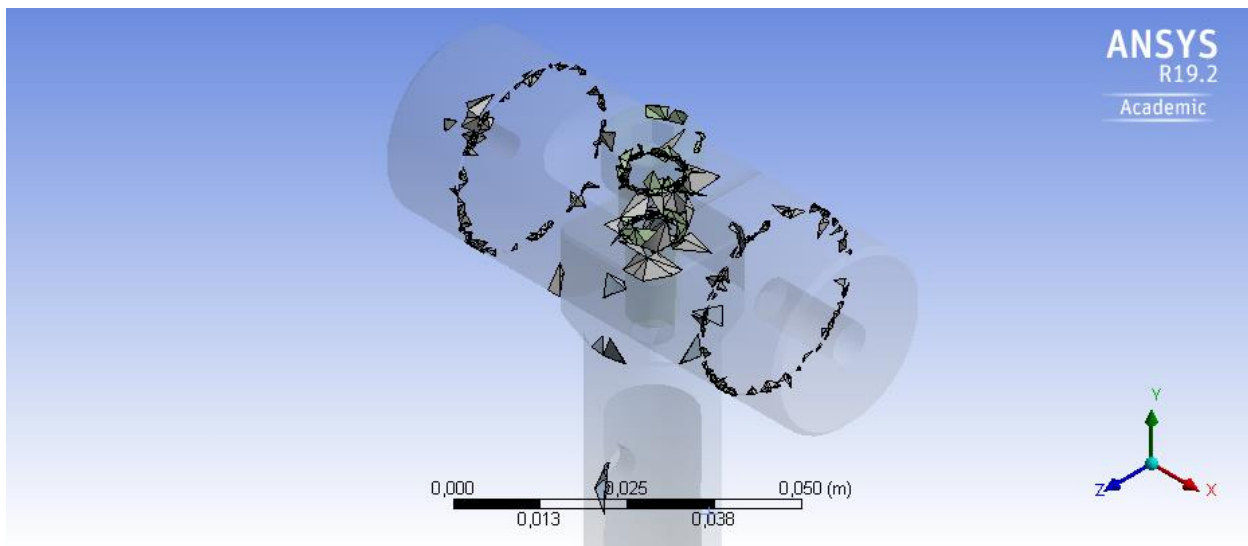


Figura 40. Elementos con menor calidad de mallado.

En la figura 41, se presentan los resultados mediante la herramienta de calidad del elemento, la opción proporciona una métrica de calidad compuesta que oscila entre 0 y 1. Esta métrica se basa en la relación del volumen a la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de borde para elementos 3D.

$$Quality = C \left[volume / \sqrt{\left[\sum (edge\ length)^2 \right]^3} \right] \quad (13)$$

Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo.

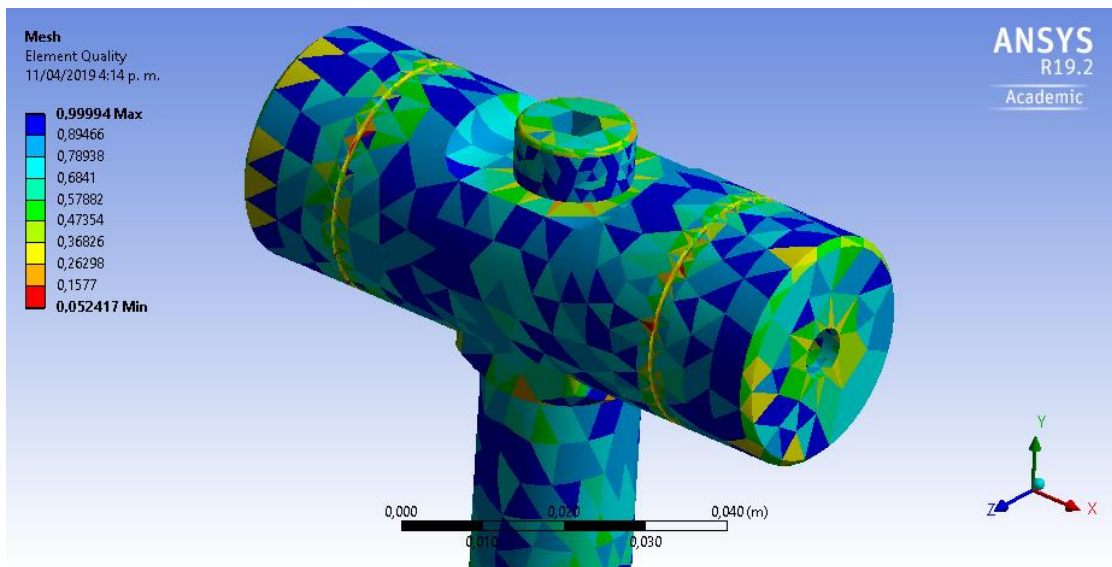


Figura 41. Calidad de los elementos de la malla.

En la figura 42, se contempla el mallado final obtenido, se resuelve realizar sizing en sectores con geometrías complejas con cambios bruscos y caras pequeñas, como en el tornillo y en la junta de la cabeza y el mango.

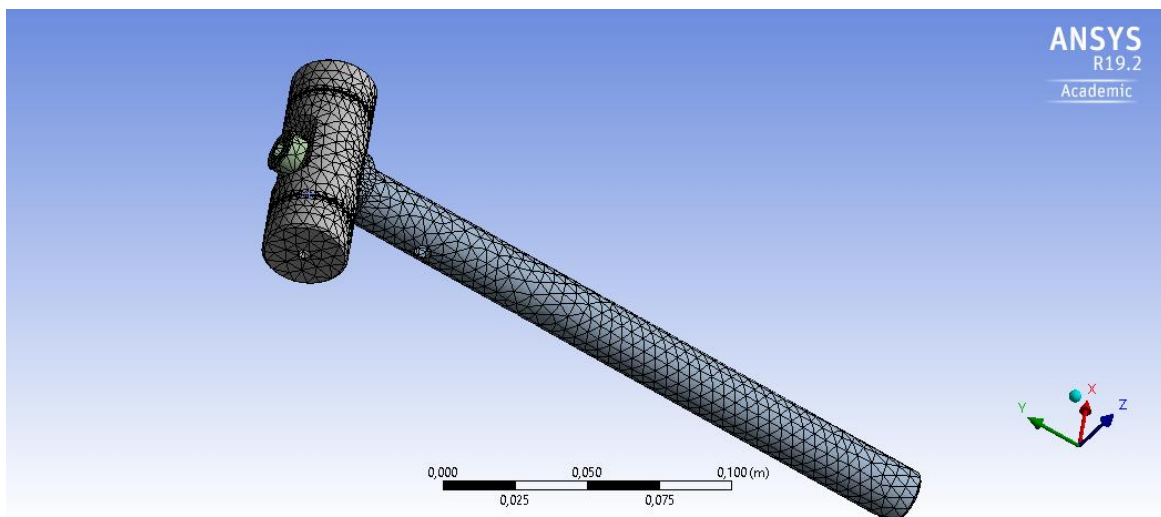


Figura 42. Mallado final obtenido después del refinamiento.

7.2.3 Element type. Como tipo de elemento en ANSYS, primero se escoge el método es cual hace referencia a la categoría de forma, este método fue Quadratic Tetrahedral debido a que este grupo de elementos es el que mejor se adapta a los requerimientos de la pieza de estudio.

SOLID 187

El elemento SOLID187 es un elemento tridimensional de 10 nodos de orden superior. El elemento tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y está bien adaptado para modelar mallas irregulares (como las producidas a partir de varios sistemas CAD / CAM).

El elemento está definido por 10 nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traducciones en las direcciones nodales x, y y z. El elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, rigidez al estrés, gran deflexión y capacidad de deformación. También tiene una capacidad de formulación mixta para simular deformaciones de materiales elastoplásticos casi incompresibles y materiales hiperelásticos totalmente incompresibles.

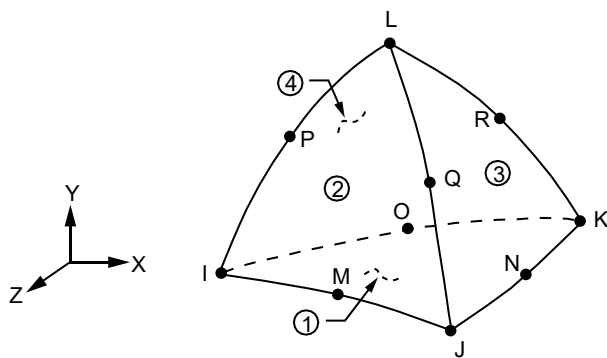


Figura 43. Representación gráfica del elemento SOLID 187. Nota: adaptado de la librería mecánica del software ANSYS.

7.3 Resultado del estudio FEM en el hammer. Una vez establecidos todos los parámetros anunciados anteriormente se dispone a resolver el estudio para un rango de entre 50-2000 Hz y se

establece un máximo para encontrar las primeras seis (6) frecuencias naturales, los resultados obtenidos se encuentran tabulados en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de las primeras frecuencias fundamentales encontradas por medio del método de elementos finitos.

Modelo Numérico ANSYS		
MODOS EN PLANO "T"		
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	124,61
	Segunda FN (Hz)	1389,5
Libre sujetado	Primera FN (Hz)	1191,7
	Segunda FN (Hz)	3264,5
MODOS EN PLANO CABEZEO		
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	123,19
	Segunda FN (Hz)	1084,5

7.4 Modelo experimental EMA

Es uso de un modelo numérico permite acercarse significativamente a los valores deseados en este caso la primer y segunda frecuencia del martillo, aunque esto no asegura que los resultados sean precisos, por ende, es evidente el uso de un modelo experimental donde se encuentren los valores reales de estas frecuencias.

El laboratorio de vibraciones de ingeniería mecánica de la UIS cuenta un con una amplia y tecnológica gama de equipos para la medición y el análisis de vibraciones mecánicas, entre ellos se encuentra el mini shaker de marca Senteck con el cual se puede realizar ensayos de análisis modal, y es el escogido para realizar los ensayos necesarios de caracterización modal real del hammer diseñado, a través de esta sección se relata la ejecución y se presentan los resultados obtenidos mediante esta técnica.

7.5 Caracterización dinámica del impulse hammer a través del análisis modal experimental (EMA)

Con el fin de descubrir la primer y segunda frecuencia natural del impulse hammer, se realiza ensayos de análisis modal mediante shaker, para realizar la caracterización, se realizaron dos tipos de arreglos:

- Empotrado en un extremo
- Libre, soportado con ligas

Se espera que la primera frecuencia natural se encuentre entre 0-200 Hz, esto debido a que el ancho de banda que debe excitar el martillo cuando esté completamente en funcionamiento es de (1000-5000 Hz) así, que encontrar una resonancia en este rango podría provocar un error al momento de la medición.

7.6 Sistema de adquisición y tratamiento de señales para la aplicación del análisis modal experimental.

Tabla 8. Equipos utilizados en los ensayos de EMA para el análisis del hammer

SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑALES			
Instrumento de medición	Imagen	Descripción	Referencia
Módulo de adquisición de datos		permite la adquisición de datos provenientes de diferentes tipos de sensores para luego ser procesados y analizados por medio de un software	Ref. OR-35-Freq-8 con capacidad de 8 canales de entrada y un ancho de banda hasta 20 kHz de la empresa OROS.
Acelerómetros		transductores que convierten una variable física en este caso aceleración en una variable eléctrica, voltaje.	
Excitador electrodinámico		Permite generar excitaciones en estructuras en un amplio rango de frecuencias por medio de un mecanismo de inducción magnética	Mini-Shaker con rango de frecuencia 15 KHz, con fuerza de salida seno Pico 4.5 LbF(20N); random Rms 3Lbf(13.3 N).
celda de carga de compresión		transductor que convierte una señal de fuerza en una señal eléctrica medible por el sistema de adquisición de datos	

software Modal



Interfaz gráfica que
permite realizar
mediciones y obtención de
resultados modales

Software NV Gate
V.10.0 modulo modal
OROS

7.7 Empotrado en un extremo

Se realizaron la medición sujetando el mango del martillo a una prensa mecánica simulando el empotramiento, y realizando mediciones equidistantes cada $40,5\text{ mm}$ mediante un acelerómetro, se diseñó una geometría con 8 nodos generando una T que representa el hammer, el shaker se ubicó sobre el nodo 6 como se indica en la Figura 44.

Undeformed Structure Geometry

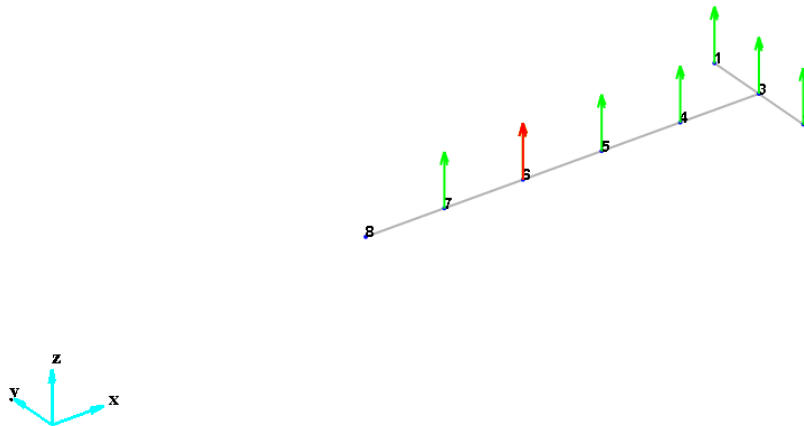


Figura 44. Mallado generado en el software modal, en forma de T con ocho nodos, para las condiciones de empotrado en un extremo.



Figura 45. Montaje del hammer empotrado en un extremo mediante una prensa mecánica, en las instalaciones de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.

7.7.1 Parámetros de control usados en el software modal. El correcto uso del shaker va de la mano de la correcta configuración del NV Gate, los parámetros que se usaron en la mayoría de los ensayos realizados fueron los consignados en la tabla 9. presentada a continuación:

Tabla 9. Parámetros de control para el software modal MV Gate.

Parámetros de configuración para el análisis EMA	
Rango de frecuencia	0 -2500 Hz
Líneas espectrales	401
Average	3
Window type	Force / exp
Type	Imput
Wave form	Random Noise
F-STRAT	10 Hz
RMS level	50 mV

7.7.2 Análisis de resultados EMA. Al terminar el procesamiento de datos de cada medición en los nodos el software NV Gate Modulo Modal permite observar diferentes resultados, entre los

más importantes se encuentra la gráfica FRF (función de respuesta en frecuencia) y la fase, presentes en la Figura 46.

A través de las gráficas anteriores se pueden determinar analíticamente las frecuencias fundamentales de los modos de vibración, al momento de presentarse un pico en la gráfica FRF acompañado de un cambio de fase de 180° es señal de que en este punto se presenta un modo natural del sistema y que debe ser estudiado.

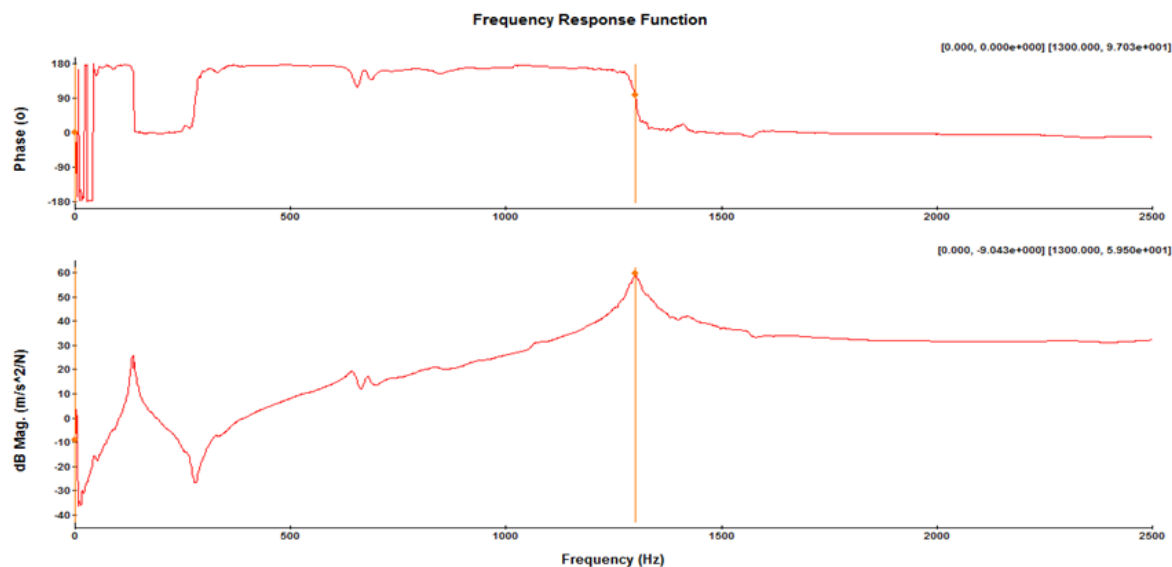


Figura 46. Grafica de función de respuesta de frecuencia FRF, acompañada de la gráfica de fase.

el software resuelve la FRF mediante la comparación y superposición de cada FRF individual hallada en cada uno de los nodos creados, de esta manera resuelve crear una única grafica donde

se presenten los resultados globales del estudio, las FRF superpuestas se pueden apreciar en la figura 47.

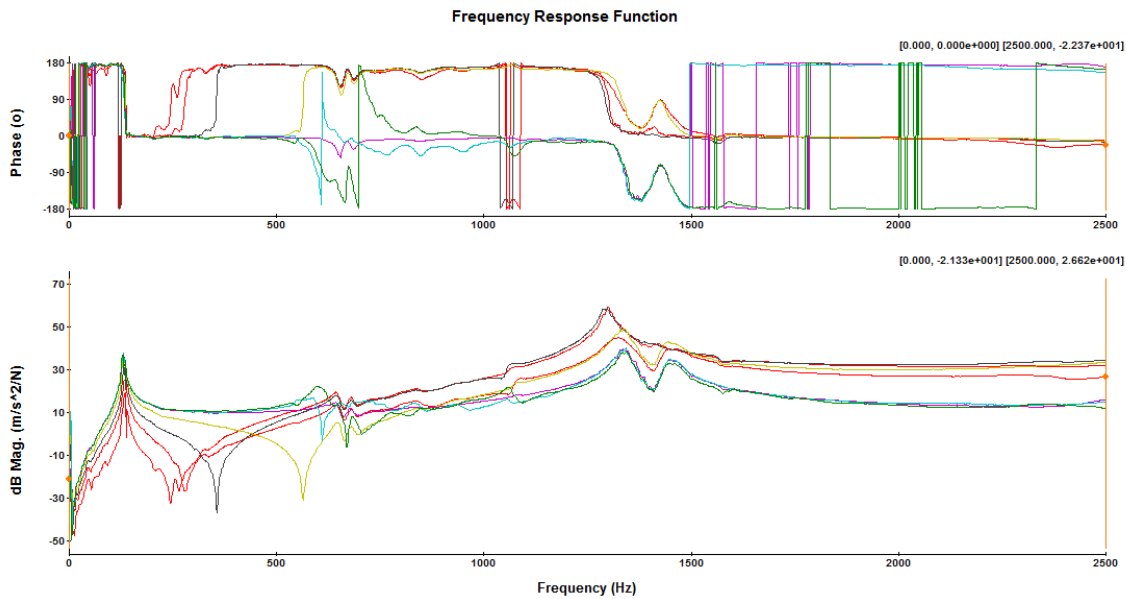


Figura 47. Graficas superpuestas de FRF y fase, para la medición individual de cada nodo del mallado.

La función de coherencia representa el grado de relación lineal entre la medición de entrada y la señal de salida para cada frecuencia en el dominio, para el caso significa la relación entre la aceleración captada por el acelerómetro y la fuerza introducida por el shaker; se puede decir que detecta el número de posibles errores en la medición, y puede ser estimada mediante la siguiente expresión, esta grafica de coherencia se aprecia en la figura 48.

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{Fx}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega)G_{FF}(\omega)} \quad (14)$$

$$0 \leq \gamma(\omega)^2 \leq 1$$

$$0 = \text{Ruido puro}$$

$$G_{Fx}(\omega) = \text{espectro cruzado, entre la respuesta y la fuerza}$$

$$G_{FF}(\omega) = \text{Autoespectro de la fuerza}$$

$$G_{xx}(\omega) = \text{Autoespectro de la respuesta}$$

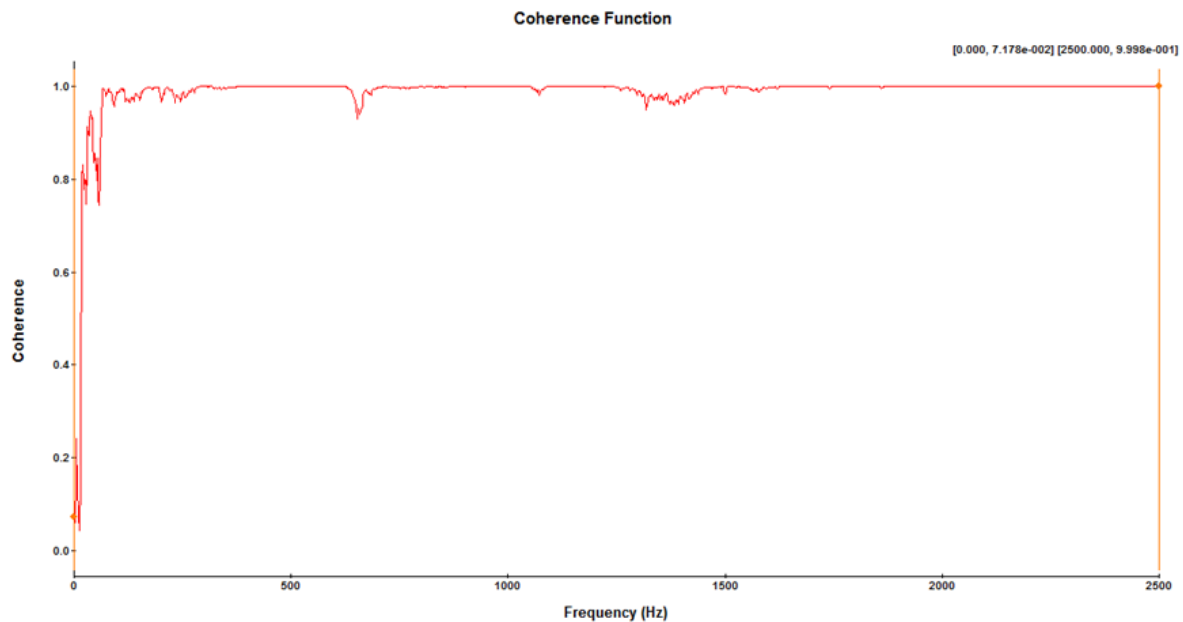


Figura 48. Función de coherencia para las condiciones: empotrada en un extremo.

7.8 Análisis libre

Para el análisis de suspensión libre se sujetó el hammer sobre ligas elástica en un marco de acero como se muestra en la Figura 49. Al igual que el modelo empotrado se realizaron mediciones en una geometría en T cada 40,5 mm en un total de nueve nodos, el shaker se ubicó en el nodo cuatro.

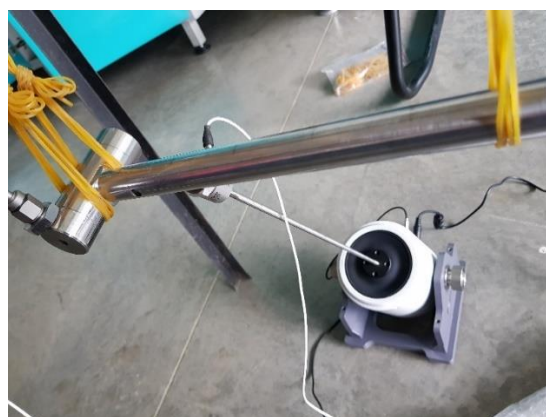


Figura 49. Montaje sobre ligas del hammer en el laboratorio de vibraciones de ingeniería mecánica.

Los parámetros usados en la configuración del software modal fueron los mismos presentados en la tabla 9. De la sección anterior con diferencia en el rango de frecuencia a estudiar debido, que en el estudio libre las primeras frecuencias naturales tienen un valor mayor.

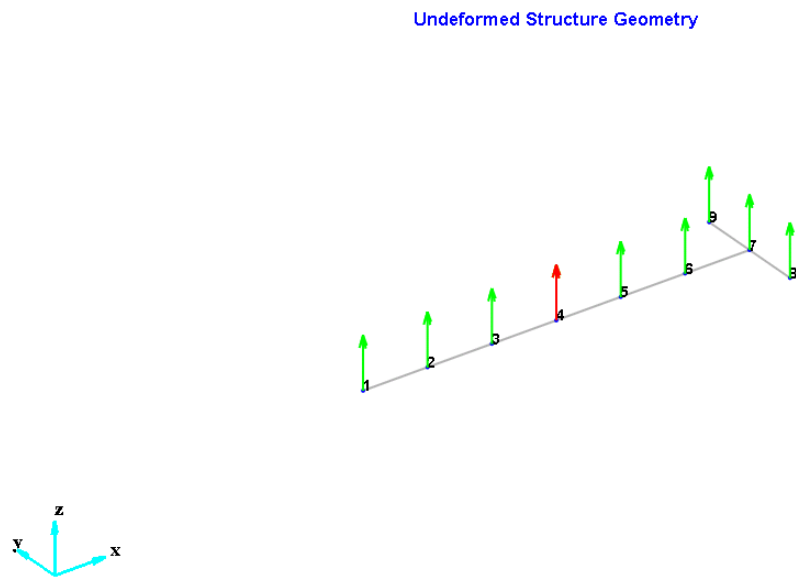


Figura 50. Mallado generado en el software modal, en forma de T con nueve nodos, para las condiciones de libre soportado.

7.8.1 Análisis de resultados EMA. Al igual que el ensayo empotrado mediante el software NV gate arroja los resultados de las curvas tanto de FRF y de fase mostradas en la Figura. 51, obteniendo los picos para la primer y la segunda frecuencia natural, a 1201,66 Hz y 3334,57 Hz respectivamente.

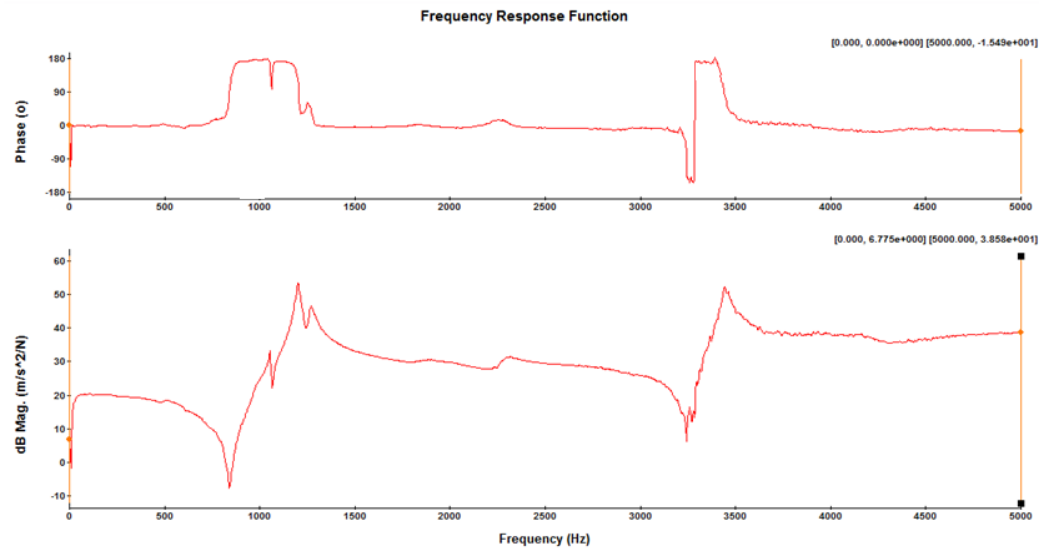


Figura 51. Grafica de función de respuesta de frecuencia FRF, acompañada de la gráfica de fase, para las condiciones de libre soportado.

En la figura 52. Se presenta la superposición para las curvas de las gráficas de función de respuesta de frecuencia FRF y fase, para cada una de las mediciones en los nodos de la malla.

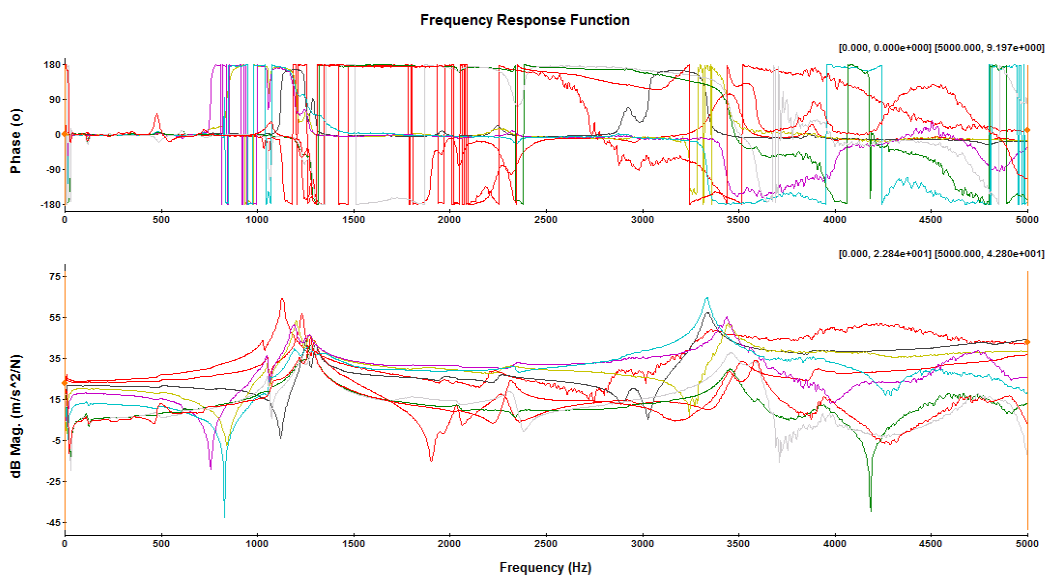


Figura 52. Graficas superpuestas de FRF y fase, para la medición individual de cada nodo del mallado, para las condiciones de libre soportado.

La coherencia de la figura 53. presenta un ruido posiblemente relacionado a las condiciones de montaje, aunque no afecta la banda en que se encuentran los picos de los modos por lo cual se hace referencia a una buena medición.

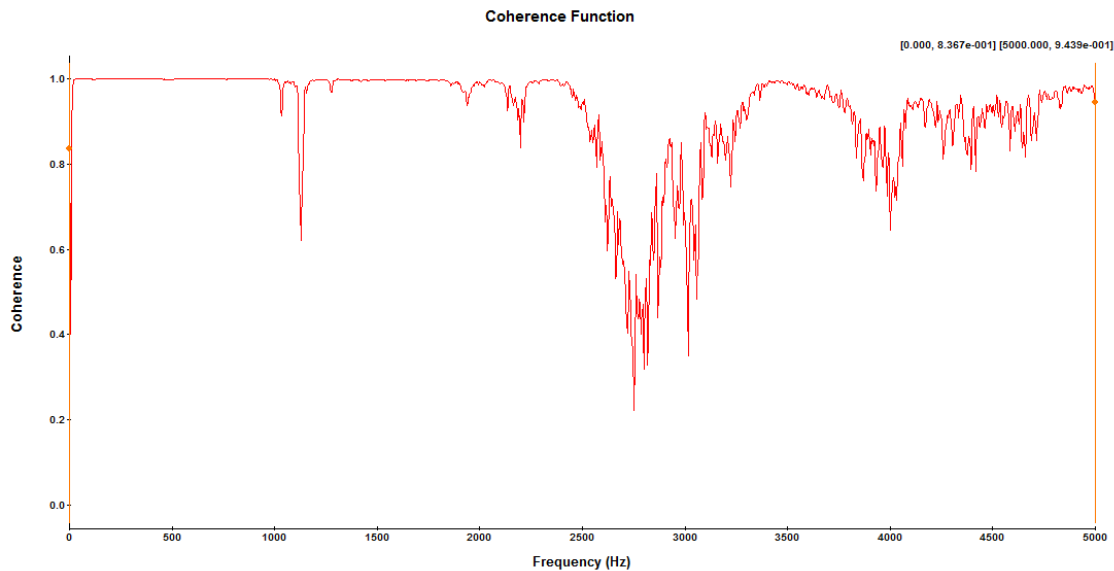


Figura 53. Grafica de coherencia para las condiciones de libre soportado.

Por medio del análisis de las graficas anteriores se procede a identificar los modos naturales en el software mediante el método BroBand. En la figura 54. Se aprecia una simulación de los primeros dos modos de vibración obtenidos a 1201,66 Hz y 3334,57 Hz respectivamente.

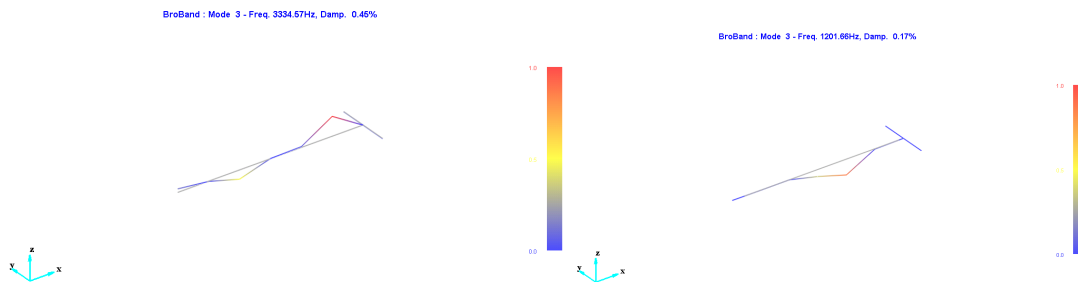


Figura 54. Representación gráfica de la primera y segunda frecuencia natural por medio del método BroBand, para las condiciones de libre soportado.

7.9 Resultados obtenidos mediante el análisis modal experimental EMA

Los resultados de las frecuencias naturales obtenidas, correspondientes a la primera y segunda fundamentales halladas por medio del estudio EMA desarrollado anteriormente y realizado para diferentes tipos de arreglos se encuentra consignado en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de las primeras frecuencias fundamentales del hammer obtenidos mediante el uso EMA.

Modelo real EMA		
MODOS EN PLANO "T"		
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	130,98
	Segunda FN (Hz)	1295,88
Libre sujetado	Primera FN (Hz)	1201,66
	Segunda FN (Hz)	3334,57
MODOS EN PLANO CABEZEO		
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	123,33
	Segunda FN (Hz)	988,66

8. Contrastación de resultados: frecuencias naturales determinadas de forma matemática, analítica y experimental

El estudio realizado se extendió hasta la segunda frecuencia natural del dispositivo, debido a que estas son las más significativas y pueden producir mayores problemas como la resonancia, se determinaron por medio de un modelo matemático, un modelo numérico por medio de elementos finitos (ANSYS) y finalmente por un análisis modal experimental (EMA), se busca contrastar los resultados para validar los resultados matemático y numérico con el método experimental y hallar los valores de errores respectivos.

Tabla 11. Frecuencias naturales a través del método matemático, numérico y experimental. Nota: el modelo matemático solo presenta valores para la primera frecuencia debido a que se representaba un modelo de un solo grado de libertad.

FRECUENCIAS FUNDAMENTALES (Hz) HALLADAS A TRAVÉS DEL MÉTODO MATEMÁTICO, NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL				
		Modelo Matemático	Modelo Numérico ANSYS	Modelo real EMA
MODOS EN PLANO "T"				
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	137,2	141,9	130,98
	Segunda FN (Hz)	-	1596,2	1295,88
Libre sujetado	Primera FN (Hz)	-	1191,7	1201,66
	Segunda FN (Hz)	-	3264,5	3334,57
MODOS EN PLANO CABECEO				
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	137,2	123,19	123,33
	Segunda FN (Hz)	-	1084,5	988,66

El error presente en las mediciones se presenta en la tabla 12. Y se contrastaran las mediciones presentes entre el modelo numérico, realizado mediante el método de elementos finitos FEM y el modelo real, realizado mediante pruebas en laboratorio.

Tabla 12. Porcentaje de error entre los modelos analítico y real.

FRECUENCIAS FUNDAMENTALES (HZ) HALLADAS A TRAVÉS DEL MÉTODO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL				
		Modelo Numérico ANSYS	Modelo real EMA	Porcentaje de error [%]
MODOS EN PLANO "T"				
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	124,61	130,98	5,1119
	Segunda FN (Hz)	1389,5	1295,88	6,7377
Libre sujetado	Primera FN (Hz)	1191,7	1201,66	0,8358
	Segunda FN (Hz)	3264,5	3334,57	2,1464
MODOS EN PLANO CABECEO				
Empotrado en un extremo	Primera FN (Hz)	123,19	123,33	0,1136
	Segunda FN (Hz)	1084,5	988,66	8,8373

Teniendo en cuenta los errores presentados en la tabla 12. Se encuentra un error promedio de 3,96%, el cual representa que el modelo numérico resuelto, funciona y es válido para las pruebas elaboradas, adicionalmente se observa que el máximo error de 8.83% se presenta en la segunda frecuencia natural del plano cabeceo.

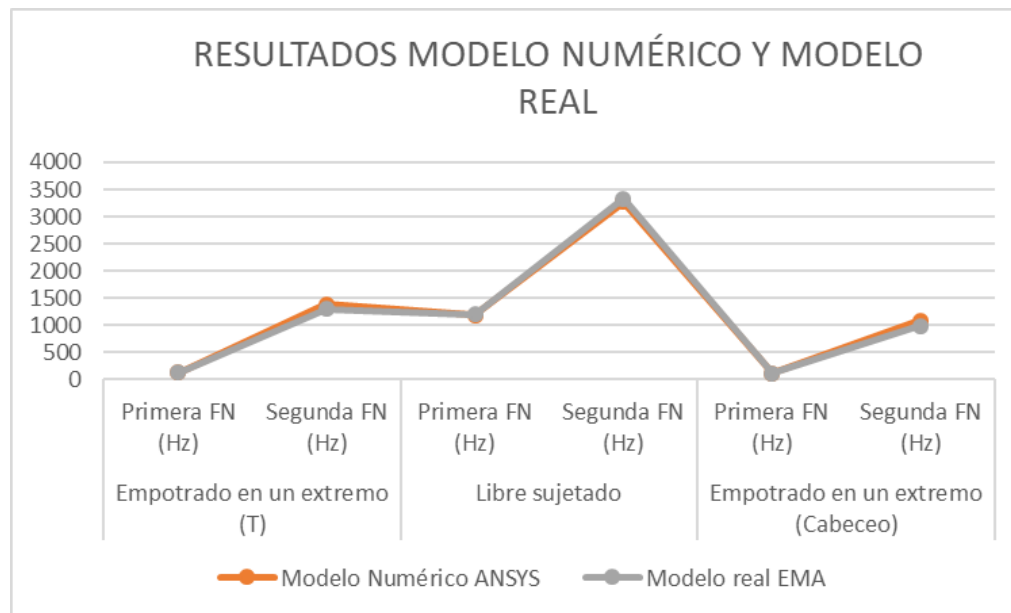


Figura 55. Resultados obtenidos mediante los métodos numérico y real, de las primeras frecuencias fundamentales del hammer, mediante diferentes condiciones de frontera.

Finalmente, en la figura 55. Se observa la diferencia entre los resultados obtenidos del método real y el método numérico, los picos con mayor varianza representan los mayores errores los cuales están presentes en la segunda frecuencia natural de la condición frontera: empotrado en un extremo.

9. Conclusiones

Se valida la aplicabilidad del análisis modal experimental (EMA) mediante la comparación de los resultados obtenidos entre el método numérico y el modelo real, para lograr la identificación de la primera y segunda frecuencia natural de los modos de vibración del impulse hammer, con una exactitud aceptable y con diferentes condiciones de apoyo: libre y empotrado en un extremo, con porcentajes de error promedio menores al 4% para los dos nodos encontrados.

El impulse hammer construido permite realizar por parte de un usuario excitaciones mediante impulsos en un bando de ancha controlado de (1-5) KHz (requerido para la excitación de estructuras a estudiar), sin presentar interferencias en la medición debidas a resonancia del instrumento, además estas pruebas pueden ser realizadas en estructuras industriales como tuberías de tipo *oil & gas* tanto en laboratorios bajo condiciones controladas como en ensayos en campo.

Se aplicaron técnicas de desenvolvimiento del producto mediante el desarrollo de la matriz QFD para el diseño y construcción de un impulse hammer con el objeto de identificar las necesidades del proyecto y los criterios más relevantes en tema de diseño con el fin de dar soluciones oportunas y contundentes; la metodología permitió reducir tiempos en prototipado enfocando las acciones para escoger la alternativa de optima de construcción destacando las oportunidades presentes de mejora en el mercado mediante un estudio de benchmarking de productos semejantes en el mercado.

Se comprueba mediante el método de elementos finitos FEM que el hammer construido puede soportar cargas de impacto del orden de 5000 newtons con un factor de seguridad confiable de cerca de 1.2, demostrando que es una herramienta confiable y segura para el uso de las personas responsable de hacer estudios con ella.

10. Recomendaciones

Para el análisis experimental EMA se recomienda usar la técnica SIMO (Single Input Múltiple Output) el cual consta de un punto de excitación (puede ser por medio de un hammer o un shaker) y múltiples puntos de salida de datos (acelerómetros) simultáneos; lo cual genera resultados más rápidos y confiables en un ensayo; al igual se puede aumentar el número de líneas espectrales para una mejor limpieza de ruido que genere interferencia en las mediciones.

11. Líneas futuras

Programar un código en software LabVIEW que permita la adquisición de datos por parte del hammer construido y el procesamiento de señal con el fin de la identificación de parámetros modales y espectro de frecuencia con el fin de dar conceptos validos sobre la integridad en estructuras industriales.

Realizar el acondicionamiento de hardware correspondiente a la adquisición de datos adquiridos por medio al sensor de fuerza adherido al impulse hammer lo cual hace referencia al correcto transporte de la adquisición de la señal por medio de cableado a la tarjeta de adquisición de datos.

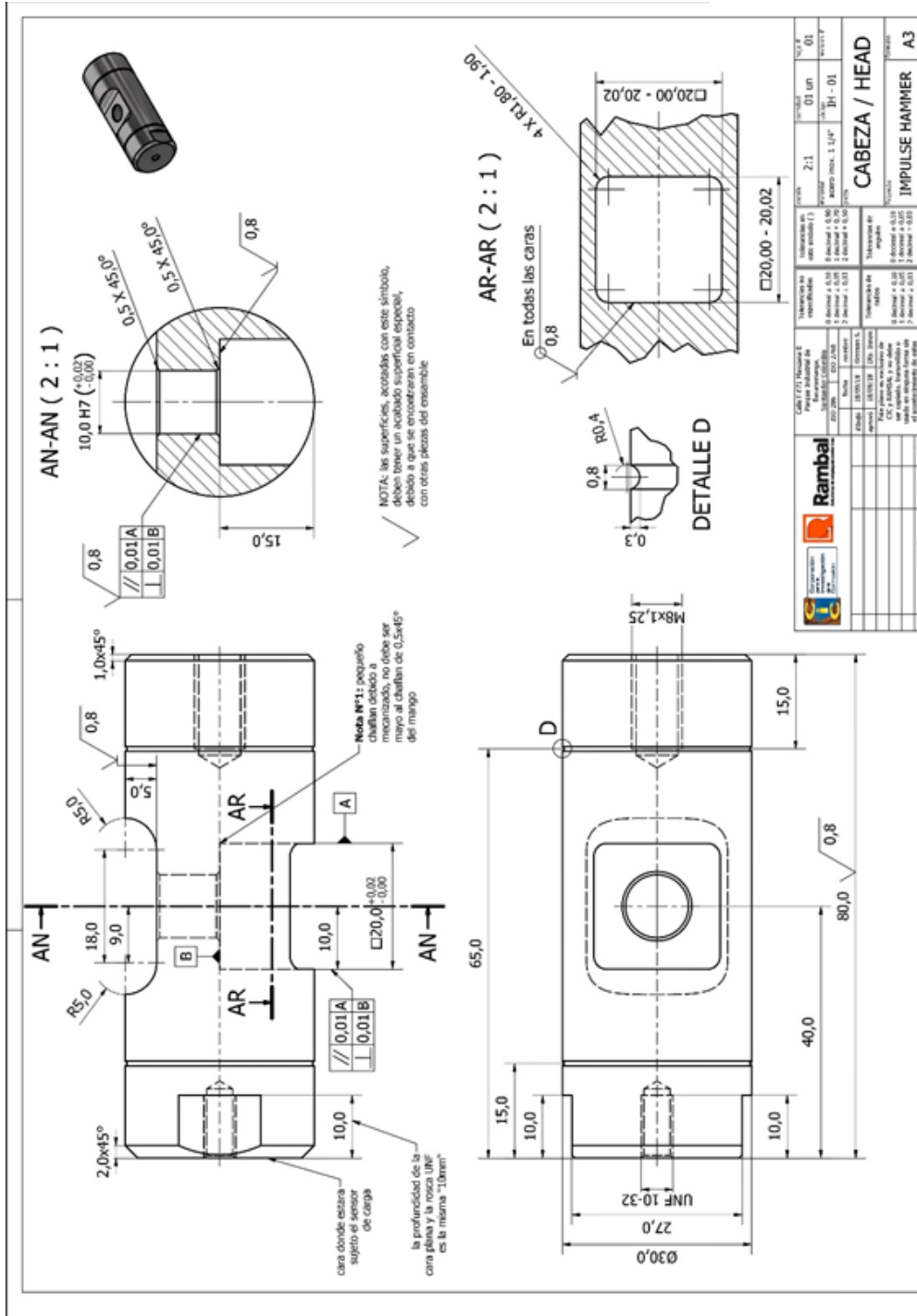
Bibliografía

- Brown, D., & Halvorsen, W. (1977). *Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing, Sound and Vibration*. New York, Estados Unidos: Piezotronics.
- Deutschman, A., Michels, W., & Wilson, C. (1987). *Diseño de Màquinas, Teoria y Pràctica*. Mexico D.F., Mexico: Continental, S.A.
- Dossing, O., & kjaer, B. &. (1988). *Structural Testing- Part 1 Mechanical Mobility Measurements*. Naerum, Dinamarca: Brüel & Kjaer.
- Dossing, O., & Kjaer, B. &. (1988). *Structural Testing, Part 2 Modal Analysis and Simulation*. Nærum, Dinamarca: Brüel & Kjaer.
- Ewins, D. (2000). *Modal testing; theory, practice and application, 2nd ed*. Philadelphia: Research Studies Press.
- Fladung, W. (1994). *The Development and Implementation of Multiple Reference Impact Testing* (tesis de maestria). Cincinnati: University of Cincinnati.
- Giesecke, M., Spencer, H., Dygdon, & Lockhart, N. (2006). *Dibujo y comunicación gráfica*. Mexico D.F, Mexico: Pearson Educación.
- Group, W. M. (2008). *PRODUCT EXCELLENCE USING SIX SIGMA*. Coventry, UK: Warwick Manufacturing Group.
- Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *HARRIS' SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK*. New York, U.S: McGRAW-HILL.
- Kobusch, M., Klaus, L., & Muñiz, L. (2017). *INVESTIGATION OF IMPACT HAMMER CALIBRATIONS*. IMEKO 23rd TC3, 6.

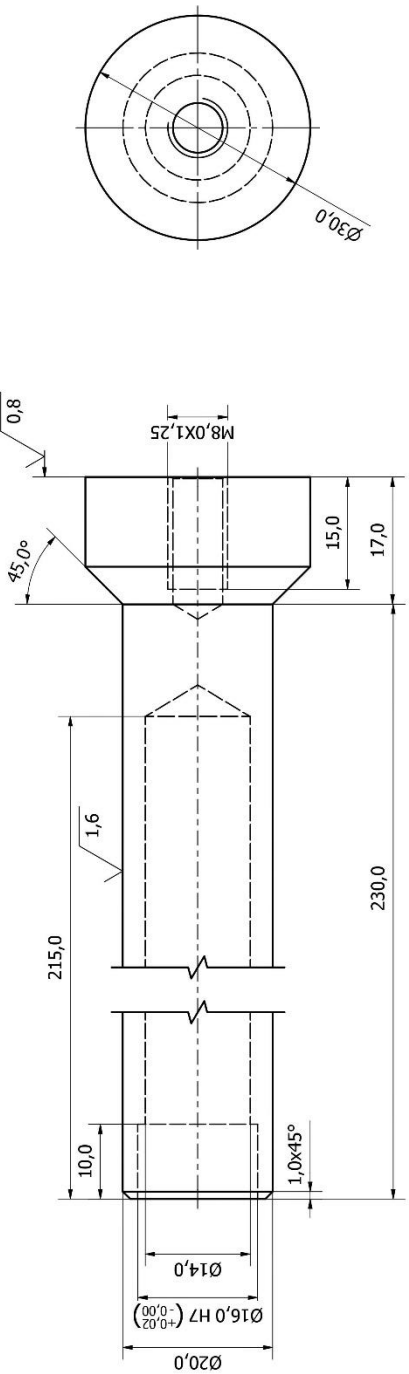
- Masui, K., Sakao, T., Kobayashi, M., & Inaba, A. (2003, Junio). Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design. *International Journal of Quality & Reliability Management*, pp. 90-106.
- Norton, L. (2011). *Diseño de Màquinas* (Cuarta ediciòn ed.). Mexico D. F., Mexico: Pearson.
- Rao, S. S. (2004). *Mechanical Vibrations*. Boston, U.S: Pearson.
- Reina, C., & Nova, F. (2017). *Metodologia para la Implementaciòn de la tècnica de anàlisis modal operacional (OMA), el la caraterizaciòn de los parametros modales de un eje de transmisiòn de potencia de un banco de ensayos del laboratorio de vobraciones de mecànica (tesis de pregrado)*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Riaño, C., Peña, C., & Sánchez, H. (2018, Enero). Aplicaciòn de tècnicas de desenvolvimiento de producto para el desarrollo de un robot antropomòrfico. *Revista UIS Ingenierías*, 21-34.
- Zienkiewicz, O. C. (1987). *The Finite Element Method (4th ed.)*. London, U.K: McGraw-Hill.
- Büyüközkan, G., & Berkol, Ç. (2011). Designing a sustainable supply chain using an integrated analytic network process and goal programming approach in quality function deployment. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 13731–13748.
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2236/10.1016/j.eswa.2011.04.171>

Apéndices

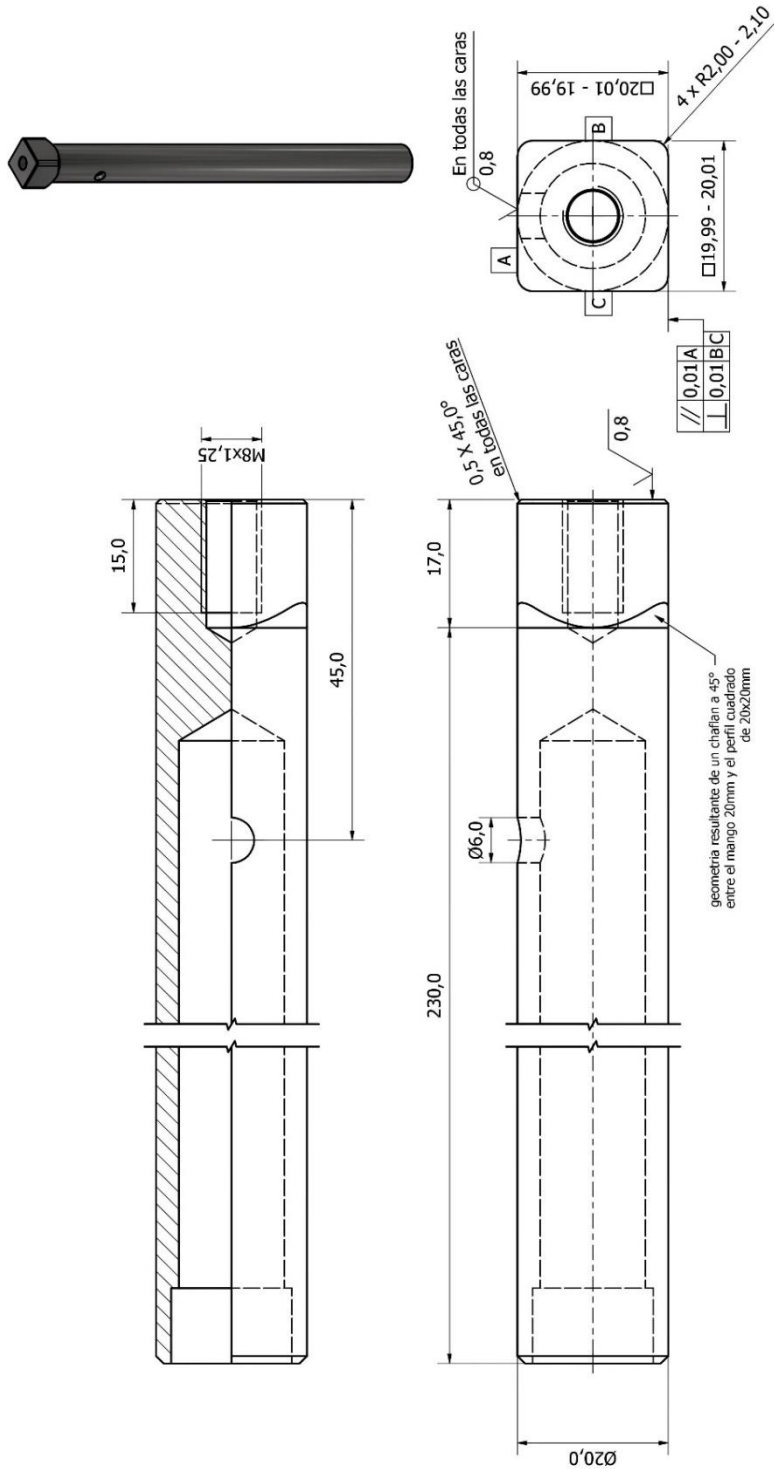
Apéndice A. Planos del impulse hammer para su construcción.



1. TORNEADO: Se realiza el chaflan a 45° desde el mango de 20mm hasta un cilindro de 30mm

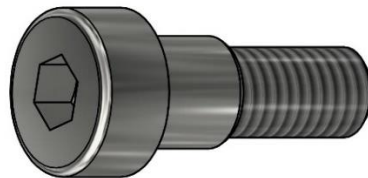
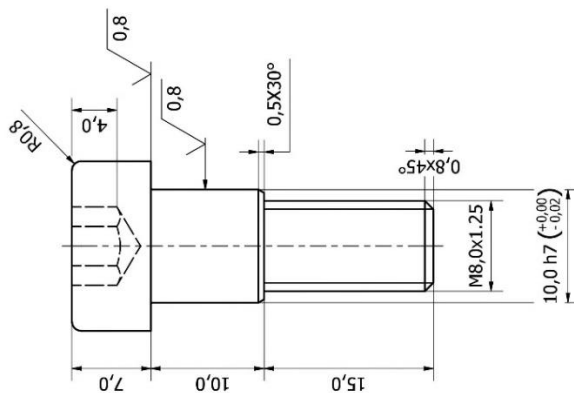


		Cálculo y Proyecto Folios y Cantidad de Bibliografía Cálculo 150,286		fecha	nombre	fecha	nombre	fecha	nombre	
		18/09/18		18/09/18	18/09/18	18/09/18	18/09/18	18/09/18	18/09/18	
Este plano es exclusivo de la empresa y no debe ser copiado, transmitido o utilizado para fines ajenos al proyecto de obra compañía		Diseño		Diseño		Diseño		Diseño		
Tolerancias no especificadas		Tolerancias en milímetros		Tolerancias de ángulos		Tolerancias de radios		Tolerancias de longitudes		
0 decimal = 0,10		0 decimal = 0,30		0 decimal = 0,10		0 decimal = 0,10		0 decimal = 0,10		
1 decimal = 0,05		1 decimal = 0,15		1 decimal = 0,05		1 decimal = 0,05		1 decimal = 0,05		
2 decimal = 0,02		2 decimal = 0,03		2 decimal = 0,02		2 decimal = 0,02		2 decimal = 0,02		
3 decimal = 0,01		3 decimal = 0,01		3 decimal = 0,01		3 decimal = 0,01		3 decimal = 0,01		
4 decimal = 0,005		4 decimal = 0,005		4 decimal = 0,005		4 decimal = 0,005		4 decimal = 0,005		
5 decimal = 0,002		5 decimal = 0,002		5 decimal = 0,002		5 decimal = 0,002		5 decimal = 0,002		
6 decimal = 0,001		6 decimal = 0,001		6 decimal = 0,001		6 decimal = 0,001		6 decimal = 0,001		
7 decimal = 0,0005		7 decimal = 0,0005		7 decimal = 0,0005		7 decimal = 0,0005		7 decimal = 0,0005		
8 decimal = 0,0002		8 decimal = 0,0002		8 decimal = 0,0002		8 decimal = 0,0002		8 decimal = 0,0002		
9 decimal = 0,0001		9 decimal = 0,0001		9 decimal = 0,0001		9 decimal = 0,0001		9 decimal = 0,0001		
10 decimal = 0,00005		10 decimal = 0,00005		10 decimal = 0,00005		10 decimal = 0,00005		10 decimal = 0,00005		
11 decimal = 0,00002		11 decimal = 0,00002		11 decimal = 0,00002		11 decimal = 0,00002		11 decimal = 0,00002		
12 decimal = 0,00001		12 decimal = 0,00001		12 decimal = 0,00001		12 decimal = 0,00001		12 decimal = 0,00001		
13 decimal = 0,000005		13 decimal = 0,000005		13 decimal = 0,000005		13 decimal = 0,000005		13 decimal = 0,000005		
14 decimal = 0,000002		14 decimal = 0,000002		14 decimal = 0,000002		14 decimal = 0,000002		14 decimal = 0,000002		
15 decimal = 0,000001		15 decimal = 0,000001		15 decimal = 0,000001		15 decimal = 0,000001		15 decimal = 0,000001		
16 decimal = 0,0000005		16 decimal = 0,0000005		16 decimal = 0,0000005		16 decimal = 0,0000005		16 decimal = 0,0000005		
17 decimal = 0,0000002		17 decimal = 0,0000002		17 decimal = 0,0000002		17 decimal = 0,0000002		17 decimal = 0,0000002		
18 decimal = 0,0000001		18 decimal = 0,0000001		18 decimal = 0,0000001		18 decimal = 0,0000001		18 decimal = 0,0000001		
19 decimal = 0,00000005		19 decimal = 0,00000005		19 decimal = 0,00000005		19 decimal = 0,00000005		19 decimal = 0,00000005		
20 decimal = 0,00000002		20 decimal = 0,00000002		20 decimal = 0,00000002		20 decimal = 0,00000002		20 decimal = 0,00000002		
21 decimal = 0,00000001		21 decimal = 0,00000001		21 decimal = 0,00000001		21 decimal = 0,00000001		21 decimal = 0,00000001		
22 decimal = 0,000000005		22 decimal = 0,000000005		22 decimal = 0,000000005		22 decimal = 0,000000005		22 decimal = 0,000000005		
23 decimal = 0,000000002		23 decimal = 0,000000002		23 decimal = 0,000000002		23 decimal = 0,000000002		23 decimal = 0,000000002		
24 decimal = 0,000000001		24 decimal = 0,000000001		24 decimal = 0,000000001		24 decimal = 0,000000001		24 decimal = 0,000000001		
25 decimal = 0,0000000005		25 decimal = 0,0000000005		25 decimal = 0,0000000005		25 decimal = 0,0000000005		25 decimal = 0,0000000005		
26 decimal = 0,0000000002		26 decimal = 0,0000000002		26 decimal = 0,0000000002		26 decimal = 0,0000000002		26 decimal = 0,0000000002		
27 decimal = 0,0000000001		27 decimal = 0,0000000001		27 decimal = 0,0000000001		27 decimal = 0,0000000001		27 decimal = 0,0000000001		
28 decimal = 0,00000000005		28 decimal = 0,00000000005		28 decimal = 0,00000000005		28 decimal = 0,00000000005		28 decimal = 0,00000000005		
29 decimal = 0,00000000002		29 decimal = 0,00000000002		29 decimal = 0,00000000002		29 decimal = 0,00000000002		29 decimal = 0,00000000002		
30 decimal = 0,00000000001		30 decimal = 0,00000000001		30 decimal = 0,00000000001		30 decimal = 0,00000000001		30 decimal = 0,00000000001		
31 decimal = 0,000000000005		31 decimal = 0,000000000005		31 decimal = 0,000000000005		31 decimal = 0,000000000005		31 decimal = 0,000000000005		
32 decimal = 0,000000000002		32 decimal = 0,000000000002		32 decimal = 0,000000000002		32 decimal = 0,000000000002		32 decimal = 0,000000000002		
33 decimal = 0,000000000001		33 decimal = 0,000000000001		33 decimal = 0,000000000001		33 decimal = 0,000000000001		33 decimal = 0,000000000001		
34 decimal = 0,0000000000005		34 decimal = 0,0000000000005		34 decimal = 0,0000000000005		34 decimal = 0,0000000000005		34 decimal = 0,0000000000005		
35 decimal = 0,0000000000002		35 decimal = 0,0000000000002		35 decimal = 0,0000000000002		35 decimal = 0,0000000000002		35 decimal = 0,0000000000002		
36 decimal = 0,0000000000001		36 decimal = 0,0000000000001		36 decimal = 0,0000000000001		36 decimal = 0,0000000000001		36 decimal = 0,0000000000001		
37 decimal = 0,00000000000005		37 decimal = 0,00000000000005		37 decimal = 0,00000000000005		37 decimal = 0,00000000000005		37 decimal = 0,00000000000005		
38 decimal = 0,00000000000002		38 decimal = 0,00000000000002		38 decimal = 0,00000000000002		38 decimal = 0,00000000000002		38 decimal = 0,00000000000002		
39 decimal = 0,00000000000001		39 decimal = 0,00000000000001		39 decimal = 0,00000000000001		39 decimal = 0,00000000000001		39 decimal = 0,00000000000001		
40 decimal = 0,000000000000005		40 decimal = 0,000000000000005		40 decimal = 0,000000000000005		40 decimal = 0,000000000000005		40 decimal = 0,000000000000005		
41 decimal = 0,000000000000002		41 decimal = 0,000000000000002		41 decimal = 0,000000000000002		41 decimal = 0,000000000000002		41 decimal = 0,000000000000002		
42 decimal = 0,000000000000001		42 decimal = 0,000000000000001		42 decimal = 0,000000000000001		42 decimal = 0,000000000000001		42 decimal = 0,000000000000001		
43 decimal = 0,0000000000000005		43 decimal = 0,0000000000000005		43 decimal = 0,0000000000000005		43 decimal = 0,0000000000000005		43 decimal = 0,0000000000000005		
44 decimal = 0,0000000000000002		44 decimal = 0,0000000000000002		44 decimal = 0,0000000000000002		44 decimal = 0,0000000000000002		44 decimal = 0,0000000000000002		
45 decimal = 0,0000000000000001		45 decimal = 0,0000000000000001		45 decimal = 0,0000000000000001		45 decimal = 0,0000000000000001		45 decimal = 0,0000000000000001		
46 decimal = 0,00000000000000005		46 decimal = 0,00000000000000005		46 decimal = 0,00000000000000005		46 decimal = 0,00000000000000005		46 decimal = 0,00000000000000005		
47 decimal = 0,00000000000000002		47 decimal = 0,00000000000000002		47 decimal = 0,00000000000000002		47 decimal = 0,00000000000000002		47 decimal = 0,00000000000000002		
48 decimal = 0,00000000000000001		48 decimal = 0,00000000000000001		48 decimal = 0,00000000000000001		48 decimal = 0,00000000000000001		48 decimal = 0,00000000000000001		
49 decimal = 0,000000000000000005		49 decimal = 0,000000000000000005		49 decimal = 0,000000000000000005		49 decimal = 0,000000000000000005		49 decimal = 0,000000000000000005		
50 decimal = 0,000000000000000002		50 decimal = 0,000000000000000002		50 decimal = 0,000000000000000002		50 decimal = 0,000000000000000002		50 decimal = 0,000000000000000002		
51 decimal = 0,000000000000000001		51 decimal = 0,000000000000000001		51 decimal = 0,000000000000000001		51 decimal = 0,000000000000000001		51 decimal = 0,000000000000000001		
52 decimal = 0,0000000000000000005		52 decimal = 0,0000000000000000005		52 decimal = 0,0000000000000000005		52 decimal = 0,0000000000000000005		52 decimal = 0,0000000000000000005		
53 decimal = 0,0000000000000000002		53 decimal = 0,0000000000000000002		53 decimal = 0,0000000000000000002		53 decimal = 0,0000000000000000002		53 decimal = 0,0000000000000000002		
54 decimal = 0,0000000000000000001		54 decimal = 0,0000000000000000001		54 decimal = 0,0000000000000000001		54 decimal = 0,0000000000000000001				



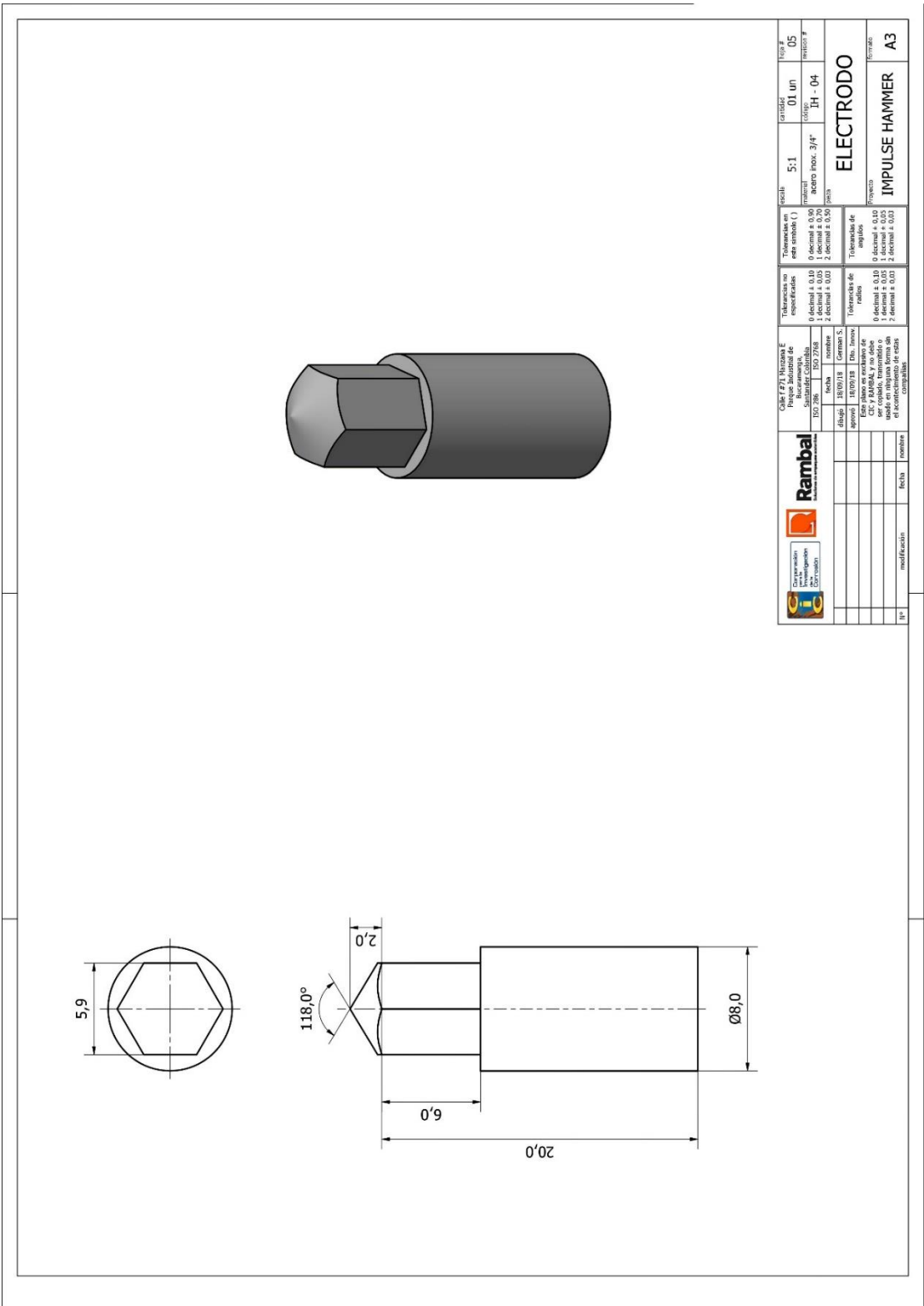
NOTA: las superficies, acotadas con este símbolo, deben tener un acabado superficial especial, debido a que se encontrarán en contacto con otras piezas del ensamble

[illegible]



NOTA: las superficies, acotadas con este símbolo, deben tener un acabado superficial especial, debido a que se encontrarán en contacto con otras piezas del ensamble

 Ministerio de Industria y Comercio República del Paraguay	Fecha de Emisión: _____ Parque Industrial de _____ Barrio: _____ Dpto: _____	fecha numero	aprovecho 18/07/18 19/07/18 20/07/18 21/07/18 22/07/18 23/07/18 24/07/18 25/07/18 26/07/18 27/07/18 28/07/18 29/07/18 30/07/18 31/07/18 01/08/18 02/08/18 03/08/18 04/08/18 05/08/18 06/08/18 07/08/18 08/08/18 09/08/18 10/08/18 11/08/18 12/08/18 13/08/18 14/08/18 15/08/18 16/08/18 17/08/18 18/08/18 19/08/18 20/08/18 21/08/18 22/08/18 23/08/18 24/08/18 25/08/18 26/08/18 27/08/18 28/08/18 29/08/18 30/08/18 31/08/18 01/09/18 02/09/18 03/09/18 04/09/18 05/09/18 06/09/18 07/09/18 08/09/18 09/09/18 10/09/18 11/09/18 12/09/18 13/09/18 14/09/18 15/09/18 16/09/18 17/09/18 18/09/18 19/09/18 20/09/18 21/09/18 22/09/18 23/09/18 24/09/18 25/09/18 26/09/18 27/09/18 28/09/18 29/09/18 30/09/18 01/10/18 02/10/18 03/10/18 04/10/18 05/10/18 06/10/18 07/10/18 08/10/18 09/10/18 10/10/18 11/10/18 12/10/18 13/10/18 14/10/18 15/10/18 16/10/18 17/10/18 18/10/18 19/10/18 20/10/18 21/10/18 22/10/18 23/10/18 24/10/18 25/10/18 26/10/18 27/10/18 28/10/18 29/10/18 30/10/18 31/10/18 01/11/18 02/11/18 03/11/18 04/11/18 05/11/18 06/11/18 07/11/18 08/11/18 09/11/18 10/11/18 11/11/18 12/11/18 13/11/18 14/11/18 15/11/18 16/11/18 17/11/18 18/11/18 19/11/18 20/11/18 21/11/18 22/11/18 23/11/18 24/11/18 25/11/18 26/11/18 27/11/18 28/11/18 29/11/18 30/11/18 01/12/18 02/12/18 03/12/18 04/12/18 05/12/18 06/12/18 07/12/18 08/12/18 09/12/18 10/12/18 11/12/18 12/12/18 13/12/18 14/12/18 15/12/18 16/12/18 17/12/18 18/12/18 19/12/18 20/12/18 21/12/18 22/12/18 23/12/18 24/12/18 25/12/18 26/12/18 27/12/18 28/12/18 29/12/18 30/12/18 31/12/18	fecha numero	aprovecho 18/07/18 19/07/18 20/07/18 21/07/18 22/07/18 23/07/18 24/07/18 25/07/18 26/07/18 27/07/18 28/07/18 29/07/18 30/07/18 31/07/18 01/08/18 02/08/18 03/08/18 04/08/18 05/08/18 06/08/18 07/08/18 08/08/18 09/08/18 10/08/18 11/08/18 12/08/18 13/08/18 14/08/18 15/08/18 16/08/18 17/08/18 18/08/18 19/08/18 20/08/18 21/08/18 22/08/18 23/08/18 24/08/18 25/08/18 26/08/18 27/08/18 28/08/18 29/08/18 30/08/18 31/08/18 01/09/18 02/09/18 03/09/18 04/09/18 05/09/18 06/09/18 07/09/18 08/09/18 09/09/18 10/09/18 11/09/18 12/09/18 13/09/18 14/09/18 15/09/18 16/09/18 17/09/18 18/09/18 19/09/18 20/09/18 21/09/18 22/09/18 23/09/18 24/09/18 25/09/18 26/09/18 27/09/18 28/09/18 29/09/18 30/09/18 01/10/18 02/10/18 03/10/18 04/10/18 05/10/18 06/10/18 07/10/18 08/10/18 09/10/18 10/10/18 11/10/18 12/10/18 13/10/18 14/10/18 15/10/18 16/10/18 17/10/18 18/10/18 19/10/18 20/10/18 21/10/18 22/10/18 23/10/18 24/10/18 25/10/18 26/10/18 27/10/18 28/10/18 29/10/18 30/10/18 31/10/18 01/11/18 02/11/
--	--	----------------------------	--	----------------------------	--



		Código 771, Normativa E		Escala	5:1	Cantidad	01 UN	Hoja 2ª					
		Ficha de											
		Ficha de											
Código 771, Normativa E		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad		Hoja 2ª					
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de		Escala		Cantidad							
Ficha de		Ficha de											

Apéndice B. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer empotrado en el

laboratorio de vibraciones mecánicas UIS

1. Equipo de adquisición de datos para el EMA

SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑALES			
Instrumento de medición	Imagen	Descripción	Referencia
Módulo de adquisición de datos		permite la adquisición de datos provenientes de diferentes tipos de sensores para luego ser procesados y analizados por medio de un software	Ref. OR-35-Freq-8 con capacidad de 8 canales de entrada y un ancho de banda hasta 20 kHz de la empresa OROS.
Acelerómetros		transductores que convierten una variable física en este caso aceleración en una variable eléctrica, voltaje.	
Excitador electrodinámico		Permite generar excitaciones en estructuras en un amplio rango de frecuencias por medio de un mecanismo de inducción magnética	Mini-Shaker con rango de frecuencia 15 KHz, con fuerza de salida seno Pico 4.5 LbF(20N); random Rms 3Lbf(13.3 N).
celda de carga de compresión		transductor que convierte una señal de fuerza en una señal eléctrica medible por el sistema de adquisición de datos	

software Modal



Interfaz gráfica que permite
realizar mediciones y
obtención de resultados
modales

Software NV
Gate V.10.0
modulo modal
OROS

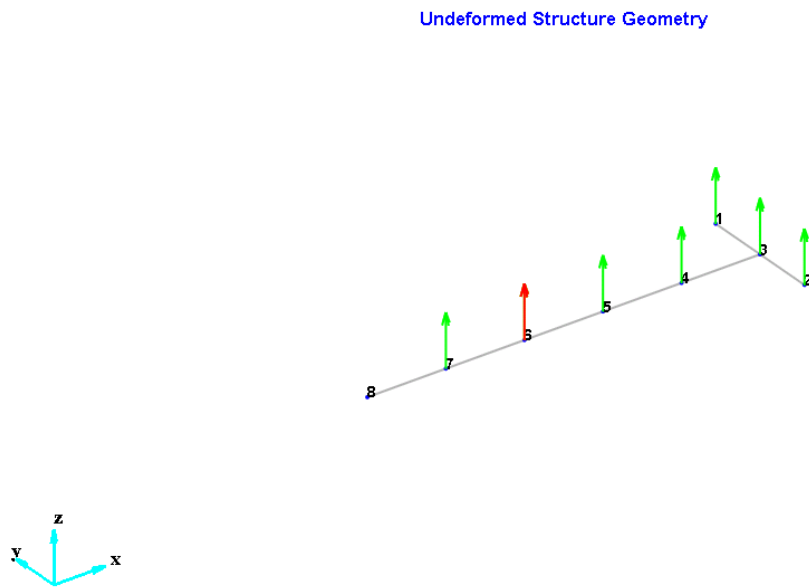
2. Configuración del módulo NV Gate, Modulo modal

Se realizará un ensayo basado en un extremo sujetado del hammer como condición de contorno y se excitará por medio de un shaker electromecánico, para esto se configuro el módulo con un segmento en figura “T” conformado por ocho nodos separados a una distancia de 40,5 mm en el mango y a 35 mm en la cabeza simulando la geometría del hammer.

El método del ensayo se realizará con el shaker fijo en el nodo tres y se trasladará el acelerómetro por todos los nodos.

Nota: en los extremos de la cabeza y el mango se le restaron 5 mm para que se pudiera fijar los acelerómetros con seguridad.

El nodo número ocho (8) no se tendrá en cuenta en el estudio para que simule el empotramiento, ósea que no tendrá ningún grado de libertad.



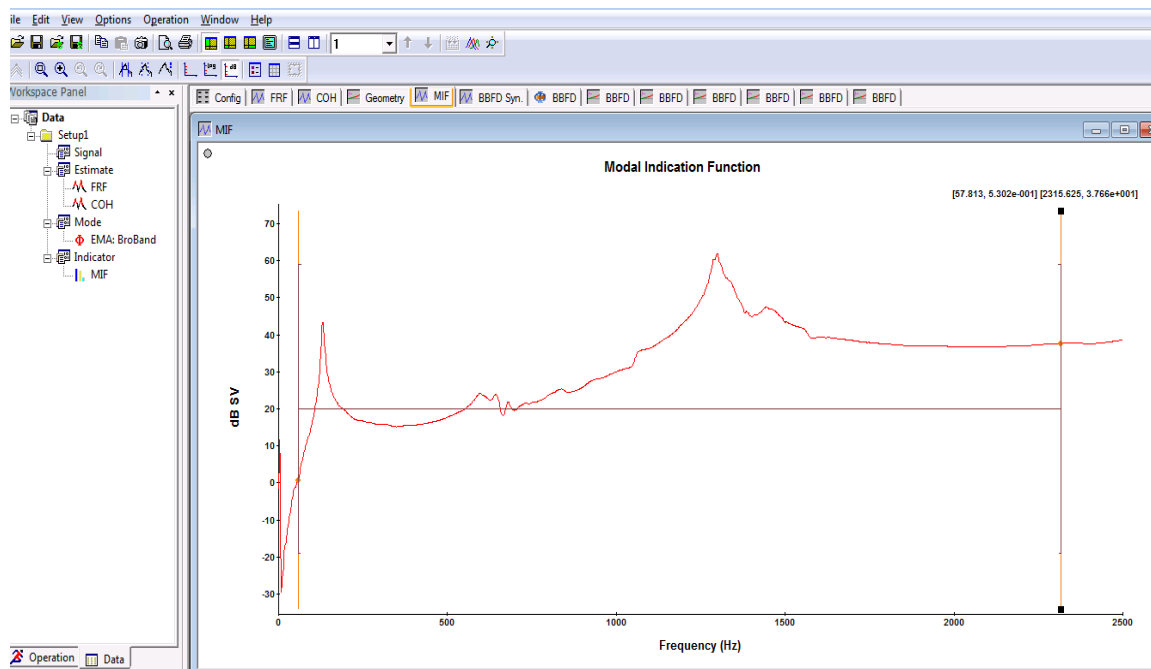
Seguidamente se configuraron los siguientes parámetros en el módulo para iniciar el ensayo:

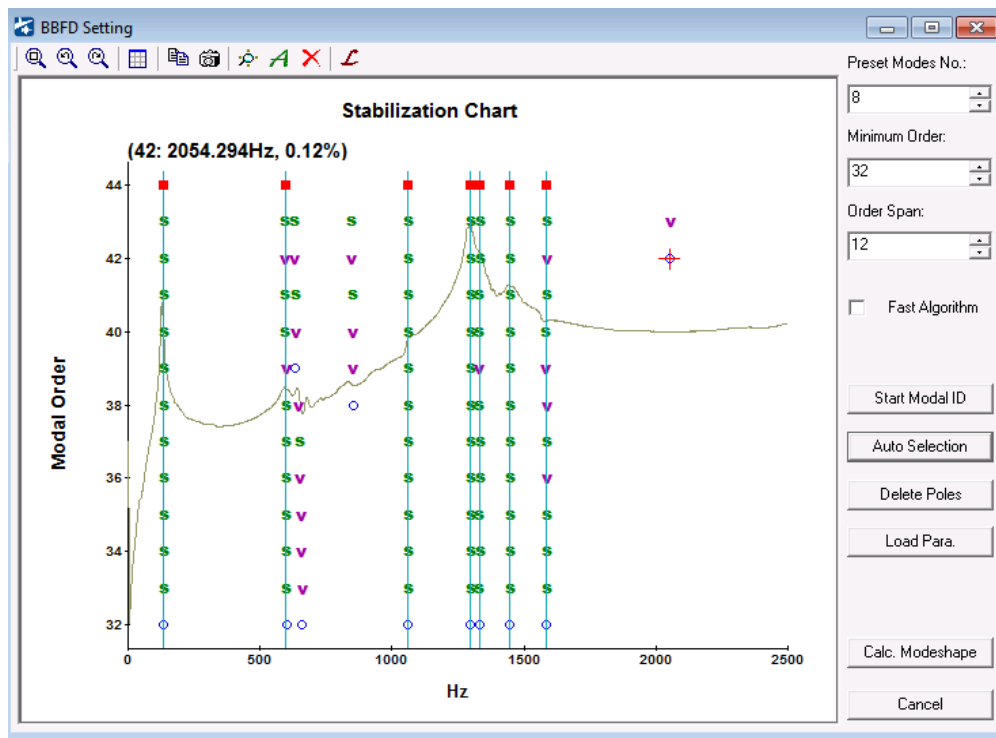
- Rango de frecuencia: 0 – 2500 Hz
- Líneas espectrales: 401
- Average: 3
- Window type: Force/exp
- Type: input
- Wave form: random noise
- f-strat: 10 Hz
- RMS level: 50 mV

3. Montaje y realización del ensayo

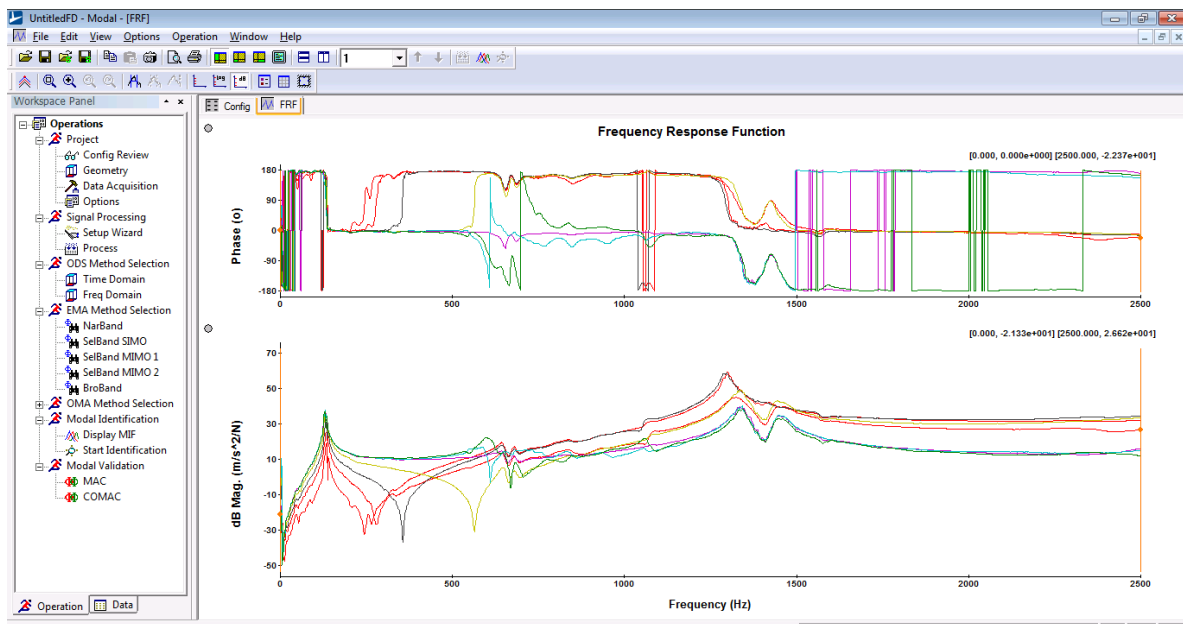
Se traslada el acelerómetro por los 8 nodos comenzando por el nodo número uno, luego se procede a calcular por el método de BroadBand del Software Nv Gate- OROS, mediante

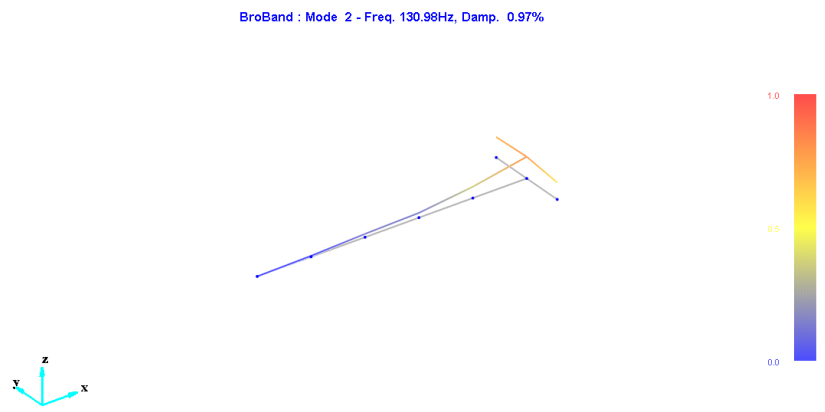
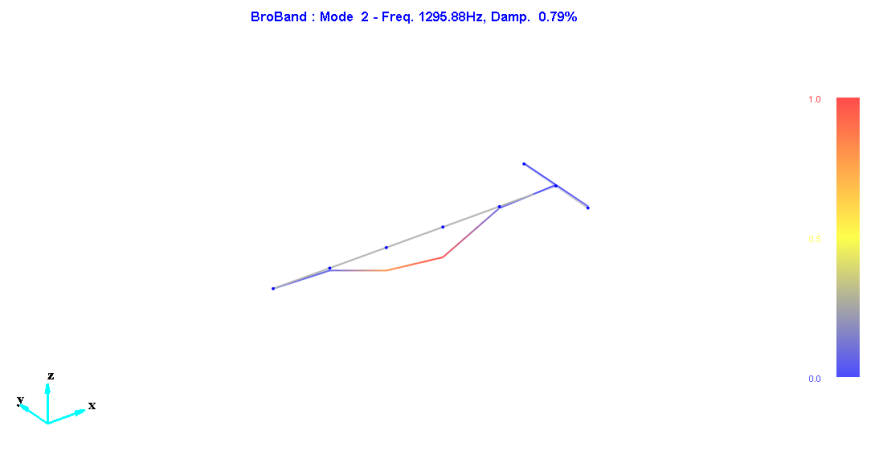
el método el software encuentra los posibles lugares donde se pueden encontrar ubicados nodos en el dominio de la frecuencia de acuerdo a las respuestas obtenidas en cada uno de los nodos.





4. Visualización de los modos de vibración con sus respectivas frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento



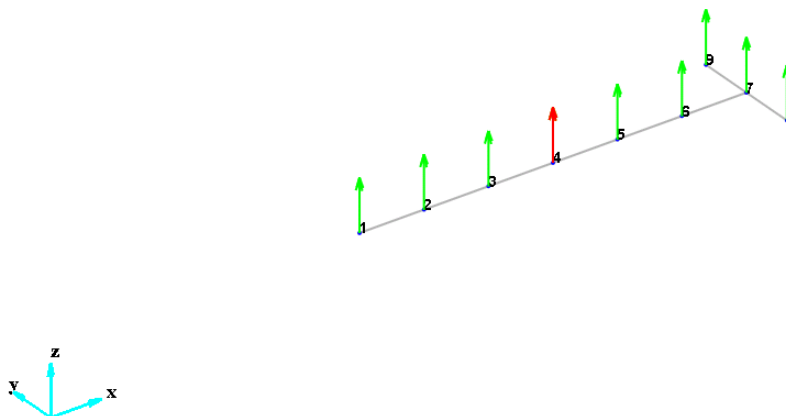


Apéndice C. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer libremente soportado en el laboratorio de vibraciones mecánicas UIS

Al igual que en el sistema empotrado en un extremo se crea una malla con figura en “T” compuesta por nueve (9) nodos separados en el mango a una distancia de 40,5 mm y en la cabeza a 35 mm, para sujetarlo libremente se usaron ligas en los extremos, y en el mallado se restaron 5mm para la correcta fijación de los acelerómetros.

La excitación se ejercerá sobre el nodo tres (3) mediante un shaker electrodinámico, este se encontrará fijo mientras se varia la posición de los acelerómetros.

Undeformed Structure Geometry

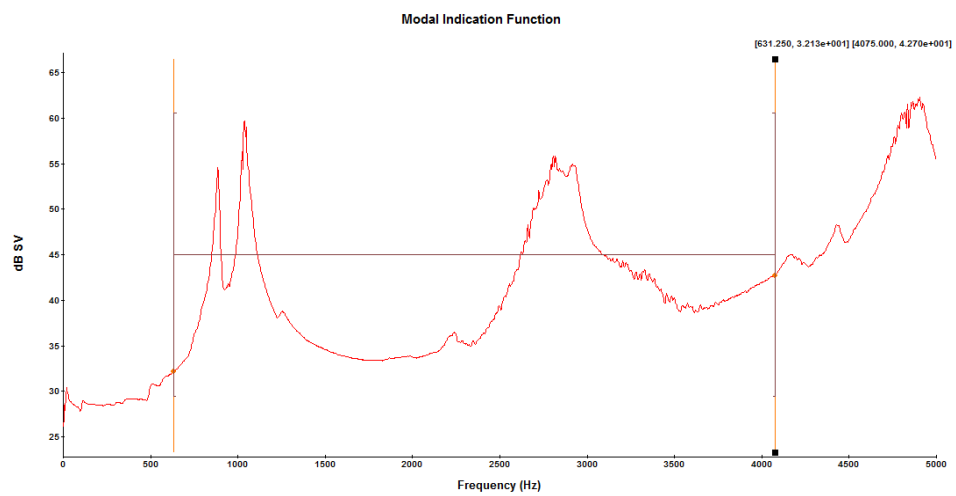


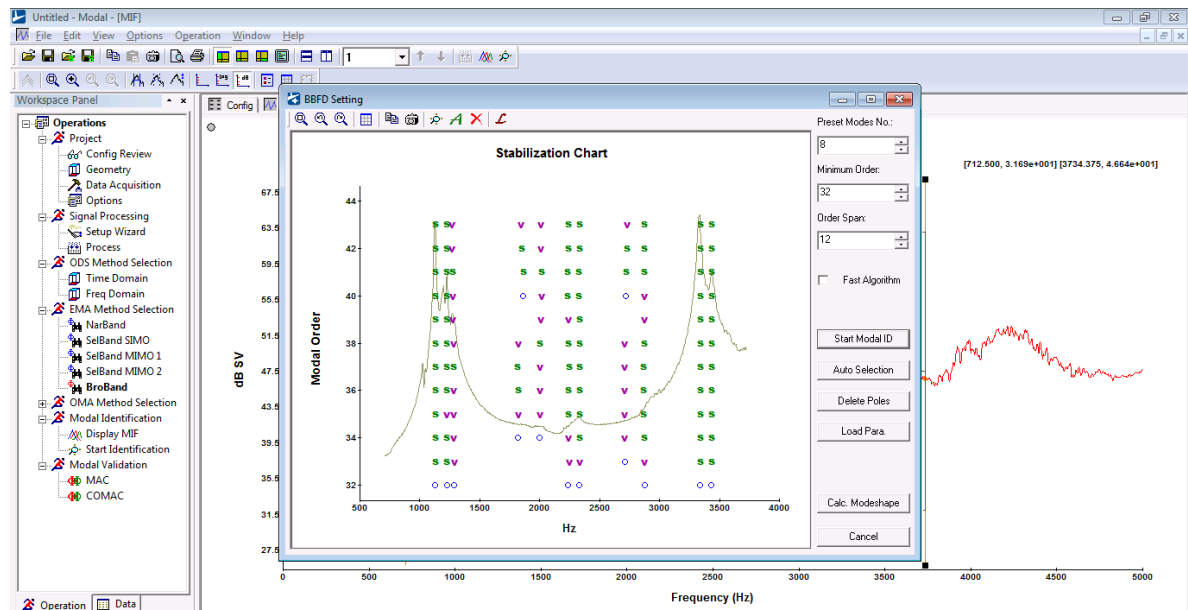
1. Montaje y realización del ensayo

Mediante un marco en el laboratorio de vibraciones se instalan las ligas y se soporta el hammer en tres puntos para que quede bajo condiciones de libre soportado.

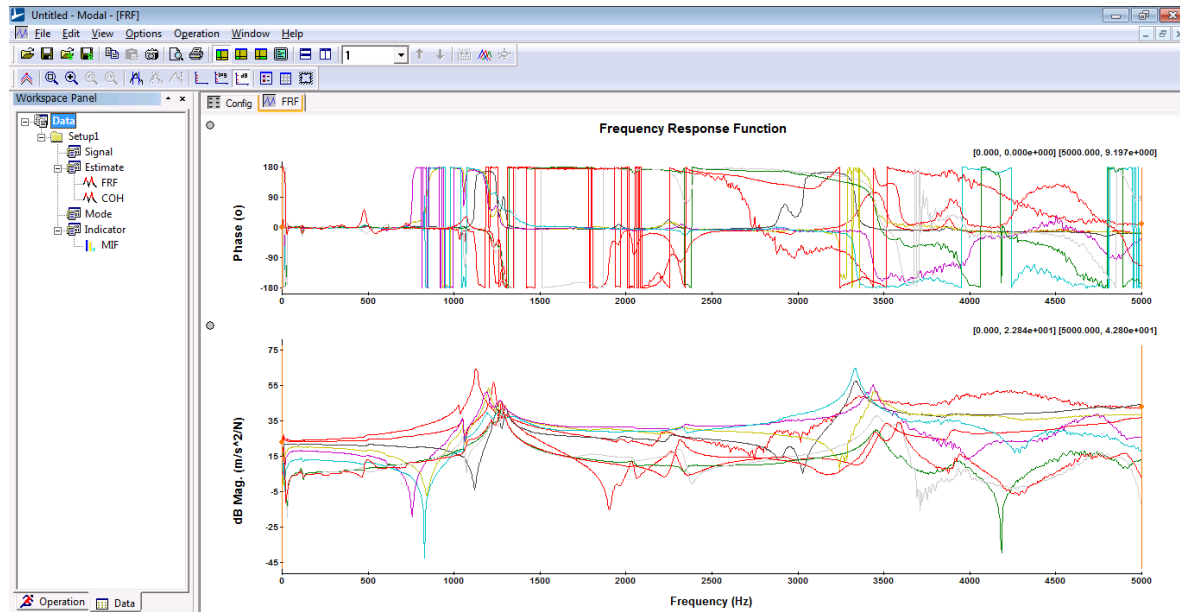


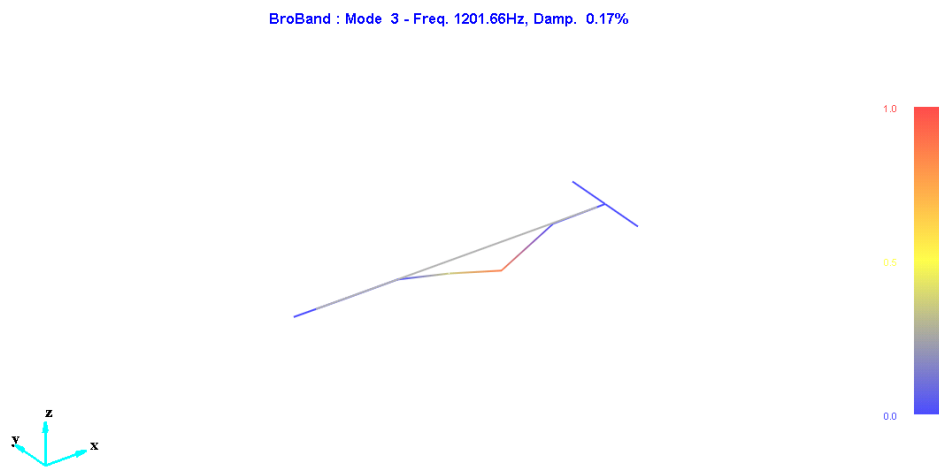
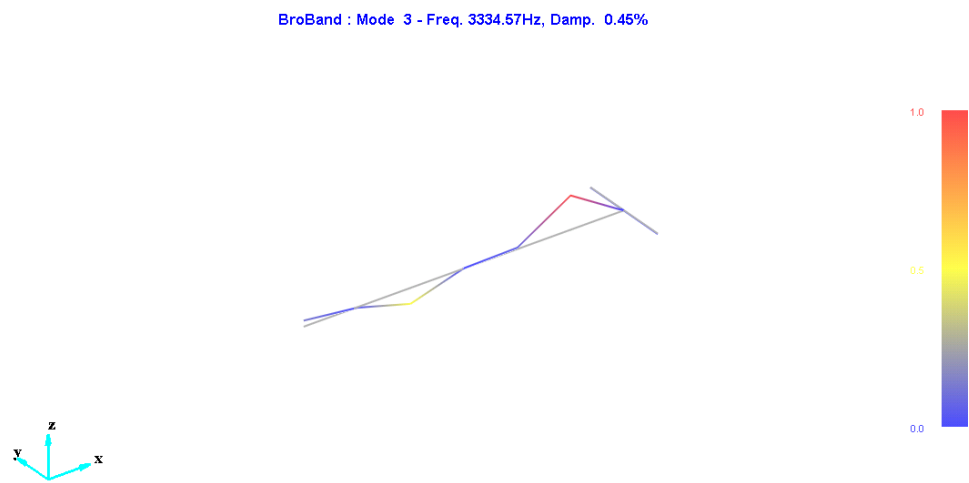
2. Calculo y visualización de vibración con sus respectivas frecuencias naturales del hammer





3. Visualización de los modos de vibración con sus respectivas frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento





Apéndice D. Análisis modal experimental (EMA) en el hammer empotrado en el laboratorio de análisis dinámico CIC.

Con el fin de validar los resultados obtenidos en el laboratorio de vibraciones de la escuela de ingeniería mecánica se dispuso a realizar ensayos EMA en las instalaciones de la corporación para la investigación de la corrosión, con los equipos que ellos cuentan.

Como factor extra a los ensayos en la UIS se estudió el comportamiento del cabeceo del martillo la cual es la posición en la cual se usará el hammer, esto debido a que los resultados encontrados mediante el método analístico en ANSYS, corrobora que cambiando la posición del hammer para el ensayo varia levemente en los resultados de las frecuencias naturales, esto puede ser debido a la inercia de la cabeza la cual cambia con la posición vertical u horizontal.

1. Equipo de adquisición de datos para el EMA

sistema de adquisición y tratamiento de señales			
Instrumento de medición	Imagen	Descripción	Referencia
Módulo de adquisición de datos		permite la adquisición de datos provenientes de diferentes tipos de sensores para luego ser procesados y analizados por medio de un software	NI – 9215, 4 AI, $\pm 10V$, 16 Bit, 100 kS/s/ch simultaneous.
Acelerómetros		transductores que convierten una variable física en este caso aceleración en una variable eléctrica, voltaje.	Acelerómetros Type 4370, Brüel & Kjær.

Impulse hammer



permiten realizar pruebas modales en estructuras mediante el estímulo de fuerzas dinámicas y el estudio de la FRF.

Impulse Hammer type 8202, Brüel &Kjaer.

Amplificador de señal



Amplificador de carga diseñado para mediciones de vibraciones en laboratorio o campo.

Charge Amplifier Type 2635, Brüel &Kjaer

software Modal



Interfaz grafica que permite realizar mediciones y obtención de resultados modales

Software LabVIEW version 2010, National Instrument

2. Configuración de la interfaz VI en el software LabVIEW

Mediante la herramienta de LabVIEW se configuran los parámetros necesarios para realizar el ensayo los cuales depende de la cantidad de canales o acelerómetros que se van a instalar, adecuar las características de los acelerómetros usados y del hammer a utilizar.

Nota: para este ensayo se usará un impulse hammer diferente al método utilizado en la UIS el cual fue con un shaker electrodinámico.

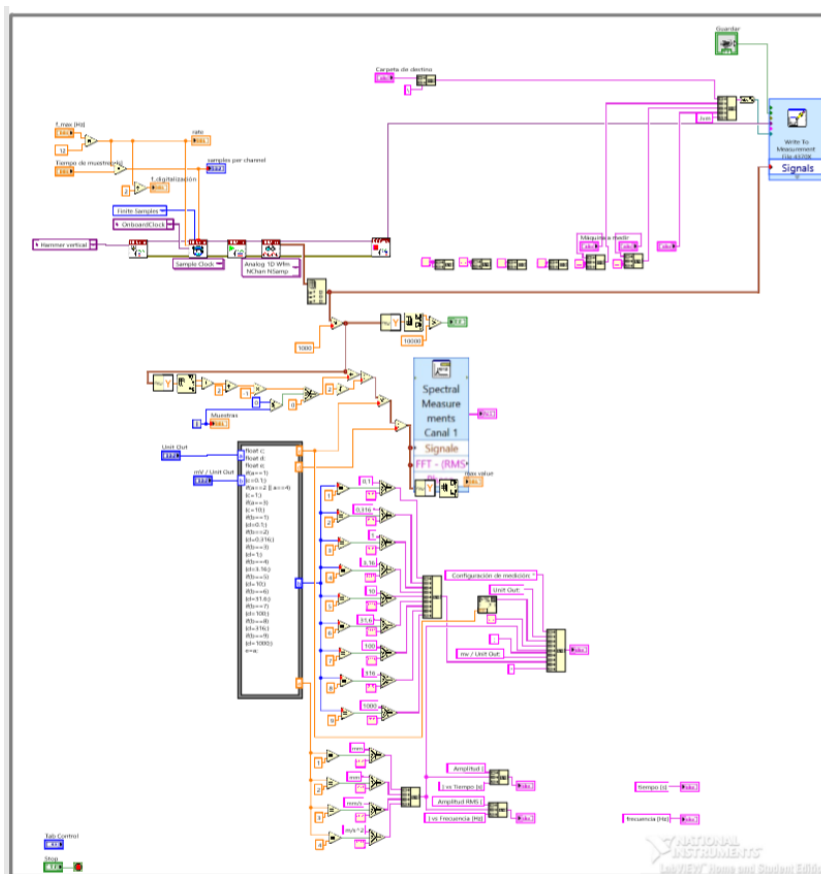
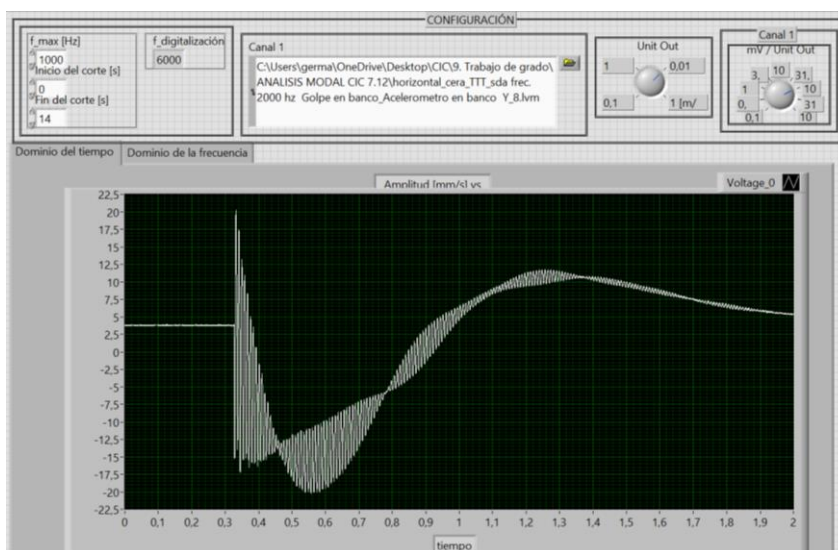


Ilustración 1. Programación del software labview para la adquisición de datos.



3. Montaje y realización del ensayo

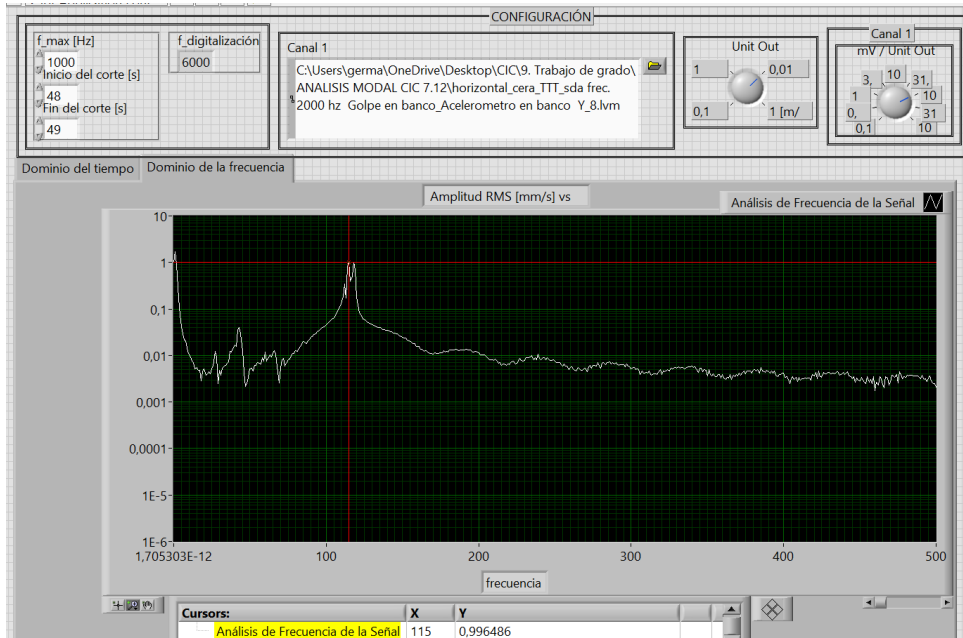
Como condiciones de frontera se realizaron los mismos pasos que en la UIS y se empotro el martillo en un extremo sujetándolo con las mismas distancias que en la prensa de la UIS para así obtener los mismos resultados, se realizó el mismo mallado y las mismas condiciones.



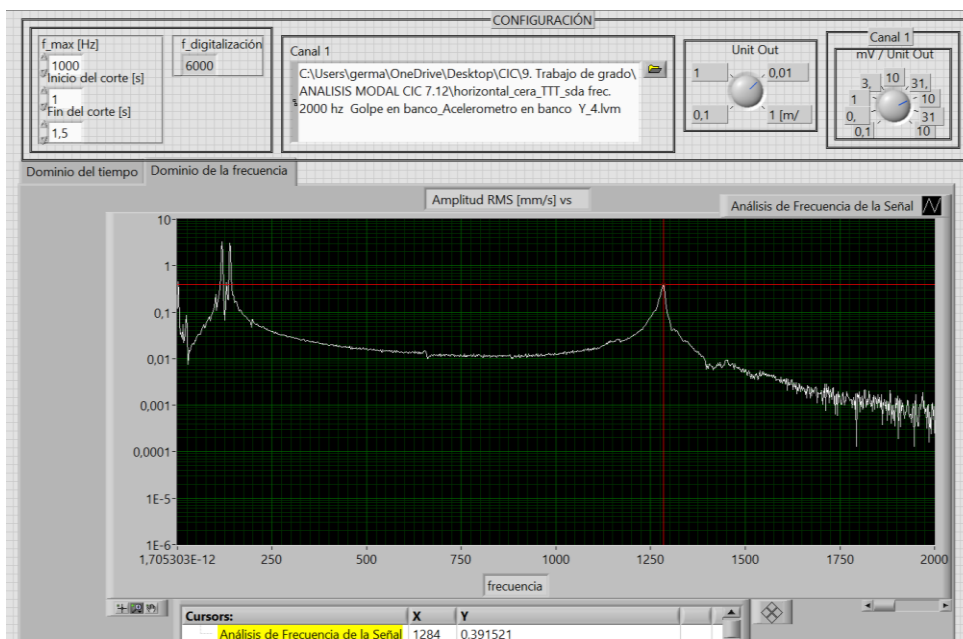
Las puntas del hammer se variaron para obtener el mejor resultado, la punta que mejor resultados obtuvo fue la puntera de acero para altas frecuencias.

4. Visualización de las frecuencias naturales fundamentales en la interfaz labview

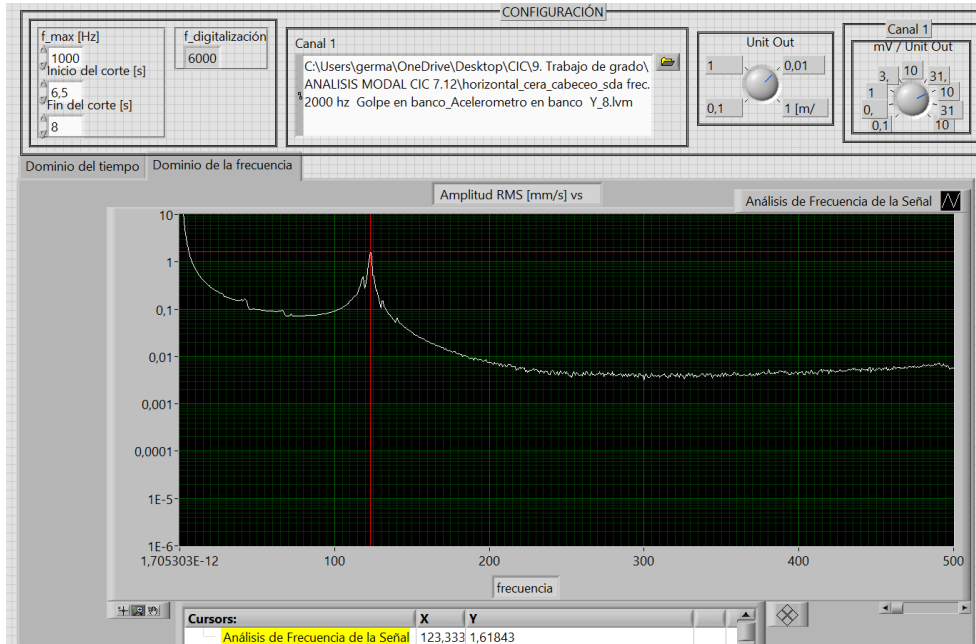
- POSICION “T” 500 Hz



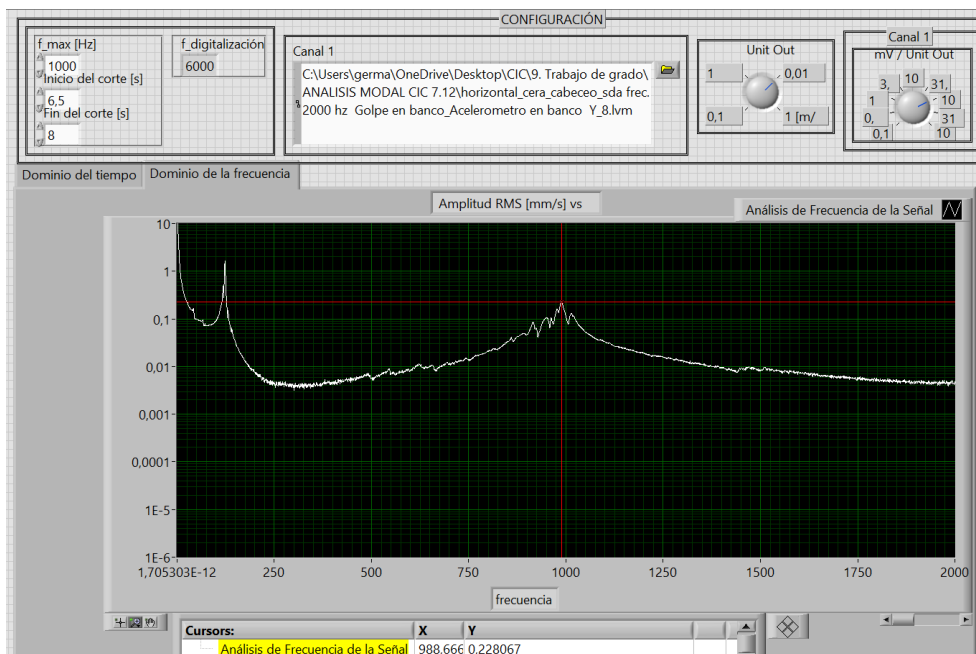
- POSICION “T” 2000 Hz

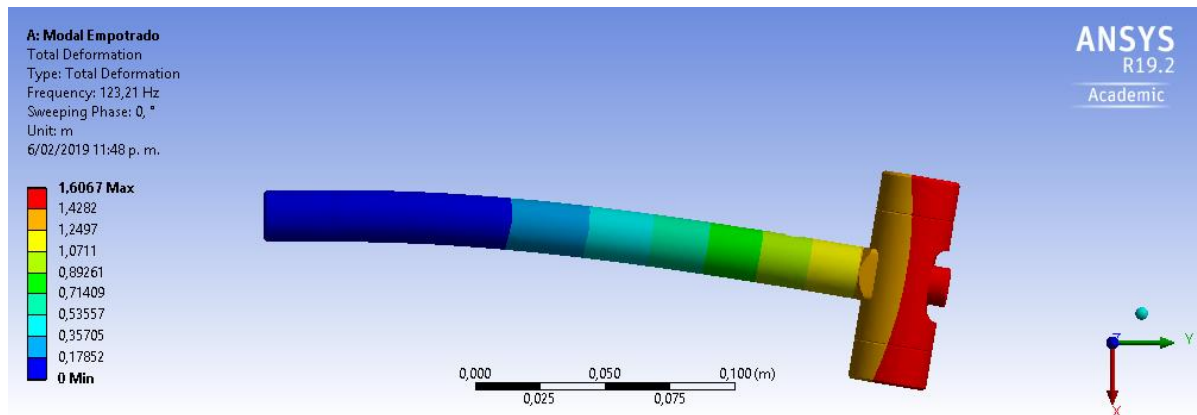
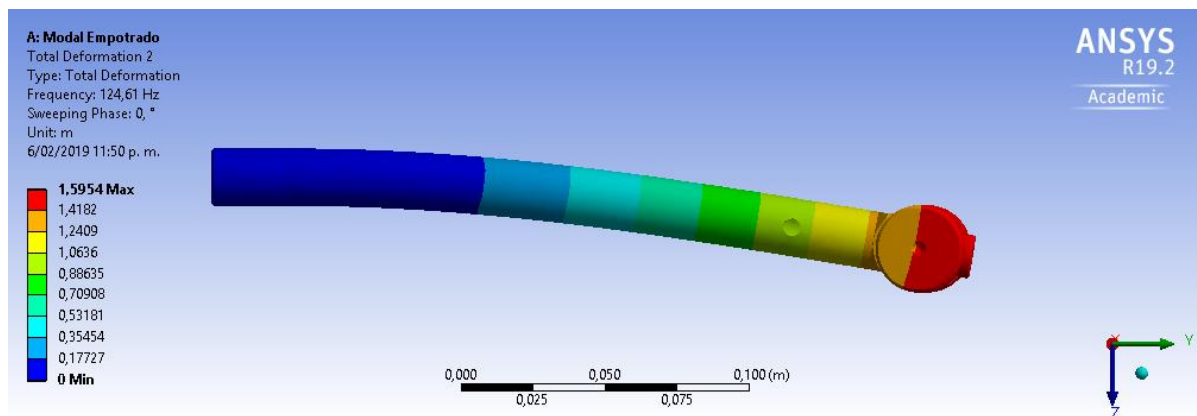


- POSICION CABECEO 500 Hz



- POSICION CABECEO 2000 Hz



Apéndice E. Modos de vibración en hammer empotrado ANSYS**Ilustración 2. Primer modo para empotrado en un extremo posición cabeceo.****Ilustración 3. Primer modo para empotrado en un extremo posición T.**

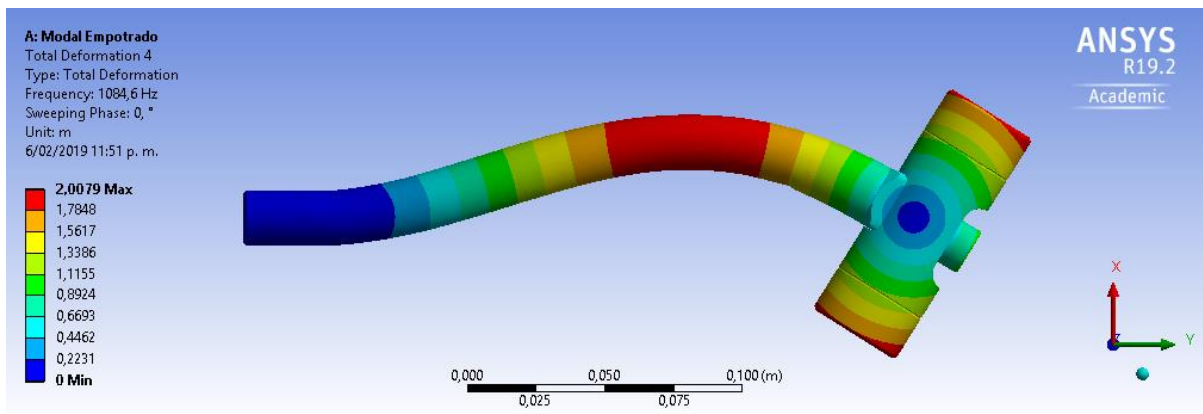


Ilustración 4. Segundo modo, para empotrado en un extremo posición cabeceo.

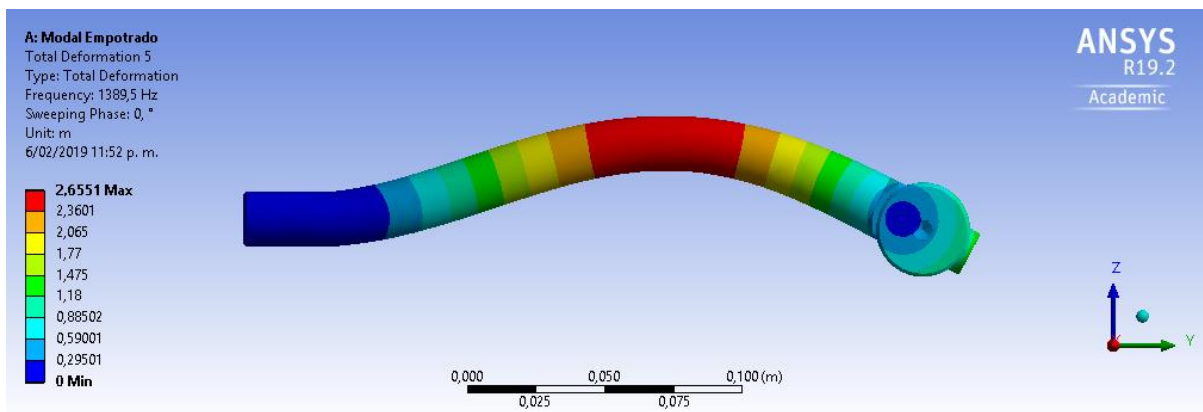
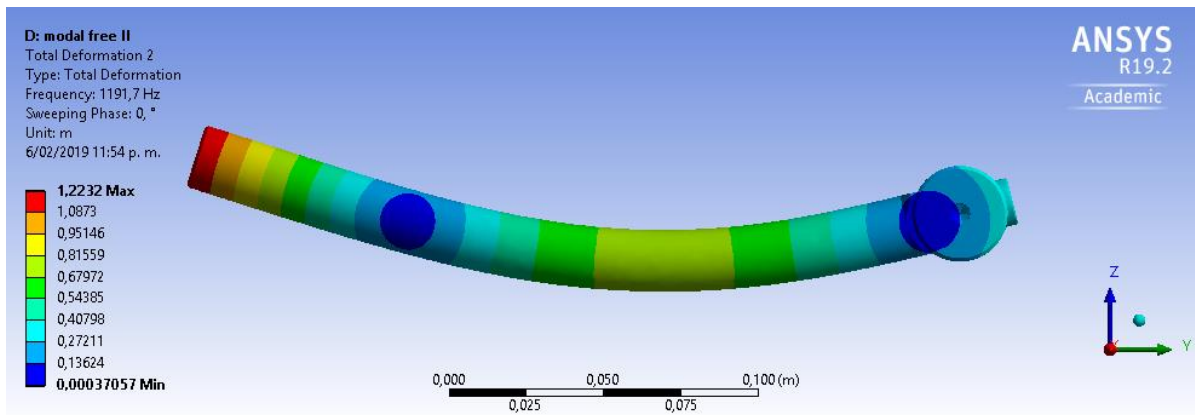
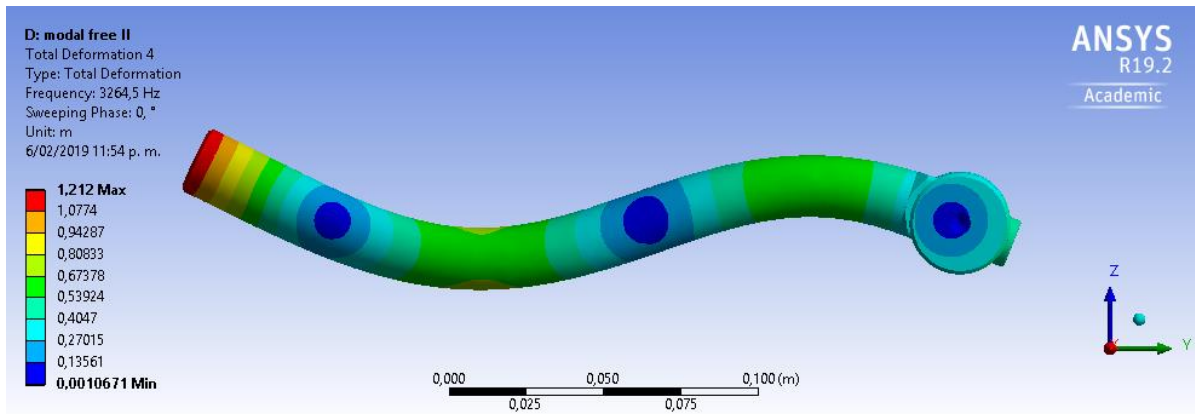


Ilustración 5. Segundo modo, para empotrado en un extremo posición T.

Apéndice F. Modos de vibración en hammer libremente soportado ANSYS**Ilustración 6. Primer modo, para condición libre.****Ilustración 7. Segundo modo, para condición libre.**