



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“REFORZAMIENTO DE VIGA METÁLICA CON FIBRA
DE CARBONO PARA REDUCIR VIBRACIONES”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: CHRISTIAN STUARD FERNÁNDEZ QUILCA

LESLY MARILU JIMENEZ ZAPATA

DIRECTOR: ING. EDUARDO PALMA ZAMBRANO

ASESOR METODOLÓGICO: ING. JUAN MALDONADO NOBOA

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“REFORZAMIENTO DE VIGA METÁLICA CON FIBRA DE
CARBONO PARA REDUCIR VIBRACIONES.”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: CHRISTIAN STUARD FERNÁNDEZ QUILCA

LESLY MARILU JIMENEZ ZAPATA

DIRECTOR: ING. EDUARDO PALMA ZAMBRANO

ASESOR METODOLÓGICO: ING. JUAN MALDONADO NOBOA

CUENCA - ECUADOR

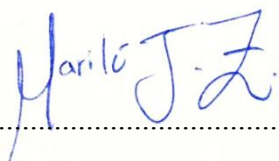
2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Christian Stuard Fernández Quilca y **Lesly Marilu Jimenez Zapata** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 030206269-0 y 140123235-8. Declaramos ser los autores de la obra: **“Reforzamiento de viga metálica con fibra de carbono para reducir vibraciones”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **25 de agosto de 2022**

F: 

Lesly Marilú Jiménez Zapata

C.I. 140123235-8

F: 

Christian Stuard Fernández Quilca

C.I. 030206269-0

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación con el tema “**Reforzamiento de viga metálica con fibra de carbono para reducir vibraciones**”, fue desarrollado por Christian Stuard Fernández Quilca y Lesly Marilu Jimenez Zapata, bajo mi supervisión.

Atentamente,
DIOS, PATRIA CULTURA Y DESARROLLO



F:

Ing. Eduardo Palma Zambrano

C.I. 171668519-1

DOCENTE – TUTOR

DEDICATORIA

El presente proyecto de tesis está dedicado primeramente a Dios por la fuerza y sabiduría que me brindó para culminar mi carrera universitaria, a mis padres Guillermo y Rosa por ser los principales promotores de mis sueños, por creer en mí, por sus sacrificios, apoyo incondicional, consejos y aliento que me brindaron siempre, a mis hermanos por su compañía y ánimo, y a todas las personas que de una u otra manera han contribuido para llegar a esta gran meta.

Mari

DEDICATORIA

Este proyecto de tesis dedico primeramente a mi Dios por haberme dada vida, fuerza y salud durante estos años de carrera, a mis padres Fredy Fernández y Elder Quilca por brindarme su apoyo incondicional, a mi abuelito Víctor Fernández por darme sabiduría y siempre alentarme en cada instante y a todos mis profesores por brindarme sus conocimientos, siendo parte de mi crecimiento profesional durante la carrera, gracias.

Christian

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Católica de Cuenca por habernos aceptado ser parte de ella y habernos abierto las puertas para estudiar la carrera de Ingeniería Civil, así como también a los diferentes docentes que nos brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir aprendiendo cada día más.

Agradecemos también, de una manera muy especial a nuestro tutor de tesis: Ing. Eduardo Palma y a nuestro asesor metodológico: Ing. Juan Maldonado, por habernos brindado la oportunidad de trabajar con Uds., por sus conocimientos impartidos y por toda la paciencia para guiarnos durante todo el desarrollo del proyecto.

¡Muchas Gracias!

RESUMEN

El presente proyecto de titulación se realizó con el objetivo de verificar si el reforzamiento con fibras de carbono de una viga de entrepiso puede reducir la vibración de la losa. Para ello se realizaron mediciones de frecuencia en el entrepiso antes y después del reforzamiento de la viga con la ayuda del Sismómetro portátil de banda ancha Ref Tek Colt.

Para obtener la frecuencia natural del entrepiso antes del reforzamiento y validar las lecturas del sismómetro se usaron dos métodos; el primero consiste en un modelo analítico elaborado en el software Robot Structural y el segundo se basó en el método aproximado proporcionado por la Guía de Diseño para el Análisis de las Vibraciones en Forjados. Los dos métodos presentaron resultados semejantes a los resultados obtenidos con el sismómetro luego de un adecuado procesamiento de señales mediante el software Geopsy.

Las medidas de la frecuencia después del reforzamiento de la viga en el entrepiso aumentaron en un 1% en todos los ensayos, lo cual implica un aumento en la rigidez del entrepiso reduciendo la vibración de la losa.

Palabras clave: reforzamiento, fibra de carbono, frecuencia, vibración, entrepiso.

ABSTRACT

This degree project aims to verify whether a mezzanine beam's carbon fiber reinforcement can reduce the slab's vibration. For this purpose, frequency measurements were performed on the mezzanine before and after the beam reinforcement with the aid of the Ref Tek Colt portable broadband seismometer.

Two methods were used to obtain the natural frequency of the floor slab before strengthening and to validate the seismometer readings. The first one consists of an analytical model developed in Robot Structural software, and the second one was based on the approximate method provided by the Design Guide for Vibration Analysis in Floor Slabs. The two methods presented results similar to those obtained with the seismometer after adequate signal processing using Geopsy software.

Frequency measurements after beam strengthening at the mezzanine increased by 1% in all tests, which implies an increase in mezzanine stiffness by reducing slab vibration.

Keywords: reinforcement, carbon fiber, frequency, vibration, mezzanine

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD	III
DEDICATORIA.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	2
1.4. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	2
1.5. OBJETIVOS	4
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
CAPÍTULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES.....	5
2.1.1 <i>Masa</i>	5
2.1.2 <i>Entrepiso</i>	5
2.1.3 <i>Vibración</i>	5
2.1.4 <i>Reforzamiento</i>	5
2.1.5 <i>Resina Epóxica</i>	5
2.1.6 <i>Catalizador</i>	6
2.1.7 <i>Señal</i>	6

2.1.8	<i>Filtros</i>	6
2.1.9	<i>Frecuencia natural</i>	6
2.1.10	<i>Periodo natural</i>	6
2.1.11	<i>Amplitud</i>	7
2.1.12	<i>Atenuación</i>	7
2.1.13	<i>Excitación Dinámica</i>	8
2.1.14	<i>Amortiguación</i>	8
2.1.15	<i>Rigidez</i>	9
2.1.16	<i>Bandas de paso</i>	9
2.1.17	<i>Ancho de banda</i>	9
2.1.18	<i>Masa Modal</i>	10
2.1.19	<i>Factor de Calidad</i>	10
2.1.20	<i>Selectividad</i>	11
2.1.21	<i>Aceleración</i>	11
2.1.22	<i>Tejido de Fibra de Carbono</i>	11
2.1.23	<i>Fibra de carbono QuintumWrap-600</i>	12
2.2.	DISPOSITIVOS Y SOFTWARES EMPLEADOS EN EL PROYECTO	13
2.2.1	<i>Sismómetro portátil de banda ancha "REF TEK, Colt"</i>	13
2.2.2	<i>Aplicación Móvil Ref Tek Recorder Setup</i>	14
2.2.3	<i>Software Rt_View</i>	15
2.2.4	<i>Robot Structural Analysis Professional</i>	16
2.2.5	<i>Software Geopsy</i>	17
2.3.	MÉTODOS PARA EVALUAR VIBRACIONES	17
2.3.1	<i>Primer método: Frecuencia natural y Masa modal para el caso de vigas</i>	18
2.3.2	<i>Segundo método: Enfoque del peso propio para el cálculo de la frecuencia natural</i>	19
2.3.3	<i>Amortiguación</i>	20
2.3.4	<i>Clasificación de la respuesta del forjado y recomendaciones</i>	21
2.4.	CRITERIOS DE FIABILIDAD DEL SESAME PARA RESULTADOS	22
2.4.1	<i>Criterios para una curva fiable:</i>	23

2.4.2	<i>Criterios para un pico claro</i>	23
2.4.3	<i>Duración de grabación</i>	25
CAPÍTULO III		26
3.	METODOLOGÍA	26
3.1.	ANTECEDENTES.....	26
3.1.1	<i>Estructura del entepiso</i>	26
3.2.	MÉTODO COMPUTACIONAL	28
3.3.	MÉTODO DE CÁLCULO MANUAL APROXIMADO SEGÚN LA GUÍA DE DISEÑO PARA EL ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN FORJADOS	28
3.3.1	<i>Primer método: Frecuencia natural y Masa modal para el caso de vigas</i>	29
3.3.2	<i>Segundo método: Enfoque del peso propio para el cálculo de la frecuencia</i>	29
3.3.3	<i>Método del diagrama de clasificación</i>	30
3.4.	METODOLOGÍA DE TRABAJO IN SITU	31
3.4.1	<i>Instalación del dispositivo Ref Tek Colt</i>	31
3.4.2	<i>Descripción de los ensayos realizados in situ antes del reforzamiento</i>	33
3.4.3	<i>Colocación de la fibra de carbono en la viga más crítica</i>	38
3.4.4	<i>Ensayos realizados en campo después del reforzamiento</i>	41
3.5.	METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS IN SITU	41
3.5.1	<i>Extracción de datos del software Rt_view</i>	41
3.5.2	<i>Procesamiento de datos en el software geopsy</i>	42
CAPÍTULO IV		47
4.	RESULTADOS	47
4.1.	FRECUENCIAS Y PERIODOS	47
4.1.1	<i>Método computacional: Robot Structural</i>	47
4.2.	MÉTODO MANUAL APROXIMADO: GUÍA DE DISEÑO PARA EL ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN FORJADOS ..	48
4.2.1	<i>Diagrama de clasificación</i>	48
4.2.2	<i>Método de trabajo en campo in situ: Ref Tek Colt</i>	50

4.3.	CUMPLIMIENTO DE LOS CRITERIOS SESAME.....	51
4.4.	CUMPLIMIENTO DE LA DURACIÓN DE GRABACIÓN RECOMENDADA POR EL SESAME	53
4.5.	COMPROBACIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD	53
CAPÍTULO V.....		55
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
7.	ANEXOS	60
	ANEXO 1:.....	60
	MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.....	60
	62
	62
	ANEXO 2:.....	63
	DIAGRAMAS BASADOS EN LA AMORTIGUACIÓN	63
	ANEXO 3:.....	66
	CONFIGURACIÓN DE LA APLICACIÓN RECORDER SETUP	66
	67
	ANEXO 4:.....	68
	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN EL SOFTWARE GEOPSY	68
	ANEXO 5:.....	89
	CONVERSIÓN DE UNIDADES.....	89
	ANEXO 6:.....	92
	CÁLCULO MANUAL APROXIMADO.....	92
	ANEXO 7:.....	99
	PLANOS.....	99

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1. FIBRA DE CARBONO	13
IMAGEN 2. MEDICIÓN EXACTA CON UN FLEXÓMETRO	31
IMAGEN 3. NIVELACIÓN DEL DISPOSITIVO	32
IMAGEN 4 . ORIENTACIÓN CON EL NORTE GEOGRÁFICO.	32
IMAGEN 5. CONEXIÓN CON EL DIGITALIZADOR.....	32
IMAGEN 6. ENTRADA PWR.....	33
IMAGEN 7. DISPOSITIVO ENCENDIDO CORRECTAMENTE.....	33
IMAGEN 8. SENSOR, FUENTE DE ENERGÍA, DIGITALIZADOR.	33
IMAGEN 9. ENSAYO 1, LANZAMIENTO DE UN SACO DE 10 KG	34
IMAGEN 10. ENSAYO 2, SALTOS VANO 1.....	35
IMAGEN 11. ENSAYO 3, TUBO DE HORMIGÓN.	35
IMAGEN 12. ENSAYO 4, PASO PEATONAL CONSTANTE.	36
IMAGEN 13. ENSAYO 5, SALTOS VANO 2.....	36
IMAGEN 14. TUBO DE HORMIGÓN VANO 2.....	37
IMAGEN 15. ENSAYO 7, PASO PEATONAL CONSTANTE.	37
IMAGEN 16. LIMPIEZA DE LA VIGA.	39
IMAGEN 17. MEZCLA DE LA RESINA CON EL CATALIZADOR	39
IMAGEN 18. APLICACIÓN DE LA RESINA SOBRE LAS FIBRAS DE CARBONO.....	40
IMAGEN 19. COLOCACIÓN DE LA FIBRA EN LA VIGA.	40

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	3
ILUSTRACIÓN 2. ENTREPISO DEL LABORATORIO DE INGENIERÍAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA	3
ILUSTRACIÓN 3. AMPLITUD DE UNA ONDA.....	7
ILUSTRACIÓN 4. TIPOS DE EXCITACIÓN DINÁMICA	8
ILUSTRACIÓN 5. DIAGRAMA DE AMPLITUD PARA UN FILTRO PASA BANDA IDEAL.	9
ILUSTRACIÓN 6. FILTRO PASA BANDA EN LA QUE SE PUEDE APRECIAR EL ANCHO DE BANDA Y LA FRECUENCIA CENTRAL.	10
ILUSTRACIÓN 7. FACTOR DE CALIDAD (Q).....	11
ILUSTRACIÓN 8. SISMÓMETRO REF TEK COLT Y REGISTRADOR SÍSMICO WRANGLER	14
ILUSTRACIÓN 9. APLICACIÓN MÓVIL REF TEK RECORDER SETUP.....	15
ILUSTRACIÓN 10. SOFTWARE RT_VIEW	16
ILUSTRACIÓN 11. SOFTWARE ROBOT STRUCTURAL	16
ILUSTRACIÓN 12. SOFTWARE GEOPSY	17
ILUSTRACIÓN 13. OS-RMS ₉₀ CON UNA AMORTIGUACIÓN DEL 2%:.....	21
ILUSTRACIÓN 14. EJEMPLO DE DURACIÓN DE GRABACIÓN	25
ILUSTRACIÓN 15. VISTA EN PLANTA DEL ENTREPISO.....	26
ILUSTRACIÓN 16. MODELADO COMPUTACIONAL EN ROBOT STRUCTURAL.	28
ILUSTRACIÓN 17. MODELADO ANALÍTICO, FLECHA MÁXIMA.....	38
ILUSTRACIÓN 18. PROCESO PARA OBTENER LA FRECUENCIA NATURAL DE LA ESTRUCTURA IN SITU	41
ILUSTRACIÓN 19. SEÑAL SELECCIONADA EN EL SOFTWARE RT_VIEW	42
ILUSTRACIÓN 20. EJEMPLO DE SEÑAL EN EL SOFTWARE GEOPSY	43
ILUSTRACIÓN 21. SELECCIÓN DEL FILTRO PASA BANDA.	43
ILUSTRACIÓN 22. SELECCIÓN DE VENTANAS CON UNA LONGITUD DE 10s. ENSAYO 1	45
ILUSTRACIÓN 23. CURVA ESPECTRAL Y FRECUENCIA CENTRAL. ENSAYO 1.....	45
ILUSTRACIÓN 24. RESULTADO DEL DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN.	49
ILUSTRACIÓN 25. VISTA EN PLANTA DEL ENTREPISO.....	61
ILUSTRACIÓN 26. PARÁMETROS DEL ANÁLISIS MODAL	61
ILUSTRACIÓN 27. COMBINACIÓN DE MASAS	62

ILUSTRACIÓN 28. FRECUENCIAS, PERIODOS Y MASAS ACTUANTES.....	62
ILUSTRACIÓN 29. OS-RMS ₉₀ CON UNA AMORTIGUACIÓN DEL 3% Y 4%:	64
ILUSTRACIÓN 30. OS-RMS ₉₀ CON UNA AMORTIGUACIÓN DEL 5% Y 6%:	64
ILUSTRACIÓN 31. OS-RMS ₉₀ CON UNA AMORTIGUACIÓN DEL 7% Y 8%:	65
ILUSTRACIÓN 32. OS-RMS ₉₀ CON UNA AMORTIGUACIÓN DEL 9%:.....	65
ILUSTRACIÓN 33. CONFIGURACIÓN DE LA APLICACIÓN RECORDER SETUP (REF TEK)	67
ILUSTRACIÓN 34. ENSAYOS SIN EFORZAMIENTO	69
ILUSTRACIÓN 35. ENSAYOS CON REFORZAMIENTO	78
ILUSTRACIÓN 36. ASIGNACIÓN DE PUNTOS.....	90
ILUSTRACIÓN 37. ECUACIÓN DE LA RECTA	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DETERMINACIÓN DE LA PRIMERA FRECUENCIA PROPIA DE VIGAS	18
TABLA 2. DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE AMORTIGUACIÓN.....	20
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LA RESPUESTA DEL FORJADO Y RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE CLASES.	22
TABLA 4. VALORES DE UMBRAL PARA UN PICO CLARO	24
TABLA 5. DURACIÓN MÍNIMA DE GRABACIÓN RECOMENDADA POR EL SESAME	25
TABLA 6. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	27
TABLA 7. RESUMEN - FRECUENCIA NATURAL Y PERIODOS.....	47
TABLA 8. RESULTADO DEL MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE ROBOT STRUCTURAL	48
TABLA 9. RESUMEN DEL MÉTODO MANUAL APROXIMADO.	48
TABLA 10. PORCENTAJE DE AMORTIGUACIÓN EMPLEADO.....	49
TABLA 11. CUADRO COMPARATIVO DE FRECUENCIAS CON Y SIN REFORZAMIENTO.	50
TABLA 12. CUADRO COMPARATIVO DE PERIODOS CON Y SIN REFORZAMIENTO.....	50
TABLA 13. TABLA RESUMEN DEL CUMPLIMIENTO DE CRITERIOS SESAME (VIGA SIN REFORZAR).....	52
TABLA 14. TABLA RESUMEN DEL CUMPLIMIENTO DE CRITERIOS SESAME (VIGA REFORZADA).....	52
TABLA 15. DURACIÓN DE GRABACIÓN RECOMENDADA	53
TABLA 16. FACTOR DE CALIDAD (Q) EN LOS ENSAYOS REALIZADOS.	54
TABLA 17. PUNTOS OBTENIDOS DEL RT_VIEW PARA LA ECUACIÓN DE LA RECTA	91

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

Con el avance de la investigación en materiales, la construcción tradicional en base al bloque y hormigón ha dado paso cada vez más al uso de las estructuras de acero, siendo hoy una de las más importantes en nuestro medio para la construcción de pequeñas y grandes estructuras ya que posee varias características que favorecen la construcción con este material, como: rapidez, durabilidad y resistencia. El acero al ser un material más rígido que el hormigón, permite tener secciones más pequeñas y esbeltas, lo cual hace que las estructuras puedan tener problemas en estado límite de servicio como altas vibraciones en entrepisos y grandes deformaciones por luces excesivas

Es por ello que la industria desarrolla tecnologías que tratan de contrarrestar estos problemas. La fibra de carbono es un material que cuenta con varias presentaciones dependiendo el uso, generalmente se usa con la finalidad de reforzar las estructuras, es por ello que, *(Nina Gomez, 2018)* concluyó en su trabajo que la diferencia de resistencia va a depender de las propiedades y dimensiones de la lámina de fibra de carbono (a mayor sección, mayor es el aumento de la resistencia), también, *(Guevara Fernández, 2018)* con su investigación demuestra que existe una relación inversamente proporcional entre el refuerzo de fibras de carbono y la cuantía de acero, y propone así un sistema más favorable para disipar energía de deformación, orientado a un óptimo diseño sismo-resistente, *(Ramos Sánchez, 2019)* demostró que el uso de las fibras de carbono influye de una manera aceptable ante un evento sísmico en desplazamientos máximos, distorsión de entrepiso y momento de volteo por su resistencia a la corrosión y es rentable en comparación con otro método de reforzamiento. *(Castro Zavaleta, 2019)* en su trabajo demostró que la investigación cumplió su cometido al incrementar la resistencia de las

columnas de la galería y el ahorro económico generado por las fibras de carbono es de un 58.4% mayor que un reforzamiento concreto acero.

Los trabajos y estudios mencionados anteriormente concluyen que la fibra de carbono es un material que cumple con la función de reforzamiento tanto a flexión, cortante y confinamiento de elementos estructurales tales como vigas y columnas.

1.2. Descripción del problema

Dentro del ámbito de la construcción la responsabilidad civil no termina con la culminación de la obra. La ley establece una responsabilidad por parte del constructor posterior a la entrega. El profesional a cargo debe garantizar la estructura y generar la comodidad esperada para sus ocupantes, es por ello que en el laboratorio de ingenierías de la Universidad Católica de Cuenca se aplicarán diferentes metodologías para verificar si la estructura de entrepiso se encuentra en los rangos adecuados de vibración debido a la mala sensación de movimiento que se genera en los usuarios, ya sea por factores externos o tan solo por el paso de las personas.

1.3. Justificación

La aplicación de la fibra de carbono es una nueva tecnología de reforzamiento que brinda a un sistema un fortalecimiento estructural confiable, de alto rendimiento y proporciona una excelente durabilidad a largo plazo, es por ello, que este proyecto se fundamenta en el reforzamiento de una viga metálica de un entrepiso con dicha fibra, con el objetivo de disipar las vibraciones que tiene la estructura y evitar las molestias causadas a los usuarios.

1.4. Definición de la zona de estudio

Los ensayos se realizaron en el entrepiso del laboratorio de ingenierías (Ilustración 2) de la Universidad Católica de Cuenca que se encuentra ubicado en la

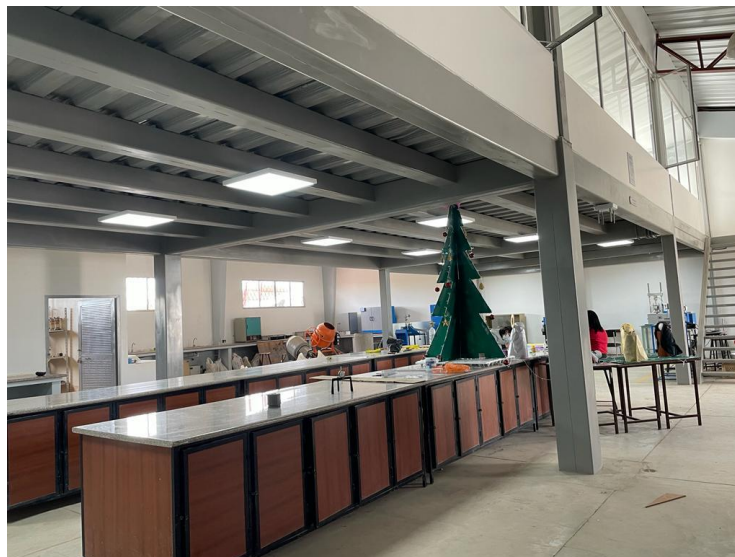
parroquia Ricaurte, cantón Cuenca, provincia del Azuay. Específicamente en la vía a Bibin con las siguientes coordenadas: 726145.00 m E, 9684167.00 m S.

Ilustración 1. *Ubicación de la zona de estudio*



Nota: tomado de Google Earth

Ilustración 2. *Entrepiso del laboratorio de ingenierías de la Universidad Católica de Cuenca*



Nota: tomado por autores

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Reforzar una viga de entrepiso con fibra de carbono para analizar la reducción de la vibración de la losa mediante métodos analíticos y experimentales.

1.5.2 Objetivos específicos

- Elaborar un análisis computacional de la estructura a través de softwares para estudiar el comportamiento del entrepiso.
- Realizar un modelo analítico para seleccionar la viga de acero con mayor flecha y reforzar con la fibra de carbono para reducir considerablemente las vibraciones.
- Generar una comparativa de los resultados obtenidos antes y después del reforzamiento mediante la elaboración de cuadros para interpretar la eficacia del método empleado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

2.1.1 Masa

Es la cantidad de materia que posee el cuerpo. La masa de un cuerpo es independiente de su localización. *(Reyes, 1998)*

2.1.2 Entrepiso

Los entrepisos son elementos rígidos. construidos en forma de vigas sucesivas apoyadas sobre muros, vigas o columnas, para separar dos ambientes. Pueden ser de cubierta o techo. *(Cobaleda Zapata et al., 1983)*

2.1.3 Vibración

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. *(White, 2010)*

2.1.4 Reforzamiento

Aumento de secciones o adición de materiales nuevos que aumenten la capacidad resistente de los elementos estructurales y de la estructura en su conjunto. *(Theurer et al., 2016)*

2.1.5 Resina Epóxica

Se trata de un polímero termoestable, derivado del petróleo, que por lo general se presenta como un líquido viscoso, el cual se endurece cuando es mezclado con un catalizador o endurecedor. Es parte de una de las clases más importantes de termoestables,

por lo que esta resina es ampliamente usada en materiales compuestos, reforzados con fibras, adhesivos y revestimientos de superficies, además de otras aplicaciones. (Rios, 2020)

2.1.6 Catalizador

Un catalizador es una sustancia (compuesto o elemento) capaz de acelerar (catalizador positivo) o retardar (catalizador negativo o inhibidor) una reacción química, permaneciendo éste mismo inalterado (no se consume durante la reacción). A este proceso se le llama catálisis. (Química, 2021)

2.1.7 Señal

Las señales eléctricas son llamadas también señales análogas. Pueden tener cualquier lectura dentro del rango y sólo están limitadas por las características de los instrumentos registradores e indicadores. Transmiten al controlador en forma continua los valores. (EcuRed, 2012)

2.1.8 Filtros

Puede definirse un filtro como cualquier dispositivo que modifica de un modo determinado una señal que pasa a través de él. (Miyara, 2004)

2.1.9 Frecuencia natural

La frecuencia natural es la frecuencia de oscilación libre sin estar excitado continuamente por un agente excitador. La frecuencia se mide en hercios (Hz), esto en honor a Heinrich Rudolf Hertz. Un hercio es la representación de un suceso repetido una vez por segundo (M. Feldmann et al., 2014)

2.1.10 Periodo natural

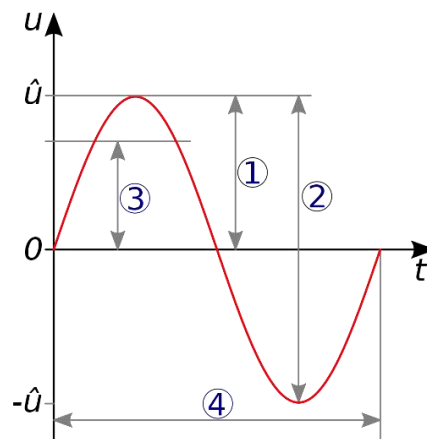
Es el tiempo requerido de un sistema no amortiguado para que éste complete un ciclo de vibración libre. El periodo se expresa en segundos por ciclo o simplemente en

segundos, entendiéndose tácitamente que se trata de segundos por ciclo. A este periodo se le denomina T_n . (Paz, 2021)

2.1.11 Amplitud

La amplitud de un movimiento oscilatorio, ondulatorio o señal electromagnética es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o casi periódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio. (Luis de la Cruz, 2016)

Ilustración 3. Amplitud de una onda



Nota: tomado de (Luis de la Cruz, 2016). 1. Amplitud. 2. Amplitud de pico a pico. 3. Media cuadrática. 4. Periodo

2.1.12 Atenuación

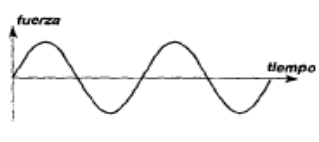
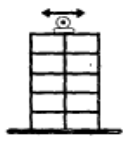
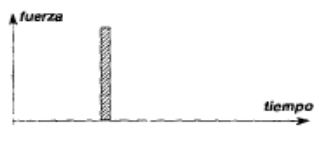
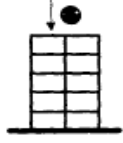

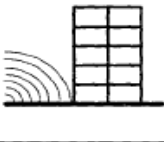
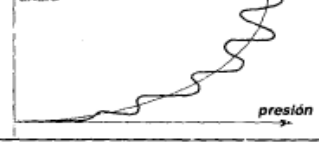
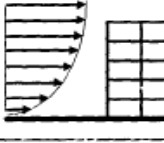
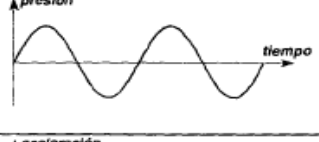
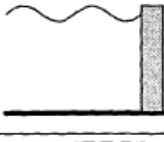

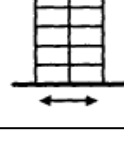
La atenuación reúne los efectos de absorción inelástica (en forma de calor), el cual expresa el decaimiento de la amplitud en la propagación de las ondas. La disipación de energía es medida como la energía disipada entre la energía pico almacenada en un ciclo. (Medina et al., 2016)

2.1.13 Excitación Dinámica

Una excitación es una acción de carácter dinámico cuando su variación con el tiempo es rápida y da origen a fuerzas de inercia comparables en magnitud con las fuerzas estáticas. (Cassano, 2009)

a) Tipos de Excitación Dinámica

Ilustración 4. Tipos de excitación dinámica

equipos mecánicos		
impacto		
explosiones		
viento		
olas		
sismos		

Nota: tomado de (Reyes, 1998)

2.1.14 Amortiguación

La amortiguación representa la energía disipada por un sistema vibratorio. El amortiguamiento total consiste en: (M. Feldmann et al., 2014)

- Amortiguación material y estructural.
- Amortiguación inducida por los muebles y los acabados.

- Distribución de energía a través de toda la estructura.

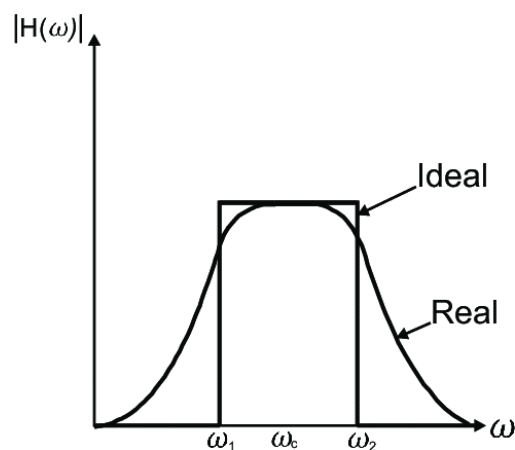
2.1.15 Rigidez

Se define como la relación entre fuerzas externas y las deformaciones que ellas inducen en el cuerpo. La rigidez es, por lo tanto, la relación entre las fuerzas y los desplazamientos y usualmente se denomina por medio de la letra k. (Reyes, 1998)

2.1.16 Bandas de paso

Permite el paso de las frecuencias comprendidas entre dos frecuencias ω_1 y ω_2 , denominadas frecuencia inferior de corte y frecuencia superior de corte, bloqueando las restantes. (Miyara, 2004)

Ilustración 5. Diagrama de amplitud para un filtro pasa banda ideal.

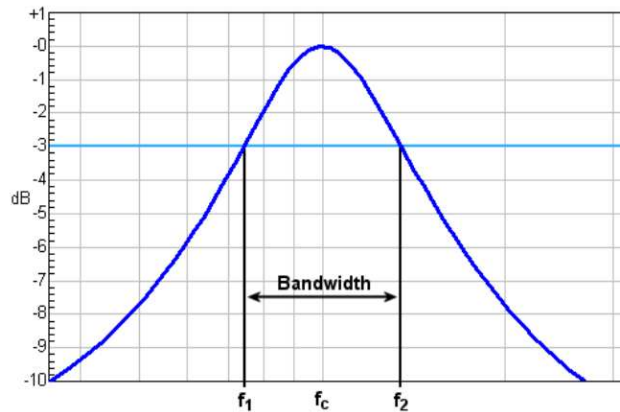


Nota: tomado de (Miyara, 2004)

2.1.17 Ancho de banda

Conocido como “BandWidth”. Está definido por la longitud, medida en hertzios, resultante de la diferencia entre la frecuencia de corte superior (f_2) y frecuencia de corte inferior (f_1) en la cual su atenuación al pasar a través del filtro se mantiene igual o inferior a tres decibelios comparada con la frecuencia central (f_c). Se expresa que un filtro posee mayor selectividad si las frecuencias de corte están más cerca de la frecuencia central o el ancho de banda del filtro es menor. (López Marín, 2003)

Ilustración 6. *Filtro pasa banda en la que se puede apreciar el ancho de banda y la frecuencia central.*



Nota: tomado de (López Marín, 2003)

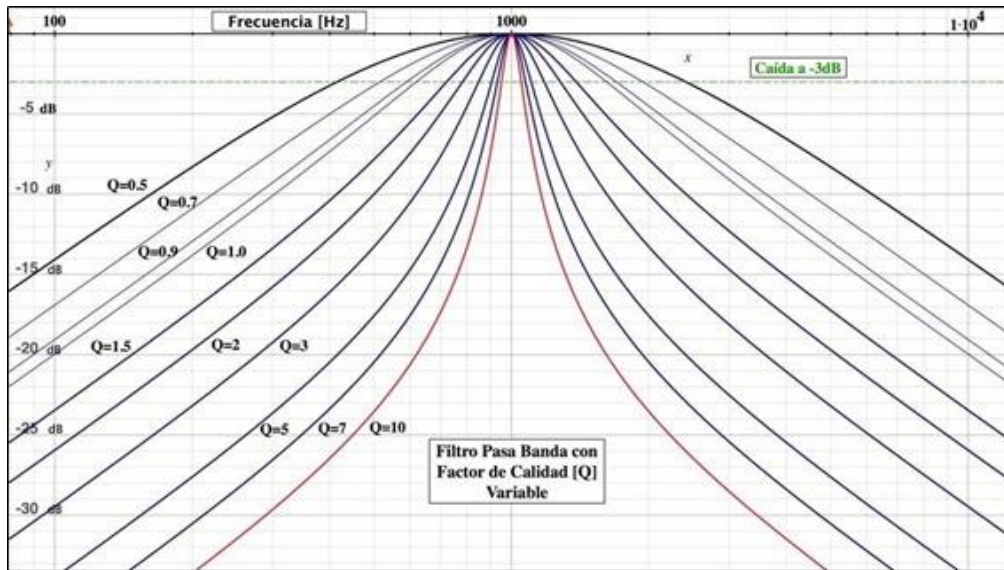
2.1.18 Masa Modal

Se considera a la masa modal como una propiedad de la vibración natural. Esto es necesario cuando se define el comportamiento dinámico de un sistema vibratorio (análisis modal). Una masa modal puede entenderse como una masa que se activa en un determinado modo de vibración.

2.1.19 Factor de Calidad

Especifica la calidad del filtro, es decir, la idealidad de su respuesta. El factor de calidad es la relación entre la frecuencia central de una banda atenuada y su ancho de banda; a mayor ancho de banda, menor factor de calidad poseerá el filtro. (López Marín, 2003)

Ilustración 7. Factor de calidad (Q).



Nota: tomado de (López Marín, 2003).

2.1.20 Selectividad

La selectividad representa la precisión del filtro al filtrar las frecuencias deseadas. Un filtro altamente selectivo se parecerá a un filtro ideal, mientras que un filtro menos selectivo dejará pasar o filtrará las frecuencias no deseadas. Una selectividad alta corresponde a un ancho de banda estrecho, por lo que se obtendrá un factor de calidad (Q) alto. Así mismo, para una selectividad baja, se puede utilizar un ancho de banda grande, lo que resulta en un factor de calidad (Q) bajo.

2.1.21 Aceleración

La aceleración es una magnitud física que se caracteriza por el cambio o variación de la velocidad de un cuerpo u objeto en un intervalo determinado de tiempo. Sus unidades están en $[m/s^2]$. (Kane & Sternheim, 1989)

2.1.22 Tejido de Fibra de Carbono

La fibra de carbono (fibrocarbono) es un material formado por fibras de 5-10 micras de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de

carbono están unidos entre sí en cristales que son más o menos alineados en paralelo al eje longitudinal de la fibra. La alineación de cristal da a la fibra de alta resistencia en función del volumen. Varios miles de fibras de carbono están trenzados para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela. *(Mariano, 2011)*

2.1.23 Fibra de carbono QuintumWrap-600

Es un tejido de fibras de carbono, de alta resistencia y de alto módulo. Este material es utilizado en conjunto con la resina epóxica para formar el sistema de polímero reforzado con fibras de carbono, usado para incrementar la resistencia y desempeño de los elementos estructurales. *(Quintum, 2020)*

a) Características y beneficios:

- Muy alta resistencia en relación al peso.
- Excelente resistencia a la deformación y fatiga. Soporta condiciones de carga cíclica y sostenida.
- Extremadamente durable. Resistencia extrema a un amplio rango de condiciones ambientales.
- Fácil de instalar, puede instalarse rápidamente aún en áreas de acceso limitado.
- No afecta el aspecto de las estructuras.
- Ofrece reparaciones extremadamente durables ya que el material no se corroe.
- Resistencia extrema al intemperismo y condiciones ambientales difíciles.
- Bajo impacto estético.

b) Datos técnicos:

- Orientación de la fibra: unidireccional
- Tejido estructural (peso): 604 g/m²
- Ancho: de 20cm a 50cm

- Hilo: 12k (12000 filamentos por hilo)
- Largo: 50 metros
- Espesor aproximado: 3 milímetros

c) Propiedades mecánicas

- Módulo de elasticidad a tracción: 1447997.02 kfg/cm²
- Módulo de elasticidad a flexión: 1325631.08 kfg/cm²

Imagen 1. *Fibra de carbono*



Nota: Fibra de carbono unidireccional. Elaboración propia

2.2. DISPOSITIVOS Y SOFTWARES EMPLEADOS EN EL PROYECTO

2.2.1 Sismómetro portátil de banda ancha “REF TEK, Colt”

Se ha usado un sismómetro de banda ancha compacto llamado “REF TEK, Colt” que proporciona datos de alta calidad; utilizando tres elementos mecánicos idénticos montados simétricamente en la base de la unidad. Las señales de salida analógicas del sismómetro son salidas de eje ortogonal Z, Y, X. La salida Z es la salida vertical, la salida del eje Y es la salida Norte-Sur y el eje X es la salida Este- Oeste. Es usado por científicos que realizan estudios de movimiento en la tierra como en estructuras. Presenta un diseño de circuito de retroalimentación electrónica de equilibrio de fuerza para controlar el ruido propio. Colt tiene la capacidad de medir el movimiento de cualquier excitación incluso

en los lugares más silenciosos; se adapta y se personifica la configuración de acuerdo a los rangos dinámicos de una manera rápida y sencilla. (Colt | REF TEK, s. f.)

El sistema de bloqueo de masa resistente a los golpes protege el instrumento durante el transporte a cualquier lugar de campo. Y, con una clasificación IP67, la lluvia, el granizo y la nieve no interferirán con su recopilación de datos. (Colt | REF TEK, s. f.)

Para el registro de las señales se ha conectado al sismómetro un registrador sísmico de banda ancha portátil de alta resolución “Wrangler” que presenta una funcionalidad de control de sensores de nueva generación, que incluye seis líneas de control de sensores digitales y una salida analógica para señales de calibración de sensores. (Wrangler | REF TEK, s. f.)

Ilustración 8. Sismómetro Ref Tek Colt y registrador sísmico Wrangler



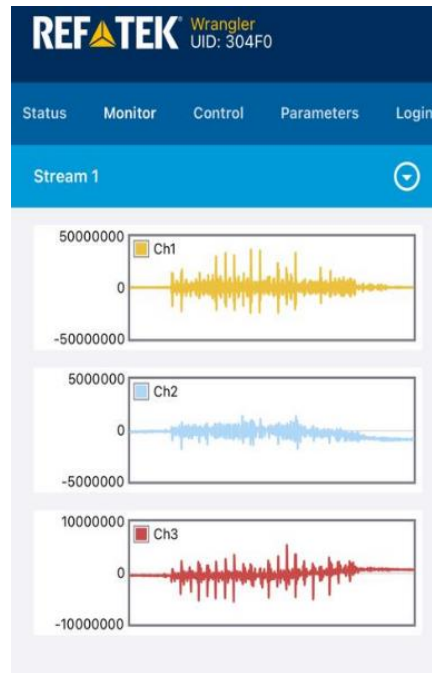
Nota: fotografías tomadas de (Colt | REF TEK, s. f.) y (Wrangler | REF TEK, s. f.)

2.2.2 Aplicación Móvil Ref Tek Recorder Setup

La aplicación se utiliza para comandar y controlar el Wrangler en el campo. Se conecta al adaptador wifi interno del mismo para configurar y actualizar la configuración. Se encuentra disponible para descarga gratuita en las tiendas Apple y Google Play. (software | TEK REF, s. f.)

A continuación, en la Ilustración 9 se visualiza la captura de pantalla de la aplicación Ref Tek Recorder Setup desde un teléfono móvil. La señal de color amarillo es la que se registra en el eje Z (vertical), la de color celeste en el eje Y (norte-sur) y la roja en el eje X (este-oeste).

Ilustración 9. *Aplicación móvil Ref Tek Recorder Setup.*

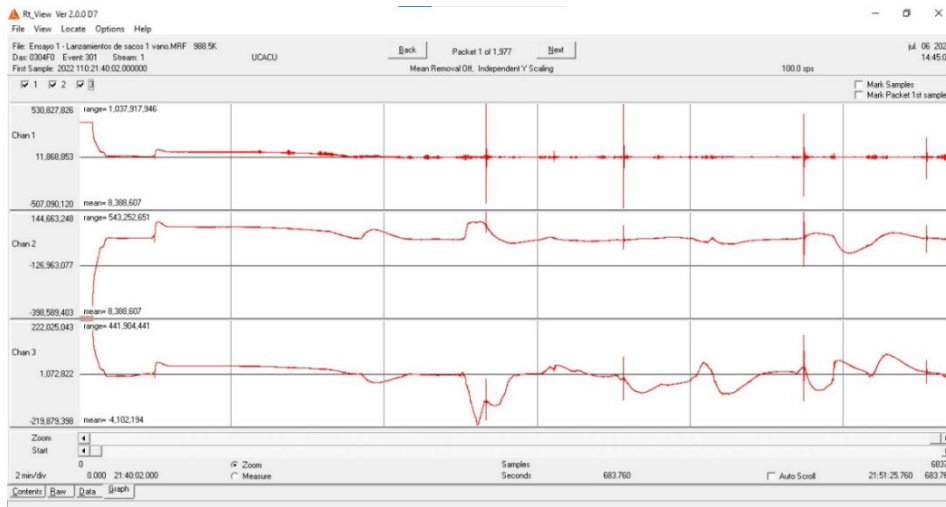


Nota: Pantalla de la aplicación cuando está en funcionamiento el sismómetro. Elaboración propia

2.2.3 Software Rt_View

La aplicación REF TEK Rt_View está diseñada para permitir la visualización de datos al extraerlos del dispositivo y presentarlos en forma legible en un computador como se puede apreciar en la Ilustración 10.

Ilustración 10. Software Rt_View

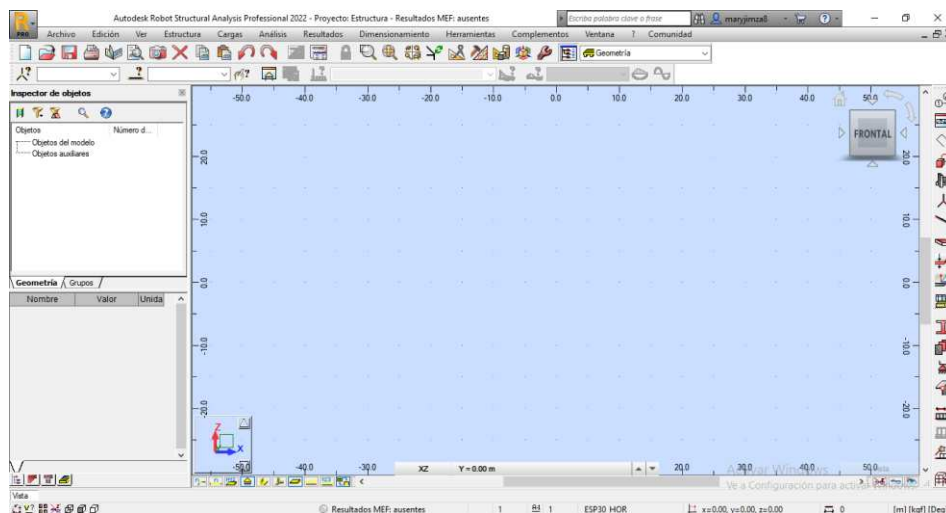


Nota: Visualización de la señal guardada en la aplicación del software. Elaboración propia

2.2.4 Robot Structural Analysis Professional

Robot Structural Analysis Professional es una herramienta avanzada de análisis estructural que permite realizar análisis lineales y no lineales de los modelos de construcción, puentes y otros tipos de estructuras industriales. Con esta herramienta se puede definir una amplia gama de tipos de análisis avanzados como análisis estáticos, modales, sísmicos, espectrales, armónicos y de historial de tiempo. (Autodesk, 2018)

Ilustración 11. Software Robot Structural



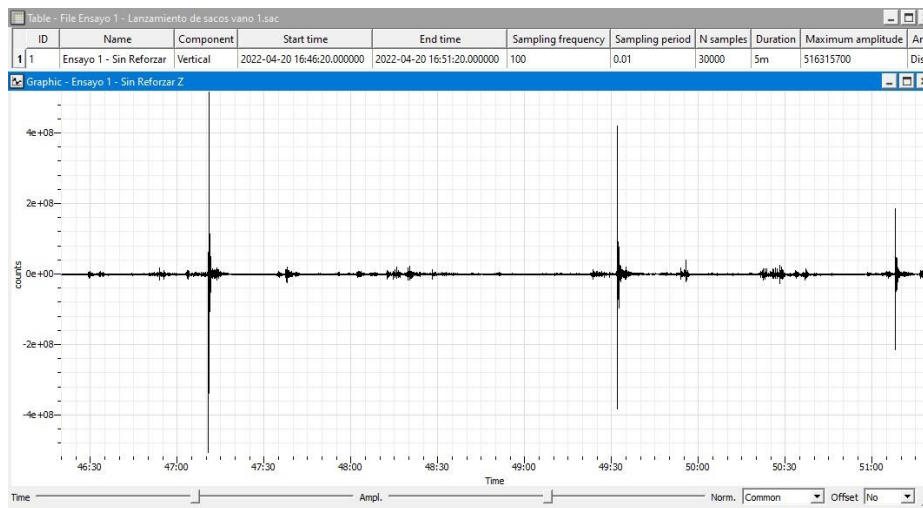
Nota: Captura de pantalla del software. Elaboración propia

2.2.5 Software Geopsy

Geopsy es una interfaz gráfica de usuario para organizar, visualizar y procesar señales geofísicas, también, es una base de datos utilizada para recopilar toda la información sobre las señales registradas. (*Manual de geopsy, 2008*)

Aunque las extensiones a otros campos científicos o de ingeniería son potencialmente posibles, este software se ha diseñado principalmente para la sismología y la prospección sísmica. Está disponible en todas las plataformas comunes (Linux, Mac OS X y Windows) y se publica de forma gratuita bajo la Licencia Pública GNU. (*Manual de geopsy, 2008*)

Ilustración 12. Software Geopsy



Nota: Captura de pantalla del software. Elaboración propia

2.3. MÉTODOS PARA EVALUAR VIBRACIONES

Según la “guía de diseño para el análisis de las vibraciones en forjados” (*M. Feldmann et al., 2014*) existen varios métodos que se detallan a continuación:

2.3.1 Primer método: Frecuencia natural y Masa modal para el caso de vigas

Para este método se puede calcular la frecuencia natural propia de una viga mediante las condiciones de apoyo de la Tabla 1, siendo:

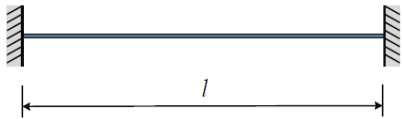
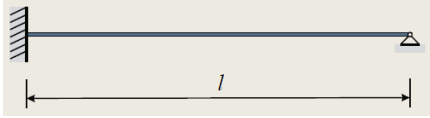
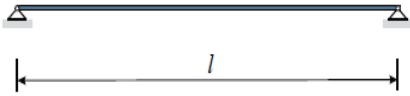
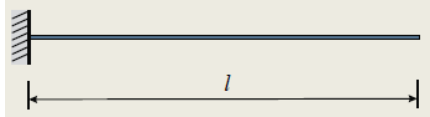
E = módulo de Young [N/m²]

I = Momento de inercia [m⁴]

μ = Masa distribuida del forjado [kg/m]

l = longitud de la viga [m]

Tabla 1. Determinación de la primera frecuencia propia de vigas

Condiciones de apoyo	Frecuencia natural	Masa modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.37 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.2 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.49 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.24 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.64 \mu l$

Nota: tomado de (Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann et al., s. f.)

2.3.2 Segundo método: Enfoque del peso propio para el cálculo de la frecuencia natural

Este método tiene por objetivo una aproximación de los casos de deformación máxima $\delta_{m\acute{a}x}$ debida a la masa m que ya se ha calculado.

Tiene por origen la ecuación general de la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

Su rigidez se le puede aproximar por medio de una suposición:

$$K = \frac{Mg}{\frac{3}{4}\delta} \quad (2)$$

Donde:

M = la masa total del sistema vibratorio (kg).

g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

$\frac{3}{4}\delta$ = deformación media (mm).

Entonces la frecuencia natural aproximada es:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4g}{3\delta_{m\acute{a}x}}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_{m\acute{a}x} [mm]}} \quad (3)$$

$\delta_{m\acute{a}x}$ es la máxima deformación producida por la carga en relación con la masa m .

2.3.3 Amortiguación

Para calcular la amortiguación total ésta guía de diseño presenta un listado de porcentajes según amortiguaciones estructurales, mobiliarias y sus terminaciones, como se puede observar en la siguiente tabla 2:

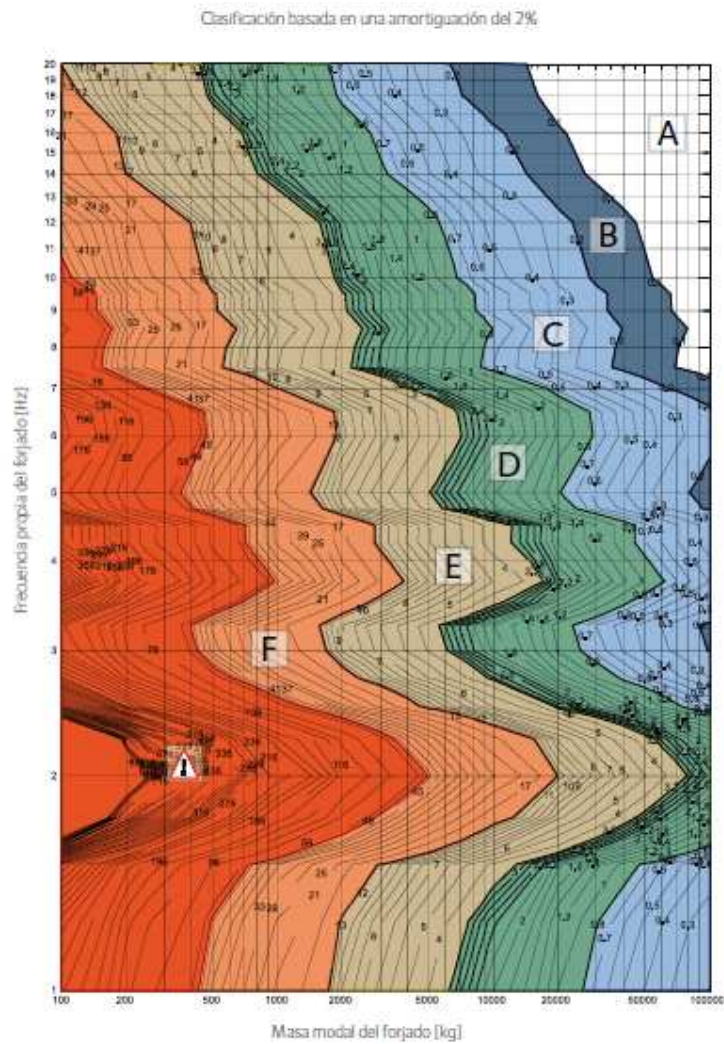
Tabla 2. *Determinación de los porcentajes de amortiguación.*

Tipo	Amortiguación (% de la amortiguación crítica)
Amortiguación estructural D1	
Madera	6%
Hormigón	2%
Acero	1%
Mixta (Hormigón – Acero)	1%
Amortiguación debida al mobiliario D2	
Oficina tradicional para 1 a 3 personas con tabiques de separación	2%
Oficina sin papeles	0%
Oficina en planta diáfana	1%
Biblioteca	1%
Casas	1%
Escuelas	0%
Gimnasios	0%
Amortiguación debida a terminaciones D3	
Cielos rasos bajo el forjado	1%
Parquet flotante	0%
Capa de compresión	1%
Amortiguación total D = D1 + D2 + D3	

Nota: tomado de (Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann et al., s. f.)

Según el porcentaje de amortiguación se determina el diagrama de clasificación. Estos diagramas tienen como eje X la masa modal y como eje Y la frecuencia natural obtenida. Por ejemplo, para una amortiguación del 2% se utiliza el diagrama de la Ilustración 13.

Ilustración 13. OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 2%:



Nota: tomado de (Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann et al., s. f.)

En el Anexo 2 se encuentran los diferentes diagramas según el porcentaje de amortiguación.

2.3.4 Clasificación de la respuesta del forjado y recomendaciones

La guía de diseño nos proporciona una clasificación de respuesta en base al resultado del diagrama mencionado en el ítem anterior, para verificar si la estructura se encuentra en una clase recomendable. En la Tabla 3 se presenta dichas clasificaciones y recomendaciones:

Tabla 3. Clasificación de la respuesta del forjado y recomendaciones para la aplicación de clases.

Clase	OS-RMS90		Función del forjado									
	Límite Inferior	Límite Superior	Zona de Trabajo Crítica	Salud	Educación	Residencial	Oficina	Reunión	Comercio	Hotel	Industrial	Deporte
A	0.0	0.1	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
B	0.1	0.2	Crítica	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
C	0.2	0.8	No recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
D	0.8	3.2	No recomendada	Crítica	Crítica	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
E	3.2	12.8	No recomendada	No recomendada	No recomendada	Crítica	Crítica	Crítica	Crítica	Crítica	Recomendada	Recomendada
F	12.8	51.2	No recomendada	No recomendada	No recomendada	No recomendada	No recomendada	No recomendada	No recomendada	No recomendada	Crítica	Crítica



Nota: tomado de (Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann et al., s. f.)

2.4. CRITERIOS DE FIABILIDAD DEL SESAME PARA

RESULTADOS

SESAME es un proyecto que fue creado en Europa en el año 2001, tiene como objetivo mitigar el riesgo sísmico en las áreas urbanas del continente. Después de varios estudios y ensayos realizados, en el año 2004 publicaron una guía sobre la aplicación del método de razones espectrales, en el cual detallan todos los procedimientos y parámetros que se deben tomar a consideración al momento de realizar un estudio o ensayo, como también, los criterios del procesamiento e interpretación de resultados.

Los criterios que se detallan a continuación son de gran importancia ya que permite garantizar la confiabilidad de los resultados en base a los datos obtenidos en

campo, con el objetivo de comprobar la frecuencia y periodo fundamental de los ensayos realizados.

2.4.1 Criterios para una curva fiable:

- $f_0 > \frac{10}{l_w}$ (4)

- $n_c(f_0) > 200$ (5)

- $\sigma_A(f_0) < 2$ para $0.5 * f_0 < f < 2 * f_0$ si $f_0 > 0.5$ Hz (6)

- $\sigma_A(f_0) < 3$ para $0.5 * f_0 < f < 2 * f_0$ si $f_0 < 0.5$ Hz (7)

2.4.2 Criterios para un pico claro

- $\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0 \right] \frac{A_H}{V}(f^-) < \frac{A_0}{2}$ (8)

- $\exists f^+ \in [f_0, 4 * f_0] \frac{A_H}{V}(f^+) < \frac{A_0}{2}$ (9)

- $A_0 > 2$ (10)

- $f_{peak} * \left[\frac{A_H}{V}(f) \pm \sigma_A(f_0) \right] = f_0 \pm 5\%$ (11)

- $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ (12)

- $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ (13)

Donde:

f_0 = frecuencia del peak (Hz).

l_w = longitud de la ventana (segundos).

n_w = número de ventanas seleccionadas para la curva.

$n_c = l_w * n_w * f_0$ número de ciclos significativos.

f = frecuencia actual (robot)

A_0 = amplitud a la frecuencia pico

$\sigma_A(f_0)$ = desviación estándar de la curva; es el factor por el cual la curva debe multiplicarse o dividirse.

$\frac{A_H}{V}(f)$ = amplitud de la curva H/V a la frecuencia.

f^- = frecuencias entre $f_0/4$ y f_0 .

f^+ = frecuencias entre f_0 y $4*f_0$.

σ_f = desviación estándar de la frecuencia peak de H/V.

$\theta(f_0)$ = valor umbral para la condición de estabilidad.

Tabla 4. *Valores de umbral para un pico claro*

Valores de umbral para $\sigma_A(f_0)$					
Rango de frecuencia (Hz)	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ para $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.3	0.25	0.20

Nota: tomado de (Acerra et al., 2008)

El cumplimiento o no de todos los criterios del proyecto SESAME no define que los resultados sean correctos o incorrectos, lo que busca es disminuir la probabilidad de errores.

2.4.3 Duración de grabación

Las condiciones mínimas para una duración recomendada por el SESAME se presentan en la Tabla 5 para diferentes valores de frecuencias con el objetivo de que por lo menos existan por cada ventana 10 ciclos significativos.

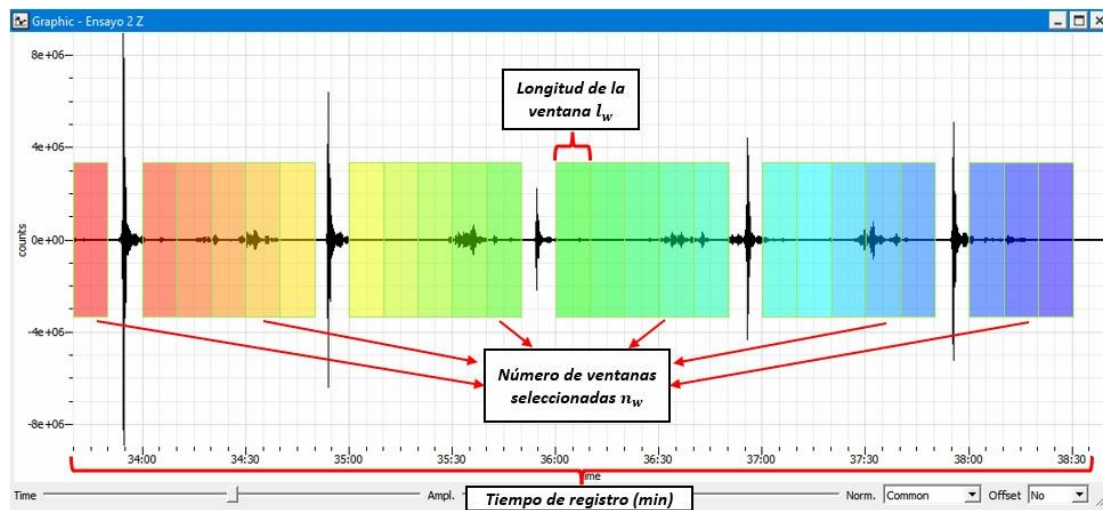
Tabla 5. Duración mínima de grabación recomendada por el SESAME

Frecuencia f_0 (Hz)	Valor mínimo para l_w (seg)	Número mínimo significativo de ciclos n_c	Número mínimo de ventanas	Mínima duración de la señal (seg)	Tiempo recomendado para el registro (min)
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Nota: tomado de (Acerra et al., 2008)

Por ejemplo; para un pico de 10 Hz, debe existir por lo menos 10 ventanas de 5 segundos cada una y se debe registrar un tiempo de grabación mínimo de 2 minutos.

Ilustración 14. Ejemplo de duración de grabación



Nota: tiempo de registro: 5 minutos, número de ventanas: 24, longitud de cada ventana: 10 segundos

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

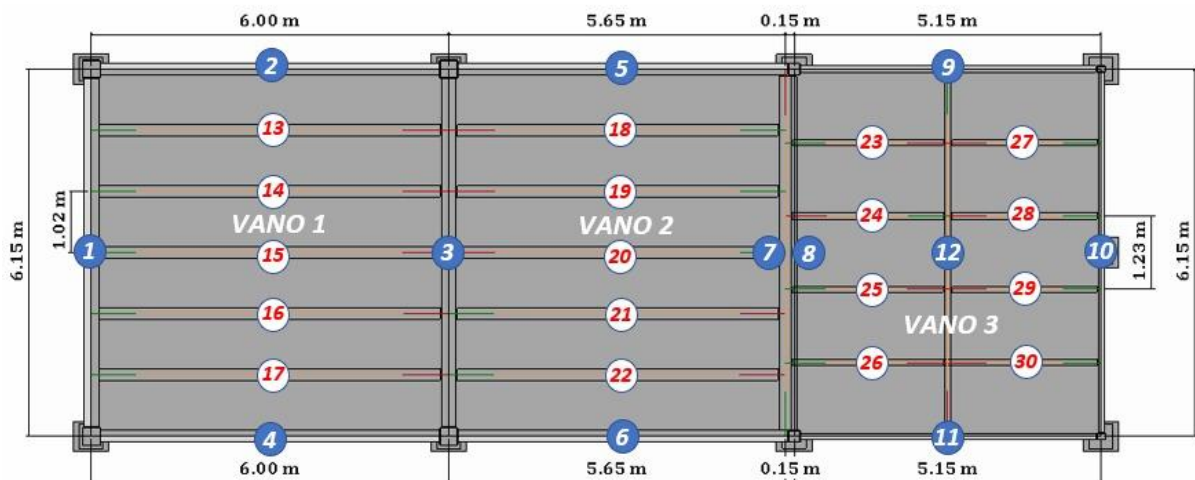
3.1. Antecedentes

3.1.1 Estructura del entrepiso

El entrepiso de oficinas del laboratorio de ingenierías (Ilustración 9) salva un vano de 6.15 metros entre vigas de borde. Las vigas secundarias en el vano 1 y 2 son perfiles de acero A36 de sección 20x20 cm y tienen una separación de 1.02 metros entre vigas, por lo contrario, las vigas secundarias del vano 3 son del mismo tipo de material, pero de sección 20x10 cm con una separación de 1.23 metros. Tiene una losa de 10cm con una placa colaborante, cabe mencionar que no existen pernos de corte entre la placa y la viga, por lo que no trabajan como sección mixta. Los planos detallados de la estructura se encuentran en el Anexo 7.

A continuación, en la Ilustración 15 se detallan los números de vigas y vanos para las menciones que se realizarán posteriormente

Ilustración 15. Vista en planta del entrepiso



Nota: Entrepiso modelado en el software Revit con la numeración detallada de las vigas y vanos. Elaboración propia

a) Propiedades mecánicas de los materiales

En la siguiente Tabla 6 se detallan las propiedades del Acero y del Hormigón que fueron utilizados en el método de cálculo manual aproximado según la guía de diseño para el análisis de las vibraciones en forjados, método computacional y método de trabajo in situ:

Tabla 6. *Propiedades mecánicas de los materiales.*

MATERIALES			
Acero A36	Simbología	Valor	Unidad
Esfuerzo de fluencia del acero estructural	f_y	2531	kgf / cm ²
Esfuerzo último del acero estructural	f_u	4000	kgf / cm ²
Módulo de elasticidad del acero	E_s	2038902	kgf / cm ²
Densidad	ρ	7850	kgf / m ³
Coefficiente de poisson	ν	0.3	--
Hormigón			
Esfuerzo de compresión del concreto de losa	f'_c	240	kgf / cm ²
Módulo de elasticidad del concreto de losa	E_c	233928	kgf / cm ²
Densidad	ρ	2400	kgf / m ³
Coefficiente de poisson	ν	0.2	--

Nota: propiedades mecánicas del acero y del hormigón utilizados en el proyecto. Elaboración propia

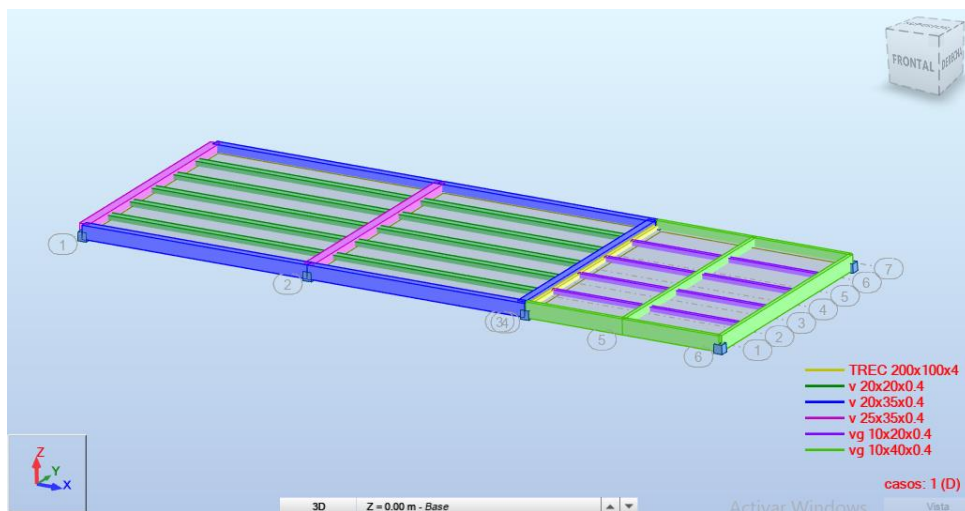
La metodología a seguir para obtener la frecuencia natural de la estructura de entrepiso del laboratorio de ingenierías parte de tres procesos diferentes; el primer método computacional consiste en realizar un análisis estructural con un modelo analítico en el software Robot Structural, el segundo mediante un método manual aproximado según la guía de diseño para el análisis de las vibraciones en forjados y el tercer método mediante ensayos realizados con registros in situ del forjado con el sismómetro Ref Tek Colt.

Los valores de frecuencia obtenidos con los diferentes procesos deberán ser lo más similares posibles para partir de un valor confiable en cuanto a la frecuencia natural del entrepiso sin reforzamiento y poder validar las mediciones del sismómetro antes y después de colocar la fibra de carbono.

3.2. Método Computacional

La metodología computacional se realizó a través del software Robot Structural el cual nos permite modelar la estructura del entrepiso con las normas y parámetros que se configuran inicialmente. Este software no es complejo de utilizar y nos facilita todos los catálogos existentes de diferentes secciones para la modelación con el objetivo de obtener la frecuencia natural y la masa total de la estructura. El proceso detallado se encuentra en el Anexo 1.

Ilustración 16. Modelado computacional en Robot Structural.



Nota: Elaboración propia

3.3. Método de cálculo manual aproximado según la Guía de diseño para el análisis de las vibraciones en forjados

Para garantizar el confort de los ocupantes que dan uso a una estructura; la guía de diseño (M. Feldmann et al., 2014) nos proporciona métodos para evaluar la respuesta

a vibraciones provocadas por cualquier factor externo. En este proyecto se utilizarán 2 métodos para el cálculo de la frecuencia natural que se detalla a continuación y un diagrama de clasificación según el apartado 2.3.5

3.3.1 Primer método: Frecuencia natural y Masa modal para el caso de vigas

Se aplicaron las siguientes condiciones y fórmulas para el primer método:

- Condición de Apoyo:

Empotrada – Empotrada

- Frecuencia Natural:

$$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.37\mu l^4}} \quad (14)$$

- Masa Modal:

$$M_{mod} = 0.41 \mu l \quad (15)$$

3.3.2 Segundo método: Enfoque del peso propio para el cálculo de la frecuencia

Para el segundo método se aplicaron las siguientes fórmulas:

Deformación de losa unidireccional con carga distribuida en toda la luz:

$$\delta_{losa} = \frac{5wL^2}{384EI} \quad (16)$$

Deformación de la viga doblemente empotrada con carga distribuida en toda la luz:

$$\delta_{viga} = \frac{wL^2}{384EI} \quad (17)$$

Máxima deformación debida a la carga en relación con la masa:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \delta_{losa} + \delta_{viga} \quad (18)$$

Frecuencia Natural:

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_{m\acute{a}x}}} \quad (19)$$

Masa distribuida del forjado:

$$\mu = \frac{p}{g} \quad (20)$$

Masa total del sistema vibratorio:

$$M = \mu * l \quad (21)$$

Masa Modal:

$$M_{mod} = M \left[\frac{\delta_{viga}^2 + \delta_{losa}^2}{2 \delta_{m\acute{a}x}^2} + \frac{8}{\pi^2} * \frac{\delta_{viga} + \delta_{losa}}{\delta_{m\acute{a}x}^2} \right] \quad (22)$$

Rigidez de la estructura:

$$K = \frac{M * g}{\frac{3}{4} \delta_{m\acute{a}x}} \quad (23)$$

3.3.3 Método del diagrama de clasificación

a) Masa Modal Total:

La masa modal que se calcula con los métodos anteriores es únicamente de la viga más crítica analizada, para este método se requiere la masa modal de toda la estructura que se obtiene mediante el modelamiento en el software Robot Structural.

b) Amortiguación

Se verifican los valores de D_1 , D_2 y D_3 según las clasificaciones de la Tabla 2.

La amortiguación total del sistema vibratorio será la suma de estas tres:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad (24)$$

c) Diagrama basado en la amortiguación y recomendaciones

Con el resultado de la frecuencia natural y masa modal obtenida en el método computacional se procede a seleccionar el diagrama correspondiente a la amortiguación y se trazan los ejes X y Y; de esta manera se podrá visualizar si la estructura se encuentra en un rango recomendado o no según la Tabla 3.

3.4. Metodología de trabajo in situ.

3.4.1 Instalación del dispositivo Ref Tek Colt

Para los ensayos y registros de datos se procede a instalar el dispositivo de la siguiente manera:

- Con la ayuda de un flexómetro se determina la ubicación precisa del lugar (centro del vano) y se ubica el dispositivo.

Imagen 2. *Medición exacta con un flexómetro*



- Se comprueba la horizontalidad con el nivel de burbuja que se encuentra en la parte superior y se controla con los tornillos de nivelación que están en la parte inferior, y se ajusta con la tuerca de seguridad una vez que esté totalmente nivelado.

Imagen 3. Nivelación del dispositivo

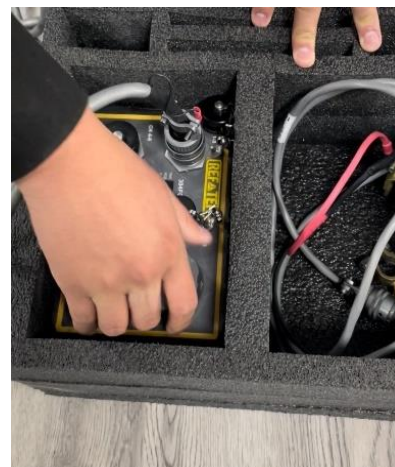


- Una vez nivelado el sensor, se procede a orientarlo con el norte geográfico y se conecta el cable desde el sensor hacia la entrada correspondiente (CH 1-3) del digitalizador.

Imagen 4. Orientación con el norte geográfico.



Imagen 5. Conexión con el digitalizador.



- Como último paso, se conecta el cable en la entrada PWR a una fuente de energía (batería Bosch S4) y se verifica que se enciendan todos los focos verdes del digitalizador. Se debe esperar un tiempo prudente para que el sensor se estabilice y se pueda visualizar mediante la aplicación móvil Ref Tek Recorder Setup.

Imagen 6. *Entrada PWR.*



Imagen 7. *Dispositivo encendido correctamente.*



Imagen 8. *Sensor, fuente de energía, digitalizador.*



- Antes de comenzar con los ensayos, se verifica la configuración en la misma aplicación móvil antes mencionada (ver Anexo 3) y se procede con la grabación, cabe recalcar que los datos se guardarán en la memoria externa ingresada en el digitalizador.

3.4.2 Descripción de los ensayos realizados in situ antes del reforzamiento

En total se realizaron 14 ensayos provocando diferentes excitaciones dinámicas de impacto y de tipo sísmicas. Éstas generan vibraciones forzadas con el objetivo de obtener la frecuencia natural de la estructura y registrar con el dispositivo de banda ancha Ref Tek Colt las mediciones y toma datos durante 5 minutos de grabación por ensayo. A continuación, se detallan los ensayos realizados:

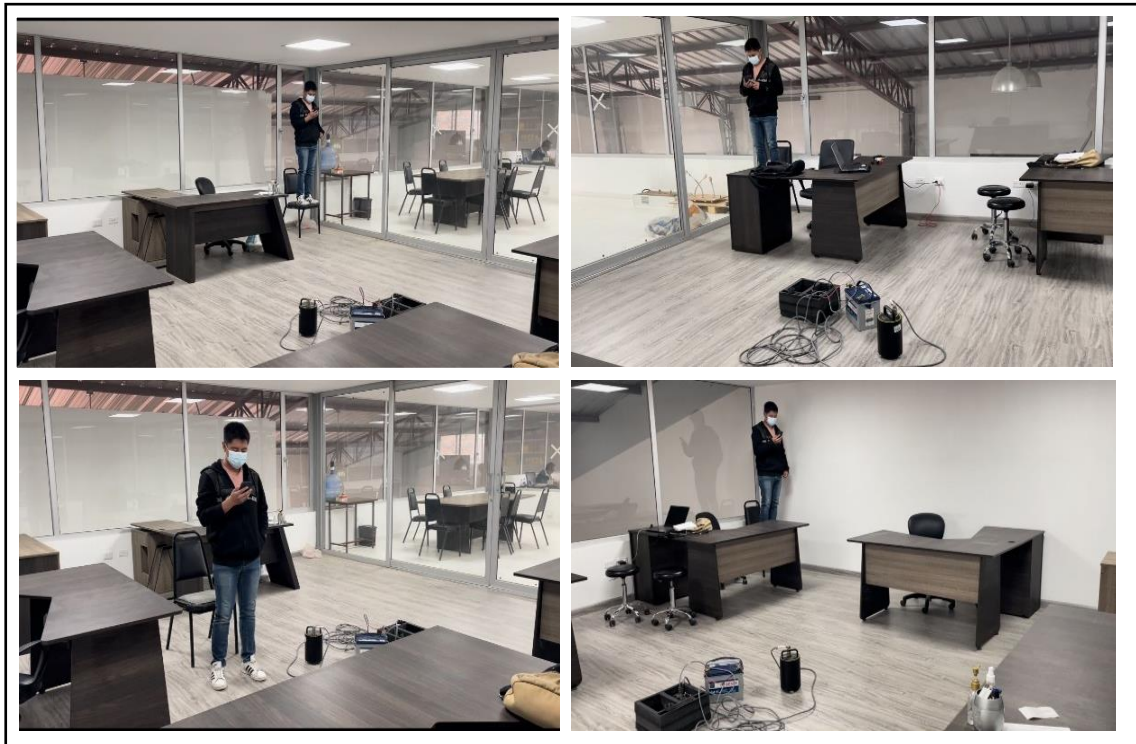
- **Ensayo 1:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 1, se provocaron tres excitaciones en la estructura mediante el impacto de un saco de 10 kg a una altura de 1 metro; el primer lanzamiento se lo realizó sobre la viga #15 a 50 centímetros del dispositivo, el segundo sobre la viga #14 paralelo al primer lanzamiento y el tercero sobre la viga #13 a 2 metros de sismómetro. Entre cada impacto hubo un intervalo de tiempo de 2 minutos, dando un total de grabación de 5 minutos.

Imagen 9. *Ensayo 1, lanzamiento de un saco de 10 kg*



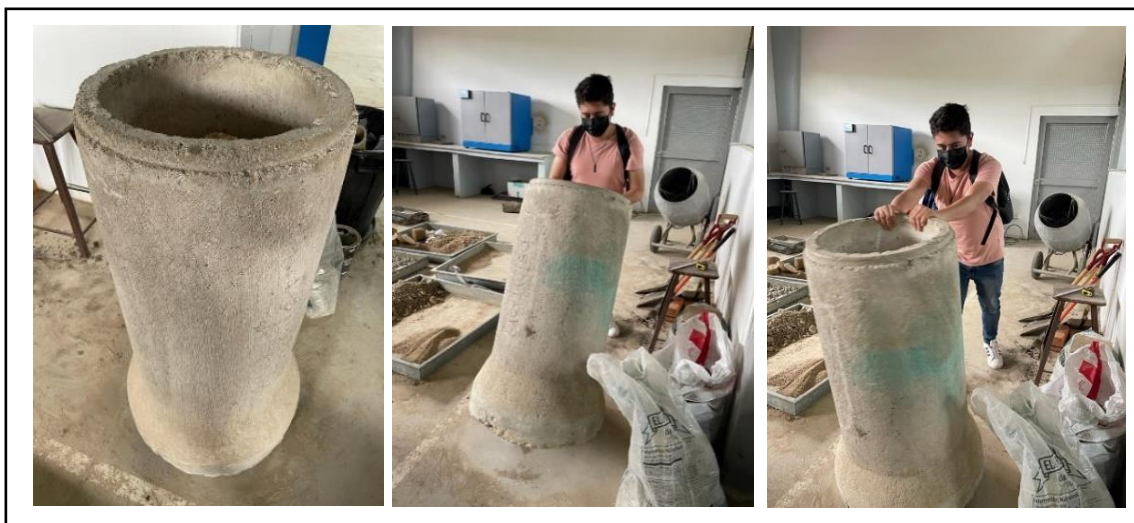
- **Ensayo 2:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 1, se provocó excitaciones a la estructura mediante saltos desde una silla que tiene una altura de 45 centímetros y con el peso de una persona de 74 kg. Se realizaron 5 saltos; el primero fue en el centro del vano y los 4 restantes en cada una de las esquinas del mismo con intervalos de tiempo entre cada salto de 1 minuto.

Imagen 10. *Ensayo 2, saltos vano 1*



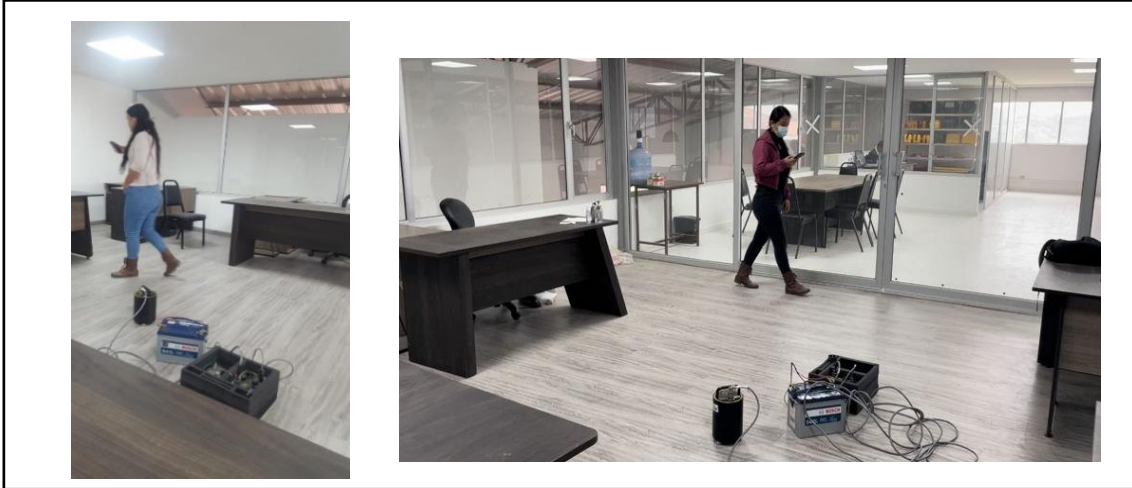
- **Ensayo 3:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 1, se provocó una excitación al entrepiso moviendo 5 veces un tubo de hormigón sin refuerzo en la planta baja de la estructura durante 15 segundos por cada minuto. Dando un total de grabación de 5 minutos.

Imagen 11. *Ensayo 3, Tubo de hormigón.*



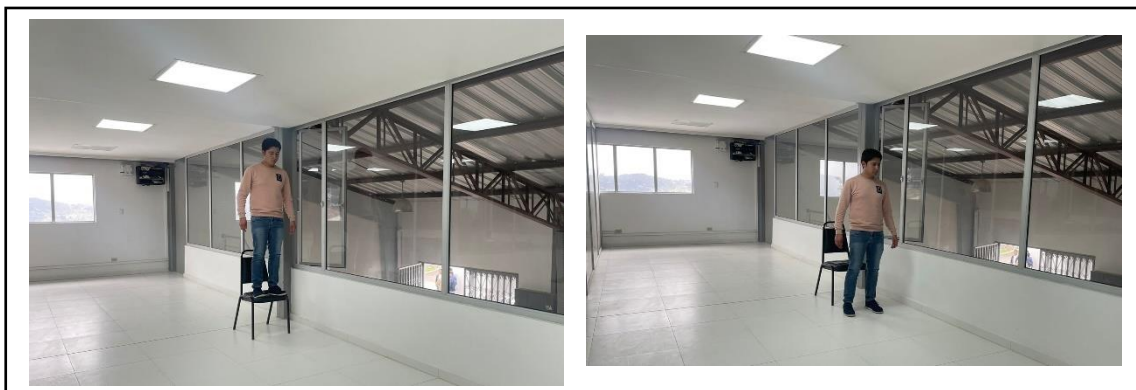
- **Ensayo 4:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 1, se provocó una excitación a la estructura mediante el paso constante de una persona que pesa 66 kg durante 5 minutos.

Imagen 12. *Ensayo 4, Paso peatonal constante.*



- **Ensayo 5:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 2; se provocó excitaciones a la estructura mediante saltos desde una silla que tiene una altura de 45 centímetros y con el peso de una persona de 74 kg. Se realizaron 5 saltos; el primero fue en el centro del vano y los 4 restantes en cada una de las esquinas del mismo con intervalos de tiempo entre cada salto de 1 minuto.

Imagen 13. *Ensayo 5, saltos vano 2*



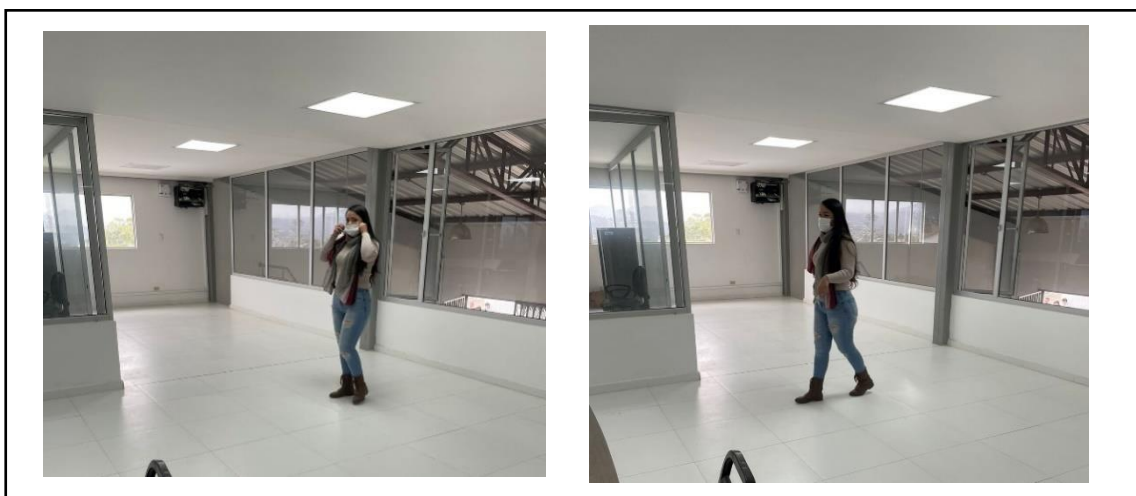
- **Ensayo 6:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 2; se provocó una excitación al entrepiso moviendo 5 veces un tubo de hormigón sin refuerzo en la planta baja de la estructura durante 15 segundos por cada minuto. Dando un total de grabación de 5 minutos.

Imagen 14. *Tubo de hormigón vano 2*



- **Ensayo 7:** con el dispositivo ubicado en el centro del vano 2; se provocó una excitación a la estructura mediante el paso constante de una persona que pesa 66 kg durante 5 minutos.

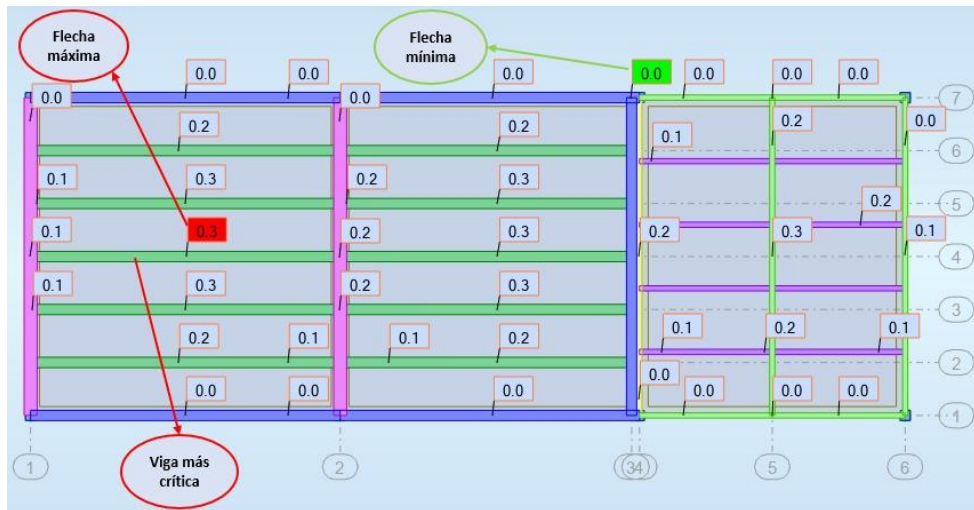
Imagen 15. *Ensayo 7, paso peatonal constante.*



3.4.3 Colocación de la fibra de carbono en la viga más crítica

Mediante el modelado analítico se obtuvo la viga con mayor flecha siendo ésta la más crítica (Ilustración 17), la cual se encuentra en el vano 1, tiene una luz de 6 metros y su sección es de 20x20x0.4cm.

Ilustración 17. Modelado analítico, flecha máxima

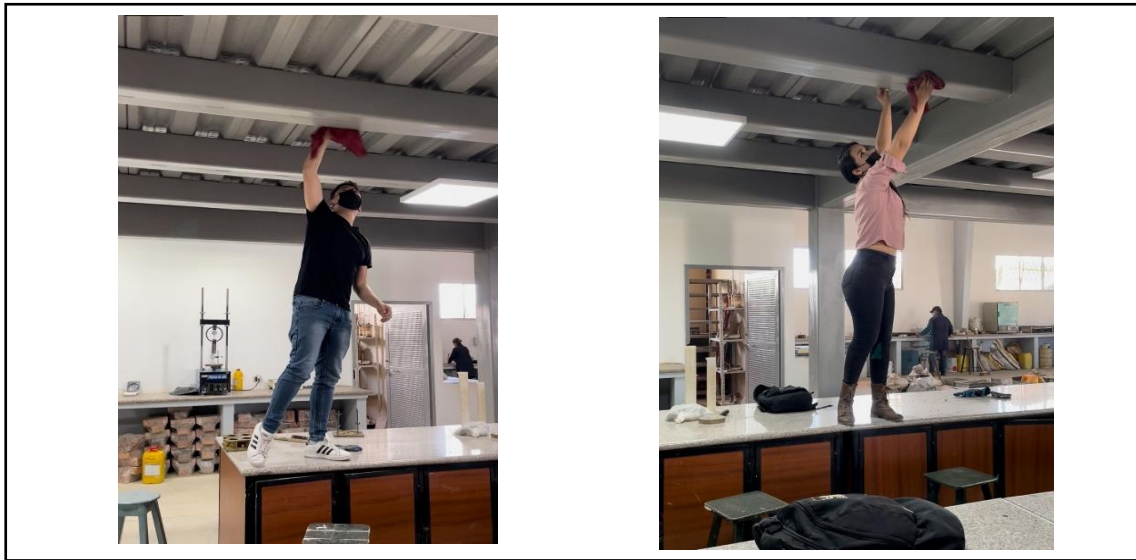


Nota: tomado de Robot Structural (unidad: centímetros). Elaboración propia

Para la colocación del tejido de Fibra de Carbono (quintumwrap – 600) unidireccional, se realizaron los siguientes pasos que se detallan a continuación:

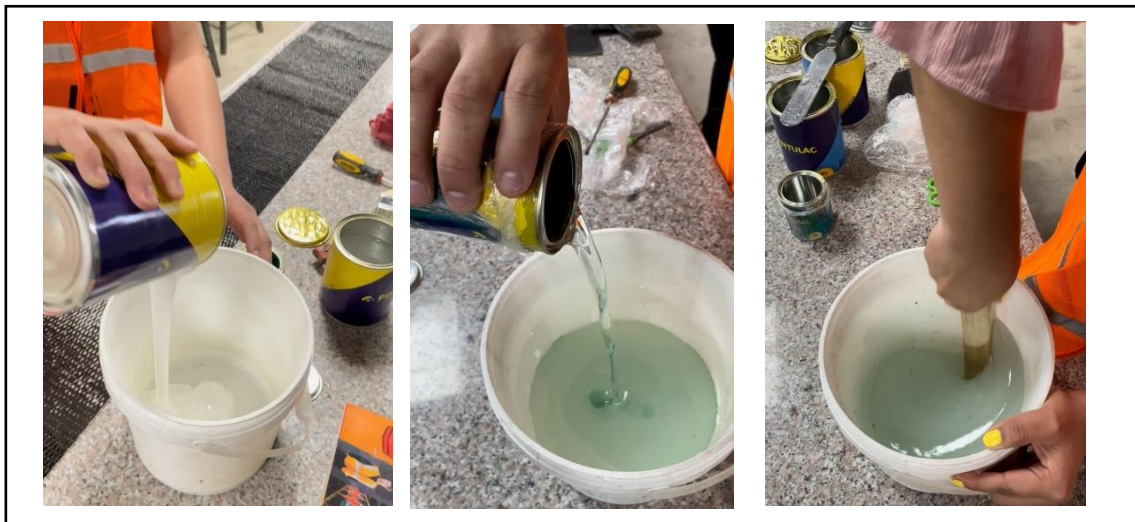
- La superficie de la viga debe estar completamente limpia y seca, libre de polvos, grasas o cualquier otra sustancia que impide la adherencia de la fibra, para ello se procedió a limpiar con cepillos y franelas húmedas.

Imagen 16. *Limpieza de la viga.*



- Una vez que la superficie esté lista, en un recipiente limpio se procede a realizar la mezcla de la Resina Epóxica Q102R con el catalizador Epóxico Q102H, de manera que nos quede una sustancia homogénea.

Imagen 17. *Mezcla de la resina con el catalizador*



- Con la ayuda de brochas se procede a aplicar la Resina sobre la fibra de carbono de manera que quede cubierta completamente. Se recomienda que la aplicación

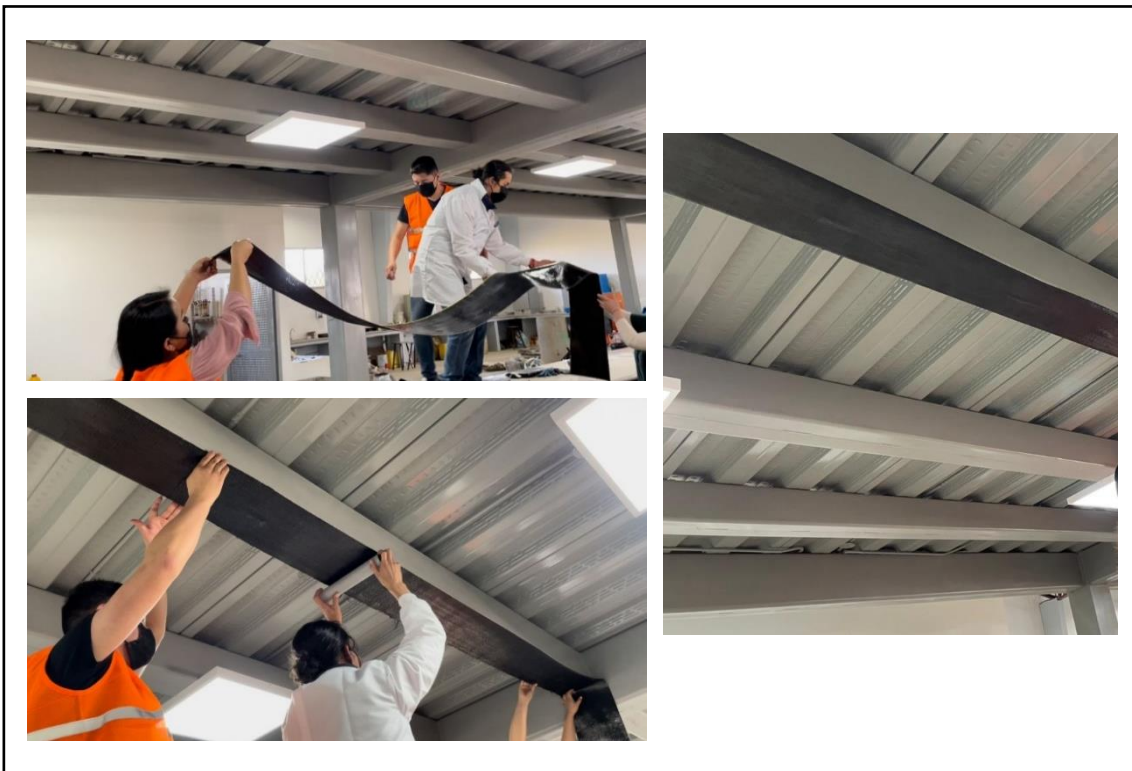
sea antes de los 30 minutos después de la mezcla debido a que su proceso de polimerización inicia en ese intervalo de tiempo.

Imagen 18. *Aplicación de la Resina sobre las fibras de carbono.*



- Inmediatamente se coloca en la parte inferior de la viga y con la ayuda de un rodillo se presiona hasta que se elimine todos los espacios vacíos de aire.

Imagen 19. *Colocación de la fibra en la viga.*



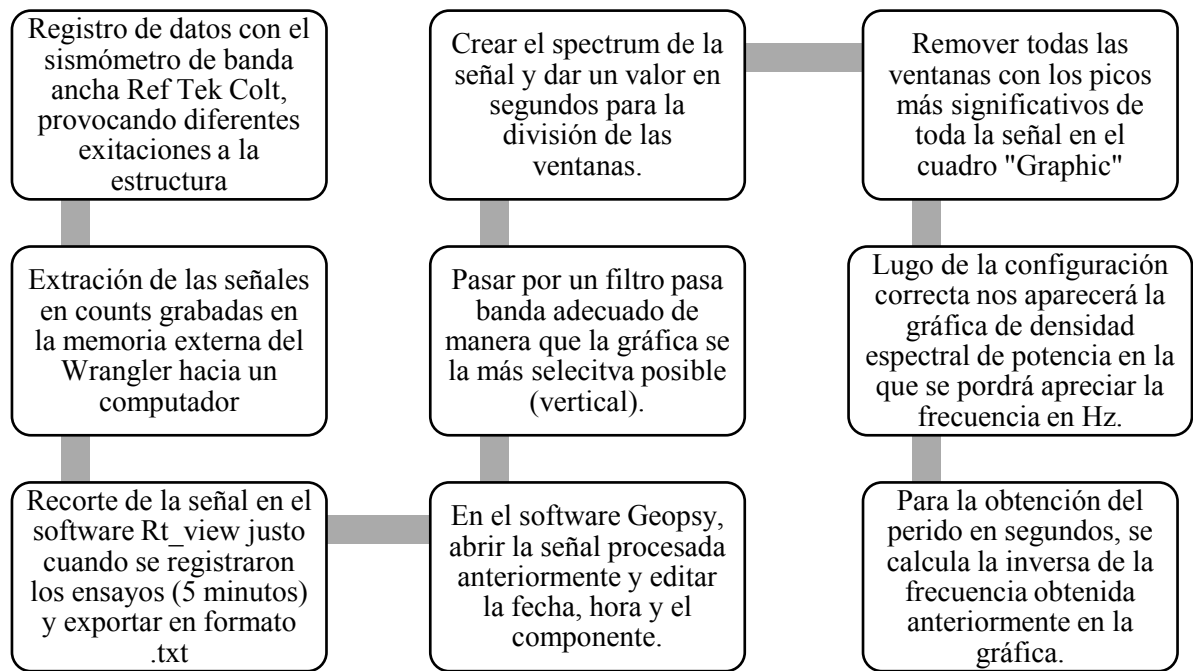
3.4.4 Ensayos realizados en campo después del reforzamiento

Los ensayos realizados después del reforzamiento de la viga más crítica se hicieron con los mismos parámetros y criterios utilizados en los ensayos anteriores con el objetivo de hacer una comparativa entre los mismos, los cuales se muestran en el capítulo IV.

3.5. Metodología de procesamiento de datos obtenidos in situ

Para el procesamiento de los datos crudos obtenidos del Ref Tek Cold se realizó con la ayuda de los softwares Rt_view y Geopsy, el proceso a seguir serán los siguientes como se visualizan en la Ilustración 18.

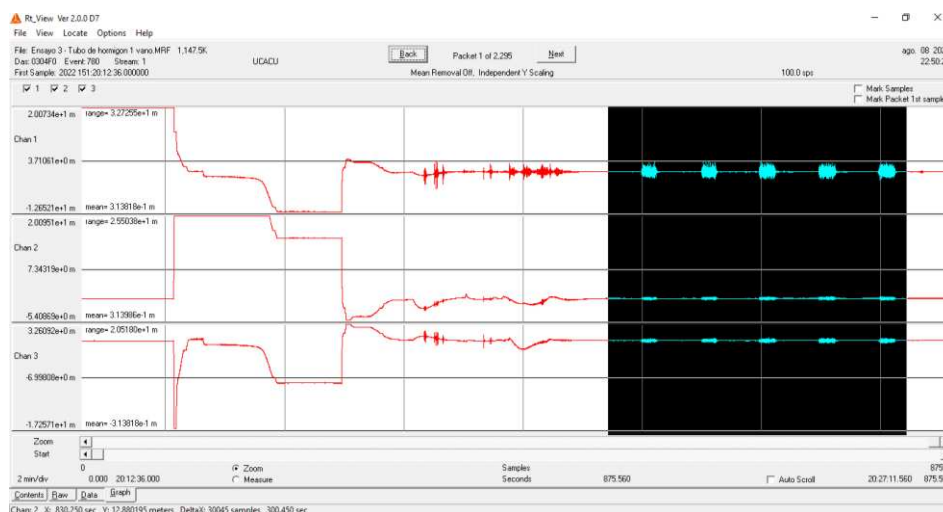
Ilustración 18. Proceso para obtener la frecuencia natural de la estructura in situ



3.5.1 Extracción de datos del software Rt_view

Después de culminar cada ensayo se descargan los datos del digitalizador a la memoria externa (100 datos por segundo) y estos se exportan al software Rt_view, en el cual se visualiza las señales en las coordenadas x, y, z grabadas en los ensayos como se muestra en la Ilustración 19.

Ilustración 19. Señal seleccionada en el software Rt_view



Nota: Elaboración propia

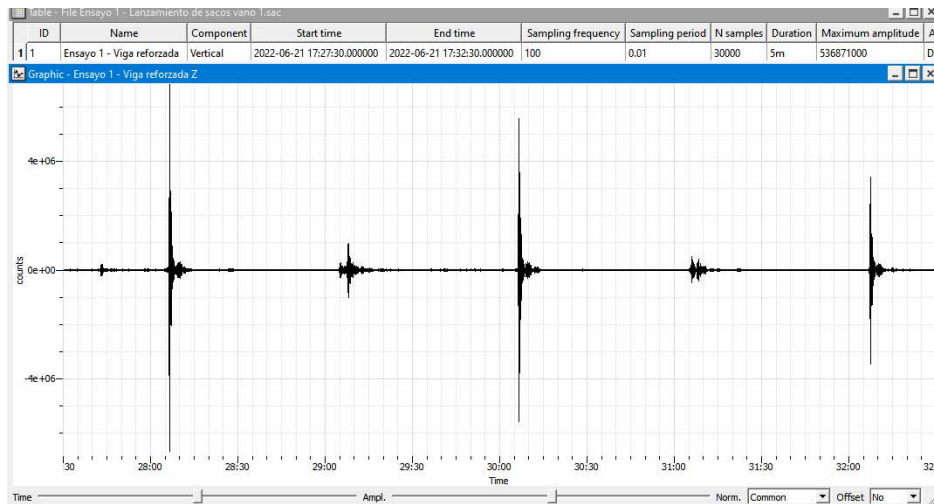
A continuación, se selecciona con el cursor el rango de tiempo en el que fue registrado cada ensayo para cortar aquellos eventos que fueron grabados al encender el equipo y se procede a exportar la señal seleccionada en formato .txt dando clic en File y Save event.

3.5.2 Procesamiento de datos en el software geopsy

El programa geopsy permite obtener la gráfica de densidad espectral de potencia que es una forma de representar la distribución de los componentes de frecuencia de la señal (DEMPSTER, 2001) de una manera simple de cualquier registro obtenido, pero antes se debe definir ciertos parámetros para que la señal sea analizada correctamente y proporcione datos confiables.

Para todos los ensayos realizados en este proyecto se sigue el mismo procedimiento; el primer paso es dar clic en la pestaña Import signals para abrir los archivos y visualizar la señal como se muestra en la Ilustración 20.

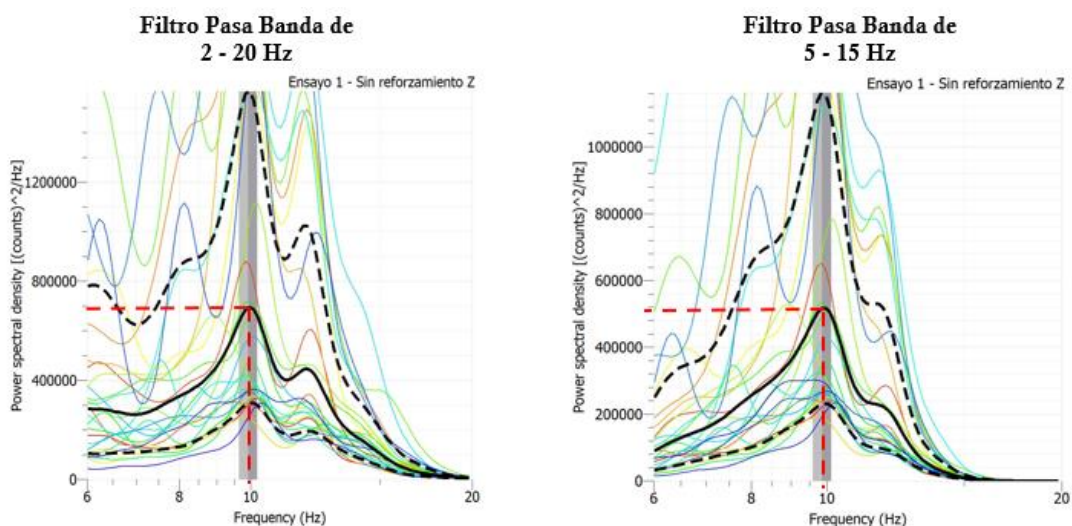
Ilustración 20. Ejemplo de señal en el software geopsy

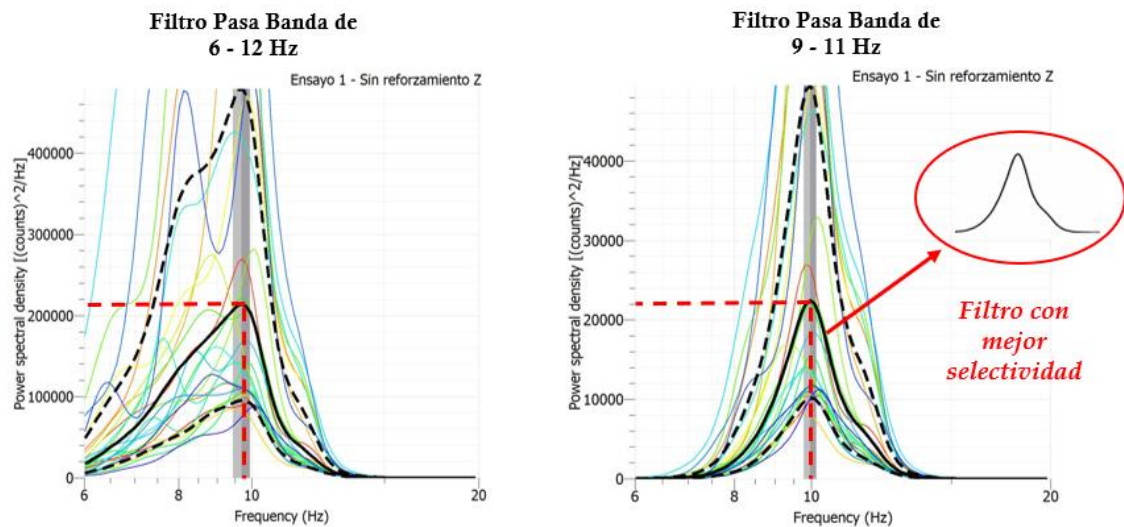


Nota: Elaboración propia

Seguidamente se aplicó un filtro pasa banda de 9.00 a 11.00 Hz para atenuar aquellas frecuencias que se encuentran fuera de este rango. La selección del ancho de banda se definió haciendo varias pruebas con diferentes rangos (Ilustración 21) hasta que la curva sea lo más selectiva (vertical) posible, es decir, mientras más bajo sea el ancho de banda, mayor será su selectividad.

Ilustración 21. Selección del filtro pasa banda.

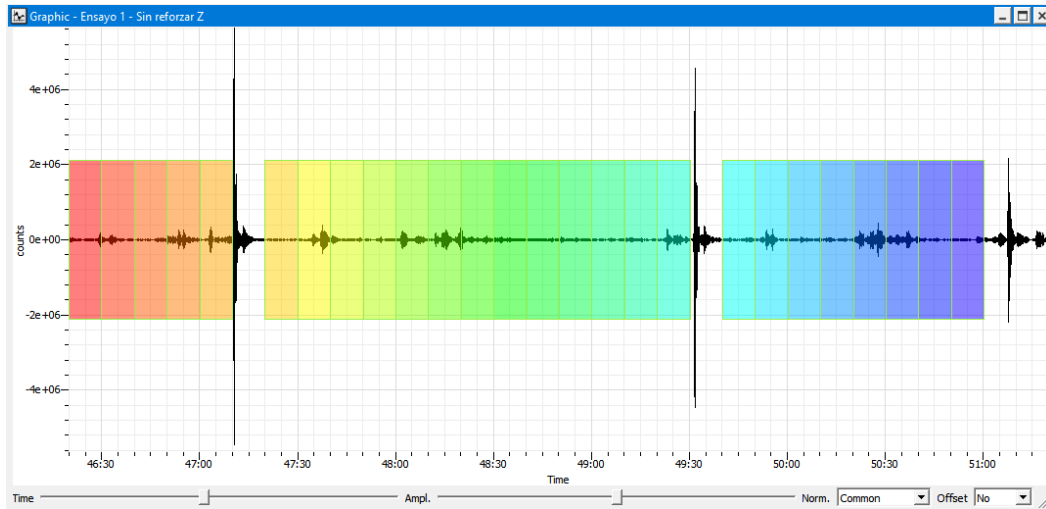




Nota: Elaboración propia

Para la longitud de las ventanas se determina de acuerdo al tiempo de duración de cada registro y se debe cumplir con los valores mínimos recomendados por el SESAME (Tabla 5), existen dos maneras de selección, ya sea de forma automática o manual. En nuestro caso la duración de todos los ensayos es de 5 minutos y se aplica una longitud de ventana de 10 segundos; mediante una selección manual se eliminan los picos significativos de cada ensayo, debido a que, para la obtención de la frecuencia natural de la estructura que se asemeje a la realidad, se requiere eventos donde más se atenúa la señal, como se muestra en el ejemplo de la Ilustración 22.

Ilustración 22. Selección de ventanas con una longitud de 10s. Ensayo 1

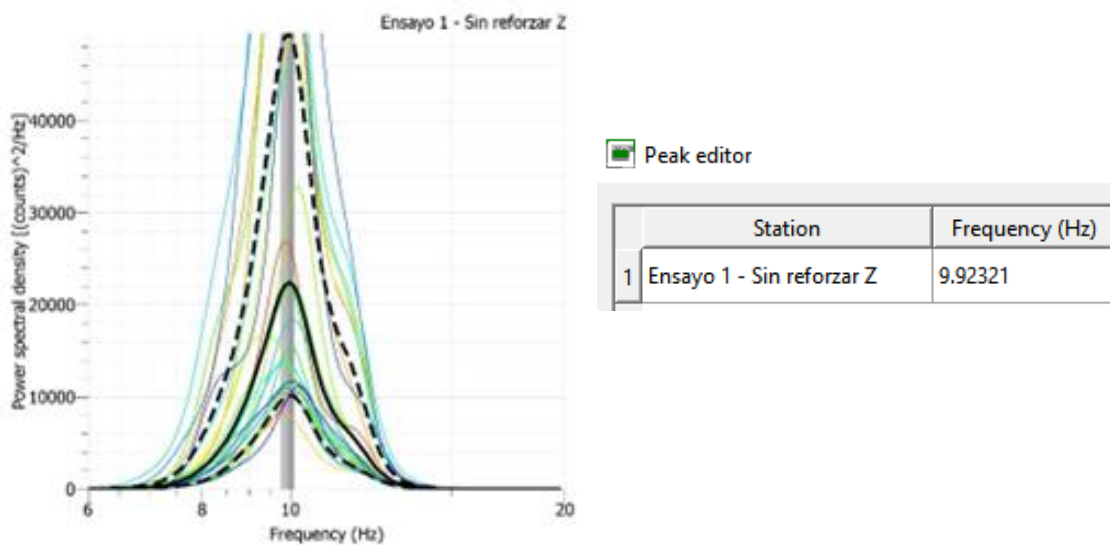


Nota: Elaboración propia

A continuación, en la pestaña procesamiento se elige el tipo de suavizado Konno & Ohmachi al 20% que recomienda el proyecto SESAME.

Con todos los parámetros configurados se obtiene la gráfica de densidad espectral de potencia (Ilustración 23) y en ella se puede visualizar la frecuencia fundamental que se encuentra justo en la barra gris ubicada en el centro del pico de la gráfica que es objetivo del presente proyecto.

Ilustración 23. Curva espectral y frecuencia central. Ensayo 1



Nota: Ejemplo del ensayo 1 sin reforzamiento. Elaboración propia

Una vez obtenida la frecuencia fundamental en cada gráfica, se puede verificar la fiabilidad de la curva espectral aplicando el factor de calidad (Q) que se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{f_o}{f_2 - f_1} \quad (25)$$

Donde:

f_o = frecuencia fundamental central.

f_2 = frecuencia superior de corte.

f_1 = frecuencia inferior de corte.

Mediante la ecuación (25) se obtuvo un factor de calidad promedio de todos los ensayos de 5. Este valor según la Ilustración 7, está en un rango de selectividad aceptable.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Frecuencias y periodos

En la siguiente Tabla 7 se visualiza un resumen de las frecuencias naturales obtenidas aplicando los tres métodos mencionados en el capítulo III, logrando observar que sus resultados son semejantes.

Tabla 7. *Resumen - Frecuencia Natural y periodos*

FRECUENCIAS NATURALES		
Métodos	Frecuencia (Hz)	Periodo (seg)
Método computacional	10.39	0.10
Método manual aproximado		
Método 1	11.47	0.087
Método 2	11.27	0.088
Metodología de trabajo in situ		
Ensayo 1 – lanzamiento de saco, vano 1	9.923	0.101
Ensayo 2 – saltos de una silla, vano 1	9.932	0.101
Ensayo 3 – tubo de hormigón, vano 1	10.247	0.098
Ensayo 4 – paso peatonal, vano 1	9.892	0.101
Ensayo 5 – saltos de una silla, vano 2	10.021	0.100
Ensayo 6 – tubo de hormigón, vano 2	10.143	0.099
Ensayo 7 – paso peatonal, vano 2	10.016	0.100

Nota: Elaboración propia

4.1.1 Método computacional: Robot Structural

Para el modelamiento en el software se utilizó el 100% de la masa modal, el cual consiste en el peso muerto de la estructura (vigas principales, vigas secundarias, losa) más la carga muerta de cuatro escritorios, obteniendo la Tabla 8 como resultado; una

frecuencia natural de toda la estructura de 10.39 Hz, un periodo de 0.10 segundos y un total de masas de 19341.25 kg.

Tabla 8. Resultado del modelamiento en el software Robot Structural

Caso/Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (sec)	. UX (%)	. UY (%)	. UZ (%)	Masas corr. UX (%)	Masas corr. UY (%)	Masas corr. UZ (%)	Total masas UX (kg)	Total masas UY (kg)	Total masas UZ (kg)
2/ 1	10.39	0.10	0.0	0.0	12.13	0.0	0.0	12.13	0.0	0.0	19341.25
2/ 2	10.85	0.09	0.0	0.0	67.08	0.0	0.0	54.95	0.0	0.0	19341.25
2/ 3	11.69	0.09	0.0	0.0	70.89	0.0	0.0	3.81	0.0	0.0	19341.25
2/ 4	18.82	0.05	0.0	0.0	70.90	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	19341.25

Nota: Se escogen los resultados del modo 1 ya que es el más crítico. Elaboración propia

4.2. Método manual aproximado: Guía de diseño para el análisis de las vibraciones en forjados

El procedimiento completo de la aplicación de los métodos se encuentra en el Anexo 6, obteniendo como resultados los siguientes valores:

Tabla 9. Resumen del método manual aproximado.

Resumen del método manual aproximado			
	Frecuencia (Hz)	Periodo (seg)	Masa Modal (kg)
Método 1	11.47	0.087	761.52
Método 2	11.27	0.088	928.61

Nota: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que la masa modal obtenida por este método es únicamente de una viga analizada mas no de toda la estructura.

4.2.1 Diagrama de clasificación

Para la selección del diagrama se sumaron los siguientes porcentajes de amortiguación crítica, obteniendo un 3% como se muestra en la Tabla 10.

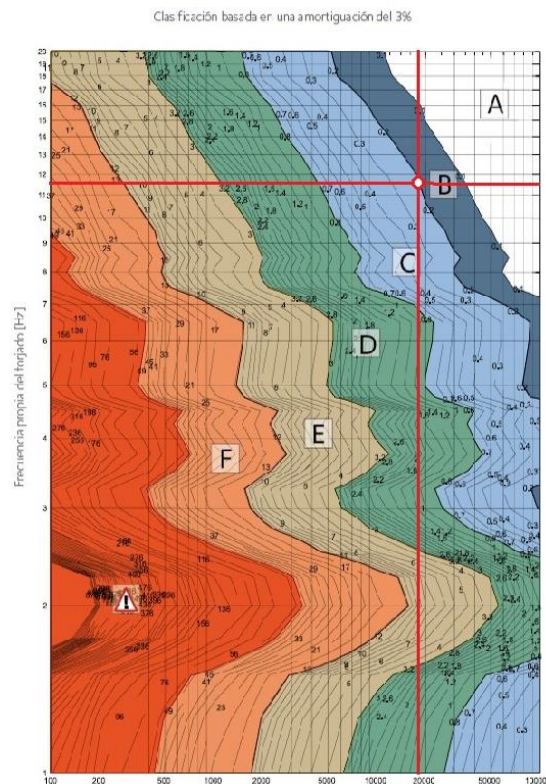
Tabla 10. Porcentaje de amortiguación empleado.

	Tipo	% amortiguación
Amortiguación estructural	Mixta (Hormigón-Acero)	D1= 1%
Amortiguación debido al mobiliario	Oficina tradicional para uno a tres personas con tabiques de separación	D2= 2%
Amortiguación debida a terminaciones	Parquet flotante	D3= 0%
Total		3%

Nota: Elaboración propia.

Con los resultados del cálculo computacional y del cálculo manual se traza la siguiente gráfica con sus ejes coordenados $x= 19341.25$ kg, $y= 11.47$ dando como resultado una clasificación Tipo C y en función del forjado “Oficinas” (Tabla 3), la estructura se encuentra en un rango recomendado.

Ilustración 24. Resultado del diagrama de clasificación.



Nota: Gráfico tomado de (Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann et al., s. f.) Elaboración propia.

4.2.2 Método de trabajo en campo in situ: Ref Tek Colt

Este proyecto se desarrolló siguiendo las normas del proyecto Sesame (2004) con el objetivo de obtener la frecuencia fundamental (f) de cada ensayo que se realizó en el entrepiso del laboratorio de ingenierías, efectuando diferentes excitaciones en cada uno.

Los resultados obtenidos antes y después del reforzamiento de la viga más crítica se visualizan en la Tabla 11, en la cual se puede verificar que, con el reforzamiento de la viga con la fibra de carbono la frecuencia aumenta en un 1% y el periodo disminuye en algunos ensayos y en otros se mantiene (Tabla 12).

Tabla 11. Cuadro comparativo de frecuencias con y sin reforzamiento.

ENSAYOS		Viga sin reforzar	Viga reforzada
N°	Descripción	f (Hz)	f (Hz)
1	Lanzamientos de sacos vano 1	9.923	9.956
2	Saltos, vano 1	9.932	10.101
3	Tubo de hormigón vano 1	10.247	10.280
4	Paso peatonal vano 1	9.892	9.987
5	Saltos, vano 2	10.021	10.027
6	Tubo de hormigón vano 2	10.143	10.142
7	Paso peatonal vano 2	10.016	10.043

Nota: Se puede visualizar un incremento de la frecuencia en la columna de viga reforzada. Elaboración propia

Tabla 12. Cuadro comparativo de periodos con y sin reforzamiento

ENSAYOS		Viga Sin Reforzar	Viga Reforzada
N°	Descripción	To (seg)	To (seg)
1	Lanzamientos de sacos vano 1	0.101	0.100
2	Saltos, vano 1	0.101	0.099
3	Tubo de hormigón vano 1	0.098	0.097
4	Paso peatonal vano 1	0.101	0.100

5	Saltos, vano 2	0.100	0.100
6	Tubo de hormigón vano 2	0.099	0.099
7	Paso peatonal vano 2	0.100	0.100

Nota: Elaboración propia.

4.3. Cumplimiento de los criterios Sesame

Para verificar que los resultados tengan una curva fiable y un pico claro se aplicaron los criterios (4), (5), (6), (10), (12), (13) que se encuentran en el apartado 2.4. Cabe recalcar que no se aplicaron todos debido a que el objetivo es analizar movimientos verticales (eje Z) y vibración en ese sentido por el entrepiso. Para la verificación de todos los criterios se necesitan las señales en todos los componentes (x, y, z). La Tabla 13 muestra el cumplimiento de los criterios mencionados anteriormente con la viga sin reforzar y la Tabla 14 con la viga reforzada.

Tabla 13. *Tabla resumen del cumplimiento de criterios SESAME (viga sin reforzar)*

Ensayo N°	Estadísticas de frecuencia de ventanas individuales						Valores umbral para las condiciones de estabilidad			Criterios SESAME				
	lw	nw	fo	nc	σ_A (f)	σ_F	ε (Fo)	θ (Fo)	Log θ (f0)	Criterios para una curva fiable			Criterios para un pico claro	
	(seg)		(Hz)				(Hz)	(Hz)		(4)	(5)	(6)	(12)	(13)
1	10	26	9.923	2580	1.0171	0.102	0.496	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
2	10	24	9.932	2384	1.0137	0.102	0.497	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
3	10	13	10.247	1332	1.0211	0.100	0.512	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
4	10	29	9.892	2869	1.0113	0.102	0.495	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
5	10	19	10.021	1904	1.0109	0.101	0.501	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
6	10	14	10.143	1420	1.0132	0.100	0.507	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
7	10	29	10.016	2905	1.0094	0.101	0.501	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Tabla 14. *Tabla resumen del cumplimiento de criterios SESAME (viga reforzada)*

Ensayo N°	Estadísticas de frecuencia de ventanas individuales						Valores umbral para las condiciones de estabilidad			Criterios SESAME				
	lw	nw	fo	nc	σ_A (f)	σ_F	ε (Fo)	θ (Fo)	Log θ (f0)	Criterios para una curva fiable			Criterios para un pico claro	
	(seg)		(Hz)				(Hz)	(Hz)		(4)	(5)	(6)	(12)	(13)
1	10	26	9.96	2589	1.020	0.102	0.4978	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
2	10	24	10.10	2424	1.015	0.100	0.5051	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
3	10	13	10.28	1336	1.013	0.099	0.514	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
4	10	29	9.99	2896	1.015	0.102	0.4993	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
5	10	19	10.03	1905	1.014	0.101	0.5014	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
6	10	14	10.14	1420	1.006	0.099	0.5071	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
7	10	29	10.04	2913	1.007	0.100	0.5022	1.58	0.2	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Nota: El cumplimiento o no de todos los criterios del proyecto SESAME no define que los resultados sean correctos o incorrectos, lo que busca es disminuir la probabilidad de errores.

4.4. Cumplimiento de la duración de grabación recomendada por el Sesame

En la siguiente Tabla 15, se puede apreciar el cumplimiento del apartado 2.4.3 del análisis de cada ensayo realizado en el software Geopsy.

Tabla 15. *Duración de grabación recomendada*

VIGA SIN REFORZAR				
Ensayo N°	Valor mínimo para lw (seg)	Número mínimo de ciclos significativos (nc)	Mínimo número de ventanas	Mínimo útil duración de la señal (seg)
1	Ok	Ok	Ok	Ok
2	Ok	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Ok	Ok
5	Ok	Ok	Ok	Ok
6	Ok	Ok	Ok	Ok
7	Ok	Ok	Ok	Ok
VIGA REFORZADA				
1	Ok	Ok	Ok	Ok
2	Ok	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Ok	Ok
5	Ok	Ok	Ok	Ok
6	Ok	Ok	Ok	Ok
7	Ok	Ok	Ok	Ok

Nota: Elaboración propia.

4.5. Comprobación del factor de calidad

El factor de calidad se obtiene mediante la diferencia de las frecuencias de corte dividido para la frecuencia central (fórmula 25). Los resultados son los siguientes:

Tabla 16. *Factor de calidad (Q) en los ensayos realizados.*

ENSAYOS		FACTOR DE CALIDAD (Q)	
Nº	Descripción	Viga Sin Reforzar	Viga Reforzada
1	Lanzamientos de sacos vano 1	4.962	4.978
2	Salto, vano 1	4.966	5.051
3	Tubo de hormigón vano 1	5.123	5.140
4	Paso peatonal vano 1	4.946	4.993
5	Salto, vano 2	5.010	5.014
6	Tubo de hormigón vano 2	5.072	5.071
7	Paso peatonal vano 2	5.008	5.022

Nota: Los resultados del factor de calidad se encuentran en un rango aceptable. *Elaboración propia.*

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Gracias al reforzamiento de la viga con la fibra de carbono unidireccional QuintumWrap-600, sí se cumplió con el objetivo general de reducir la vibración de la losa.
- Con el modelamiento analítico de la estructura real, se detectó la viga más crítica para ser reforzada que tiene las siguientes características: flecha de 0.3cm, ubicada en el centro del vano 1, luz de 6 metros y su sección de 20x20x0.4cm.
- La obtención de la frecuencia natural de la estructura se obtuvo aplicando las tres metodologías mencionadas anteriormente; con la primera se tiene una frecuencia de 10.39 Hz, con la segunda un promedio de 11.37 Hz, y con la tercera un promedio de 10.02 Hz, siendo estos valores semejantes, es decir, fueron ejecutados de una manera correcta.
- El reforzamiento realizado con las fibras de carbono en el entrepiso del laboratorio de ingenierías en la viga de acero, influye de una manera aceptable debido a su peso ligero sin afectar a la estructura original y por su fácil instalación y manejabilidad.
- Con la ayuda del dispositivo Ref Tek Colt se realizaron los ensayos in situ y utilizando los mismos parámetros, criterios y tipos de excitaciones de los ensayos antes del reforzamiento, se obtuvo un aumento del 1% de las frecuencias fundamentales de la estructura una vez reforzada. Con esto se puede concluir que el uso de las fibras de carbono si cumplen con el objetivo de aumentar la rigidez de la viga disminuyendo así las vibraciones del forjado.

- Con los resultados obtenidos plasmados en el diagrama de clasificación, se concluye que toda la estructura del entrepiso se encuentra en un rango recomendado para oficinas según M. Feldmann.
- Siguiendo las directrices y recomendaciones del proyecto SESAME, los 14 ensayos cumplieron con los 5 criterios seleccionados (eje Z) para una curva fiable y para un pico claro, cabe mencionar que el cumplimiento o no de los mismos, no quiere decir que sean correctos o incorrectos los resultados, lo que trata es de disminuir errores.
- Con la aplicación del filtro pasa banda de 9 a 11 Hz en el software geopsy, el factor de calidad entre todos los ensayos tiene un promedio de 5, lo que permite observar una selectividad aceptable en las curvas de los espectros.
- Después de 7 días del reforzamiento, se realizó una inspección in situ y se verificó que el traslape realizado de 30 centímetros fue el adecuado debido a que la fibra de carbono conjuntamente con el Epóxico se adhirió correctamente en la viga.
- Con respecto a la instalación de la fibra de carbono, se recomienda que lo realice una persona especialista y conocedora de los productos debido a que causó irritaciones en la piel.
- Si se desea apreciar más la reducción de vibraciones de dicho entrepiso, se recomienda el reforzamiento de todas las vigas que conforman la estructura con una fibra de mayor espesor.
- En un futuro estudio, se recomienda reforzar las vigas con placas de acero para obtener mejores resultados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Basili, R., Bertrand, E., Bettig, B., Blarel, F., Bonnefoy-Claudet, S., Paola, B., Borges, A., Sørensen, M., Bourjot, L., Cadet, H., Cara, F., Caserta, A., Chatelain, J.-L., & Zacharopoulos, S. (2008). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 1-2.
- Autodesk. (2018). Acerca de Robot Structural Analysis Professional | Revit 2018 | Autodesk Knowledge Network.
<https://knowledge.autodesk.com/es/support/revit/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/Revit-Analyze/files/GUID-7CCD1413-93C6-4BD7-824B-7AB47E2AC71A-htm.html>
- Cassano, A. M. (2009). Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas. Editorial Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Castro Zavaleta, C. R. (2019). Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial Fullmarket en el 2019.
- Cobaleda Zapata, D., Beltrán Gamboa, S. G., Aristizábal Gómez, J., Torres, J. de los R., Omaña Duarte, M. Á., Gonzalez, P. P., & Alcázar López, R. (1983). Entrepisos. Colt | REF TEK. (s. f.). Recuperado 21 de junio de 2022, de <https://reftek.com/product/colt>
- DEMPSTER, J. (2001). CHAPTER SIX - Signal Analysis and Measurement. En J. DEMPSTER (Ed.), *The Laboratory Computer* (pp. 136-171). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-012209551-1/50039-8>

EcuRed. (2012). Señal eléctrica—EcuRed.

https://www.ecured.cu/Se%C3%B1al_el%C3%A9ctrica

Feldmann, M., Heinemeyer, C., & Völling, B. (2014). Guía de Diseño para el análisis de las vibraciones en forjados. Publ. ArcelorMittal.

Feldmann, Prof. Dr.-Ing. M., Heinemeyer, Dr.-Ing. Ch., & Völling, Dr.-I. B. (s. f.). Guía de Diseño para el análisis de las vibraciones en forjados.

https://constructalia.arcelormittal.com/files/Vibration_EN--6106e7a7bd18ced6a7f471752d104089.pdf

Guevara Fernandez, M. J. (2018). Análisis de la resistencia y ductilidad de vigas de concreto armado con reforzamiento de fibras de carbono.

Kane, J. W., & Sternheim, M. M. (1989). Física. Reverté.

López Marín, D. A. (2003). Historia, definición, descripción, tipos y aplicaciones de filtros electrónicos. Nombre de la.

<https://es.scribd.com/document/404346902/Filtros-electronicos>

Luis de la Cruz. (2016, marzo 29). Definición de Frecuencia, período y amplitud.

IngenieríaElectrónica. <https://ingenieriaelectronica.org/definicion-de-frecuencia-periodo-y-amplitud/>

Manual de geopsy. (2008).

<https://www.geopsy.org/documentation/geopsy/introduction.html>

Mariano. (2011, noviembre 18). Fibra de carbono | Tecnología de los Plásticos. Fibra de carbono | Tecnología de los Plásticos.

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Medina, L. Y., UdP, F. H. C., Arias, C. A., & Piedrahita, C. C. (2016). Modelado sísmico en un medio con atenuación usando la ecuación de onda fraccionaria: Difusión-Onda.

- Miyara, F. (2004). Filtros activos. Cátedra de Electrónica III FCEIA-UNR. Rosario.
- Nina Gomez, J. A. (2018). Reforzamiento de vigas de concreto con fibras de carbono de 1.2 mm y 1.4 mm de espesor.
- Paz, M. (2021). Dinámica estructural. Teoría y cálculo. Reverté.
- Química. (2021). Catalizador_(química).
https://www.quimica.es/enciclopedia/Catalizador_%28qu%C3%ADmica%29.html
- Quintum. (2020). TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO - QuintumWrap-600®.
<http://www.quintum.com.mx/pdf/quintum-wrap600.pdf>
- Ramos Sánchez, I. B. (2019). Reforzamiento estructural con encamisado de fibra de carbono en columna para vivienda de 3 pisos en Santa Anita, 2019.
- Reyes, L. E. G. (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
- Rios, E. (2020, julio 1). Todo lo que necesita saber acerca de la resina epóxica. Mexican Fiber | Fibra de Vidrio para uso industrial. <https://mexicanfibers.com/todo-lo-que-necesita-saber-acerca-de-la-resina-epoxica/>
- Software | TEK REF. (s. f.). Recuperado 4 de julio de 2022, de <https://reftek.com/product/software>
- Theurer, M. M., Rodriguez, J., & others. (2016). Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras. Ingeniería, 20(1), 57-62.
- White, G. (2010). Introducción al análisis de vibraciones. Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima, 551, 1990-2010.
- Wrangler | REF TEK. (s. f.). Recuperado 8 de agosto de 2022, de <https://reftek.com/product/wrangler>

7. ANEXOS

ANEXO 1:

Modelamiento de la Estructura

Ilustración 25. Vista en planta del entrespiso

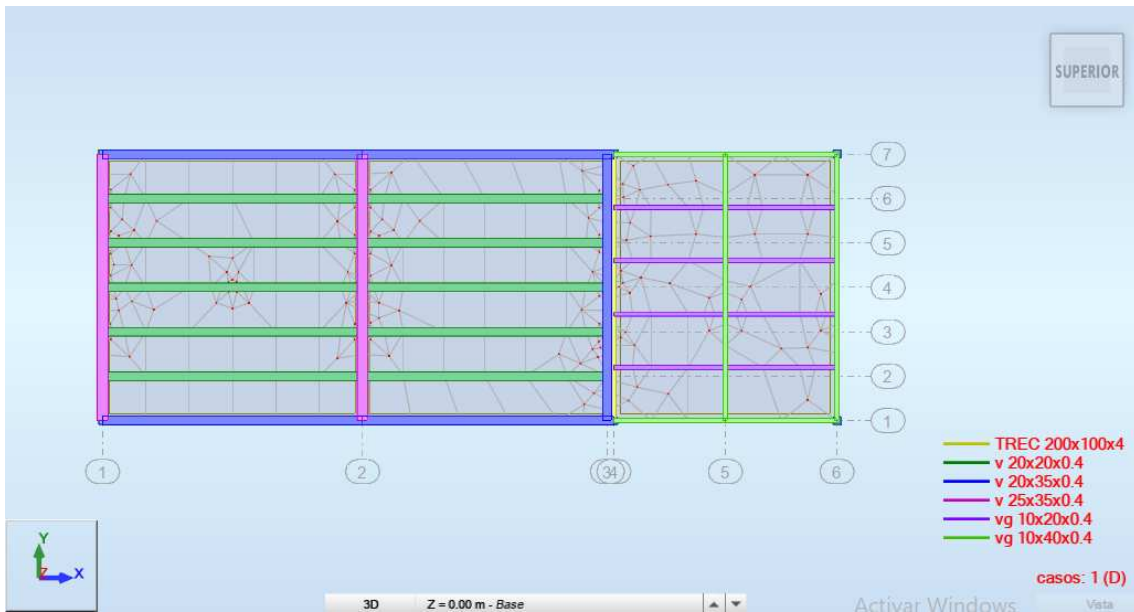


Ilustración 26. Parámetros del análisis modal

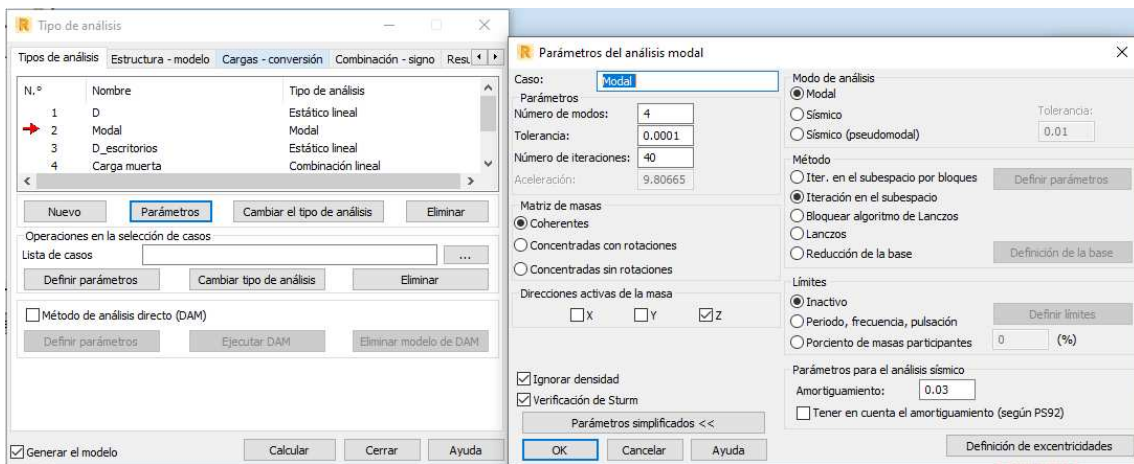


Ilustración 27. Combinación de masas

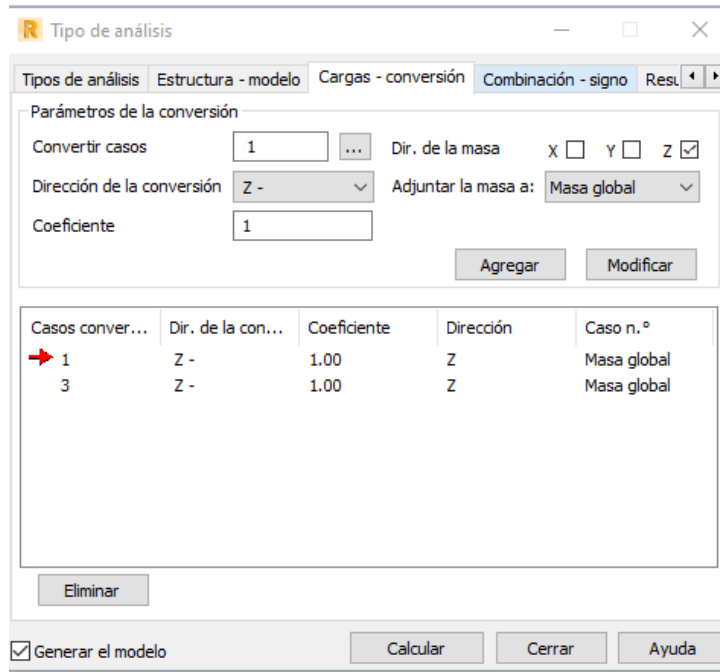
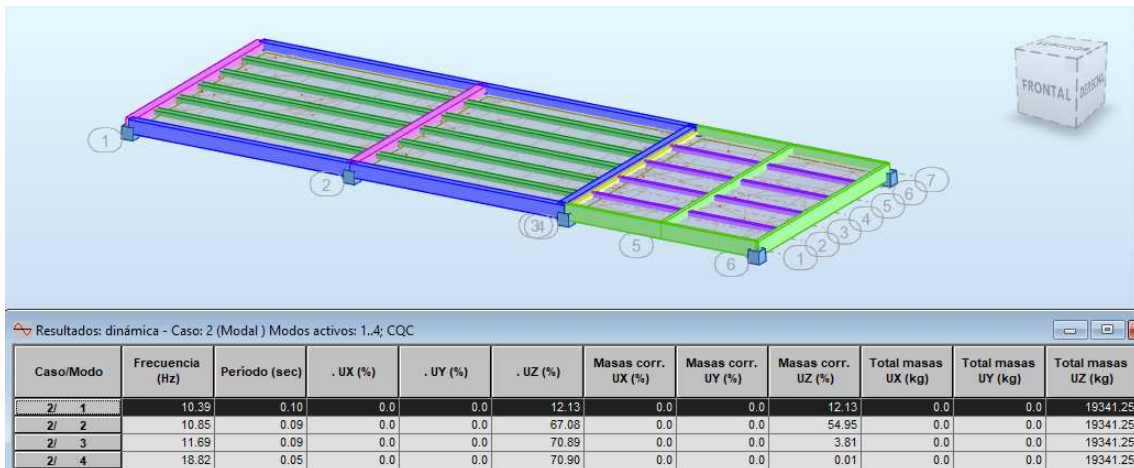


Ilustración 28. Frecuencias, periodos y masas actuantes



ANEXO 2:

Diagramas basados en la amortiguación

Ilustración 29. OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 3% y 4%:

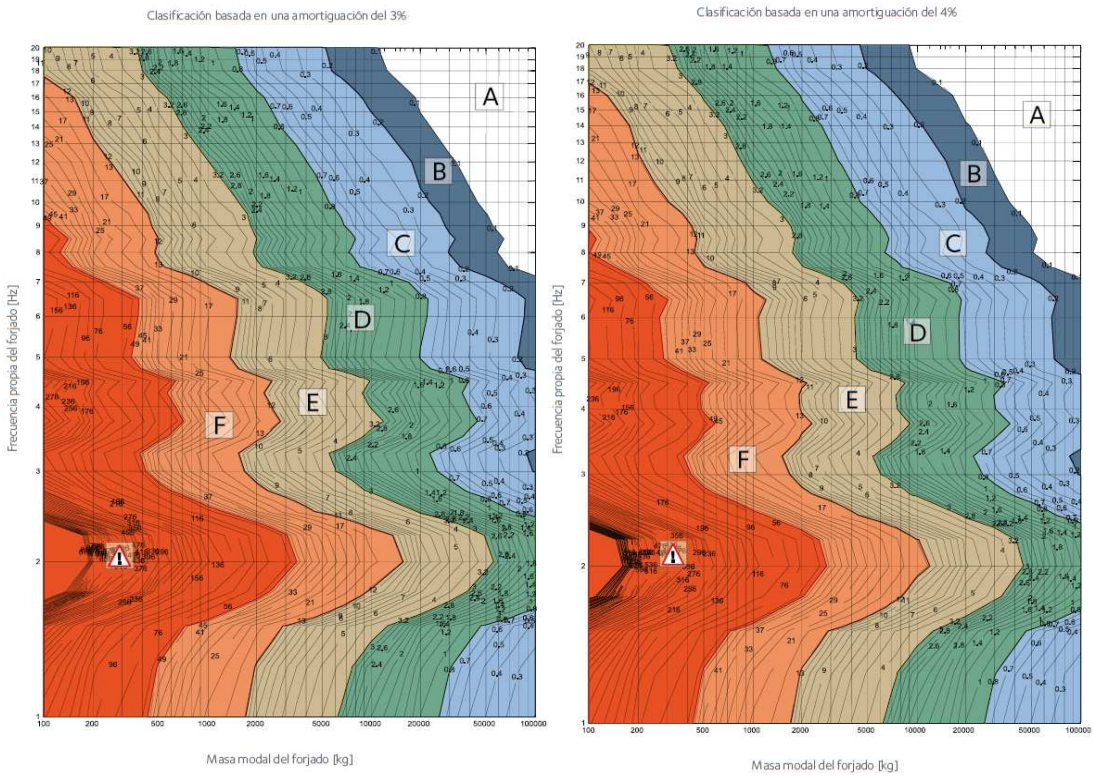


Ilustración 30. OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 5% y 6%:

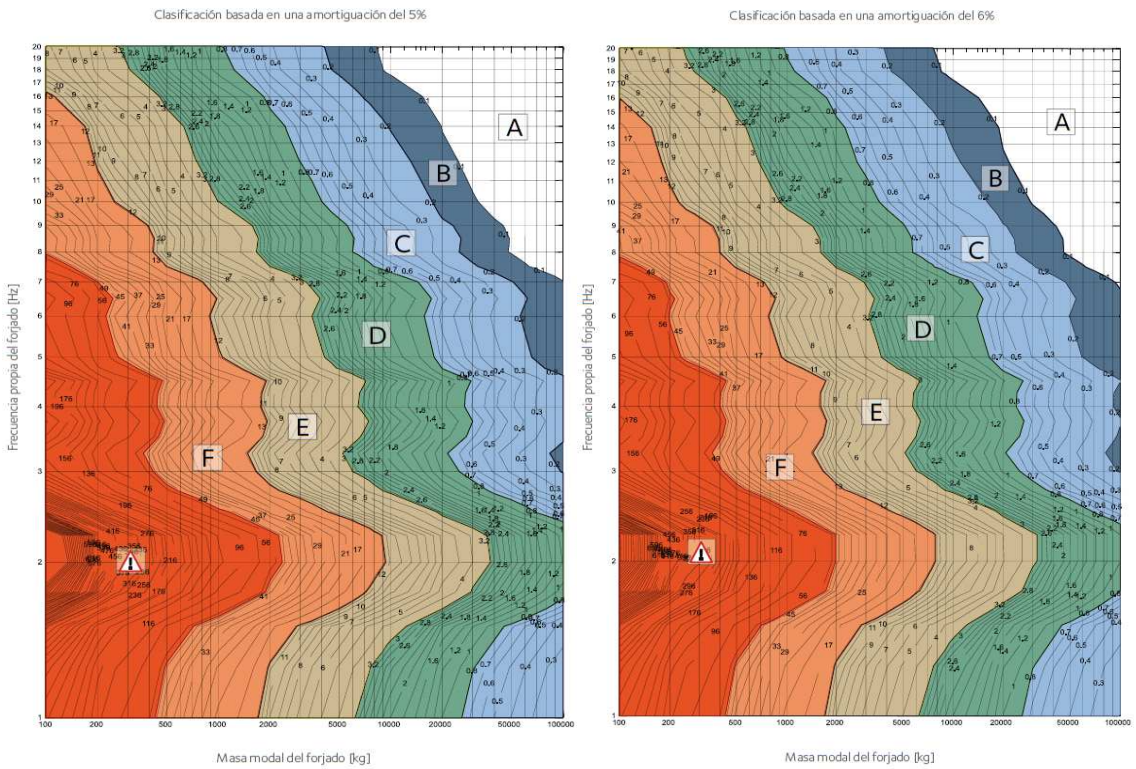


Ilustración 31. OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 7% y 8%:

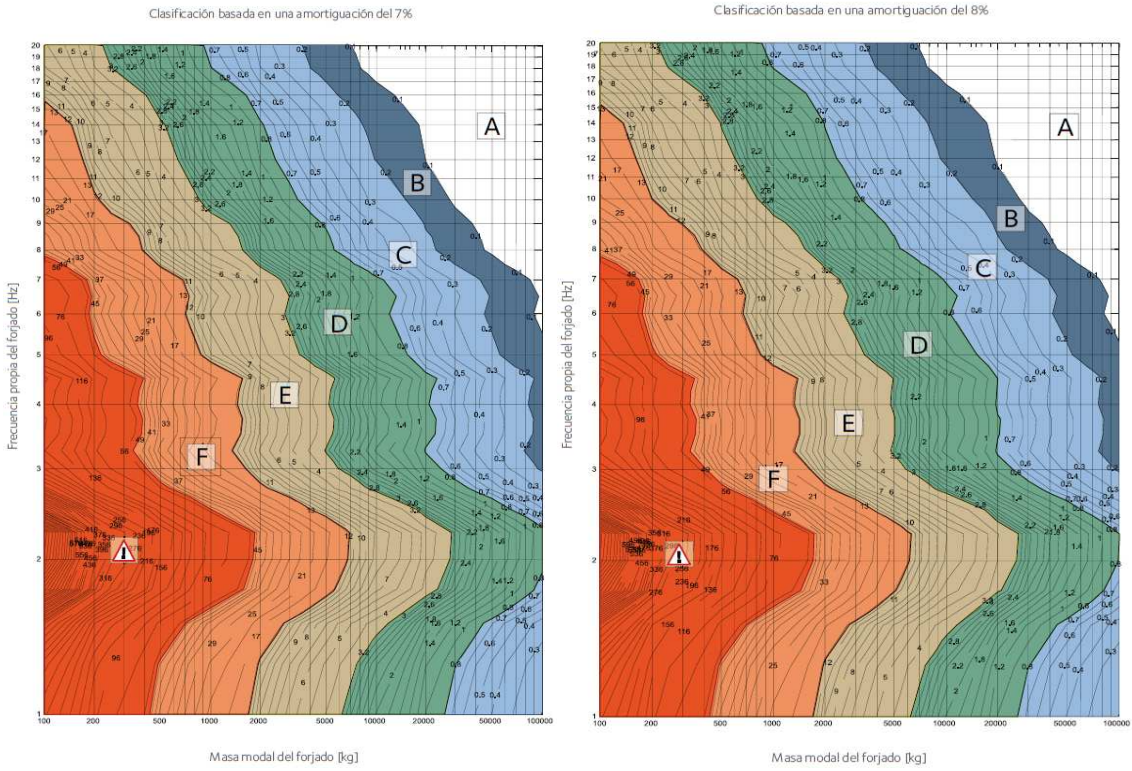
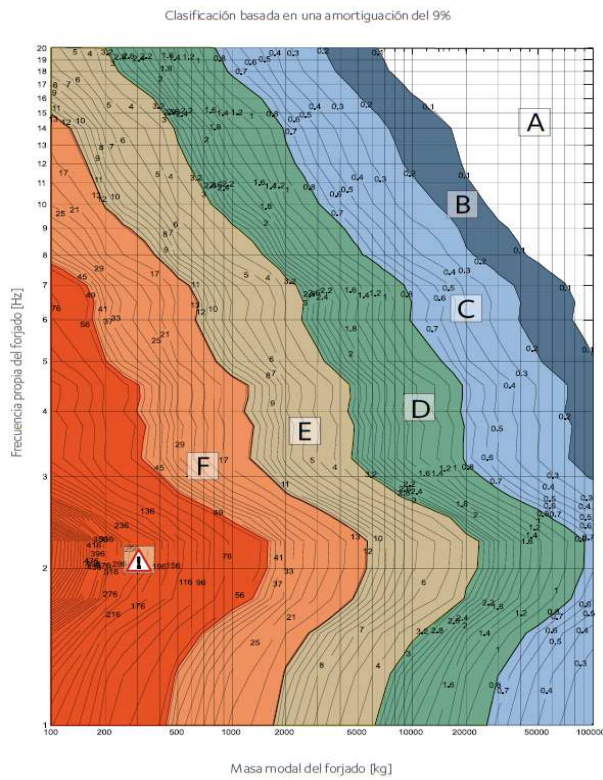


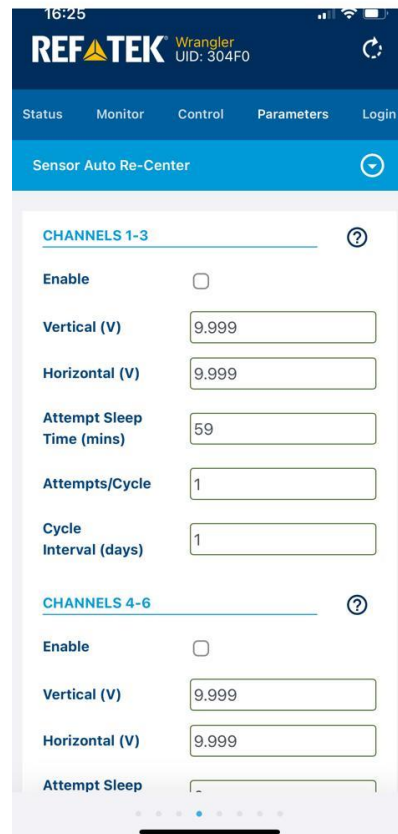
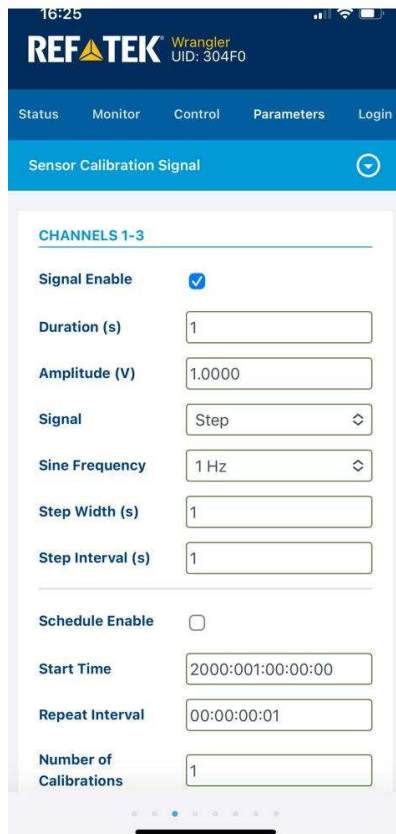
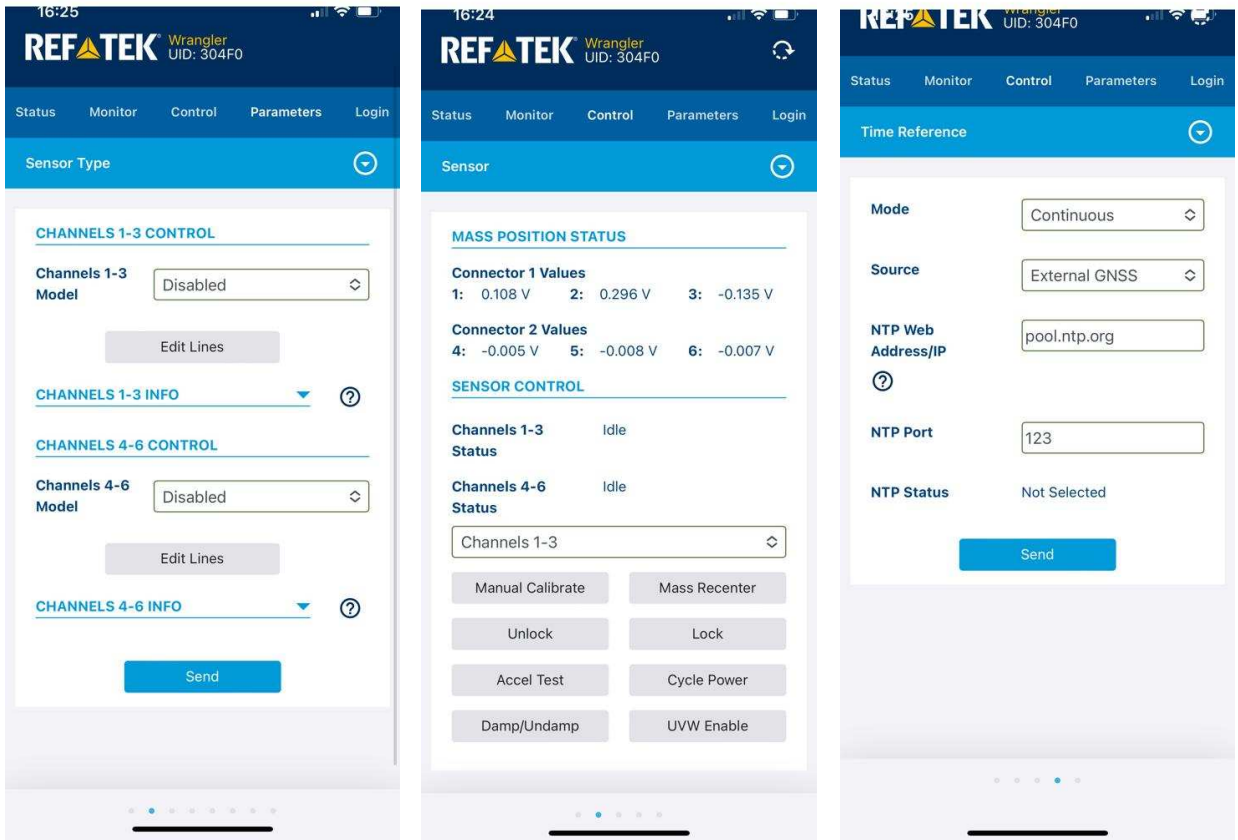
Ilustración 32. OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 9%:



ANEXO 3:

Configuración de la aplicación Recorder Setup

Ilustración 33. Configuración de la aplicación Recorder Setup (Ref Tek)

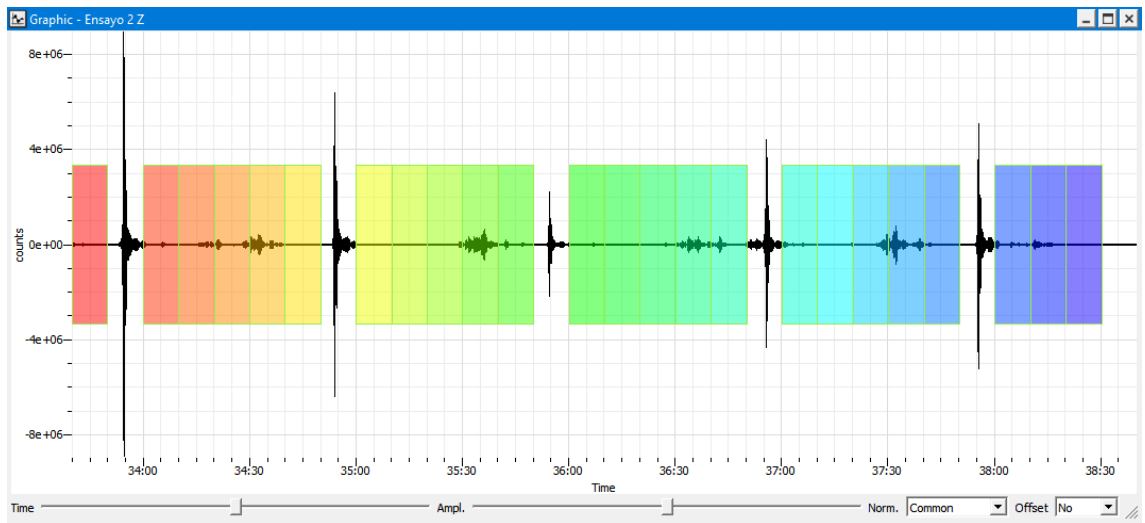
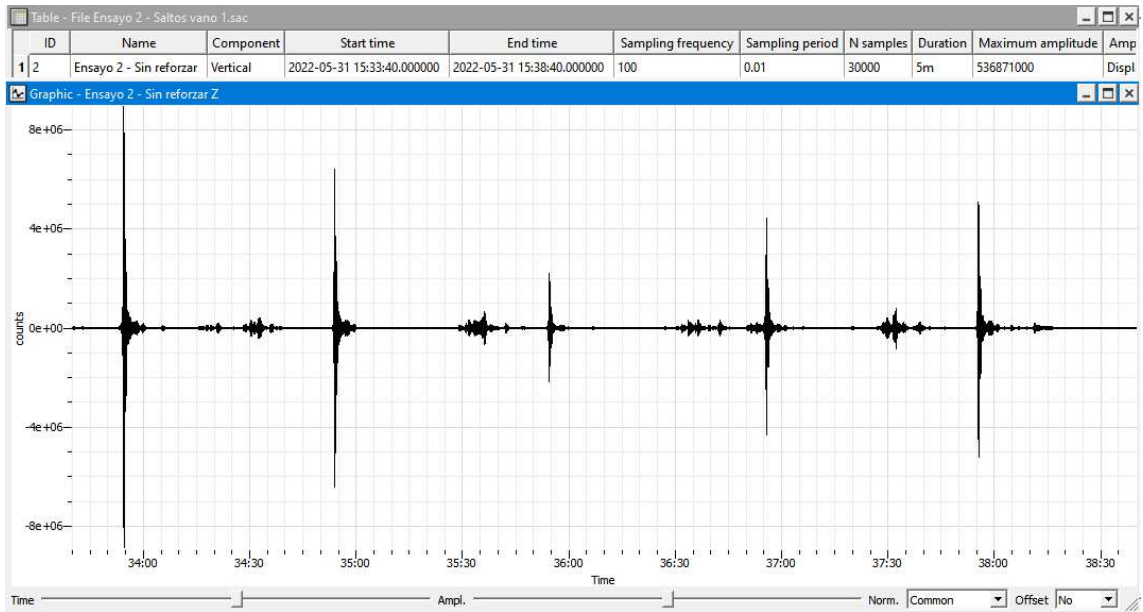


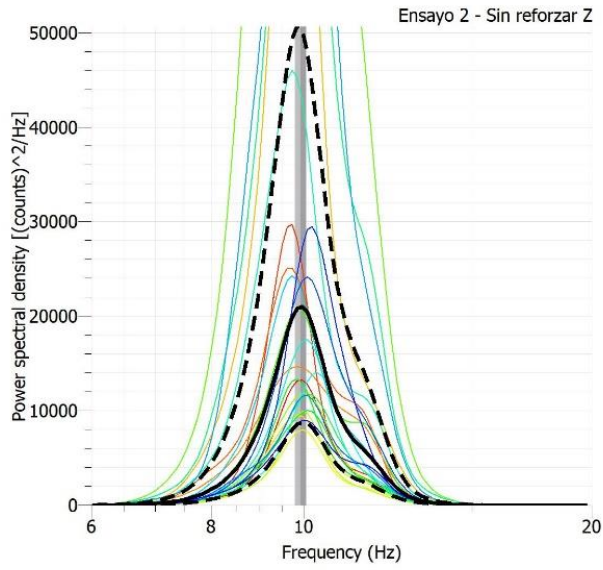
ANEXO 4:

Resultados de los ensayos en el software Geopsy

Ilustración 34. Ensayos sin eforzamiento

Ensayo 2:

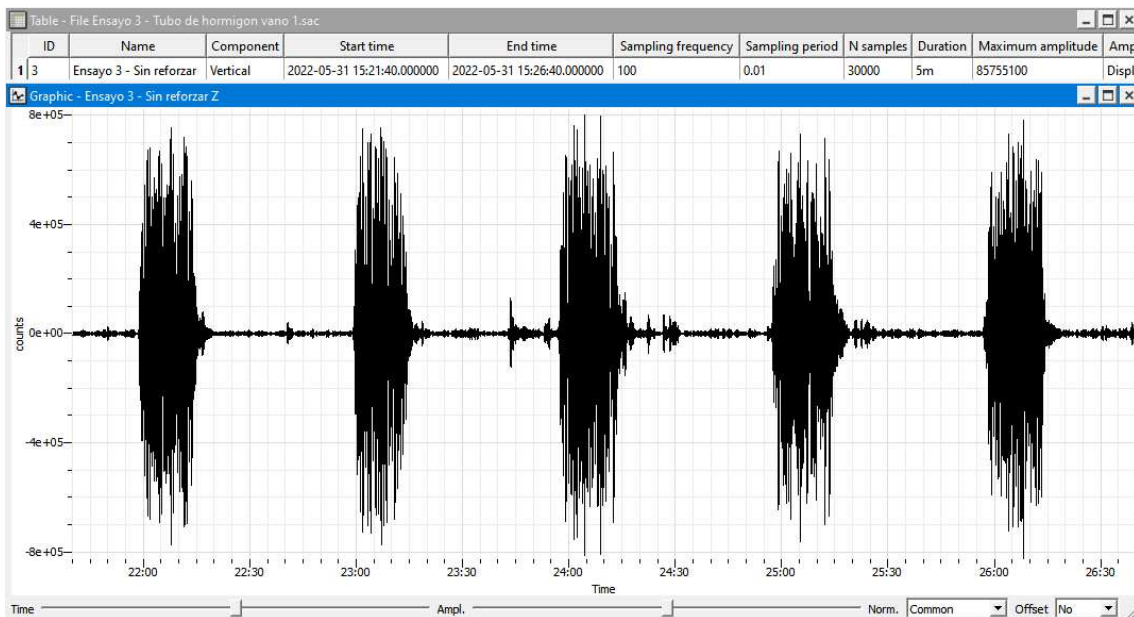


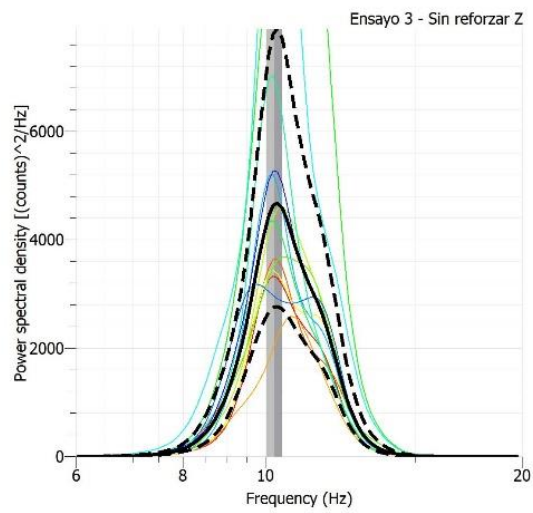
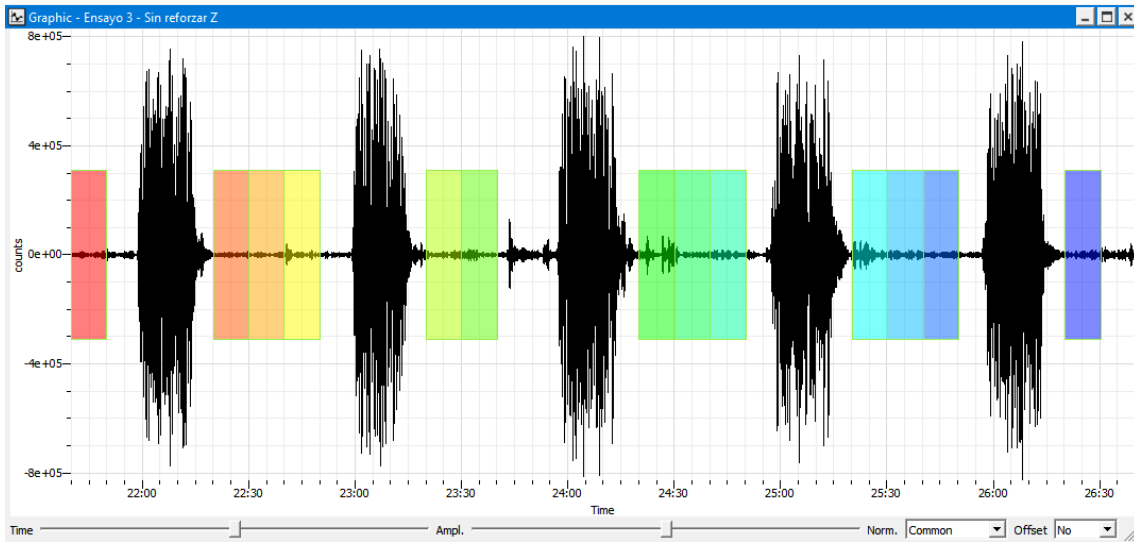


Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 2 - Sin reforzar Z	9.93195	9.79785	10.0679

Ensayo 3:

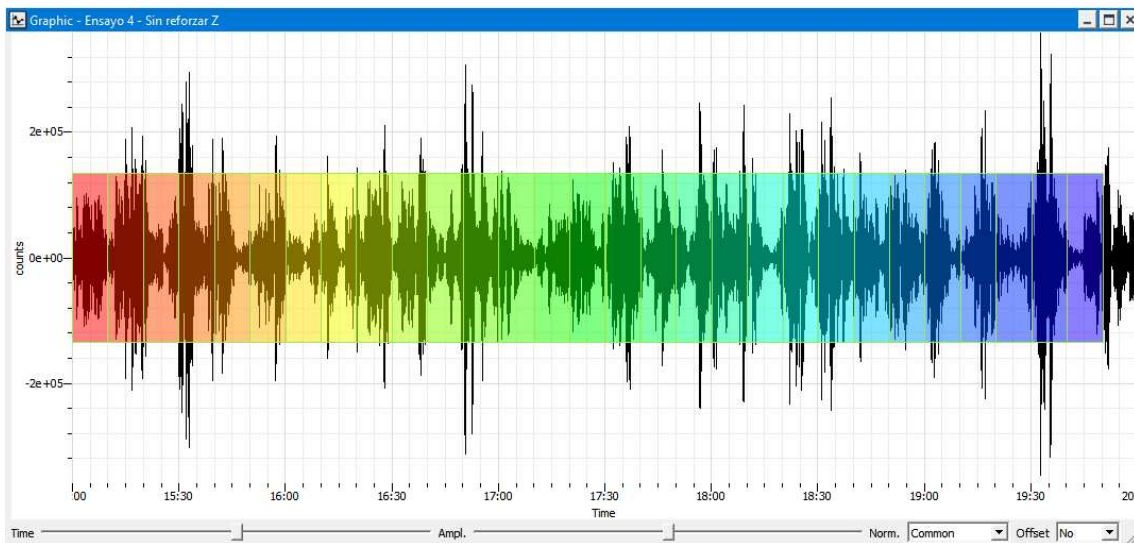
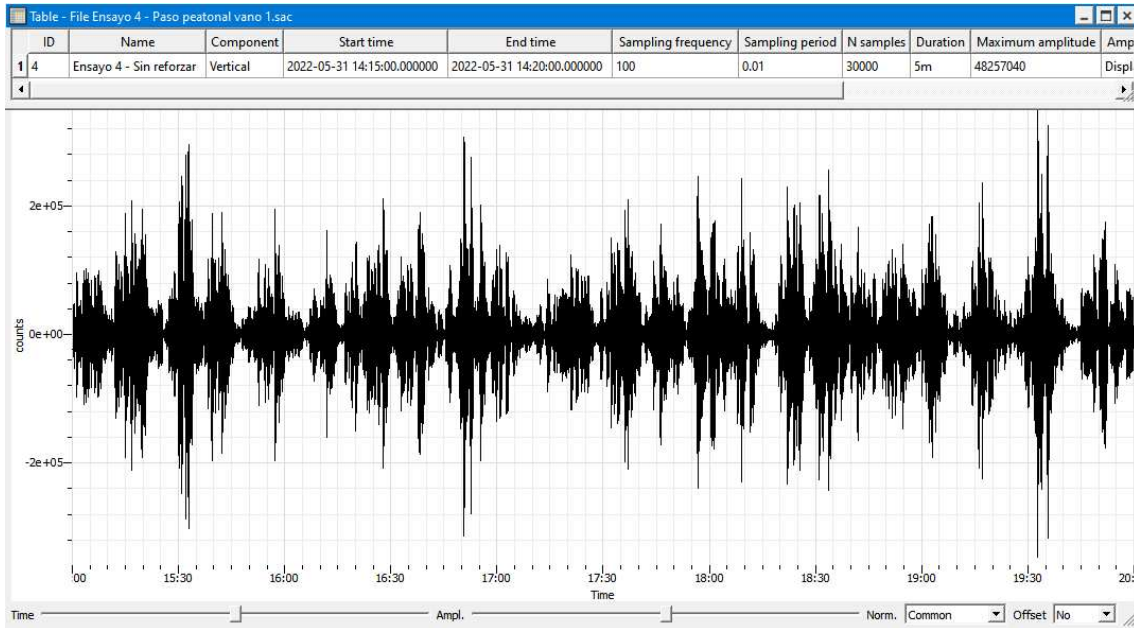


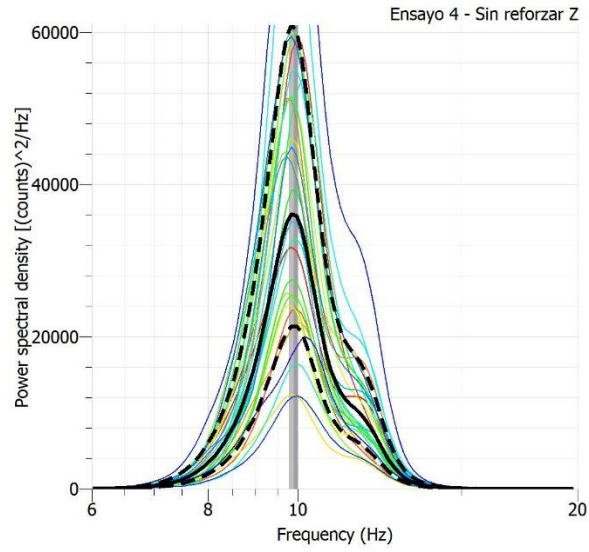


Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 3 - Sin reforzar Z	10.2467	10.0346	10.4632

Ensayo 4:

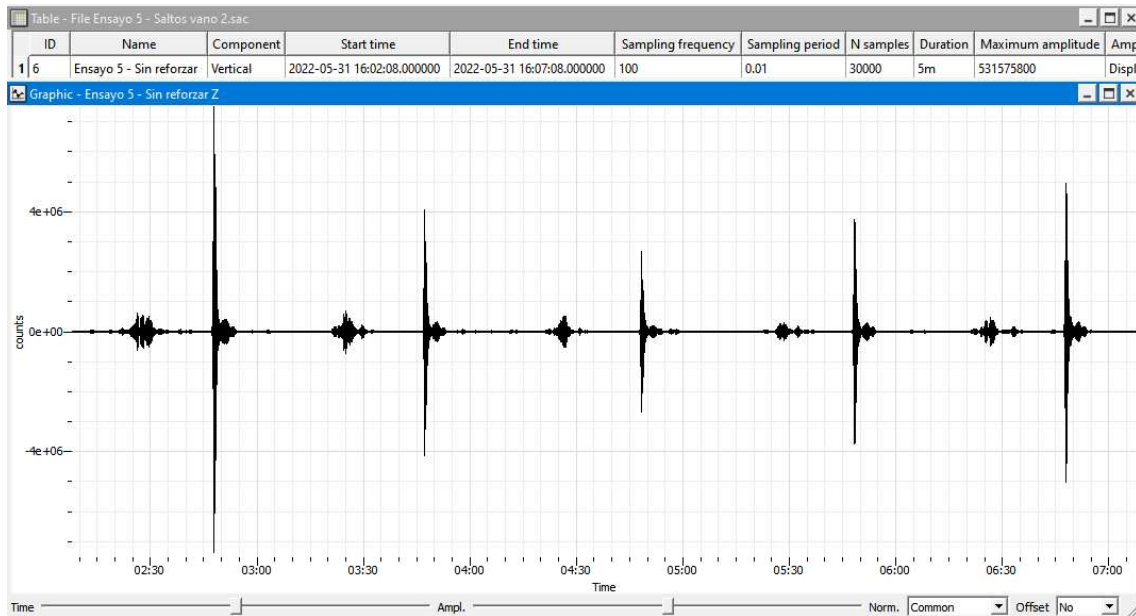


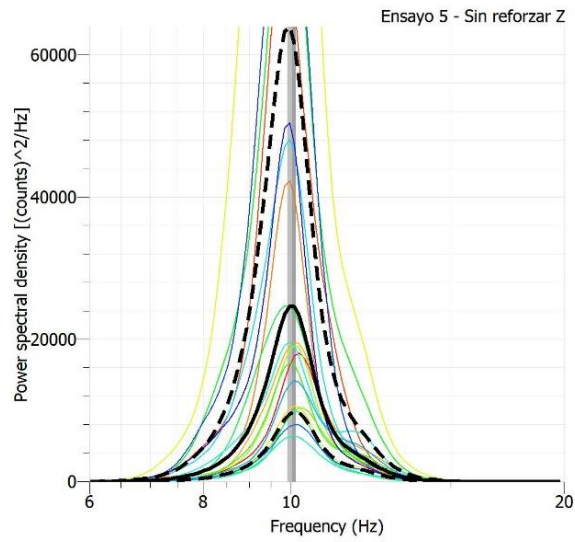
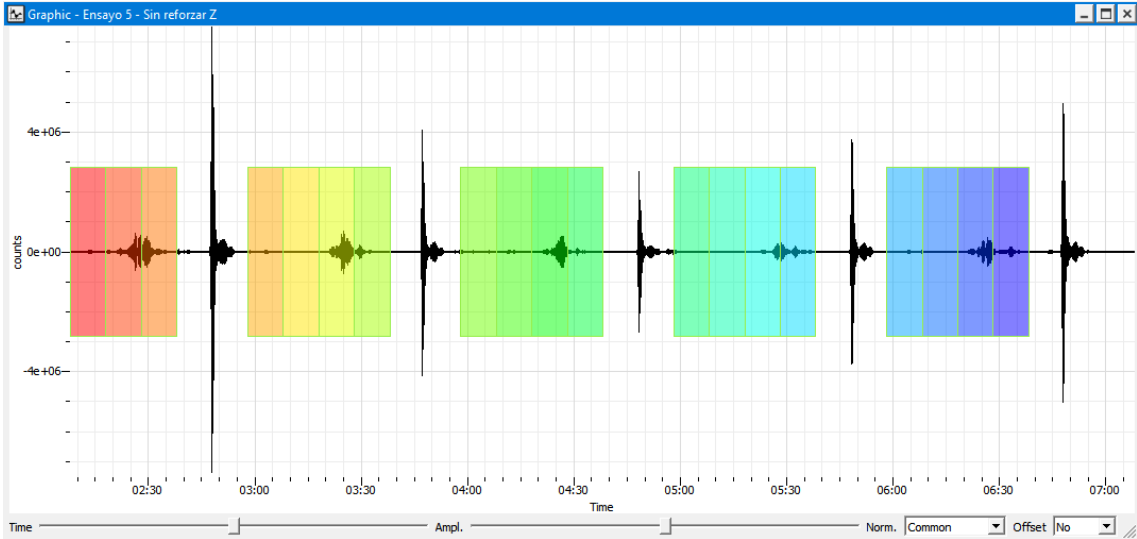



Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 4 - Sin reforzar Z	9.89174	9.78085	10.0039

Ensayo 5:

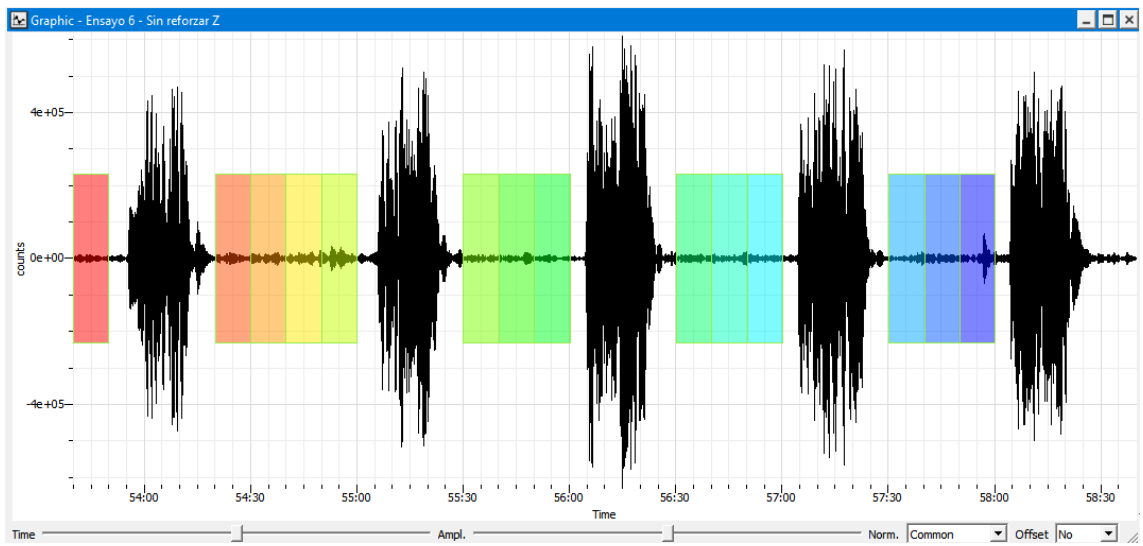
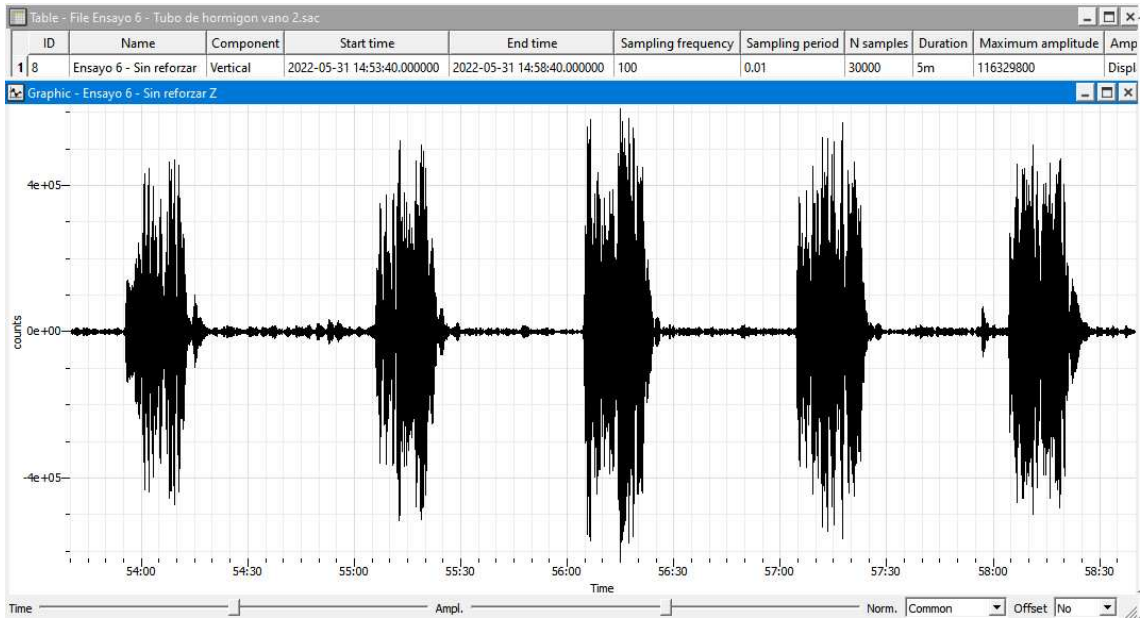


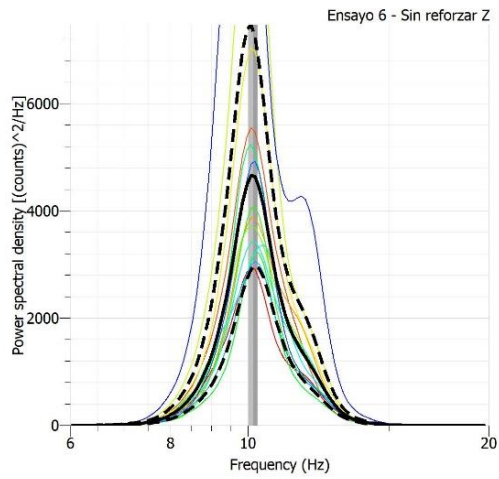



 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 5 - Sin reforzar Z	10.0207	9.91256	10.1301

Ensayo 6:

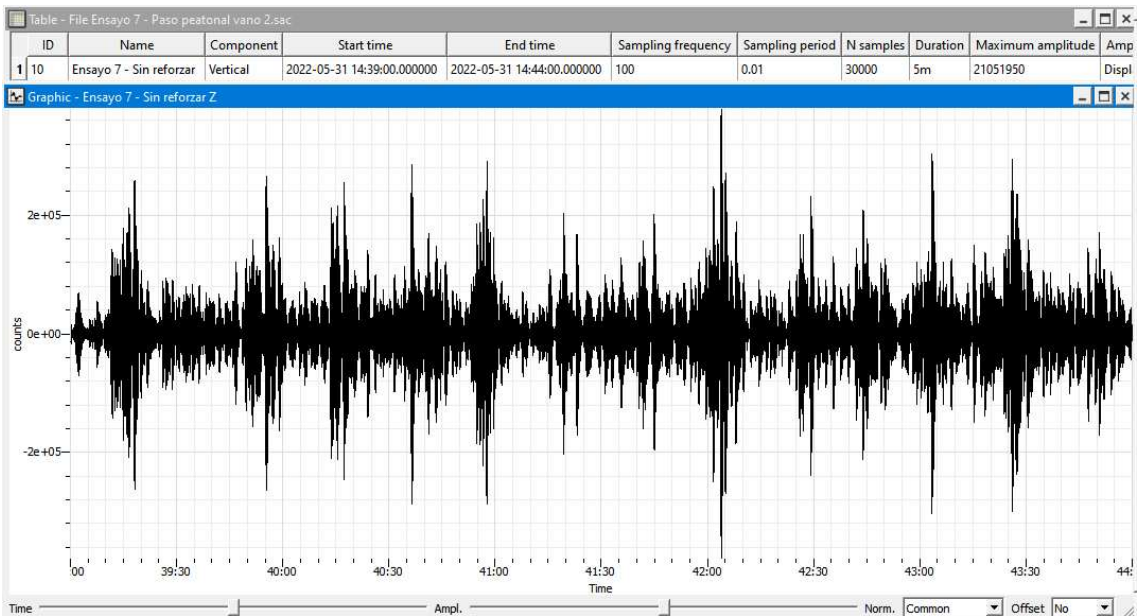


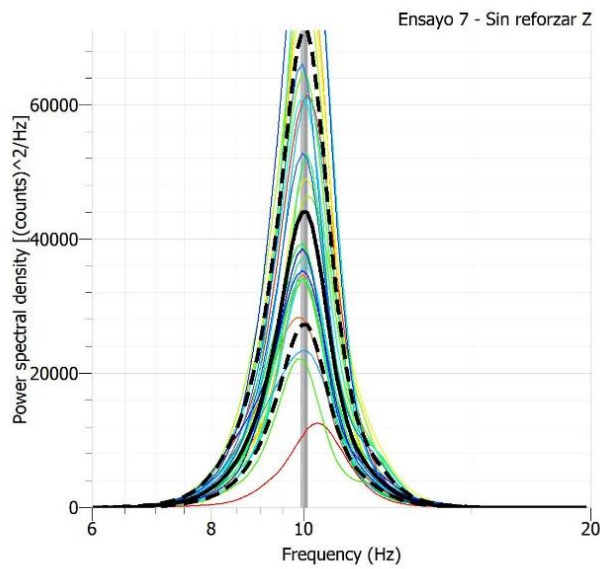
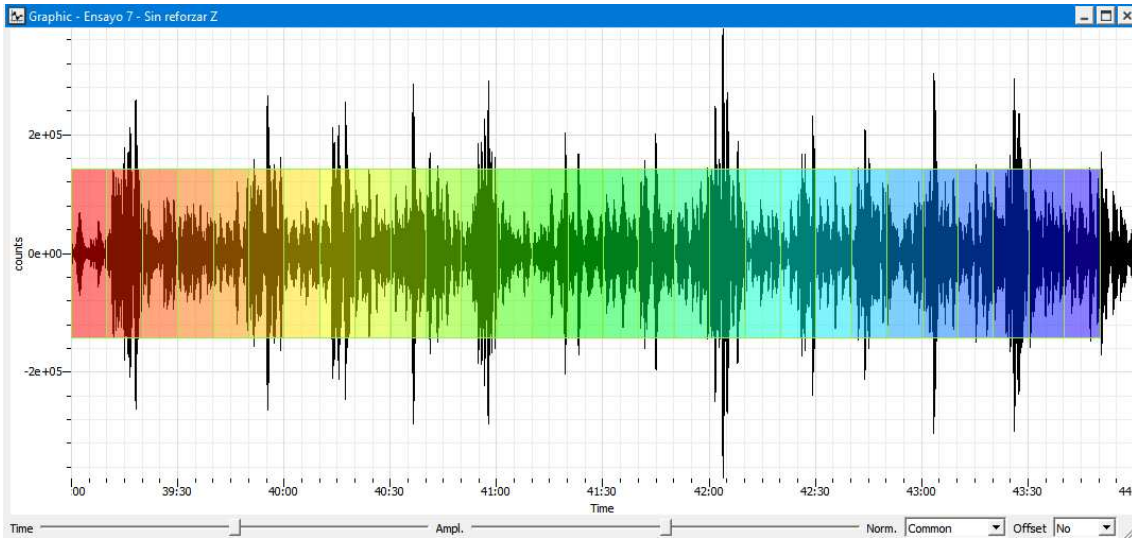



 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 6 - Sin reforzar Z	10.143	10.0109	10.277

Ensayo 7:



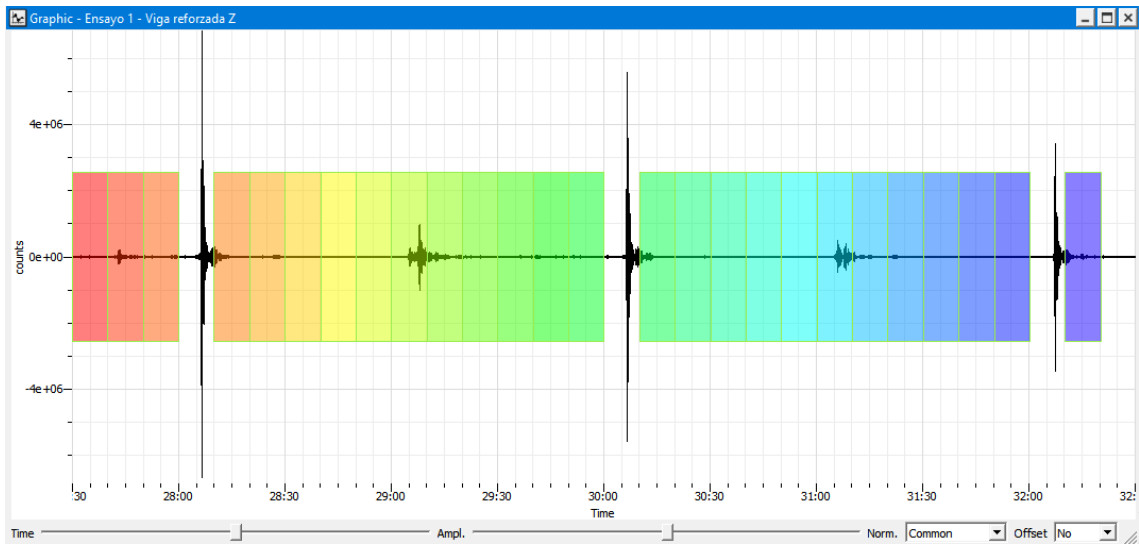
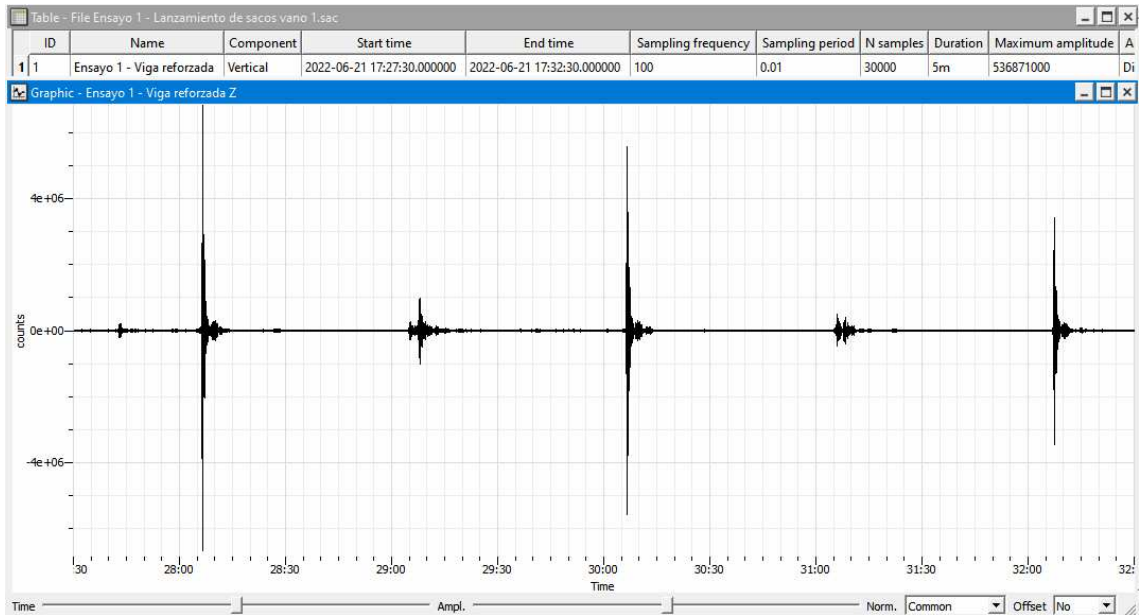


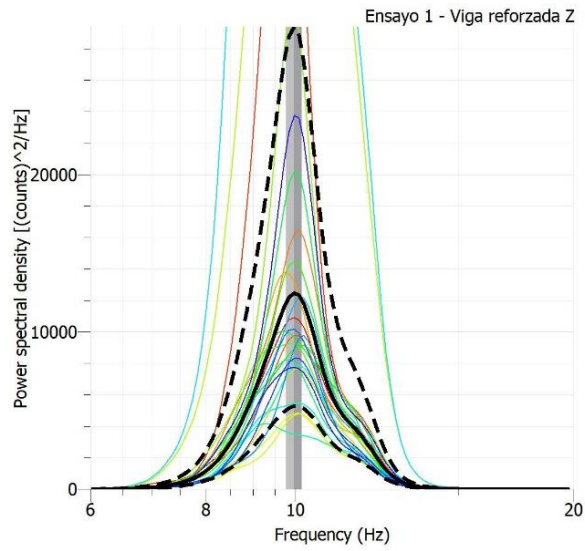
 Peak editor


	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 7 - Sin reforzar Z	10.0157	9.92266	10.1096

Ilustración 35. Ensayos con reforzamiento

Ensayo 1:

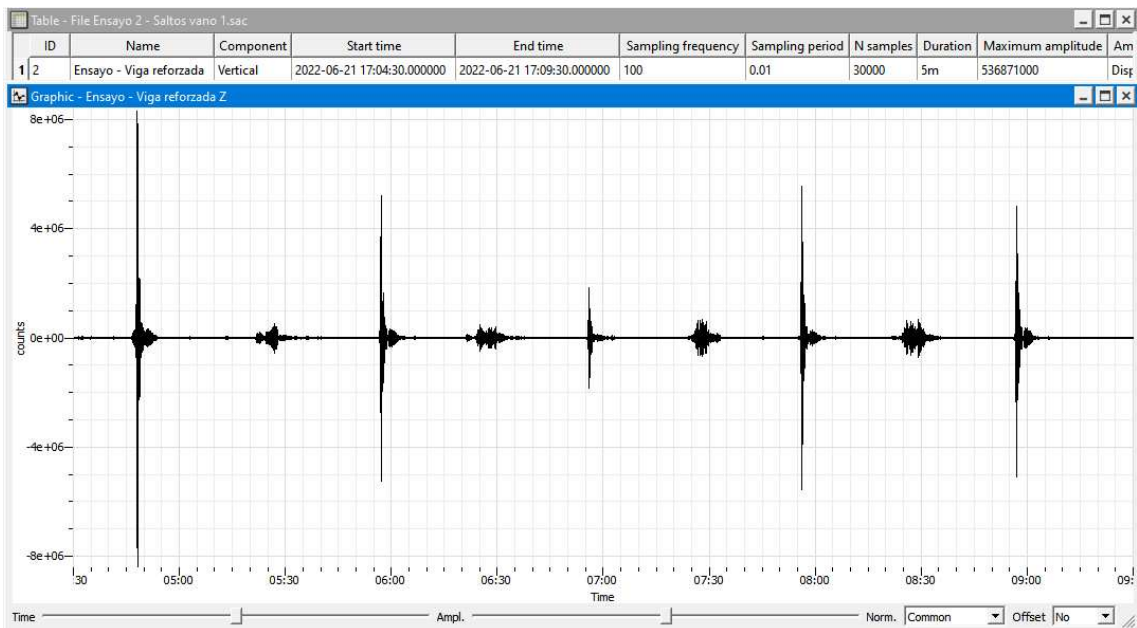


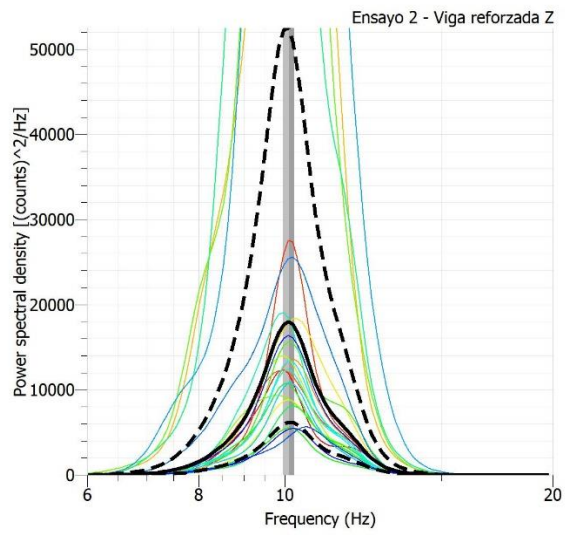
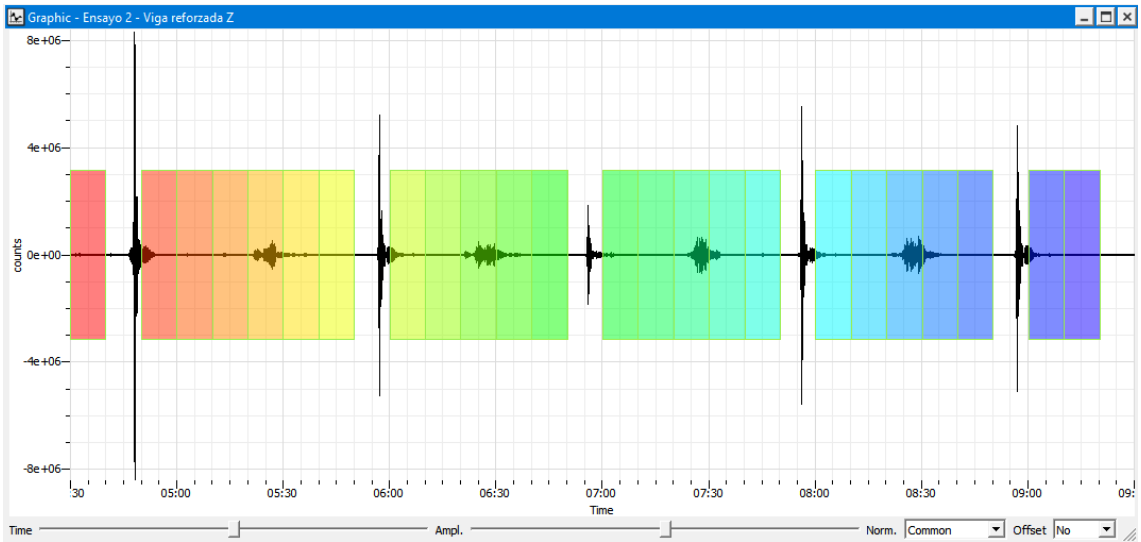


 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 1 - Viga reforzada Z	9.95623	9.76532	10.1509

Ensayo 2:

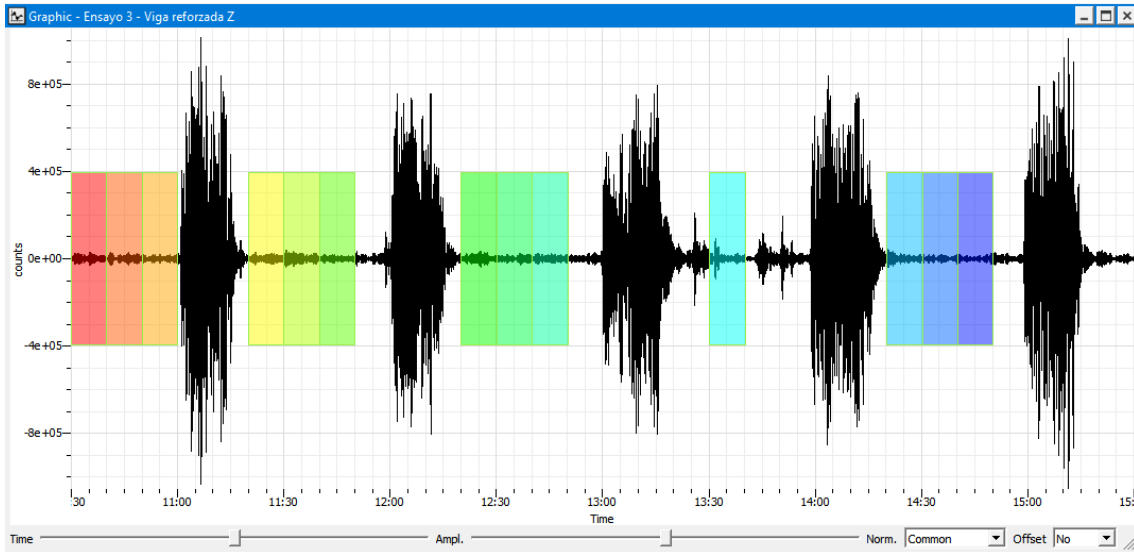
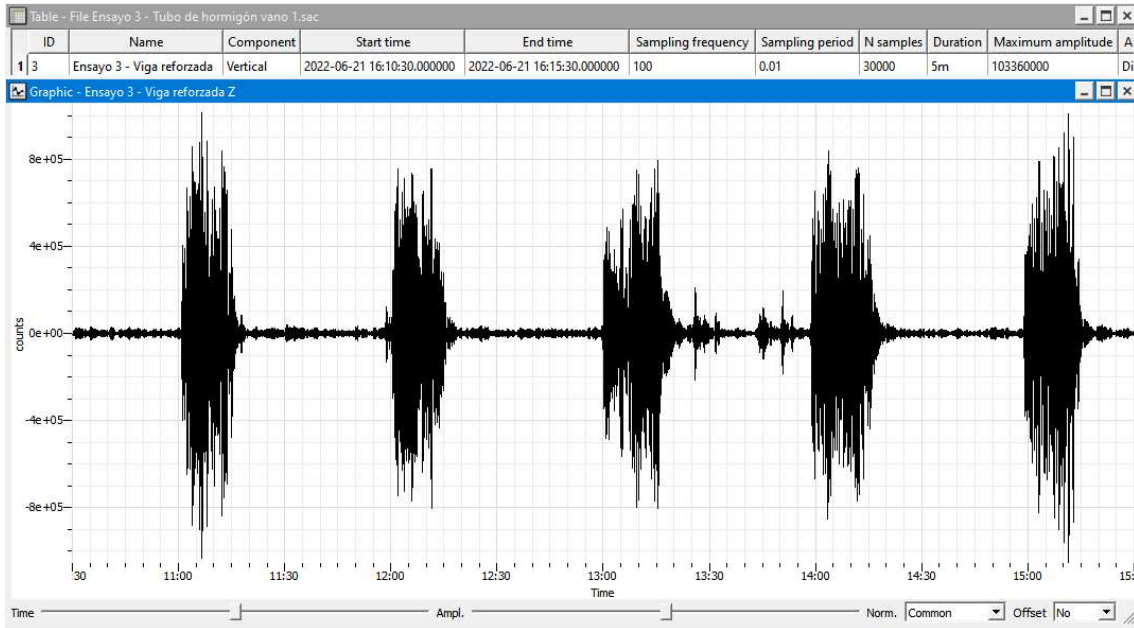


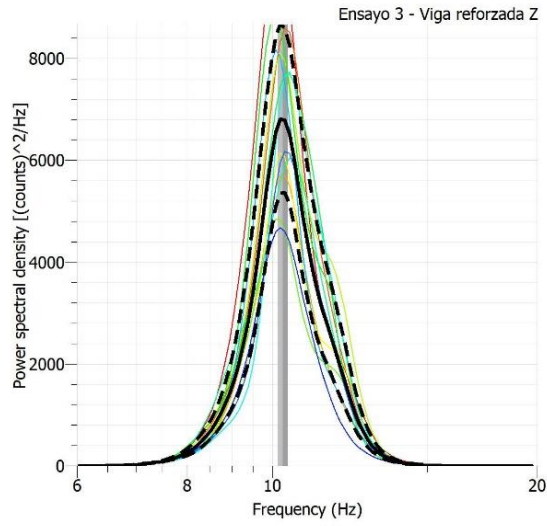



Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 2 - Viga reforzada Z	10.101	9.95031	10.2539

Ensayo 3:

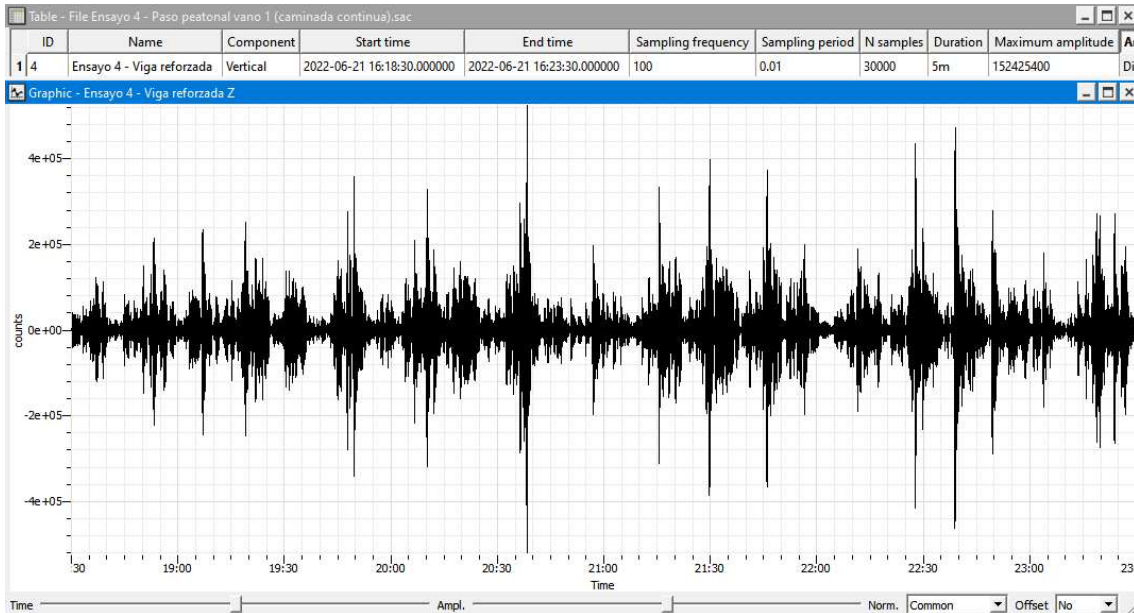


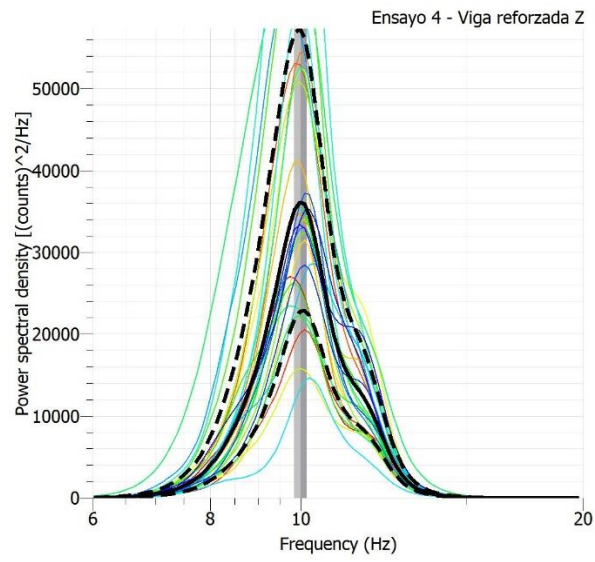
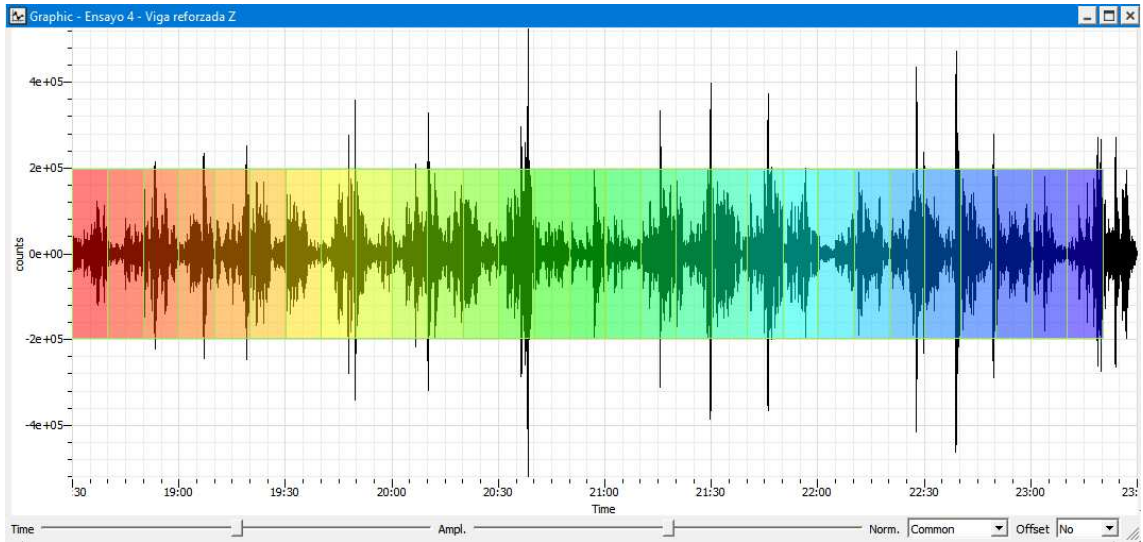



 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 3 - Viga reforzada Z	10.2795	10.1504	10.4103

Ensayo 4:

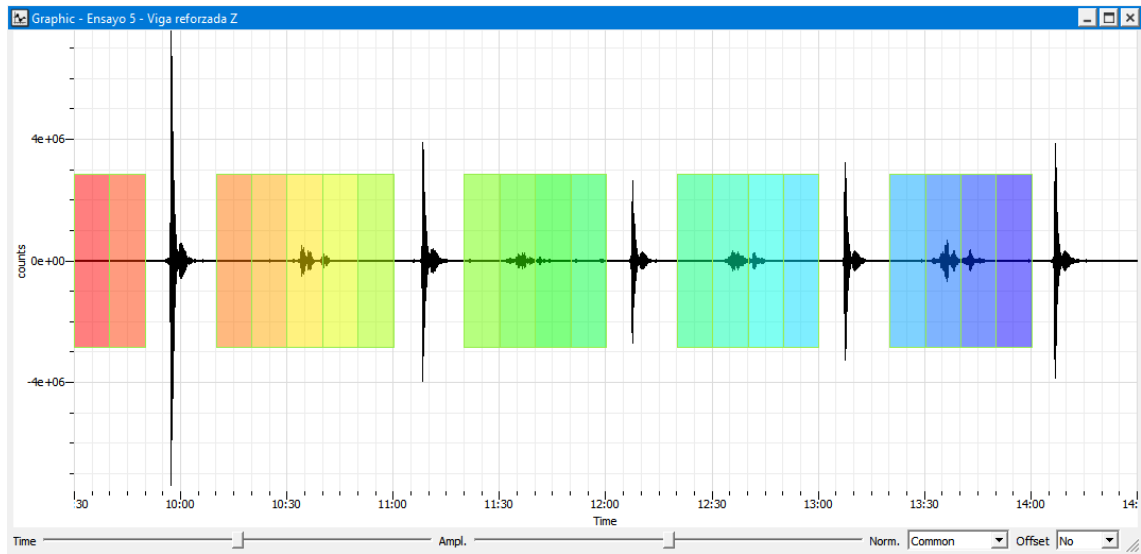
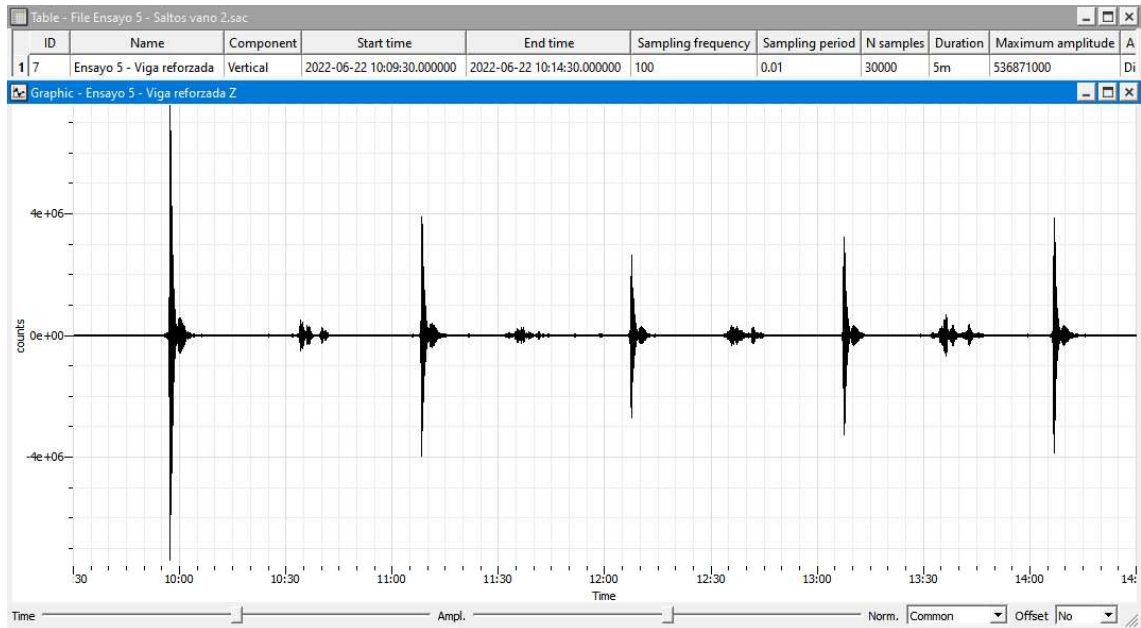


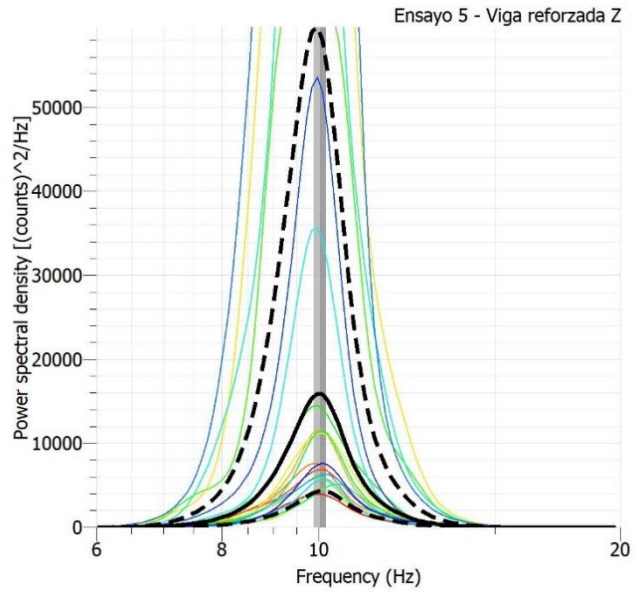


 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 4 - Viga reforzada Z	9.98665	9.83463	10.141

Ensayo 5:

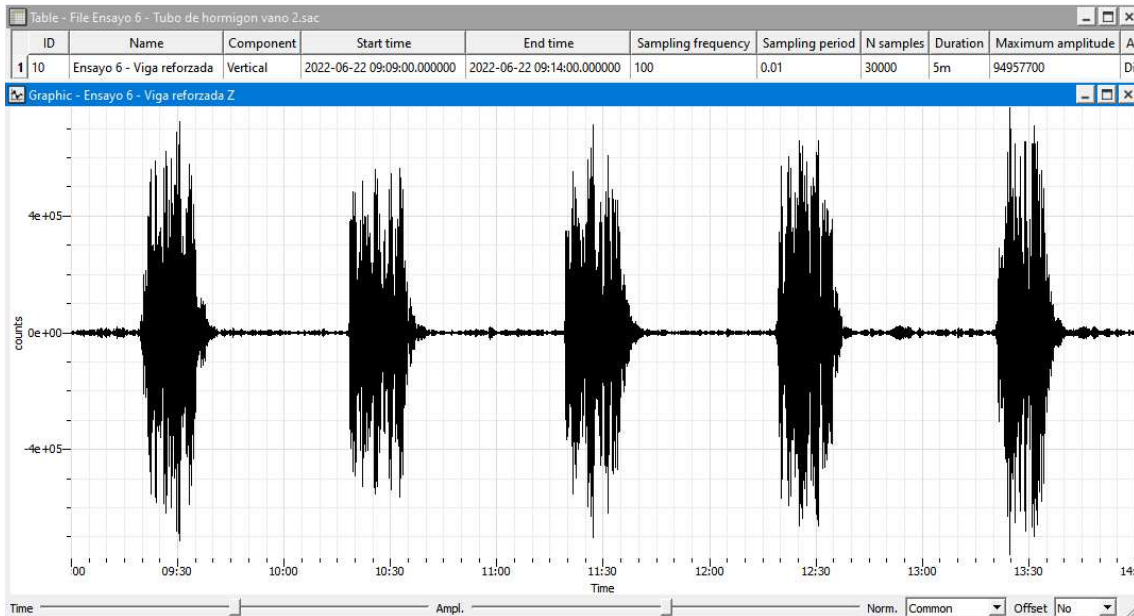


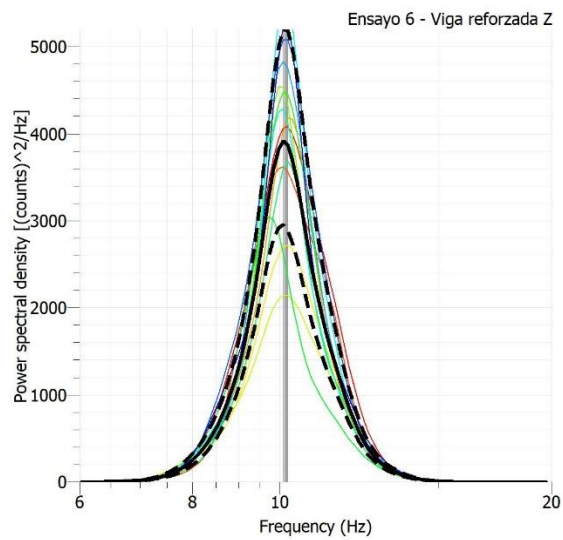
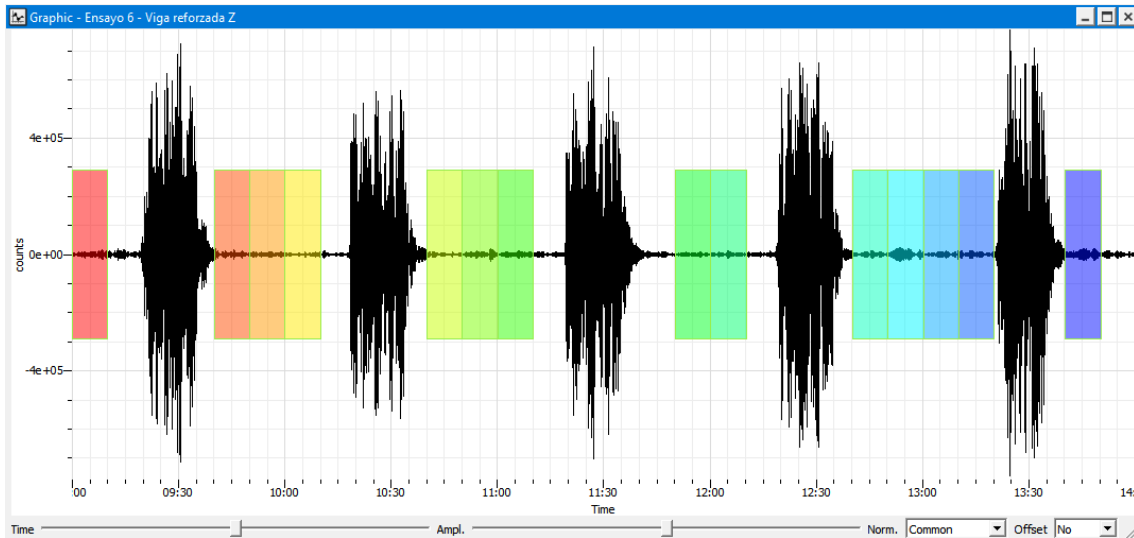


Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 5 - Viga reforzada Z	10.0271	9.88657	10.1696

Ensayo 6:

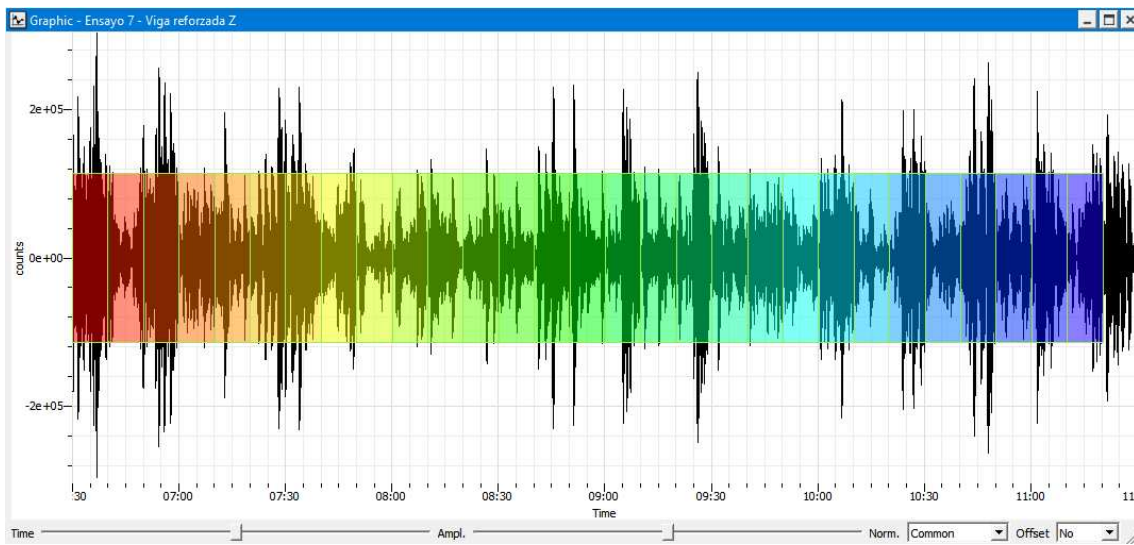
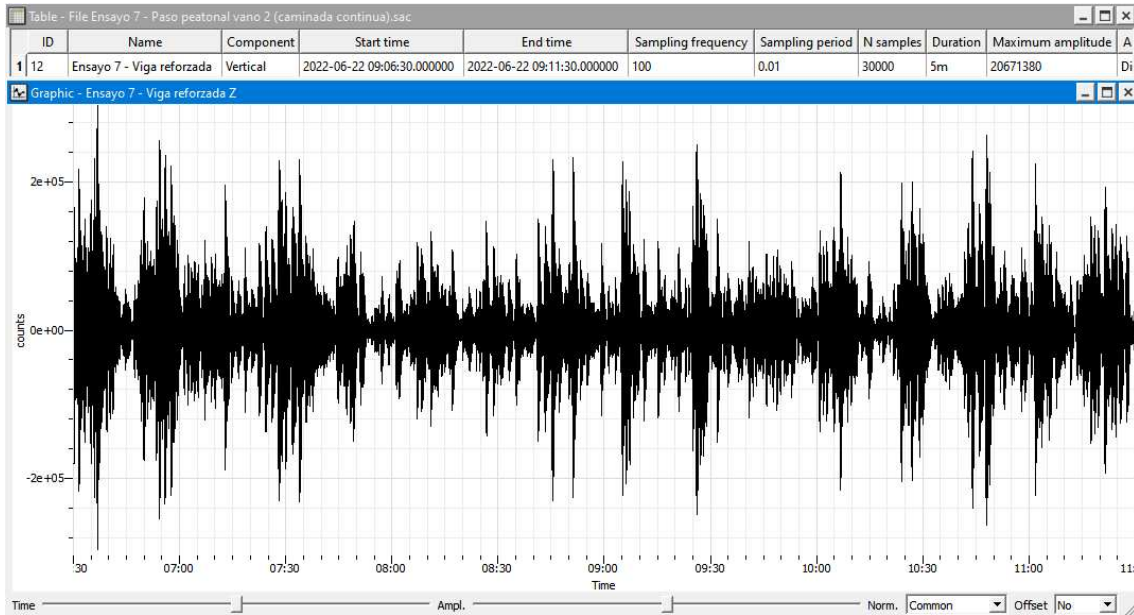


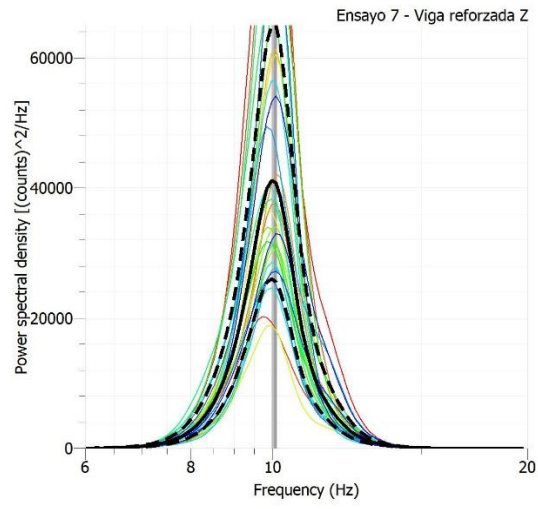



Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 6 - Viga reforzada Z	10.1416	10.0789	10.2047

Ensayo 7:





 Peak editor

	Station	Frequency (Hz)	f/stddev (Hz)	f*stddev (Hz)
1	Ensayo 7 - Viga reforzada Z	10.0434	9.97316	10.1142

ANEXO 5:

Conversión de unidades

Ilustración 36. Asignación de puntos

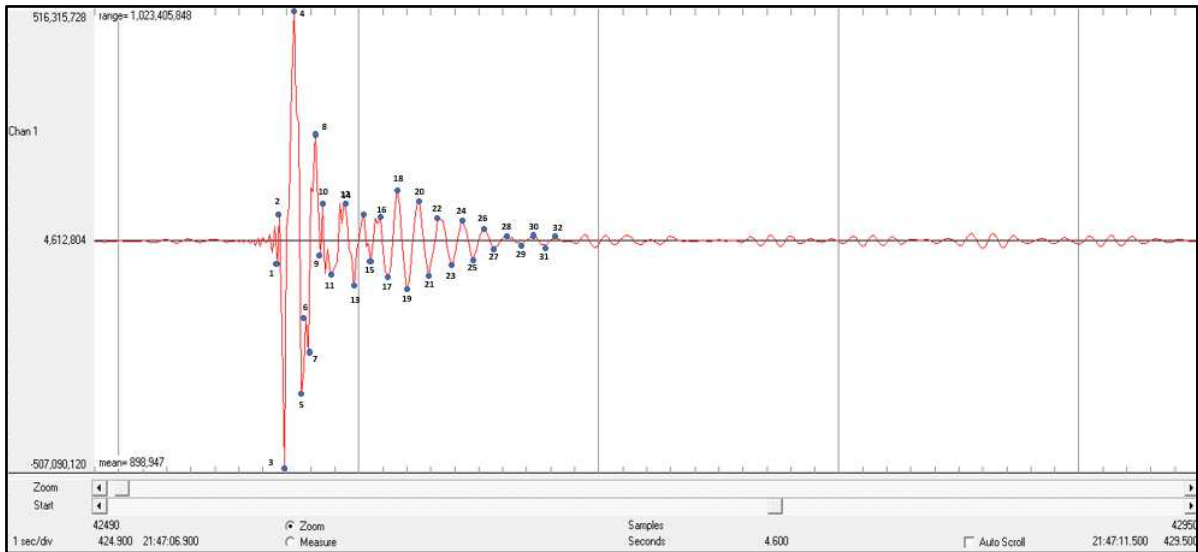


Ilustración 37. Ecuación de la recta

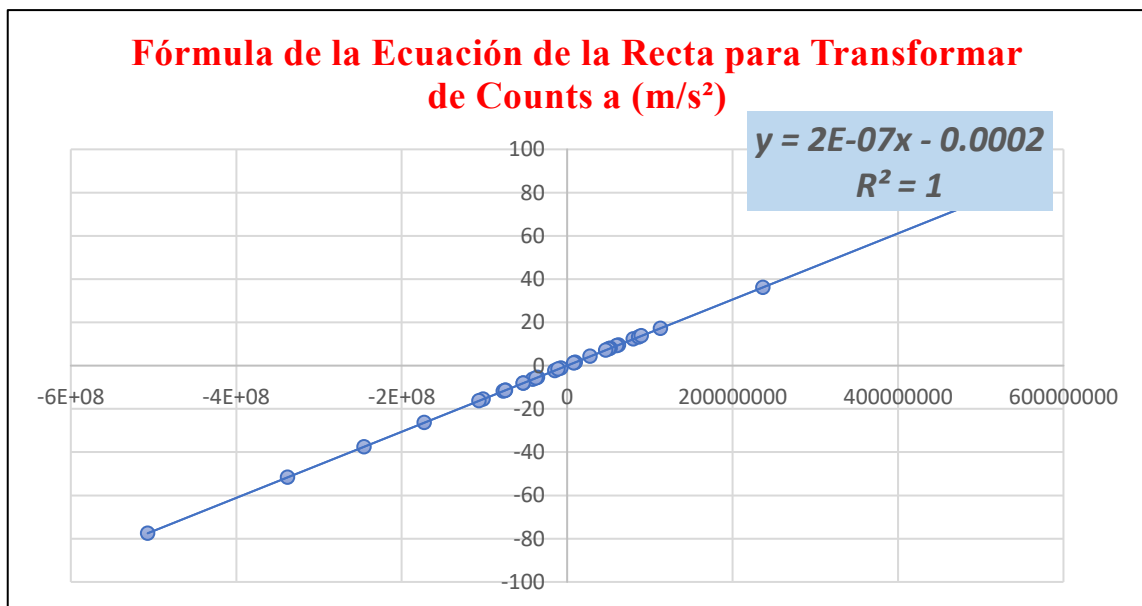


Tabla 17. Puntos obtenidos del Rt_{view} para la ecuación de la recta

Lanzamiento saco (10kg) 1er vano				
N°	Hora	Counts	m/s²	Fórmula (m/s²)
1	21:47:07.660	-52814639	-8.073	-10.5631278
2	21:47:07.670	62335131	9.529	12.4668262
3	21:47:07.680	-507090120	-77.51	-101.418224
4	21:47:07.690	516315728	78.92	103.2629456
5	21:47:07.700	-337736018	-51.63	-67.5474036
6	21:47:07.710	-172588212	-26.38	-34.5178424
7	21:47:07.720	-245353395	-37.5	-49.070879
8	21:47:07.730	236590727	36.17	47.3179454
9	21:47:07.740	-35613085	-5.444	-7.122817
10	21:47:07.750	80152705	12.25	16.030341
11	21:47:07.760	-74453779	-11.38	-14.8909558
12	21:47:07.770	86712404	13.25	17.3422808
13	21:47:07.780	-101318181	-15.49	-20.2638362
14	21:47:07.790	59754724	9.134	11.9507448
15	21:47:07.800	-41623041	-6.363	-8.3248082
16	21:47:07.810	52048413	7.956	10.4094826
17	21:47:07.820	-77024813	-11.77	-15.4051626
18	21:47:07.830	112964075	17.27	22.592615
19	21:47:07.840	-106535981	-16.29	-21.3073962
20	21:47:07.850	89841722	13.73	17.9681444
21	21:47:07.860	-74884501	-11.45	-14.9771002
22	21:47:07.870	50075703	7.655	10.0149406
23	21:47:07.880	-52911841	-8.088	-10.5825682
24	21:47:07.890	46612474	7.125	9.3222948
25	21:47:07.900	-37437231	-5.723	-7.4876462
26	21:47:07.910	27789263	4.248	5.5576526
27	21:47:07.920	-14877568	-2.274	-2.9757136
28	21:47:07.930	9018769	1.379	1.8035538
29	21:47:07.940	-7526575	-1.151	-1.505515
30	21:47:07.950	9946572	1.52	1.9891144
31	21:47:07.960	-10744896	-1.642	-2.1491792
32	21:47:07.970	8013032	1.225	1.6024064

Nota: Selección de picos significativos. Elaboración propia.

ANEXO 6:

Cálculo manual aproximado

FRECUENCIAS NATURALES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

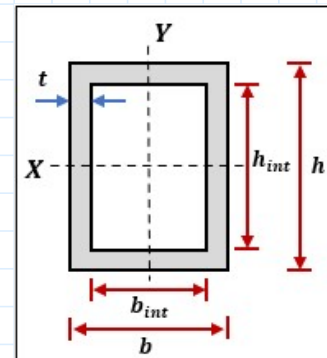
Viga Analizada

Propiedades Mecánicas

Peso específico del acero	$\gamma_s := 7850 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$
Límite de fluencia del acero	$f_y := 36 \text{ ksi} = 2531.05 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo elástico del acero o Módulo de Young	$E_s := 29000 \text{ ksi} = 2038901.781 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Propiedades de la Sección

Longitud de la viga	$L_{\text{viga15}} := 6 \text{ m}$
Base de la viga	$b_{\text{viga}} := 20 \text{ cm}$
Altura de la viga	$h_{\text{viga}} := 20 \text{ cm}$
Espesor de la viga	$t_{\text{viga}} := 4 \text{ mm}$
Base interior de la viga	$b_{\text{int}} := b_{\text{viga}} - 2 t_{\text{viga}} = 19.2 \text{ cm}$
Altura interior de la viga	$h_{\text{int}} := h_{\text{viga}} - 2 t_{\text{viga}} = 19.2 \text{ cm}$
Área de la sección cuadrada hueca	$A_{\text{viga15}} := b_{\text{viga}} \cdot h_{\text{viga}} - b_{\text{int}} \cdot h_{\text{int}} = 31.36 \text{ cm}^2$
Momento de inercia respecto eje X	$I_x := \frac{b_{\text{viga}} \cdot h_{\text{viga}}^3}{12} - \frac{b_{\text{int}} \cdot h_{\text{int}}^3}{12} = 2008.71 \text{ cm}^4$
Momento de inercia respecto eje Y	$I_y := \frac{h_{\text{viga}} \cdot b_{\text{viga}}^3}{12} - \frac{h_{\text{int}} \cdot b_{\text{int}}^3}{12} = 2008.71 \text{ cm}^4$



Losa Analizada

Propiedades Mecánicas

Peso específico del hormigón	$\gamma_c := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2447.319 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	NEC-SE-CG, 2015 Tabla 8
Resistencia del concreto	$f'_c := 240 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Planos
Módulo elástico del concreto	$E_c := 4.7 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \text{GPa} = 7352.637 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	NEC-SE-HM, 2015 Sección 3.3.3

Tal como se establece en el Capítulo 3, el módulo elástico nominal del hormigón se incrementa al realizar cálculos dinámicos:

Módulo dinámico de elasticidad del concreto

$$E_{c.dyn} := 1.1 E_c = 8087.901 \frac{kgf}{cm^2}$$

Propiedades de la Sección

Anchura del forjado (en dirección y)

$$b := 1.025 \text{ m} \quad \text{Separación entre vigas}$$

Longitud del forjado (en dirección x)

$$l := L_{viga15} = 6 \text{ m}$$

Espesor de la losa

$$e_{losa} := 10 \text{ cm}$$

Momento de inercia respecto eje X

$$I_{x.losa} := \frac{b \cdot e_{losa}^3}{12} = 8541.667 \text{ cm}^4$$

Cargas Actuantes

LOSA

Cargas Muertas:

Peso propio de la losa

$$P_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 2.4 \frac{kN}{m^2}$$

Peso de la malla electrosoldada

$$P_{malla} := 1.32 \frac{kg}{m^2}$$

Peso de la novalosa

$$P_{novalosa} := 7.47 \frac{kg}{m^2}$$

Peso total (malla+novalosa)

$$\Delta g := (P_{malla} + P_{novalosa}) \cdot g = 0.086 \frac{kN}{m^2}$$

Cargas Vivas:

Carga de uso o carga viva

$$C_{v.losa} := 2.40 \frac{kN}{m^2}$$

Factor considerado en cálculos dinámicos

$$f_{cv} := 10\%$$

Carga de uso dinámica

$$q_{losa} := C_{v.losa} \cdot f_{cv} = 0.24 \frac{kN}{m^2}$$

Peso muerto total

$$D := P_{losa} + \Delta g = 2.486 \frac{kN}{m^2}$$

VIGA

Cargas Muertas:

Peso propio de la viga

$$P_{viga} := \gamma_s \cdot A_{viga15} = 0.241 \frac{kN}{m}$$

Catálogo De
Productos
NOVACERO

NEC-SE-CG, 2015
Tabla 9
Carga de uso en
oficinas

ArcelorMittal -
Dr. Ing. Markus Feldmann

Peso muerto total de la viga

$$w_{viga} := (P_{losa} + \Delta g) \cdot b + P_{viga} = 2.79 \frac{kN}{m}$$

Cargas Vivas:

Peso vivo de la viga

$$q_{viga} := q_{losa} \cdot b = 0.246 \frac{kN}{m}$$

Peso total de la viga:

$$p := w_{viga} + q_{viga} = 3.036 \frac{kN}{m}$$

Masa distribuida del forjado

$$\mu := \frac{p}{g} = 309.563 \frac{kg}{m}$$

FRECUENCIA NATURAL Y MASA MODAL PARA EL CASO DE VIGAS

Masa distribuida del forjado

$$m := \mu = 309.563 \frac{kg}{m}$$

Anchura del forjado

$$b = 1.025 \text{ m}$$

Longitud de la viga

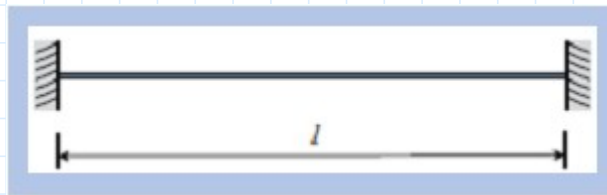
$$l = 6 \text{ m}$$

Masa total del sistema vibratorio

$$M := \mu \cdot l = 1857.375 \text{ kg}$$

Condiciones de apoyo

Empotrada – Empotrada ▾



Frecuencia Natural

$$f := \begin{cases} \text{if } Tipo = 1 \\ \left| \left| \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{3 E_s \cdot I_x}{0.37 \mu \cdot l^4}} \right| \right| \\ \text{if } Tipo = 2 \\ \left| \left| \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{3 E_s \cdot I_x}{0.2 \mu \cdot l^4}} \right| \right| \\ \text{if } Tipo = 3 \\ \left| \left| \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{3 E_s \cdot I_x}{0.49 \mu \cdot l^4}} \right| \right| \\ \text{else} \\ \text{if } Tipo = 4 \\ \left| \left| \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 E_s \cdot I_x}{0.24 \mu \cdot l^4}} \right| \right| \end{cases} = 11.471 \text{ Hz}$$

Masa Modal

$$M_{mod} := \begin{cases} \text{if } Tipo = 1 \\ \left| \left| 0.41 \cdot \mu \cdot l \right| \right| \\ \text{if } Tipo = 2 \\ \left| \left| 0.45 \cdot \mu \cdot l \right| \right| \\ \text{if } Tipo = 3 \\ \left| \left| 0.5 \cdot \mu \cdot l \right| \right| \\ \text{else} \\ \left| \left| \text{if } Tipo = 4 \right| \right| \\ \left| \left| 0.64 \cdot \mu \cdot l \right| \right| \end{cases} = 761.524 \text{ kg}$$

ENFOQUE DEL PESO PROPIO PARA EL CÁLCULO DE LA FRECUENCIA

Deformación de la losa

$$\delta_{losa} := \frac{5 (D + q_{losa}) \cdot b^4}{384 E_{c.dyn} \cdot I_{x_{losa}}} \cdot 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ mm}$$

Deformación de la viga

$$\delta_{viga} := \begin{cases} \text{if } Tipo = 1 \\ \left| \frac{p \cdot l^4}{384 E_s \cdot I_x} \right| \\ \text{if } Tipo = 2 \\ \left| \frac{p \cdot l^4}{185 E_s \cdot I_x} \right| \\ \text{if } Tipo = 3 \\ \left| \frac{5 \cdot p \cdot l^4}{384 E_s \cdot I_x} \right| \\ \text{else} \\ \text{if } Tipo = 4 \\ \left| \frac{p \cdot l^4}{8 E_s \cdot I_x} \right| \end{cases} = 0.255 \text{ cm}$$

Máxima deformación debida a la carga en relación con la masa m.

$$\delta_{m\acute{a}x} := \delta_{losa} + \delta_{viga} = 2.552 \text{ mm}$$

Frecuencia Natural Aproximada

$$f := \frac{18}{\sqrt{\frac{\delta_{m\acute{a}x}}{\text{mm}}}} \cdot \text{Hz} = 11.269 \text{ Hz}$$

Distribución de masa:

$$M = 1857.375 \text{ kg}$$

Masa Modal Fórmula

$$M_{mod} := M \left[\frac{\delta_{viga}^2 + \delta_{losa}^2}{2 \cdot \delta_{m\acute{a}x}^2} + \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\delta_{viga} \cdot \delta_{losa}}{\delta_{m\acute{a}x}^2} \right] = [928.608] \text{ kg}$$

Partiendo de la fórmula general de frecuencia podemos encontrar la rigidez de la estructura:

Fórmula general de la frecuencia natural:

$$f = \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Rigidez de la estructura:

$$K := \frac{M \cdot g}{\frac{3}{4} \cdot \delta_{m\acute{a}x}} = 970581.152 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

MASA MODAL DE TODA LA ESTRUCTURA ROBOT

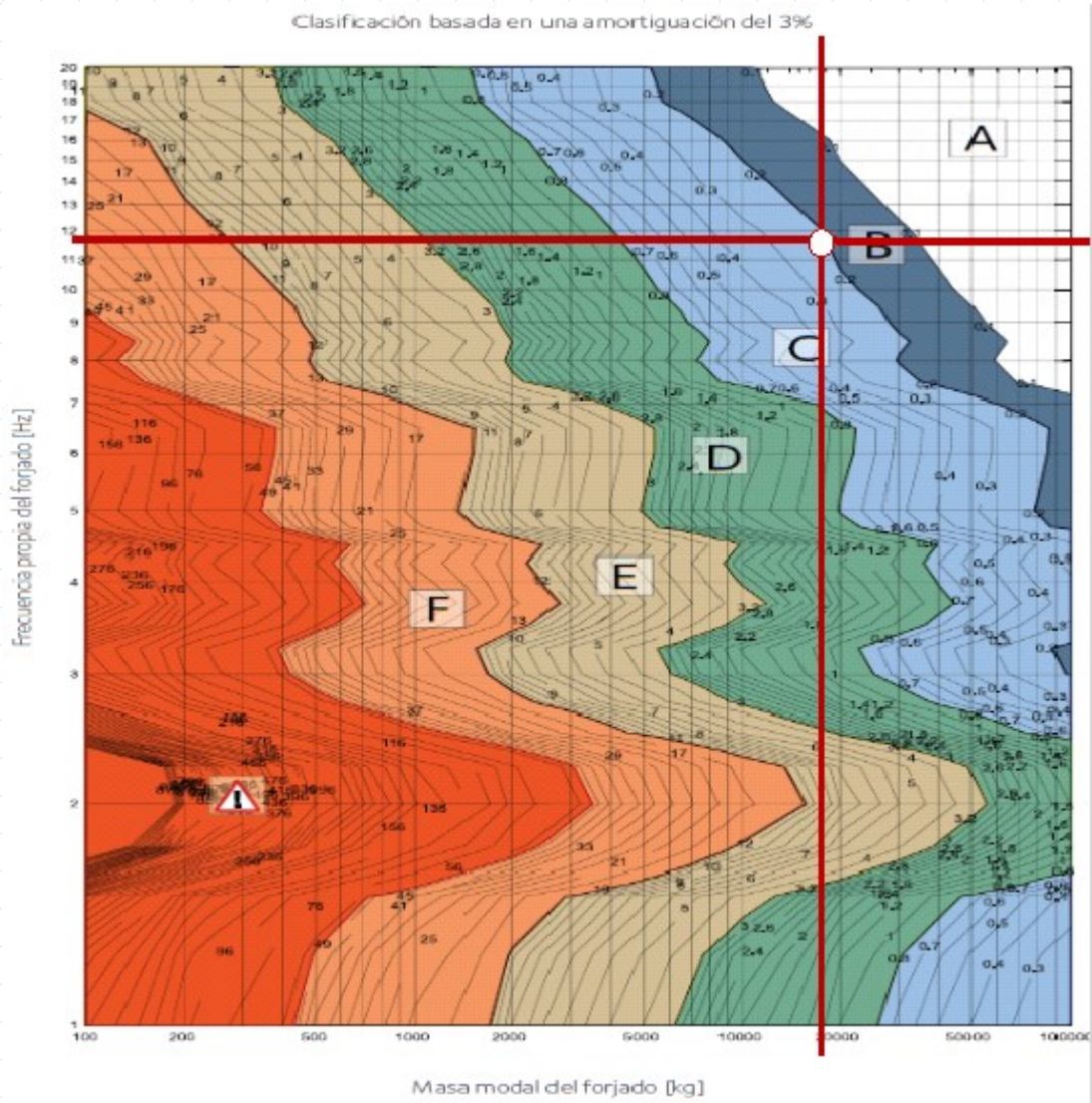
Masa Modal obtenido del Robot

$$M_{modal} := 19341.25 \text{ kg}$$

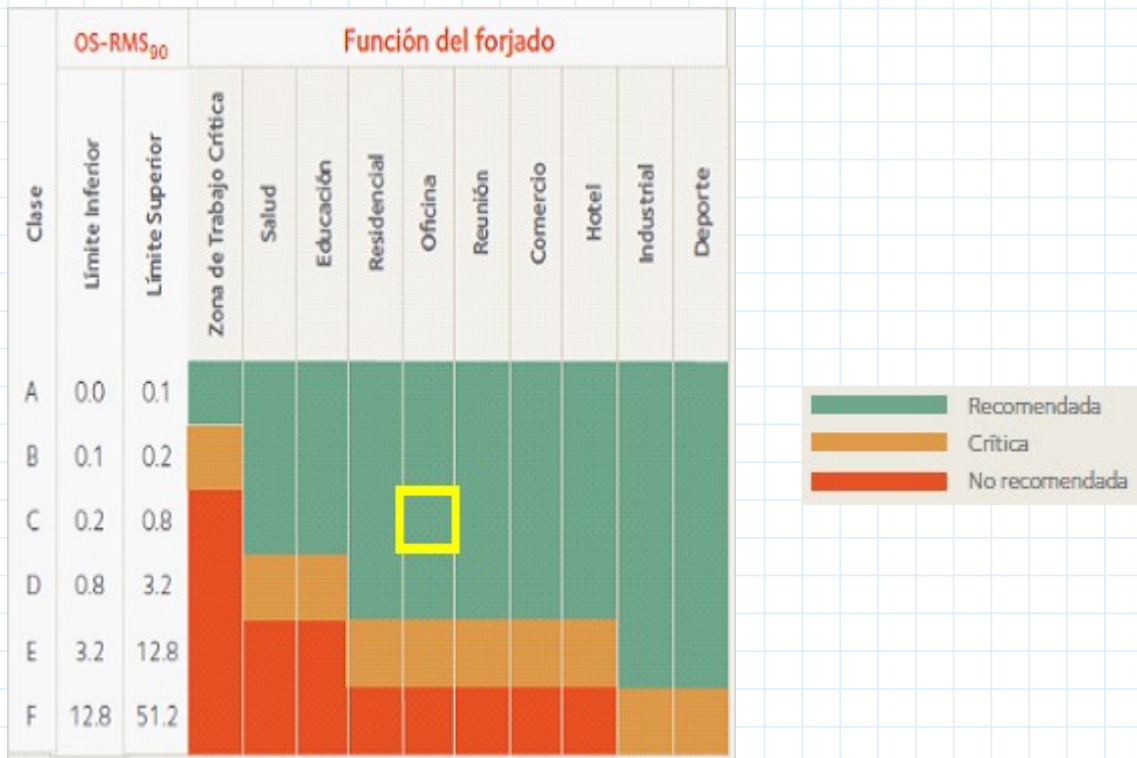
AMORTIGUACIÓN:

	Tipo	% de la amortiguación crítica
Amortiguación estructural	Mixta (Hormigón – Acero) ▾	$D_1 = 1\%$
Amortiguación debida al mobiliario	Oficina tradicional para 1 a 3 personas con tabiques de separación ▾	$D_2 = 2\%$
Amortiguación debida a terminaciones	Parquet flotante ▾	$D_3 = 0$
Amortiguación total	$D := D_1 + D_2 + D_3 = 3\%$	

OS-RMS90:



CLASIFICACIÓN DE LA RESPUESTA DEL FORJADO Y RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE CLASES:



ANEXO 7:

Planos



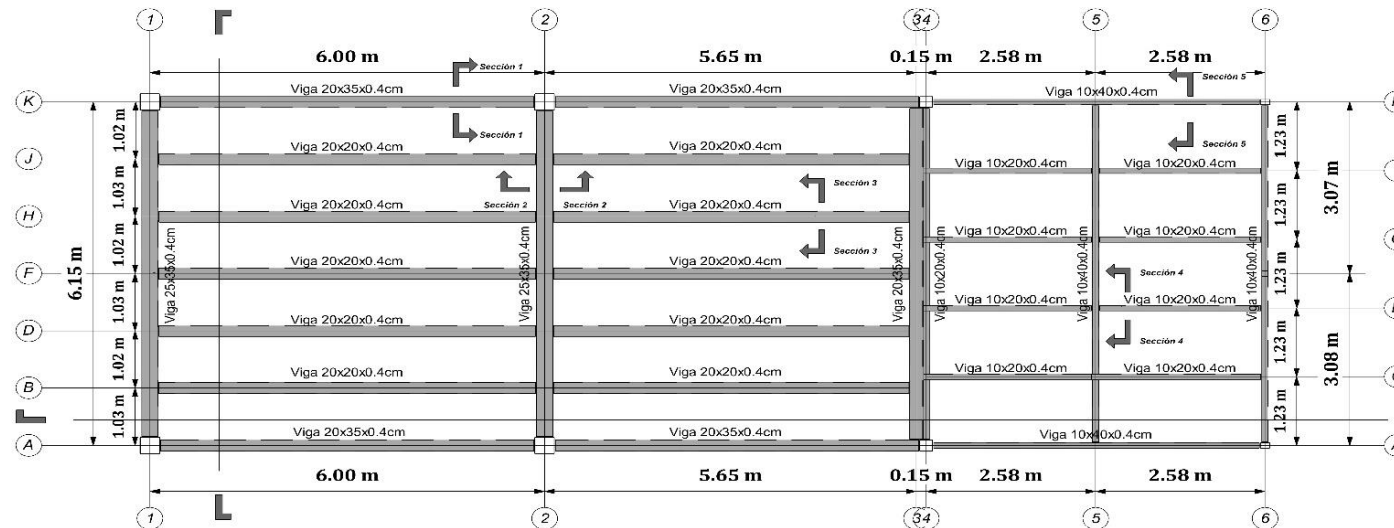
Universidad
Católica de
Cuenca

Proyecto:
Reforzamiento de Estructura Metálica con
Fibra de Carbono para reducir Vibraciones

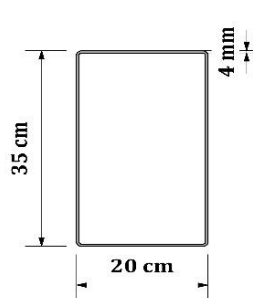
Ubicación:



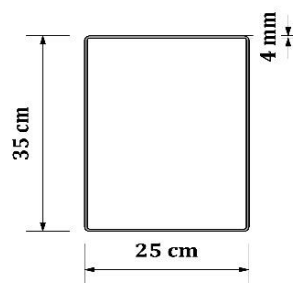
Especificaciones Técnicas:



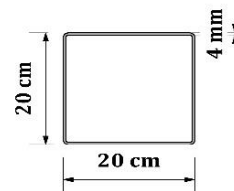
1 **Vista en Planta**
1 : 100



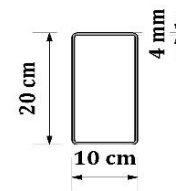
2 **Sección 1**
1 : 10



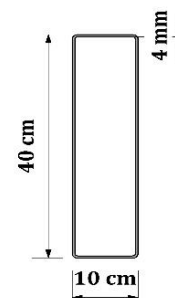
3 **Sección 2**
1 : 10



4 **Sección 3**
1 : 10



5 **Sección 4**
1 : 10



6 **Sección 5**
1 : 10

Contiene:

Plano Estructural

Integrantes:

Christian Fernández
Marilu Jiménez

Fecha:

29/07/2022

Escala:

Como se
indica

Lámina:

1/3



Universidad
Católica de
Cuenca

Proyecto:
Reforzamiento de Estructura Metálica con
Fibra de Carbono para reducir Vibraciones

Ubicación:



Especificaciones Técnicas:

Contiene:

Cortes y Elevaciones

Integrantes:

Christian Fernández
Marilu Jiménez

Fecha:

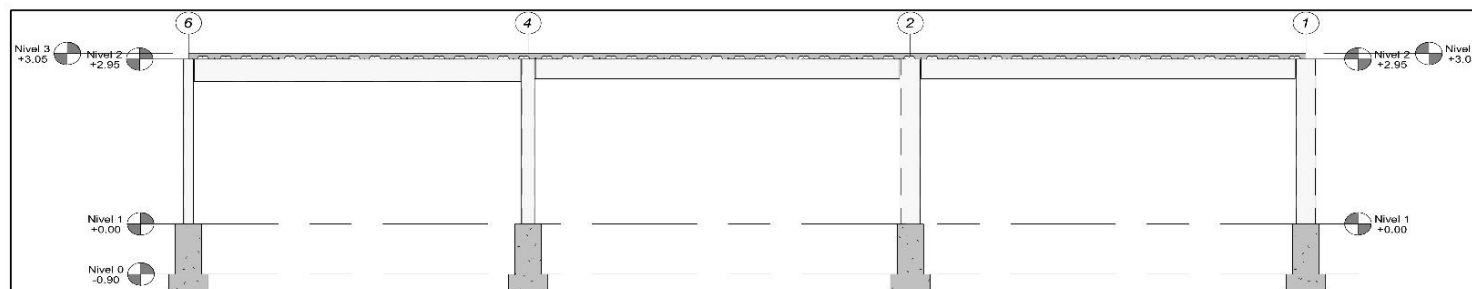
29/07/2022

Escala:

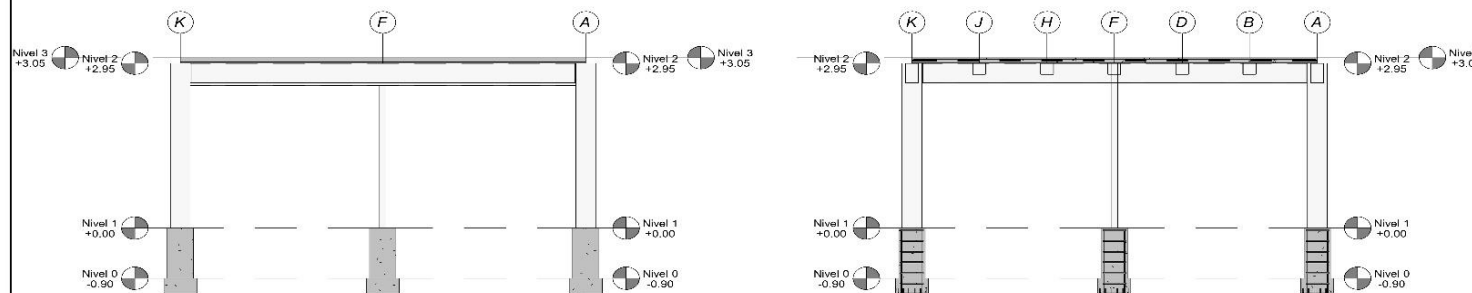
1 : 100

Lámina:

2/3

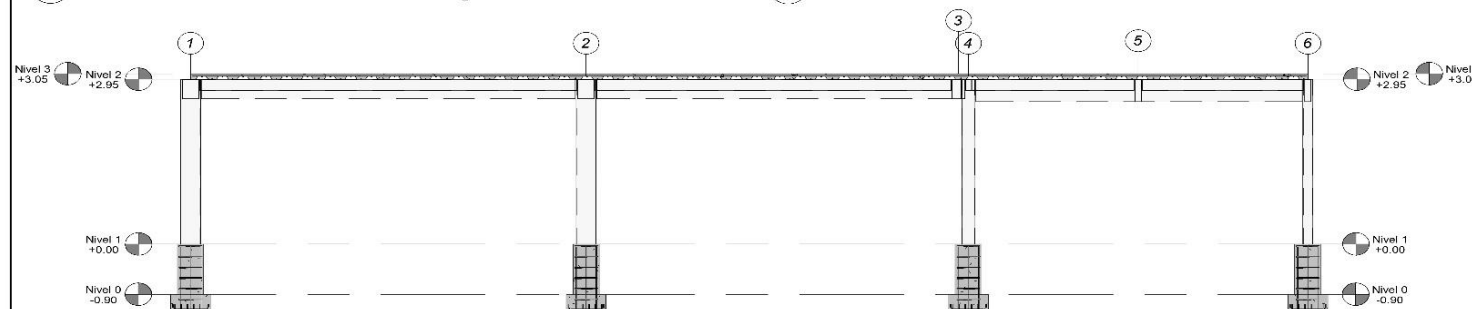


1 Elevación Frontal - Posterior



2 Elevación Lateral Derecha - Izquierda

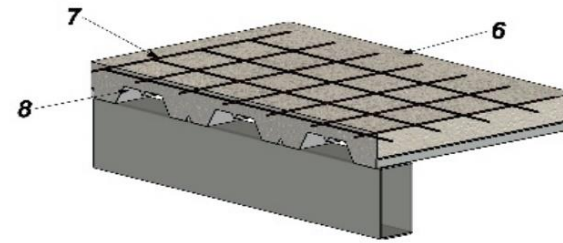
3 Corte Transversal



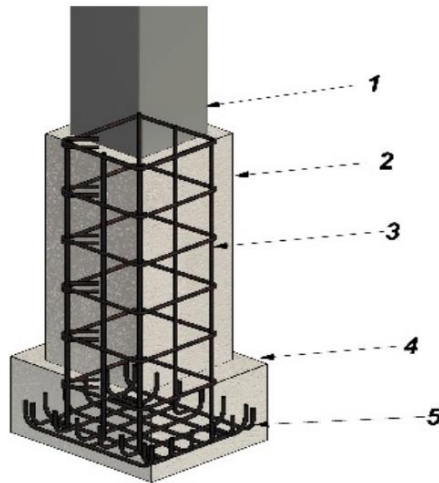
4 Corte Longitudinal



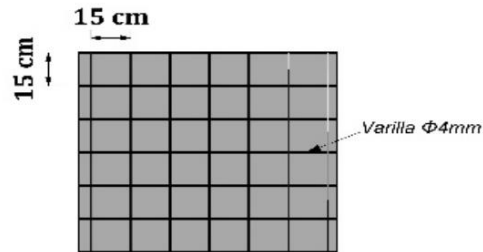
1 Modelo 3D



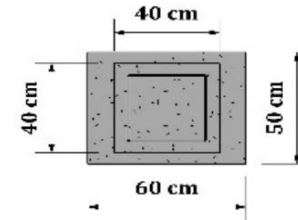
3 Detalles Losa



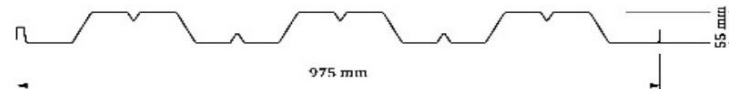
2 Armado Zapata-columna



4 Malla Electrosoldada R84



5 Zapata de Hormigón



6 Novalosa 55



Universidad
Católica de
Cuenca

Proyecto:
Reforzamiento de Estructura Metálica con
Fibra de Carbono para reducir Vibraciones

Ubicación:



Especificaciones Técnicas:

1. Columna cajón 30x30x0.5cm
2. Plinto de hormigón h=90cm
3. Varilla $\Phi 12\text{mm}$ x 6unid.
4. Zapata de hormigón de 60x50x30cm
5. Varilla $\Phi 12\text{mm}$ x 6unid.
6. Losa: e=10cm
 $f_c=240 \text{ kg/cm}^2$
7. Malla electrosoldada R84
8. Placa colaborante Novacoro e=0.76mm

Contiene:

Detalles

Integrantes:

Christian Fernández
Marilu Jiménez

Fecha:

29/07/2022

Escala:

1 : 10

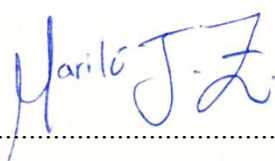
Lámina:

3/3

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

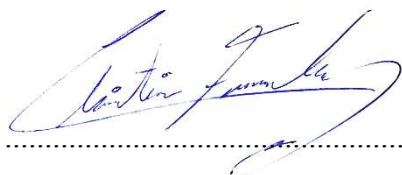
Nosotros, **Christian Stuard Fernández Quilca** y **Lesly Marilu Jimenez Zapata** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 030206269-0 y 140123235-8. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Reforzamiento de viga metálica con fibra de carbono para reducir vibraciones”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **25 de agosto de 2022**

F: 

Lesly Marilú Jiménez Zapata

C.I. 140123235-8

F: 

Christian Stuard Fernández Quilca

C.I. 030206269-0