



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

ESTUDIO DEL CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE
MAMPOSTERÍA POR EFECTO DEL DETERIORO DE LOS MATERIALES

PRESENTA

Ing. Tonatiuh Cordero Hernández

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
EN EL AREA DE ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORAL

Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Aguascalientes, Ags. 18 de Noviembre del 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

No. Oficio: CCDC-D-224-12

Asunto: Integración de Comité Tutorial
programada de Maestría en Ingeniería Civil

ING. TONATIUH CORDERO HERNÁNDEZ
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 105-G Sección 2 del Capítulo XI del Reglamento General de Docencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, me permito designar como tutor al DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ y como asesores al DR. GERARDO ARAIZA GARAYGORDOBIL y al DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO del proyecto de tesis titulado “ESTUDIO DEL CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA POR EFECTO DE ENVEJECIMIENTO Y DETERIORO DE LOS MATERIALES” del programa de posgrado Maestría en Ingeniería Civil, desde ahora y hasta la culminación, entrega y presentación final de la misma.

Esta asignación de comité tutorial sustituye a cualquier otra realizada con fecha anterior. Sin otro particular lo exhorto a que continúe trabajando con esmero y dedicación para que pueda obtener el grado en el tiempo y forma establecidos en nuestra legislación vigente.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”

Aguascalientes, Ags., 09 de noviembre de 2012.


DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO

c.c.p. Dr. Jesús Pacheco Martínez- Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. Archivo
JPM/cgm.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEON
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO
Y DE LA CONSTRUCCION.
P R E S E N T E.

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **TONATIUH CORDERO HERNÁNDEZ** con **ID 147861** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO DEL CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA POR EFECTO DEL DETERIORO DE LOS MATERIALES** y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 22 de Noviembre de 2013.

Dr. Jesús Pacheco Martínez.
Tutor de tesis.

V.B.
MEZ

- c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaria de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

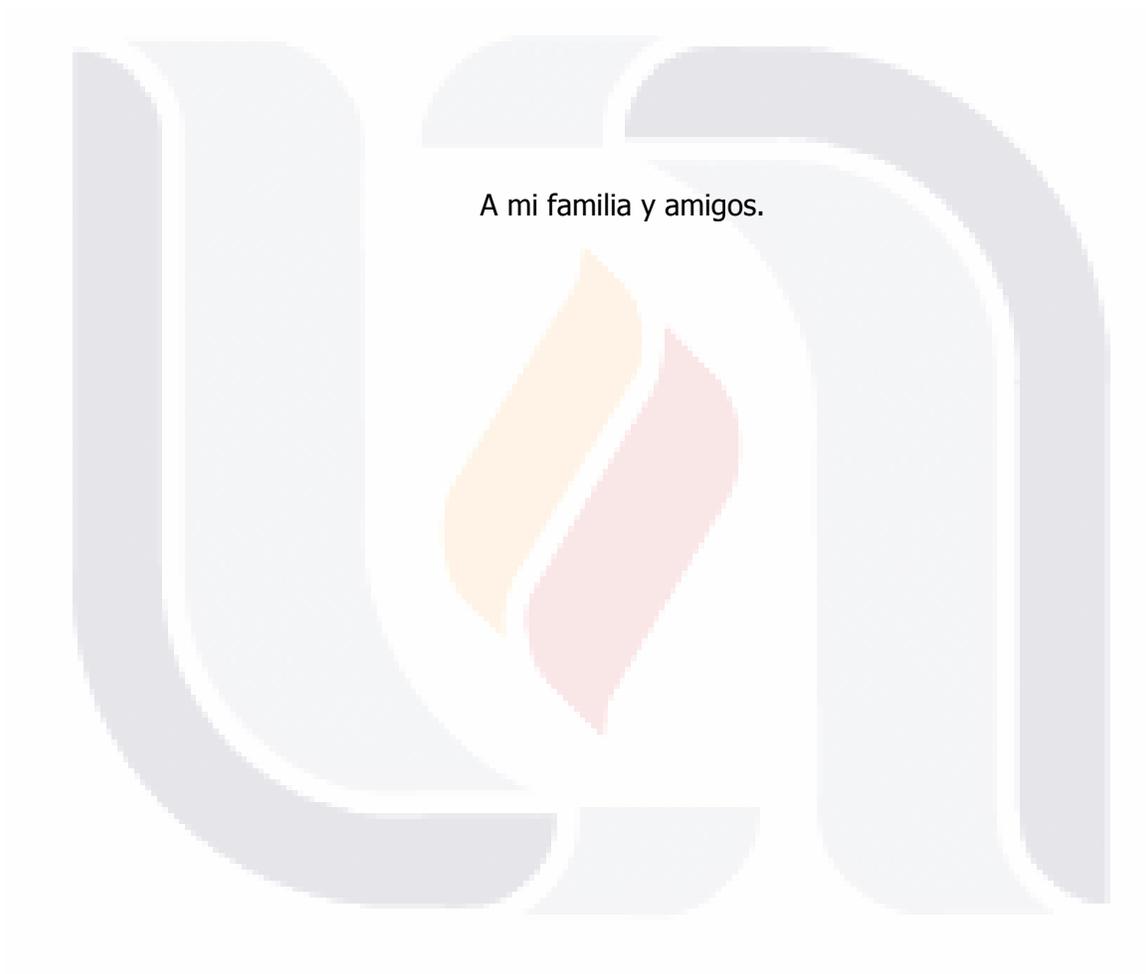
AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por apoyarme durante el transcurso de la maestría y el desarrollo de mi Tesis, a mis padres Cuquis y Armando y mis hermanos Andrea, Flora y Yosafat. También quiero agradecer a mis compañeros los Vengadores y los Gallos por ofrecerme su amistad en especial a Marisol, Job y Héctor por su colaboración en mi proyecto de investigación. Ivonne gracias por tu cariño, apoyo, aliento y jalones de oreja, junto a Laura y Raudel se convirtieron en mi familia de Aguascalientes.

Mi gratitud a mis profesores y asesores por el conocimiento que me compartieron y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico indispensable para la realización de la investigación.

Para finalizar quiero agradecer a mi tutor el Doctor Jesús Pacheco Martínez ya que sin su ayuda y dirección este trabajo no hubiera sido posible.

DEDICATORIA



A mi familia y amigos.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL _____	1
INDICE DE TABLAS _____	3
INDICE DE FIGURAS _____	7
INDICE DE ECUACIONES _____	11
RESUMEN _____	12
ABSTRACT _____	13
INTRODUCCIÓN _____	14
CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE _____	23
CAPITULO 2. MARCO TEORICO _____	32
2.1. LEY DE HOOKE _____	32
2.2. CONSTANTES ELÁSTICAS _____	33
2.3. TEORÍA DE LAS ONDAS MECÁNICAS _____	34
2.3.1. ONDAS DE CUERPO _____	34
2.4. TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA _____	37
2.5. DINÁMICA ESTRUCTURAL _____	38
2.5.1. FRECUENCIA NATURAL DE VIBRACIÓN. _____	39
2.5.2. VIBRACIÓN LIBRE Y FORZADA. _____	39
2.5.3 VIBRACIÓN AMBIENTAL _____	40
CAPITULO 3. METODOLOGÍA _____	42
3.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE PRUEBA DE LABORATORIO _____	43
3.2. DEGRADACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES _____	45
3.3. EQUIPO UTILIZADO _____	45
3.3.1. EQUIPO DE CÓMPUTO _____	45

3.3.2. SISMÓGRAFO DE EXPLORACIÓN ULTRA LIGERO GEODE_____	46
3.3.3. HIDROLAVADORA_____	50
3.4. COLOCACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SENSORES_____	50
3.4.1. ARREGLO DE SENSORES PARA VIBRACIÓN AMBIENTAL Y FORZADA _	51
3.4.2. ARREGLO DE SENSORES PARA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS _____	53
CAPITULO 4. RESULTADOS _____	56
4.1. MODULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS _____	56
4.2. MÓDULOS DE ELASTICIDAD ESTÁTICOS_____	74
4.3. FRECUENCIAS NATURALES_____	81
4.4. MODELO NUMÉRICO _____	116
4.4.1. CALIBRACIÓN DE MODELO NUMÉRICO _____	121
4.5. COMPARACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS RESULTANTES _____	125
CAPITULO 5. DISCUSION DE RESULTADOS _____	129
CONCLUSIONES _____	132
GLOSARIO _____	133
REFERENCIAS _____	134
ANEXOS _____	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Módulos elásticos del arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 56

Tabla 2 Módulos elásticos arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 57

Tabla 3 Módulos elásticos del arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 57

Tabla 4 Módulos elásticos arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 58

Tabla 5 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 60

Tabla 6 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 60

Tabla 7 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 61

Tabla 8 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 61

Tabla 9 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 63

Tabla 10 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 63

Tabla 11 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 64

Tabla 12 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 64

Tabla 13 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 65

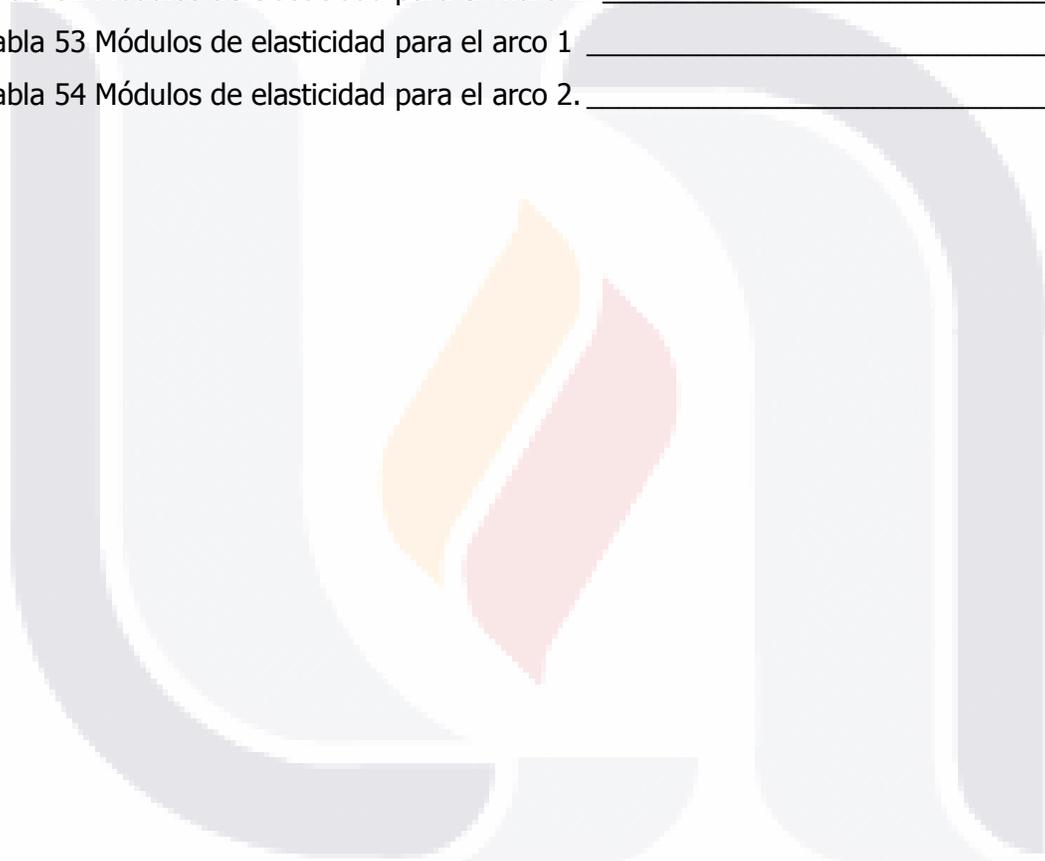
Tabla 14 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento. _____ 65

Tabla 15 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa. _____ 66

Tabla 16 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.	66
Tabla 17 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.	69
Tabla 18 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.	69
Tabla 19 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.	70
Tabla 20 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.	70
Tabla 21 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.	71
Tabla 22 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.	71
Tabla 23 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.	72
Tabla 24 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.	72
Tabla 25 Factores correctivos por esbeltez de las pilas.	75
Tabla 26 Resumen de Módulos elásticos obtenidos correspondientes a los muretes probados.	81
Tabla 27 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.	90
Tabla 28 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.	90
Tabla 29 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.	91
Tabla 30 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.	91
Tabla 31 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.	92

Tabla 32 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.	92
Tabla 33 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.	93
Tabla 34 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.	93
Tabla 35 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.	94
Tabla 36 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.	94
Tabla 37 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.	95
Tabla 38 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.	95
Tabla 39 Frecuencias naturales del Arco 1 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.	111
Tabla 40 Frecuencias naturales del Arco 1 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.	111
Tabla 41 Frecuencias naturales del Arco 2 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.	112
Tabla 42 Frecuencias naturales del Muro 2 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.	112
Tabla 43 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.	121
Tabla 44 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.	122
Tabla 45 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.	122
Tabla 46 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 2. usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.	123
Tabla 47 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada.	123

Tabla 48 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada. _____	124
Tabla 49 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada. _____	124
Tabla 50 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada. _____	125
Tabla 51 Módulos de elasticidad para el muro 1. _____	126
Tabla 52 Módulos de elasticidad para el muro 2. _____	126
Tabla 53 Módulos de elasticidad para el arco 1 _____	127
Tabla 54 Módulos de elasticidad para el arco 2. _____	127



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo de propagación de onda P y S (Imagen, www.funvisis.gob.ve) _____ 35

Figura 2 Elementos de un sistema vibratorio _____ 39

Figura 3 Medidas de muro de tabique rojo recocido. _____ 44

Figura 4 Medidas de arco de tabique rojo recocido. _____ 44

Figura 5 Equipo de cómputo utilizado. _____ 46

Figura 6 Gráfica de sensibilidad de Geófono de 10 Hz. _____ 48

Figura 7 a) Geófono vertical y b) geófono horizontal GS-20DX de 4 Hz. _____ 49

Figura 8 Sismógrafo ultra ligero Geode. _____ 49

Figura 9 Hidrolavadora Karcher K 2.360. _____ 50

Figura 10 Ejes propuestos. _____ 51

Figura 11 Disposición de grupos de geófonos. _____ 52

Figura 12 Disposición y colocación de geófonos en pilastras. _____ 52

Figura 13 Colocación de geófono para determinación de módulo de elasticidad. _____ 54

Figura 14 Distancia entre impacto y geófono para muros. _____ 55

Figura 15 Distancia entre impacto y geófono para arcos. _____ 55

Figura 16 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 1. _____ 58

Figura 17 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 1. _____ 59

Figura 18 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 2. _____ 62

Figura 19 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 2. _____ 62

Figura 20 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 1. _____ 67

Figura 21 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 1. _____ 68

Figura 22 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 2. _____ 73

Figura 23 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 2. _____ 73

Figura 24 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 1. _____ 76

Figura 25 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 2. _____ 77

Figura 26 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 3. _____ 78

Figura 27 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 2. _____ 79

Figura 28 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 2. _____ 80

Figura 29 Gráfica Amplitud-Frecuencia, primer ciclo, arco 1, primer grupo de geófonos. _____ 82

Figura 30 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 1, segundo grupo de geófonos. _____	82
Figura 31 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 1, tercer grupo de geófonos. _____	83
Figura 32 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, primer grupo de geófonos. _____	84
Figura 33 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, segundo grupo de geófonos. _____	84
Figura 34 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, tercer grupo de geófonos. _____	85
Figura 35 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, primer grupo de geófonos. _____	86
Figura 36 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, segundo grupo de geófonos. _____	86
Figura 37 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, tercer grupo de geófonos. _____	87
Figura 38 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, primer grupo de geófonos. _____	88
Figura 39 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, segundo grupo de geófonos. _____	88
Figura 40 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, tercer grupo de geófonos. _____	89
Figura 41 Gráfico "Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación" del muro 1 para el primer arreglo de geófonos. _____	96
Figura 42 Gráfico "Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación" del muro 1 para el segundo arreglo de geófonos. _____	97
Figura 43 Gráfico "Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación" del muro 1 para el tercer arreglo de geófonos. _____	98
Figura 44 Gráfico "Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación" del muro 2 para el primer arreglo de geófonos. _____	99
Figura 45 Gráfico "Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación" del muro 2 para el segundo arreglo de geófonos. _____	100

Figura 46 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del muro 2 para el tercer arreglo de geófonos. _____ 101

Figura 47 “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 1 para el primer arreglo de geófonos. _____ 102

Figura 48 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 1 para el segundo arreglo de geófonos. _____ 103

Figura 49 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 1 para el tercer arreglo de geófonos. _____ 104

Figura 50 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 2 para el primer arreglo de geófonos. _____ 105

Figura 51 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 2 para el segundo arreglo de geófonos. _____ 106

Figura 52 Gráfico “Frecuencias fundamentales-Ciclo de degradación” del arco 2 para el tercer arreglo de geófonos. _____ 107

Figura 53 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del muro 1 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal. _____ 108

Figura 54 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del muro 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal. _____ 108

Figura 55 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del arco 1 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal. _____ 109

Figura 56 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del arco 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal. _____ 110

Figura 57 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del muro 1 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal. _____ 113

Figura 58 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del muro 2 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal. _____ 114

Figura 59 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del arco 1 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal. _____ 115

Figura 60 Gráfico “Frecuencia Natural-Ciclos de degradación” del arco 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal. _____ 116

Figura 61 Discretización de parte central de los arcos. _____ 117

Figura 62 Modelo numérico de muros. _____ 118

Figura 63 Modelo numérico de arco 1. _____ 119

Figura 64 Modelo numérico de arco 2. _____ 120



INDICE DE ECUACIONES

(1)	32
(2)	32
(3)	33
(4)	33
(5)	33
(6)	33
(7)	33
(8)	33
(9)	33
(10)	35
(11)	35
(12)	36
(13)	37
(14)	37
(15)	37
(16)	37
(17)	37
(18)	39
(19)	74
(20)	75

RESUMEN

Para la intervención de cualquier estructura el conocer el estado de salud estructural de los elementos que la integran, más allá de su condición estética, es parte fundamental de la toma de decisiones para el restaurador ya que cualquier trabajo que se realice sin conocimiento de esto puede llevar a empeorar su condición. En este documento se presenta un experimento realizado para conocer la relación entre las propiedades dinámicas y mecánicas de elementos de mampostería y como varía ésta al ir degradándolos. Para lograrlo se construyeron elementos representativos (dos arcos y dos muros) y se sometieron a una serie de ciclos de degradación, en cada uno de los cuales se determinaron sus frecuencias naturales y sus módulos de elasticidad estáticos y dinámicos. Para la determinación de las frecuencias naturales se usó vibración ambiental y vibración forzada, para la determinación de los módulos elásticos estáticos se construyeron muretes que se degradaron de la misma manera en la que se degradaron los elementos representativos probándolos para los 5 primeros ciclos de degradación y para determinar los módulos dinámicos se utilizó la teoría de las ondas mecánicas. Los resultados muestran que a medida que los elementos fueron degradados las frecuencias fundamentales y los módulos elásticos disminuyeron. Esta investigación servirá para desarrollar una metodología de detección de patologías, determinación de propiedades mecánicas y dinámicas así como para conocer en qué punto de su vida útil se encuentra un edificio histórico.

ABSTRACT

Down for intervention of any structure know the state of structural health of the elements that compose it, beyond its cosmetic condition, it is essential part of the decision-making for the restorer and any work performed without knowledge of this can lead to affect his condition. This paper presents an experiment performed to determine the relationship between the dynamics and mechanical properties of masonry elements and how this varies according they degrade. To determine the natural frequencies ambient vibration and forced vibration is used, for determining the static elastic moduli, specimens were built and degraded in the same way in which the representative elements were degraded and were tested for each cycle of degradation, and to determine dynamic moduli the theory of mechanical waves was used. The results show that as the items were degraded the fundamental frequencies and the elastic modulus declined. This research will help to develop a methodology for detection of diseases, identification of mechanical and dynamic properties and to identify that point in his life the building is

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional los edificios considerados históricos o patrimoniales, como los son templos religiosos, teatros, acueductos y mercados entre otros, son considerados como pilares del turismo cultural del país; los principales motivos que mueven al turista a son el conocer y comprender los rasgos y elementos distintivos tanto materiales, espirituales, intelectuales y afectivos que caracterizan a su sociedad. El presidente de la comisión Especial de Ciudades Patrimonio de la Humanidad Hugo Sandoval Martínez afirmó que México puede aumentar en un 50% la derrama económica en el sector turístico cultural, contemplando tan solo las diez ciudades nombradas Patrimonio Cultural de América Latina debido a que no son "sólo decorativas" sino una fuente de usufructo ya que el 90% de su economía depende de sus visitantes, de ésta manera se activa el ciclo productivo que propicia el aumento en la generación de empleos directos e indirectos que tiene como objetivo el atender la demanda relacionada con el sector.

Esto conlleva a un análisis minucioso sobre la importancia del cuidado de éstos recintos que siguen contribuyendo al desarrollo del país; por lo tanto priorizar su conservación por medio de mantenimiento, cuidado preventivo y correctivo permite asegurar el principal atractivo del país en cuanto a identidad cultural se refiere.

Para que cualquier diagnóstico y posterior intervención en estos edificios se lleve a cabo de manera correcta necesario es conocer las patologías y el grado de deterioro que presentan los elementos que componen su sistema estructural.

Las patologías que afectan a los edificios pueden ser ocasionadas por diferentes factores como hundimientos diferenciales, accidentes ocurridos (golpes debidos a choques, explosiones), vandalismo, ataques químicos (presencia de sulfatos, ácidos, reacciones álcali-sílicas) y además con el paso del tiempo las edificaciones pierden parte de sus propiedades mecánicas. La cantidad y tipo de pérdida dependen del uso al que estén sujetas, del mantenimiento realizado a cada una de ellas y de las condiciones climáticas de la región donde se sitúan.

Este trabajo se deriva del proyecto de investigación "Las vibraciones como una fuente de información para evaluar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales" y en él se presenta un estudio experimental sobre el cambio en las propiedades dinámicas de elementos estructurales representativos de mampostería (muros y arcos construidos expofeso) por el deterioro de los materiales, relacionando sus propiedades dinámicas (modos de vibrar) con propiedades mecánicas (módulos de elasticidad). El fin último que se busca es el poder estimar en que parte de su línea de vida útil se encuentra y conocer el nivel de seguridad en cada nivel de degradación, con la intención de extrapolar los resultados a edificios patrimoniales, teniendo como principio que una estructura sana o nueva tendrá mayor rigidez que una estructura dañada o antigua.

Se construyeron 2 muros y 2 arcos de secciones similares utilizando mortero cal-arena y tabique arcilla recocido de 7x14x28 cm a los cuales se les sometió a un proceso de degradación y deterioro que le restó propiedades a los mismos. La degradación de los elementos se realizó mediante ataques químicos y disminuyendo su sección transversal por erosión causada por un chorro de agua a presión. Para cada etapa de degradación se determinaron los modos de vibrar de los diferentes elementos por medio de vibración ambiental y vibración forzada así como el módulo elástico de la mampostería midiendo la velocidad de propagación de la onda sísmica P y S (V_p y V_s) a través de ella. Se realizó un modelo numérico para comparar y validar los resultados, el cual se alimentó con los datos determinados mediante la teoría de las ondas mecánicas.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es determinar la variación de las propiedades dinámicas de elementos de mampostería por efecto de la degradación de las propiedades mecánicas del material.

OBJETIVOS PARTICULARES

Se plantearon los siguientes objetivos particulares para alcanzar el objetivo general

Investigar el método de degradación adecuado para reproducir el deterioro de los elementos de mampostería construidos, de manera similar al que afecta a los edificios patrimoniales.

Identificar y aplicar un método no invasivo para la caracterización mecánica de las estructuras construidas en cada etapa de degradación del material.

Caracterización dinámica de cada elemento construido para las diferentes etapas de degradación.

Realizar una modelización numérica para reproducir el comportamiento del experimento

Calibrar y validar la modelización numérica con los resultados experimentales.

Analizar los datos del cambio en el comportamiento dinámico de los elementos con relación a su nivel de daño en búsqueda de una posible correlación.

ANTECEDENTES

Los métodos de diagnóstico de estructuras tienen gran importancia en la localización y análisis de las patologías presentes en los edificios, con ellos es posible diseñar e implementar soluciones que corrijan o prevengan estas patologías.

Los métodos de diagnóstico de estructuras se puede dividir en 3 grandes grupos (Hola, et al., 2010):

- Los métodos destructivos.
- Los métodos semidestructivos.
- Los métodos no destructivos.

Los métodos destructivos pueden ser aplicados en muestras o en elementos a escala natural, ambos son destruidos en estas pruebas y por esta razón sólo unos pocos elementos a escala natural son sujetos a dichas pruebas (Hola, et al., 2010). En estos métodos es necesario extraer parte de la estructura "muestra" y realizar pruebas en laboratorio, probar la estructura o elemento estructural directamente in situ hasta llevarla a la falla o elaborando especímenes a escala natural. El problema que existe en la reproducción de especímenes a escala natural es que si la estructura original presenta grietas internas, desgaste o alteración de los materiales componentes del elemento estructural difícilmente se podrán reproducir y los resultados probablemente no sean representativos.

Los métodos semidestructivos también son aplicados en muestras o en elementos a escala natural y envuelven una pequeña (usualmente superficial) intrusión en la estructura del edificio, resultando en pérdida local de propiedades de servicio y requiriendo reparación menor (Hola, et al., 2010). Ejemplos de este método pueden ser las pruebas de carga y la extracción de corazones de elementos estructurales.

Los métodos no destructivos pueden ser aplicados a los mismos elementos estructurales muchas veces y en diferentes momentos, por lo que dichos métodos son adecuados para pruebas de diagnóstico estructural de edificios durante su construcción y los muchos años de su vida útil, además de poder monitorizar el desempeño de las reparaciones hechas sobre éstos (Hola, et al., 2010; Meli, 1988; NDTH, 1996). Además estos métodos nos dan la posibilidad de determinar la condición de un elemento estructural, la severidad y extensión del daño presente sin la necesidad de intervenir severamente la estructura, pues lo único que es necesario para este tipo de pruebas es instrumentar el edificio lo cual no conlleva a ningún riesgo para la integridad estructural de éste permitiendo también programar las intervenciones que sean necesarias, lo que hace a estos métodos ideales para llevarlos a cabo en edificios patrimoniales (Farrar, 1988). Debido a la importancia de las estructuras históricas y las normativas existentes para realizar estudios sobre su estabilidad o salud estructural, de los tres métodos mencionados los primeros dos métodos sólo son permitidos bajo situaciones especiales, en cambio los métodos no destructivos por su naturaleza son los más utilizados.

La mayoría de los métodos no destructivos y semidestructivos fueron desarrollados para evaluar la resistencia y deformación de elementos de concreto y para la industria del acero. Algunos de los primeros trabajos para evaluar la resistencia del concreto in situ fueron adaptados del método de Dureza Brinell, en el cual se presionaba una bola de acero de alta resistencia sobre la pieza de estudio y se medía la abolladura que ocasionaba. En 1934 el Profesor K. Gaede en Hanover, Alemania reportó el uso del resorte impactador accionado para suplir la fuerza para presionar la bola de acero contra el concreto (Malhotra, 1976).

Estos métodos han tenido gran desarrollo debido al avance de los sistemas de cómputo, y al impulso que le han dado las aplicaciones en la industria y la tecnología. A partir de estas aplicaciones se han adaptado muchos de estos métodos para usos en ingeniería estructural.

Actualmente los métodos de prueba no destructivos se pueden dividir en dos grupos (Hola, et al., 2010):

- Métodos de valoración de la resistencia y evaluación de su variación a través del tiempo.
- Métodos de valoración de otras características que la resistencia.

Los métodos de valoración de la resistencia y su variación a través del tiempo como su nombre lo dice evalúan la variación de la resistencia de elementos estructurales a través del tiempo. Ejemplos de estos métodos son los Métodos Esclerométricos (Métodos Estáticos y Métodos Dinámicos), Métodos Acústicos (Método Ultrasonico y Método de Resonancia), Métodos Pull-Off (Métodos de Corte) (Hola, et al., 2010).

Los métodos de valoración de otras características diferentes a la resistencia se utilizan para evaluar las dimensiones de los elementos estructurales y la localización de defectos o daños en éstos (Métodos Acústicos, Métodos Radiológicos), para la localización de refuerzo y evaluación de corrosión (Métodos Electromagnéticos, Métodos Radiológicos, Métodos Eléctricos) y para la evaluación de humedad (Métodos Químicos, Métodos Físicos) (Hola, et al., 2010).

HIPÓTESIS

La hipótesis considerada para el presente trabajo es que las propiedades dinámicas de las estructuras varían en función del cambio en sus propiedades mecánicas, esto quiere decir que una estructura a través de su vida útil presentará variaciones en sus propiedades mecánicas y dinámicas a través de su línea de tiempo. Así pues una estructura recién construida presentará mayor rigidez, un módulo de elasticidad y frecuencias naturales más altas que la misma estructura después de algún periodo largo de tiempo de su construcción debido al deterioro por daños causados ya sea por accidentes, construcción defectuosa, mal mantenimiento, etc., y a la pérdida de propiedades de los materiales por el "envejecimiento".

JUSTIFICACIÓN

Actualmente la restauración y preservación del patrimonio edificado se dirige al rescate y recuperación de la apariencia estética de los edificios, poniendo atención en los daños "superficiales" tales como desprendimientos de repellados, alteraciones en repellos por humedad y desprendimiento de elementos ornamentales, etc.

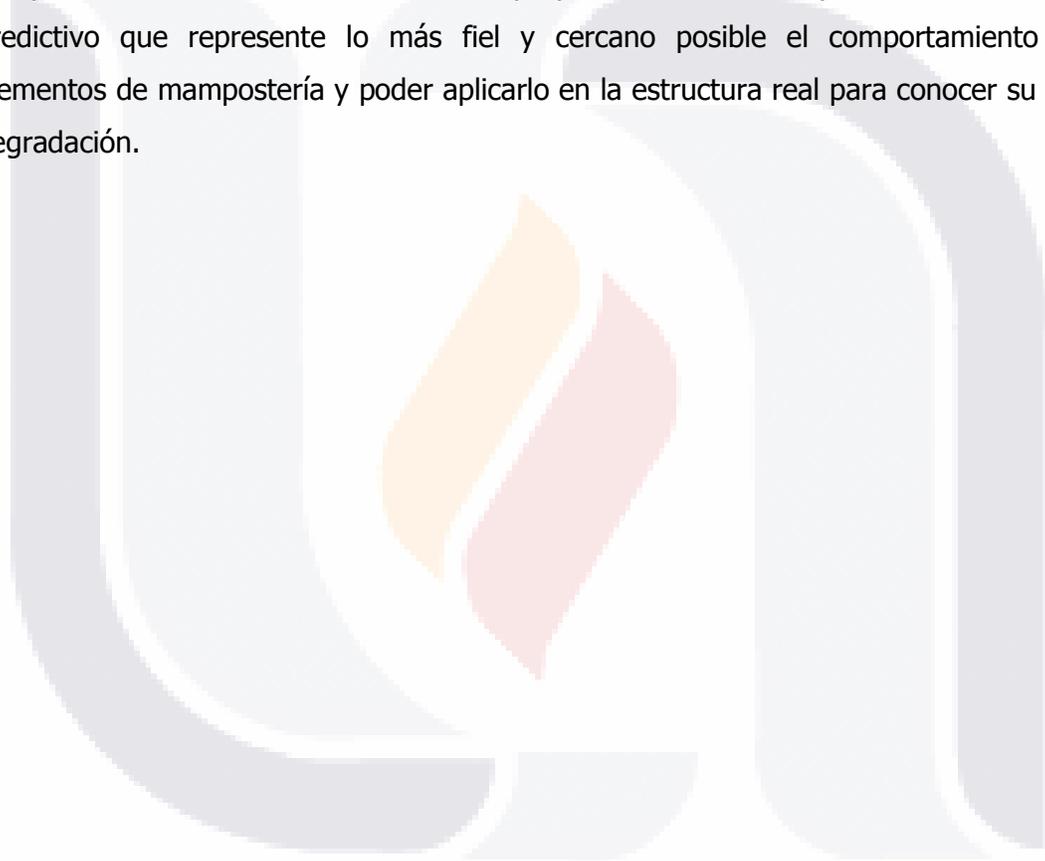
Tales tareas para la eliminación de patologías como fisuras, fracturas, zonas de aplastamiento o zonas donde los materiales perdieron sus propiedades y se están desintegrando, se limita la mayoría de las veces a la sustitución del repellado en la zona alterada, al rellene de grietas o al "acorazamiento" con algún tipo de mortero de las zonas donde los materiales se están disgregando.

Estas tareas a la larga sólo preservan la estética del edificio, sin embargo los efectos que se observan en la "superficie" o "piel" del edificio sólo son síntomas de las patologías que los elementos estructurales presentan a profundidad y que no pueden ser detectadas por levantamientos visuales de daños que se realizan en los trabajos de restauración tradicionales.

De lo anterior se observa un nicho de oportunidad para la aplicación de técnicas no destructivas ya que estas no comprometen la integridad de los edificios, pueden efectuarse repetidas veces durante un periodo de tiempo determinado para los mismos elementos y en la mayoría sus resultados han validados por investigaciones previas.

En este caso se decidió usar los métodos de valoración de resistencia y su variación a través del tiempo, en específico el método dinámico. Éste puede ser usado para cuantificar la degradación de un material como la mampostería y tiene la ventaja sobre técnicas convencionales de que la frecuencia con que vibre el elemento de mampostería estará en función de la condición del material como un todo (propiedades mecánicas), por lo que se puede clasificar la calidad de la mampostería dependiendo de sus propiedades dinámicas. Para poder realizar este tipo de análisis lo primero que se debe de hacer es conocer las propiedades dinámicas iniciales con las que contaba la estructura, para esto es

necesario hacer una pieza de mampostería que tenga las mismas características iniciales del edificio, lo que implica que se debe de tratar de utilizar los mismos materiales (ubicar bancos usados para la extracción de piedra, tratar de reproducir el mismo material aglutinante), ya que al ser diferentes los materiales serán diferentes las propiedades dinámicas. Después se deberán medir y registrar sus propiedades dinámicas de ésta entendiendo que serían representativas de las propiedades iniciales del edificio, luego habrá que sujetarlas a un proceso de degradación controlado para a ciertos intervalos de tiempo tomar lecturas del cambio en sus propiedades dinámicas y así construir un modelo predictivo que represente lo más fiel y cercano posible el comportamiento de los elementos de mampostería y poder aplicarlo en la estructura real para conocer su nivel de degradación.



CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE

Se realizó una búsqueda en internet y en buscadores de revistas especializadas (Springer y Elsevier), así como en memorias de congresos nacionales e internacionales, de trabajos relacionados con el problema a tratar (cambio de propiedades dinámicas de mampostería por envejecimiento o degradación de materiales). La búsqueda se realizó por palabras clave, por tema, por especialidad etc., y no se encontró algún trabajo que reporte algún estudio como el que se pretende desarrollar, lo cual es un indicativo de que es un tema poco o nulamente tratado y que hace valiosa cualquier contribución al entendimiento del problema.

Durante la revisión realizada a la literatura sobre el tema se consiguieron diversos trabajos que tienen alguna relación con el problema a abordar, y que se consideró pudieran aportar elementos de partida para este trabajo. Se revisaron un total de 30 documentos (4 libros, 1 tesis, 12 artículos de revistas, 13 artículos de congresos).

De estos documentos revisados se presentan los que se consideran como trabajos de referencia o punto de partida para la ejecución del trabajo a desarrolla, ya sea por su aportación conceptual al problema o por su contribución metodológica para el desarrollo de este trabajo. Se presenta una breve discusión de estos trabajos:

[Lourenço \(2006\)](#) presenta una serie de recomendaciones y conceptos básicos de conservación útiles para el análisis y valoración de edificios históricos, en él define las técnicas de modelado que deben de usarse para diferentes necesidades y las características que deben cumplir así como que propiedades de los materiales se buscan para el modelado entre otras.

Una parte importante para la caracterización de las propiedades dinámicas de un elemento estructural es conocer su módulo de elasticidad. [Elmshawi et al \(2011\)](#) investigaron técnicas estáticas y dinámicas para evaluar los módulos de elasticidad y de cortante de muros de mampostería. Para llevar a cabo su investigación construyeron muros de piedra arenisca y piedra caliza conectados por un mortero débil. Para las

pruebas cuasi-estáticas los especímenes fueron sujetos a diferentes cargas cíclicas con el fin de medir sus características sísmicas en el plano. Las pruebas dinámicas consistieron en: 3 pruebas de vibración libre, la primera aplicando una carga directamente al nudo mediante un cable y liberándola con la finalidad de que vibrara, otra sujetándola a una carga dinámica sinusoidal y la última en una mesa vibratoria. Los experimentos arrojaron que de las pruebas estáticas en especímenes no dañados son muy cercanas a la relación G/E de 0.1.

Por su parte [Pau y Vestroni \(2011\)](#) describen tres técnicas de identificación modal utilizando vibración ambiental:

- Selección de pico de las densidades espectrales de potencia (PP).
- Descomposición del valor singular (SVD) .
- Identificación espacial estocástica (SSI).

Estas técnicas han sido usadas con éxito para la identificación modal de numerosas estructuras civiles como arcos o edificios altos, frecuentemente menos aplicada a estructuras históricas y monumentos. Ejemplos de aplicación a casos selectos de estructuras de mampostería histórica en Italia son el Coliseo, la Basílica de Maxentius, la Columna Troyana. Para cada caso hicieron una comparación entre los parámetros modales experimentales y numéricos, en perspectiva con la evaluación y actualización de los modelos de elemento finito de acuerdo con el comportamiento medido. La información obtenida relaciona el actual estado de la estructura: frecuencias más bajas que las predichas por el modelo de elemento finito pueden indicar deterioro en la rigidez de la estructura y formas anómalas modales pueden señalar movimientos independientes de partes de la estructura debido a grietas. La comparación entre frecuencias y formas modales numéricas y experimentales obtenidas proveen suficiente acuerdo después de un ajuste de las características mecánicas para sintonizar los dos modelos.

Como conclusión [Pau y Vestroni \(2011\)](#) mencionan que de entre las tres técnicas consideradas la identificación espacial estocástica es la más exigente desde el punto de vista computacional y en general proporciona una mejor calidad de la forma modal. En

cuanto a la comparación con modelos de elementos finitos, se ha demostrado que después de la actualización de las propiedades del material de los modelos de elementos finitos, se puede conseguir un acuerdo entre las frecuencias determinadas de manera experimental y las determinadas en forma numérica.

De Sortis et al (2004), revisaron la aplicabilidad de procesos de identificación dinámica usados para estructuras de concreto reforzado o en edificios de acero, y en la estimación de las características dinámicas de edificios de mampostería. Investigaron el comportamiento dinámico para vibración forzada de bajos niveles en mampostería, las pruebas dinámicas aplicadas fueron las sinusoidales y de barrido. La vibración sinusoidal es la más simple forma de vibración, un generador de señal senoidal puede ser usado para a través de máquinas vibratorias programar las frecuencias que se desean inducir al elemento. En las pruebas de barrido se utilizan también máquinas vibratorias, pero en ellas se trata de reproducir la vibración ambiental. La revisión fue hecha a través de un código de identificación dinámica especialmente desarrollado basado en ecuaciones de error de salida.

Su caso de estudio fue la escuela de S. Sisto en L' Aquila en la región central de Italia. Los parámetros dinámicos que obtuvieron por medio de identificación modal (autovectores y frecuencias) fueron utilizados para la selección de los parámetros mecánicos constituyentes del modelo de elementos finitos que realizaron.

Mientras la prueba sinusoidal hace posible distinguir la presencia de dos modos en un intervalo estrecho de frecuencia, esto no es evidente en la prueba de barrido, donde sólo un nivel excesivamente alto de amortiguamiento podría sugerir la presencia de dos modos cercanos.

Concluyeron entonces que el uso de excitaciones sinusoidales parece ser más fiables que las pruebas de barrido para la evaluación de los parámetros dinámicos en la mampostería.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Brincker et al (2000) presentan una técnica de dominio de frecuencias para la identificación modal de sistemas solo-salida, esto es en el caso donde los parámetros modales deben ser estimados sin el conocimiento de las excitaciones introducidas al sistema. Su técnica es una extensión de la técnica de cosecha de picos (Peak Picking) que se basa en el procesamiento de señales usando una transformada de Fourier discreta y usando el hecho de que modos bien separados pueden ser estimados directamente de la matriz de poder espectral de los picos. Aunque en el caso de modos cercanos puede dificultarse la detección de los modos y aun en el caso de que los modos son detectados las estimaciones se convierten en altamente sesgadas. La técnica que presentan es la descomposición del dominio de frecuencias, que elimina las desventajas del aproximamiento clásico pero conserva su fácil implementación e incluso mejora la comprensión física al tratar directamente con el espectro de función de densidad. La técnica se basa en la descomposición de la matriz de función de la densidad de poder espectral (PSD) usando la descomposición del valor espectral (SVD), éste descompone la respuesta espectral en una serie de sistemas de Simple grados de libertad (SDOF), cada uno correspondiente al modo individual. Esta técnica puede ser útil en la investigación ya que es capaz de estimar modos cercanos que se presentan en modelos de mampostería con una alta precisión.

Chiostrini et al (1993) presentan un análisis del comportamiento dinámico y la evaluación de daño sísmico de edificios de mampostería, con el propósito de aplicarlo en un edificio de mampostería de piedra de cuatro pisos en Florencia, el cual fue modelado con elementos finitos. Algunas propiedades del modelo han sido estimadas de acuerdo con el método propuesto de identificación basado en la comparación entre resultados numéricos y experimentales.

El programa experimental comprendió pruebas en componentes de piedra y mortero, pruebas diagonales de paneles reconstruidos con material procedentes de la demolición de edificios de la misma edad, pruebas "in situ" de cizallamiento de muros y pruebas "in situ" con la técnica "flat-jack". Esto con el fin de obtener datos de constantes mecánicas para realizar la correcta calibración de la aproximación numérica. Se realizaron series de pruebas en laboratorio de especímenes a escala completa con el fin de correlacionar las pruebas in-situ y de laboratorio. Realizaron pruebas de compresión diagonal con el fin de detectar las características del mortero, se utilizaron varios tipos de mortero y los resultados se compararon a los arrojados por pruebas "in situ". Realizaron también series de pruebas flat-jack no destructivas para obtener el nivel de esfuerzos existentes en los muros y pruebas para investigar las características de rigidez de la mampostería.

Para la modelación numérica utilizaron un elemento finito elástico-plástico 3D con capacidades de agrietamiento continuo para representar la mampostería, utilizaron el programa ANSYS donde emplearon el elemento STIF65 que es capaz de agrietarse bajo tensión y aplastarse bajo compresión, el comportamiento plástico fue modelado de acuerdo con la ley de Drucker-Prager, aplicable a materiales granulares como a sólidos, roca y concreto.

De acuerdo con los autores solo se requieren 3 constantes para definir la ley constitutiva del modelo de Drucker-Prager del material: 1 la cohesión valor C , el ángulo de fricción interna Φ y la cantidad de dilatación. Utilizaron una característica importante en el arreglo del modelo numérico, la capacidad de reducir la rigidez cuando condiciones de cedencia son alcanzadas en algunos puntos.

El modelo de elemento finito fue capaz de reproducir el comportamiento de la construcción con buena aproximación debido a la buena representación geométrica y al apropiado ajuste de las relaciones constitutivas del material. Para calibrar el modelo fueron requeridos un gran número de resultados numéricos.

Estos autores concluyen que para que el modelado de elemento finito sea lo más cercano al comportamiento de la estructura se debe primero seleccionar cuidadosamente las propiedades del continuo, la geometría del objeto debe ser igual a la del espécimen de prueba y se deben de realizar ajustes en el modelo de acuerdo con las propiedades medidas en el espécimen de prueba.

Gentile y Saisi (2006) presentan los resultados de investigaciones basadas en vibración ambiental para evaluar las condiciones estructurales de un campanario de mampostería. Comentan que la evaluación basada en la dinámica envuelve análisis modales teóricos y experimentales, que incluyen los siguientes pasos:

- Pruebas de vibración ambiental.
- Análisis modal operacional (OMA), es decir, la extracción de los parámetros modales (frecuencias naturales y formas modales) de datos experimentales sólo-salida
- Análisis de elementos finitos (FEA) y la correlación con los resultados experimentales.
- Identificación de los parámetros estructurales del modelo (modelo de actualización), reduciendo al mínimo la diferencia entre el comportamiento modal teórico y experimental.
-

Utilizaron dos métodos de identificación de parámetros modales: el método de cosecha de picos (PP) y la descomposición de frecuencias dominantes (FDD), ambos basados en la evaluación de la matriz espectral en el dominio de las frecuencias y con los cuales tuvieron resultados similares.

Una vez que la fase de identificación modal se completó, los dos conjuntos de formas modales que resultan de la aplicación de los métodos PP y FDD se compararon mediante el uso de Criterio Garantía Modal (MAC). El MAC es probablemente el procedimiento más comúnmente utilizado para correlacionar dos conjuntos de vectores formas modales.

El trabajo de [Gentile y Saisi \(2006\)](#) será referencia para definir los pasos a seguir para la evaluación dinámica de elementos estructurales, y que se pueden aplicar varios modelos para la identificación de parámetros modales con el fin de compararlos y correlacionarlos obteniendo parámetros más precisos para ser utilizados en el modelamiento por elemento finitos.

[Cruz Díaz et al, \(2007\)](#) presentaron el estudio analítico y con vibración ambiental de las gradas de un estadio de fútbol, con la finalidad de investigar la evolución de las características dinámicas de la estructura en sus distintas etapas constructivas, toda vez que el estadio se encuentra en proceso de construcción. El estudio contempla únicamente el cuerpo central de las gradas poniente del estadio. Los resultados analíticos y de vibración ambiental muestran las frecuencias y formas modales de la estructura.

El estudio analítico se realizó en el programa SAP2000. Se utilizó un modelo elástico tridimensional con elementos barra para columnas y trabes con sección transversal rectangular, y elementos finitos isoparamétricos de cuatro nodos para las gradas. Las columnas se consideraron articuladas en su base toda vez que el suelo es altamente compresible y la cimentación es a base de zapatas aisladas.

El análisis dinámico modal permite determinar las formas modales de la estructura; de esta manera, el primer modo de las gradas es de traslación longitudinal (dirección y) con un periodo fundamental $T=0.48$ s. Observaron que la traslación fue más evidente en las columnas posteriores ya que adolecen de la rigidez que proporcionan las gradas en las otras columnas.

El segundo modo de vibrar de la estructura, el cual corresponde a torsión respecto al eje vertical con un periodo $T=0.28$ s. En este modo se observaron que el cuerpo formado por las gradas sufría una rotación hacia la derecha mientras que las columnas posteriores se movían en el sentido contrario; este efecto se debió nuevamente a la diferencia de rigideces entre el bloque rígido formado por las gradas y la hilera de columnas.

Finalmente el tercer modo de vibrar de las gradas corresponde a traslación pura en el sentido transversal (dirección x) con un periodo $T=0.21$ s.

Las mediciones se realizaron utilizando un acelerómetro K2 de Kinematics de 12 canales. Se utilizaron nueve sensores de balance uniaxial colocados en el cuerpo de la estructura y un sensor triaxial colocado en campo libre. Todos los sensores se montaron en una placa de aluminio de $2.54 \times 35 \times 35$ cm. El sensor triaxial se colocó en campo libre en el lado poniente de las gradas, el resto de los sensores se colocaron en dos arreglos: en el primer arreglo se colocaron los sensores en la dirección longitudinal, canales 4 a 6 en el centro, canales 7 a 9 en el extremo sur y los canales 10 a 12 en el extremo norte de las gradas en el segundo arreglo se colocaron los sensores en la dirección transversal, canales 4 a 6 en el extremo poniente, canales 7 a 9 en el centro y los canales 10 a 12 en el extremo oriente de las gradas. Se hace notar que en ambos arreglos los canales 1, 4, 7 y 10 corresponden a la dirección longitudinal; los canales 2, 5, 8 y 11 a la dirección transversal y los canales 3, 6, 9 y 12 a la dirección vertical.

Se realizaron cinco mediciones con duración de 5 minutos cada una con un intervalo de tiempo de 0.005 s, dos mediciones para el primer arreglo y tres mediciones para el segundo arreglo, las señales registradas se procesaron para determinar desplazamientos, velocidades, aceleraciones, espectros de amplitudes de Fourier y funciones de transferencia a partir de las cuales se determinan las frecuencias naturales de vibración.

Los resultados mostraron una concentración energética importante para la frecuencia de 12.7 rad/s que corresponde a un periodo de 0.49 s, el cual se asocia a la primera forma modal y corresponde a la dirección N-S. Los periodos obtenidos analíticamente y mediante vibración son prácticamente iguales. También se observó una concentración importante de energía para las frecuencias comprendidas entre de 18 y 30 rad/s, lo que permite pensar, que las frecuencias del segundo y tercer modo de vibrar de la estructura se localizarán entre esos valores.

Los sensores ubicados en la dirección E-W (dirección transversal), sensores 2-5, 2-8 y 2-11, se observa una concentración energética importante para la frecuencia de 29.9 rad/s que corresponde a un periodo de 0.21 s, el cual puede asociarse con el tercer modo de vibrar de la estructura. Este periodo es igual al obtenido a partir del modelo analítico. Se manifestaron nuevamente concentraciones importantes de energía para frecuencia comprendidas entre 18 y 28 rad/seg lo que corrobora la presencia del segundo modo de vibrar entre esas frecuencias. El periodo correspondiente al segundo modo de vibrar, de torsión según el análisis numérico, no se pudo determinar a partir de las mediciones de vibración; dado que no se cuenta con sensores que permitan identificar esa forma modal. Sin embargo, se puede inferir el intervalo en el que se localiza la frecuencia correspondiente al segundo modo. De esta manera, se observó que la frecuencia del segundo modo se localiza entre 18 y 28 rad/s que corresponden a los periodos de 0.349 s y 0.224 s respectivamente. Por otra parte, el estudio analítico arrojó un periodo de 0.28 s, el cual corresponde a una frecuencia de 22.43 rad/s.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

A continuación se revisan algunos de los conceptos necesarios de conocer con el fin de desarrollar de manera adecuada la recolección, el procesamiento e interpretación de los datos.

2.1. LEY DE HOOKE

Para calcular las deformaciones cuando se conocen los esfuerzos se debe conocer la relación entre el esfuerzo y la deformación. Cuando las deformaciones son pequeñas, esta relación está dada por la ley de Hooke que establece que una deformación dada es directamente proporcional al esfuerzo que la produce. Cuando existen varios esfuerzos, cada uno produce deformaciones independientes a los otros; por lo tanto la deformación total es la suma de las deformaciones producidas por esfuerzos individuales. Esto significa que cada deformación es una función lineal de todos los esfuerzos. En general la ley de Hooke conduce a relaciones complicadas, pero cuando el medio es isotrópico, es decir, cuando las propiedades no dependen de la dirección, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii}, \quad i = x, y, z; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij}, \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j \quad (2)$$

Las cantidades λ y μ se conocen como constantes de Lamé. Si se escribe $\varepsilon_{ij} = (\sigma_{ij}/\mu)$, es evidente que ε_{ij} es más pequeña a medida que μ aumenta. Por lo tanto μ es una medida de la resistencia a la deformación cortante y a menudo se denomina módulo de rigidez o módulo de cortante. Aunque la ley de Hooke tiene una amplia aplicación no se cumple más allá del límite elástico de cualquier cuerpo. Deformaciones resultantes de los esfuerzos que exceden el límite elástico no desaparecen por completo cuando se retira el esfuerzo.

2.2. CONSTANTES ELÁSTICAS

Las constantes elásticas más comunes son el módulo de Young (E), la relación de Poisson (ν), y el módulo volumétrico (k). Para definir los primeros dos, se considera un medio en que todos los esfuerzos son cero, excepto σ_{xx} . Suponiendo que σ_{xx} es positiva, las direcciones paralelas a σ_{xx} aumentarán, mientras que las direcciones normales disminuirán; esto significa que ε_{xx} es positiva (elongación en dirección x) mientras que ε_{yy} y ε_{zz} son negativas e iguales. Ahora E y ν se definen por las relaciones.

$$E = \sigma_{xx} / \varepsilon_{xx}, \quad (3)$$

$$\nu = -\varepsilon_{yy} / \varepsilon_{xx} = -\varepsilon_{zz} / \varepsilon_{xx}; \quad (4)$$

Para definir k , se considera un medio sujeto solamente a presión hidrostática P ; esto es equivalente a los planteamientos

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -P; \quad \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0. \quad (5)$$

Luego k se define como la relación de la presión con la dilatación.

$$k = -P / \Delta \quad (6)$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ley de Hooke se pueden obtener las siguientes relaciones entre E , ν y k y las constantes de Lamé, λ y μ

$$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}, \quad (7)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{3}(3\lambda + 2\mu); \quad (9)$$

2.3. TEORÍA DE LAS ONDAS MECÁNICAS

Las ondas mecánicas son aquellas que se desplazan a través de un medio deformable o elástico, a diferencia de aquellas que no requieren de ningún medio para su propagación. Formalmente podemos definir las ondas mecánicas como aquellas que viajan de un lugar a otro a través de un medio material, originando una perturbación temporal en este medio, sin que el medio a su vez se transporte de un lugar a otro. Un aspecto importante que caracteriza a las ondas es que todo movimiento ondulatorio tiene una energía asociada a él. En las ondas encontramos un fenómeno físico en el cual se presenta un fenómeno de transporte de energía sin que las partículas o cuerpos materiales se desplacen (Young y Freedman, 2009). Las ondas sísmicas son probablemente las más conocidas, pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los más grandes de los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos. Las ondas sísmicas pueden ser generadas también artificialmente (fenómenos antropogénicos) como voladuras, tráfico, explotación minera etc.

2.3.1. ONDAS DE CUERPO

Existen dos tipos de ondas las de cuerpo y las superficiales. Se presentan los conceptos sólo de las primeras pues fueron las que se utilizaron para realizar este trabajo.

Las ondas de cuerpo o internas viajan a través de la Tierra. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero posee poco poder destructivo. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S) (Figura 1).

Las ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en dirección a la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces mayor a las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Sus velocidades típicas son 330 m/s en el aire, 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.

Las ondas S son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la onda P (SMIS, 2013).

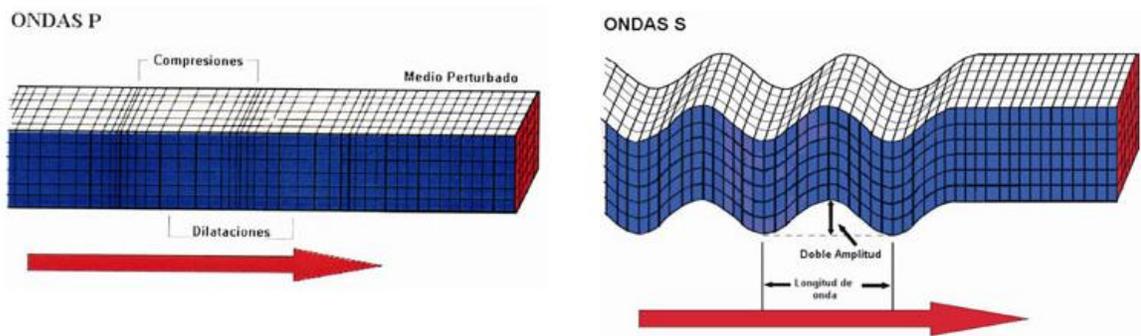


Figura 1 Modelo de propagación de onda P y S (Imagen, www.funvisis.gob.ve)

La onda P tiene una velocidad α en términos de constantes de Lamé y de la densidad del material

$$\alpha = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2} \tag{10}$$

De igual manera la velocidad de la onda se define como

$$\beta = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2} \tag{11}$$

Las constantes de Lamé pueden ser determinadas si se conocen la velocidad de propagación de la onda Vp (α) y de la onda Vs (β), para determinar la densidad del medio por el cual las ondas se propagan mediante la relación que [Gardner et al \(1974\)](#) sugieren:

$$\rho = aV^{1/4} \quad (12)$$

Donde ρ está en g/cm³, V en m/s cuando $a = 0.31$.

Una vez conocidas las constantes de Lamé es posible calcular E , ν y k con las ecuaciones (7), (8) y (9).

En el método sísmico se utiliza la propagación de ondas a través de la tierra para hacer inferencias sobre su configuración y sus propiedades mecánicas. La propagación de las ondas depende de las propiedades elásticas de las rocas, por lo que se deben tratar algunos de los conceptos básicos de la elasticidad.

Un cuerpo sólido puede ser deformado aplicando fuerzas en su superficie externa. A esta fuerza externa se le oponen fuerzas internas que resisten las deformaciones inducidas. Debido a esto el cuerpo vuelve a su estado original después de retiradas las fuerzas deformadoras, a esta propiedad de los cuerpos se le llama elasticidad. Cuando un cuerpo recupera completamente su forma después de ser deformado se dice que el cuerpo es perfectamente elástico.

En la teoría de la elasticidad a las fuerzas que se aplican a la superficie externa de los cuerpos se les relaciona con los cambios de tamaño y forma resultantes. Esta relación puede ser mejor expresada con los términos esfuerzo y deformación. La deformación es generalmente proporcional al esfuerzo (fuerza sobre unidad de área) que la produce. La constante de proporcionalidad se le llama módulo elástico.

2.4. TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA

La Transformada Discreta de Fourier (DFT) convierte una lista finita de muestreos igualmente espaciados de una función en coeficientes de una combinación finita de sinusoides complejos, ordenado por sus frecuencias, que tiene los mismos valores de muestra. Se puede decir que convierte la función muestreada de su dominio original al dominio de las frecuencias. En este caso se utilizará para convertir las funciones muestreadas del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. En matemática su definición es la siguiente:

Si $x(t) = x(t + T)$ es una función periódica, esto puede expresarse en la expansión de Fourier

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{-\frac{i2\pi kt}{T}} dt \tag{13}$$

Donde

$$X_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-\frac{i2\pi kt}{T}} dt \tag{14}$$

Cuando solo valores de las muestras de $x(t)$ son conocidos, la integral en (14) puede ser reemplazada con sumatorias. Si el muestreo ocurre en un espacio regular de tiempo Δ se tiene:

$$N\Delta = T \tag{15}$$

y se escribe

$$x(t = r\Delta) = x_r, \tag{16}$$

entonces se tiene

$$X_k = \frac{1}{N\Delta} \sum_{r=0}^{N-1} \left[x_r e^{-\frac{i2\pi kr}{N}} \right] \Delta = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-2i\pi kr/N} \tag{17}$$

Esta definición de transformada discreta de Fourier (TDF) es de la secuencia $\{x_r\}$, $r = 0$ a $N - 1$. Siempre que el intervalo Δ de muestreo sea lo suficientemente pequeño, el X_k calculado de (17) es aproximadamente exacto para los coeficientes de Fourier calculados por (14).

2.5. DINÁMICA ESTRUCTURAL

La dinámica es la parte de la física que comprende el estudio del movimiento de los cuerpos, las causas que lo provocan o que lo alteran. Los conceptos fundamentales de la Dinámica son el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y la fuerza, con estos conceptos es posible describir el movimiento de un cuerpo.

El análisis Dinámico es el análisis de los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas que actúan sobre cualquier cuerpo o estructura. La Dinámica Estructural es el Análisis Dinámico de una estructura. Cualquier estructura ante acciones de tipo dinámica responde modificando su configuración alrededor de una posición de equilibrio estable, a este comportamiento se le denomina Vibración.

Así pues el análisis dinámico de una estructura comprende el estudio de las vibraciones presentes en ésta, sus causas y los efectos que provoca dicha vibración.

Los componentes de un sistema vibratorio son el elemento de inercia que es la capacidad de un cuerpo para permanecer en movimiento y depende de la cantidad de masa de la estructura, el elemento de rigidez que es la propiedad de un cuerpo para oponerse a la deformación y depende del módulo de elasticidad y de su geometría, y el elemento de amortiguamiento que es la capacidad de un sistema para disipar la energía cinética como se muestra en la Figura 2.

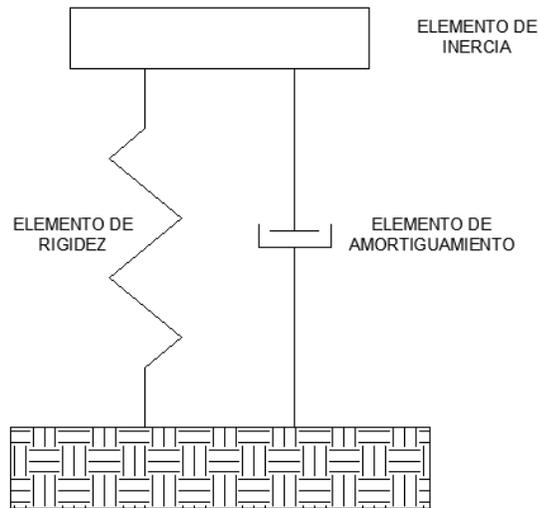


Figura 2 Elementos de un sistema vibratorio

La ecuación rectora de cualquier sistema vibratorio es:

$$F = m_a + c_v + k_x \tag{18}$$

2.5.1. FRECUENCIA NATURAL DE VIBRACIÓN.

Cualquier objeto oscilante tiene una frecuencia natural de vibración que se define como la frecuencia a la que un sistema seguirá vibrando después que se retira la excitación que lo hizo vibrar. Por ejemplo, en el caso de un péndulo al sacarlo de equilibrio y permitiéndole vibrar libremente, la frecuencia de oscilación será la misma independientemente de la perturbación que comenzó el movimiento oscilatorio.

2.5.2. VIBRACIÓN LIBRE Y FORZADA.

La vibración libre es la que ocurre naturalmente sin que se le añada energía al sistema vibratorio. La vibración es iniciada por alguna fuente excitadora y luego que se retira esta tiene lugar la vibración libre, sin embargo la vibración se extingue con el tiempo debido a que la energía es disipada por efecto del amortiguamiento del sistema.

La vibración forzada es la oscilación de un sistema en respuesta a una excitación continua, por ejemplo la vibración de un edificio durante un sismo.

El modo de vibrar de una estructura es la configuración, patrón o forma en el que vibra un sistema adoptando una forma específica. Un análisis modal tiene como objetivo determinar las frecuencias naturales y los modos de vibrar de un sistema.

Las vibraciones presentes en un sistema vibratorio pueden ser interpretadas como señales en el dominio del tiempo, para entender mejor el comportamiento de esta vibración es necesario pasar la señal del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. Un espectro de frecuencias es el resultado de transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Función de densidad espectral de potencia (PSD) muestra la fuerza de las vibraciones (energía) como una función de la frecuencia. En otras palabras muestra a qué frecuencias las vibraciones son más fuertes y a qué frecuencias las vibraciones son más débiles. La unidad de las PSD es la energía por frecuencia (ancho) y se puede obtener energía dentro de un determinado rango de frecuencias mediante la integración del PSD dentro de ese rango de frecuencias.

2.5.3 VIBRACIÓN AMBIENTAL

Las microtrepidaciones, también conocidas como ruido ambiental pueden definirse de varias maneras:

- a) Vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía
- b) Una superposición de ondas superficiales que constituyen un campo estacionario y homogéneo

- c) El ruido ambiental generado por fuentes naturales y culturales, como tráfico vehicular o la actividad humana (Flores Estrella et al 2004)
- d) Ondas sísmicas con energía relativamente baja, con amplitudes típicas dentro del rango de 10^{-3} a 10^{-4} mm. (Roberts y Asten, 2004)

Los microtremores sólo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz., sin embargo, en la exploración geofísica superficial sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz., ya que en esta banda parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre hasta profundidades de 20 Km. (Flores Estrella, 2004).

Generalmente, los microtremores con frecuencias menores a 1 Hz. son el resultado de fenómenos naturales como la acción de las olas, viento y variaciones atmosféricas; mientras aquellos con frecuencias mayores a 1 Hz. Son producidos por fuentes culturales como trenes y el funcionamiento de maquinaria pesada.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

La caracterización dinámica puede ser usada para cuantificar la degradación de un material como la mampostería, tiene la ventaja sobre otras técnicas de que la frecuencia con la que vibre el elemento de mampostería estará en función de la condición del elemento, por lo que se puede clasificar la calidad de la mampostería dependiendo de sus propiedades dinámicas.

La teoría dice que se debe conocer un punto de referencia del comportamiento dinámico estructural en la vida de la estructura, preferentemente inmediatamente después de finalizada su construcción (condición no dañada). Esto es conocer las propiedades dinámicas iniciales con las que contaba la estructura.

En el caso de los edificios patrimoniales que se construyeron hace varios años, e incluso siglos, no es posible tener un punto de referencia de su comportamiento estructural de su condición no dañada o recién construida. Para subsanar esto se propuso construir un elemento estructural de mampostería que tenga las mismas características iniciales del edificio que se desee valorar, para esto se debe utilizar materiales y métodos constructivos similares a los empleados originalmente en la construcción del edificio. La propuesta contempla medir y registrar las propiedades dinámicas del elemento recién construido asumiendo que serían representativas de las propiedades iniciales del edificio, posteriormente habrá que someter al elemento construido a un proceso de degradación controlada para ciertos intervalos de tiempo, tomando lecturas del cambio de sus propiedades dinámicas. Finalmente con los datos de las propiedades dinámicas de las diferentes etapas de degradación del material del elemento estructural construido elaborar un modelo predictivo que debería servir para determinar el nivel de degradación de la mampostería del edificio patrimonial estudiado, a partir de su comportamiento dinámico, el cual es posible determinarlo experimentalmente.

Por otra parte, el construir elementos estructurales como se explica en el párrafo anterior resulta más costoso que con materiales modernos, por lo que para probar la hipótesis principal y para perfeccionar la metodología antes de su aplicación en elementos estructurales elaborados con materiales y métodos similares a los de algún edificio patrimonial, se propuso el trabajar con elementos construidos con materiales de fácil adquisición: el ladrillo de arcilla recocido y el mortero cal-arena.

Los resultados de este primer experimento permitirán valorar su es pertinente realizar el mismo experimento en los elementos con materiales similares a los del edificio patrimonial en base a los resultados obtenidos. Servirá además para perfeccionar la implementación de técnicas usadas tanto para la caracterización de materiales como para la caracterización dinámica. De la misma manera éste dará oportunidad de sistematizar el procesamiento de datos y le permitirá al equipo de trabajo desarrollar experiencia en la interpretación de los resultados.

3.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE PRUEBA DE LABORATORIO

Con el fin de estudiar las variaciones en las propiedades dinámicas de elementos estructurales se construyeron 4 elementos de prueba, 2 muros y 2 arcos. Los elementos fueron construidos con tabique rojo recocido de 7 x 14 x 28 cm escogido por su disponibilidad en la zona, con una resistencia a la compresión promedio de 50 Kg/cm², y mortero cal-arena 1:6 con una resistencia a la compresión de 7.27 Kg/cm². Los 2 muros se construyeron con una sección de 2.60 mts de largo por 1.50 mts de alto con dos pilas en sus extremos de 44x44 cm (Figura 3)

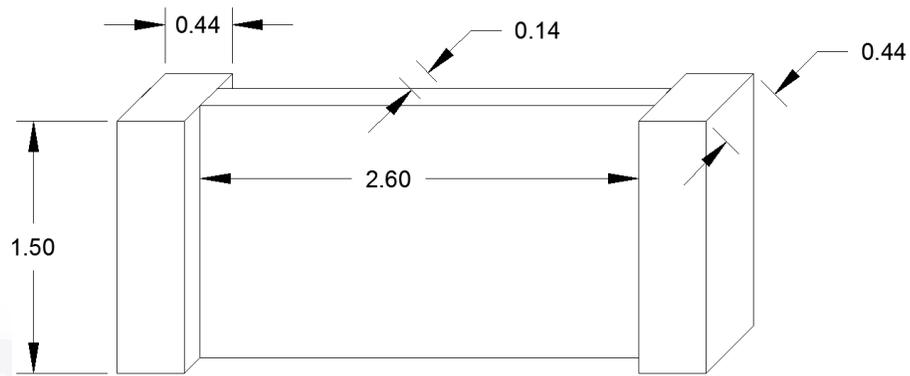


Figura 3 Medidas de muro de tabique rojo recocido.

Los dos arcos se construyeron con un claro de 2.6 mts y una altura de 1.50 mts con dos pilas en sus extremos de 44x44 cm (Figura 4)

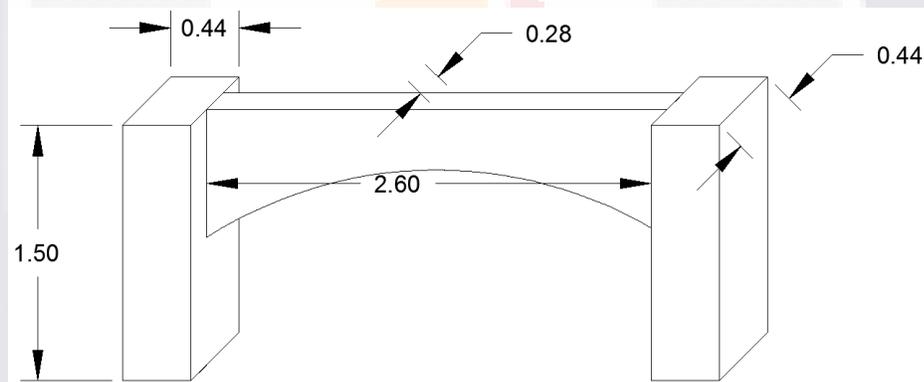


Figura 4 Medidas de arco de tabique rojo recocido.

3.2. DEGRADACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La degradación de los elementos estructurales se llevó a cabo degradando sección a los elementos tratando de simular el desgaste que éstos tendrían en condiciones normales. Se realizó mediante el impacto de un chorro de agua a presión utilizando la hidrolavadora Karcher K 2.360 .Además se degradó químicamente el mortero mediante el humedecimiento de los elementos con ácido clorhídrico diluido al 28% (ácido muriático).

Se realizaron 7 ciclos de degradación, en el sexto y séptimo ciclo de degradación además se degradaron las pilastras de los elementos quitándoles sección cincelandos sus esquinas, en el séptimo ciclo se degradó la sección de los elementos cincelandos las secciones de las pilastras de los elementos, además de las secciones de los muros y arcos.

3.3. EQUIPO UTILIZADO

Para registrar tanto las vibraciones de los elementos como la propagación de las ondas V_p y V_s a través de la mampostería, se usó el sistema de adquisición de datos sísmicos que se describe a continuación.

3.3.1. EQUIPO DE CÓMPUTO

Se utilizó una Laptop de uso rudo Toughbook marca Panasonic para controlar la adquisición de datos y para almacenarlos. Este modelo es altamente recomendable para su uso en la intemperie ya que resiste golpes, altas temperaturas, humedad, además que su batería es duradera (Figura 5).



Figura 5 Equipo de cómputo utilizado.

3.3.2. SISMÓGRAFO DE EXPLORACIÓN ULTRA LIGERO GEODE

Un sismómetro es un dispositivo para medir el movimiento de la tierra, consiste en un sensor de detección de movimiento de suelo, llamado geófono, acoplado con un sistema de registro el cual es propiamente sismógrafo. Un sismómetro simple que es sensible a movimientos de la tierra puede ser entendido visualizando como una masa colgando un resorte. La masa y el resorte se suspenden sobre un marco fijado a la superficie de la tierra. Cuando la tierra se mueve, la masa comienza a oscilar y su movimiento relativo respecto al eje de la tierra provee una medida del movimiento del terreno. En esta explicación el sistema masa-resorte-marco es el sismómetro. Si un sistema de registro es instalado, como un tambor rotatorio unido al marco y una pluma unida a la masa, este movimiento relativo entre peso y tierra puede ser registrado para producir un historial de movimiento del suelo, llamado sismograma, aquí el sistema de registro es el sismógrafo.

Los sismómetros son instrumentos que se utiliza para medir ondas sísmicas generadas por terremoto, erupciones de volcanes, desprendimientos de tierra e incluso las generadas por la acción humana entre otras.

Existen varios tipos de sismómetro:

El Sismómetros de periodos largos en los cuales la frecuencia de resonancia es muy baja, el desfase entre el sismómetro y el movimiento del suelo tiende a cero y las amplitudes de los desplazamientos en el sismómetro llega a ser igual a la amplitud de los desplazamientos del suelo por esta razón es llamado medidor de desplazamiento. Es usado normalmente para registrar señales sísmicas con frecuencias en el rango de 0.01 Hz a .01 Hz correspondientes a periodos de 100 segundos a 10 segundos.

El sismómetro de periodo corto está construido para tener un corto periodo natural correspondientemente a una frecuencia de resonancia alta, más alta que la mayoría de las frecuencias en una onda sísmica. El desplazamiento de un sismómetro de periodo corto es proporcional a la aceleración del suelo, en consecuencia este instrumento es denominado acelerómetro. Diseñado para responder a frecuencias de 1 Hz a 10 Hz correspondientes a periodos de 1 a 0.1 segundos. Este tipo de instrumento es usado para medir movimientos fuertes donde las amplitudes del movimiento del suelo pueden superar el desplazamiento normal del sismómetro.

Los Sismómetros de banda ancha tienen un diseño de péndulo de inercia con un mecanismo de fuerza de retroalimentación. La cantidad de fuerza de retroalimentación aplicada es determinada usando un transductor eléctrico para convertir el movimiento de la masa en una señal eléctrica, tienen un rango de 0.1 Hz a 1 Hz. Pueden verse afectados por la presencia de ruido de fondo natural llamado microsismo provocado por tráfico, movimiento de árboles debido al viento etc. Los sismómetros de banda ancha tienen alta sensibilidad sobre un rango dinámico amplio, pueden ser utilizados para registrar una amplia gama de señales y rangos dinámicos desde ruido ambiental hasta la cadena de aceleraciones que vendría de un gran terremoto, y periodos que pueden ser registrados desde ondas de cuerpo de altas frecuencias a periodos de oscilación muy largos asociados con mareas terrestres.

Los sismómetros utilizados en este estudio son los geófonos de 4 Hz de frecuencia con orientación vertical y horizontal (Figura 7). La disposición del mecanismo de registro en un geófono horizontal puede ser ajustada mediante la burbuja nivel con la que cuentan, la dirección de este nivel nos indica la dirección en la que el geófono registra las vibraciones.

Algunas de sus características son las siguientes.

- Frecuencia Natural (Fn): 4 Hz.
- Tolerancia de frecuencia \pm 5%.
- Sensibilidad intrínseca.
- $V/cm/seg = 0.28$.

La curva de respuesta de salida Vs Gráfica de frecuencia del sismómetro GS-20DX es la siguiente (Figura 6):

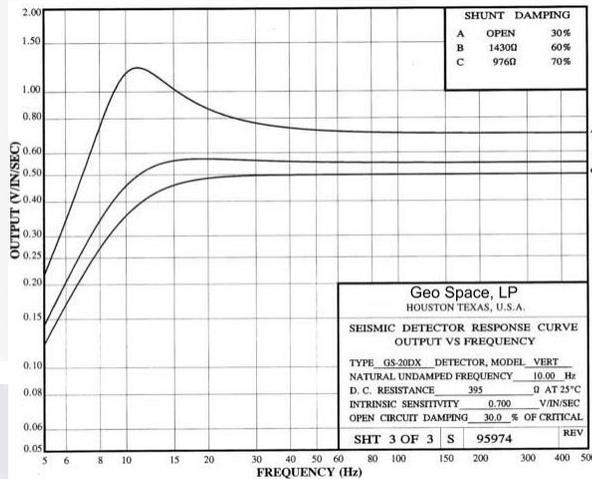


Figura 6 Gráfica de sensibilidad de Geófono de 10 Hz.



a)



b)

Figura 7 a) Geófono vertical y b) geófono horizontal GS-20DX de 4 Hz.

El sismógrafo utilizado fue un equipo modelo GEODE GS20DX de Geometric de 24 canales (Figura 8).



Figura 8 Sismógrafo ultra ligero Geode.

3.3.3. HIDROLAVADORA

Para degradar los elementos se utilizó una hidrolavadora karcher modelo K 2.360 (Figura 9) la cual tiene las siguientes características:

- Motor eléctrico
- Presión 1600 PSI
- 5.68 lts. de agua por minuto



Figura 9 Hidrolavadora Karcher K 2.360

3.4. COLOCACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SENSORES

Para la colocación de los sensores se propuso un sistema ejes para los elementos construidos para facilitar la interpretación de los datos y evitar confusiones durante las pruebas. Los ejes propuestos se muestran en la Figura 10

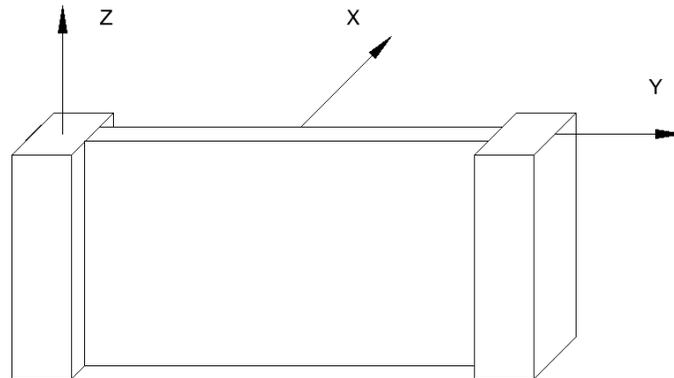


Figura 10 Ejes propuestos.

3.4.1. ARREGLO DE SENSORES PARA VIBRACIÓN AMBIENTAL Y FORZADA

Con el fin de registrar las vibraciones ambientales y forzadas, y para determinar el módulo elástico de los elementos se dispusieron dos tipos de arreglos para los sismómetros.

El primer arreglo corresponde a la vibración ambiental y forzada, en ellas se propuso medir y registrar las vibraciones en tres direcciones ortogonales diferentes X, Y, Z. Para cada elemento la componente X corresponde a su dirección transversal, la componente Y a la dirección longitudinal y la componente Z corresponde a la dirección vertical. Para la componente X y Y se utilizaron geófonos con disposición horizontal y para la componente Z geófonos con disposición vertical.

La vibración de los elementos se midió en tres puntos con tres geófonos para cada punto, un geófono para cada dirección X, Y y Z (Figura 12). La colocación de los grupos de geófonos se realizó sobre la parte superior de cada elemento y fue la siguiente: un grupo de geófonos se dispuso sobre una pilastra, el siguiente sobre la mitad de cada muro o arco y el último grupo sobre la otra pilastra como lo indica la Figura 11

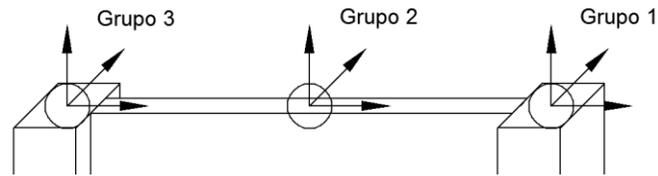


Figura 11 Disposición de grupos de geófonos.

Para que los sensores horizontales registren la vibración en la dirección requerida basta con alinear la burbuja de nivel con la que cuentan con la dirección en la que se desea registrar. Con el fin de asegurar el correcto registro de las vibraciones los geófonos se fijaron a los elementos mediante plastilina.



Figura 12 Disposición y colocación de geófonos en pilastras.

Para determinar los modos de vibrar de los muros y los arcos construidos se utilizaron dos técnicas diferentes, la primera se llevó a cabo tomando registros de vibración ambiental o microtemores, tomando mediciones de 1 minuto. La segunda técnica consistió en generar una vibración forzada excitando el terreno contiguo al elemento mediante el golpe de un marro de 14 lbs sobre una placa de acero.

Las dos lecturas (de vibración ambiental y de vibración forzada) se llevaron a cabo al final de cada ciclo de degradación sobre muros y arcos. Los datos fueron registrados con el sistema de adquisición antes descrito utilizando el arreglo de sensores para vibración ambiental y forzada también descrita anteriormente.

Los datos fueron registrados mediante el programa seismic controller, el cual graba los datos en un archivo con extensión .sg2. Para poder manipular los datos se debe convertir el archivo .sg2 a un archivo .txt mediante el programa tape, con el cual también se convierten los datos obtenidos a mili volts. Una vez teniendo los datos en formato ascii se tabulan y se separan los datos de cada geófono en archivo txt individual, con el fin de poder utilizar el programa Degtra para poder obtener los registros sísmicos en forma de odograma. Una vez teniendo los datos en forma de odograma este programa nos permite calcular los espectros de amplitudes de Fourier y con esto determinar las frecuencias dominantes en los elementos

3.4.2. ARREGLO DE SENSORES PARA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS

Las características mecánicas de la mampostería se determinaron mediante la medición de la velocidad de propagación de las ondas elásticas V_p y V_s a través de la mampostería de los elementos. La teoría de esta metodología se presenta en el capítulo de fundamentos teóricos.

Las ondas V_p y V_s fueron producidas mediante el golpe de un marro de 4 lbs sobre la cara de una de las pilastras del elemento estudiado en cuestión, y fueron registradas mediante un geófono horizontal, el cual se dispuso de manera que la burbuja de nivel se alineara con la dirección transversal de cada elemento (dirección normal a la trayectoria de las ondas), el geófono se colocó sobre la pilastra del otro extremo donde se generó la onda mecánica a 25 cm por debajo de su parte superior (Figura 13).



Figura 13 Colocación de geófono para determinación de módulo de elasticidad.

Conociendo la distancia entre el golpe y la localización del geófono y el tiempo de arribo de las ondas P y S se determinó la velocidad de las (V_p y V_s respectivamente). Con la velocidad de propagación de la onda P se pudo conocer el peso volumétrico (ρ) de la medio utilizando la Ecuación (12), una vez calculado el peso volumétrico y usando el valor de la velocidad de propagación de la onda V_p se calculó utilizando la Ecuación (11) el valor de la constante de Lamé (μ) o módulo de cortante. Calculado μ y usando el valor de V_p y ρ se calculó la constante de Lamé λ con la Ecuación (10). Luego utilizando las constantes de Lamé μ y λ se calculó la relación de Poisson (ν) utilizando la Ecuación (8), también utilizando μ y λ se puede calcular el módulo elástico del medio con la Ecuación (7).

Las distancias entre el geófono y los impactos realizados para generar las ondas P y S se muestran en la Figura 14 para los muros y Figura 15 para los arcos, haciendo espejo en la figura se realizó otra serie de impactos comparar los resultados obtenidos.

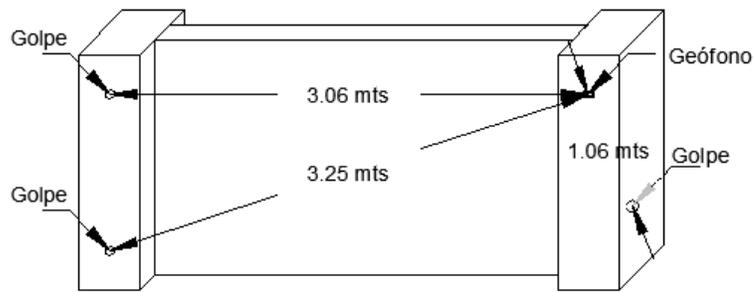


Figura 14 Distancia entre impacto y geófono para muros.

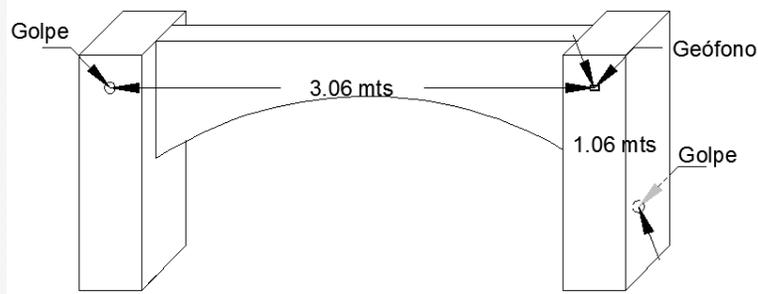


Figura 15 Distancia entre impacto y geófono para arcos.

El procedimiento mencionado se utilizó para calcular el módulo elástico de los elementos construidos para cada ciclo de degradación realizado.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. MODULOS DE ELASTICIDAD DINÁMICOS

Siguiendo el método descrito en el Capítulo 4.4.2 se calcularon los módulos elásticos de los elementos construidos para cada ciclo de degradación. Los datos que se obtuvieron a partir del golpe en la parte inferior posterior de la pilastra donde se colocó el geófono no se presentan ya que la distancia entre golpe y geófono es muy corta lo cual hizo que no se pudieran determinar las velocidades de onda P y S. Los resultados se presentan a continuación.

En la Tabla 1 se presentan los resultados correspondientes al arco 1 obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Norte del arco 1 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Sur.

Tabla 1 Módulos elásticos del arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	765.00	510.00	1630.34	0.10	163.03	9513.04
2	784.62	478.13	1640.69	0.20	335.78	9214.73
3	927.27	546.43	1710.66	0.23	400.30	12854.50
4	900.00	546.43	1697.94	0.21	353.31	12490.92
5	1055.17	527.59	1766.82	0.33	588.94	13372.96
6	927.27	470.77	1710.66	0.33	558.31	10255.44
7	874.29	665.22	1685.68	0.19	315.95	12361.54

Tabla 2 Módulos elásticos arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	874.29	588.46	1685.68	0.09	144.75	12927.00
6	1020.00	493.55	1751.91	0.35	608.17	11724.53
7	956.25	485.71	1723.87	0.33	562.23	10999.35

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes al arco 1 obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Sur del arco 1 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Norte.

Tabla 3 Módulos elásticos del arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	927.27	556.36	1710.66	0.22	5399.58	13161.49
2	2781.82	680.00	2251.35	0.47	10615.51	31171.92
3	---	---	---	---	---	---
4	784.62	470.77	1640.69	0.22	3707.84	9037.87
5	850.00	600.00	1673.85	0.00	6144.67	12331.71
6	1176.92	478.13	1815.72	0.40	4232.64	11861.28
7	956.25	450.00	1723.87	0.36	3559.66	9666.46

Para esta configuración en la prueba realizada en el ciclo 3 se colocó mal el geófono y no se pudo determinar el módulo de elasticidad.

Tabla 4 Módulos elásticos arco 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	850	577.36	1673.85	0.07	5689.67	12195.37
6	1224	413.51	1833.61	0.44	3197.17	9179.59
7	956.25	470.77	1723.87	0.34	3895.83	10441.21

Para poder visualizar la variación de los módulos elásticos construyeron las siguientes gráficas (Figura 16 y Figura 17) a partir de los datos de las tablas (los datos en rojo de las tablas no se tomaron en cuenta para alimentar la gráfica ya que se salen del rango medio de los demás datos).

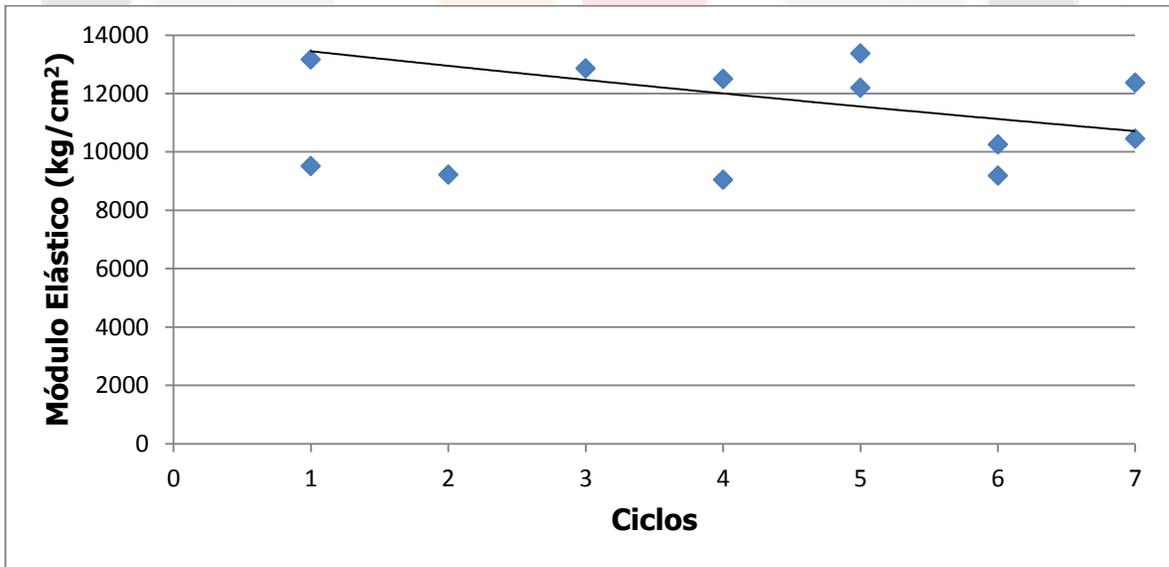


Figura 16 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 1.

En la Figura 16 se presentan los datos resultado del golpe del marro a la placa metálica apoyada sobre el elemento, se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

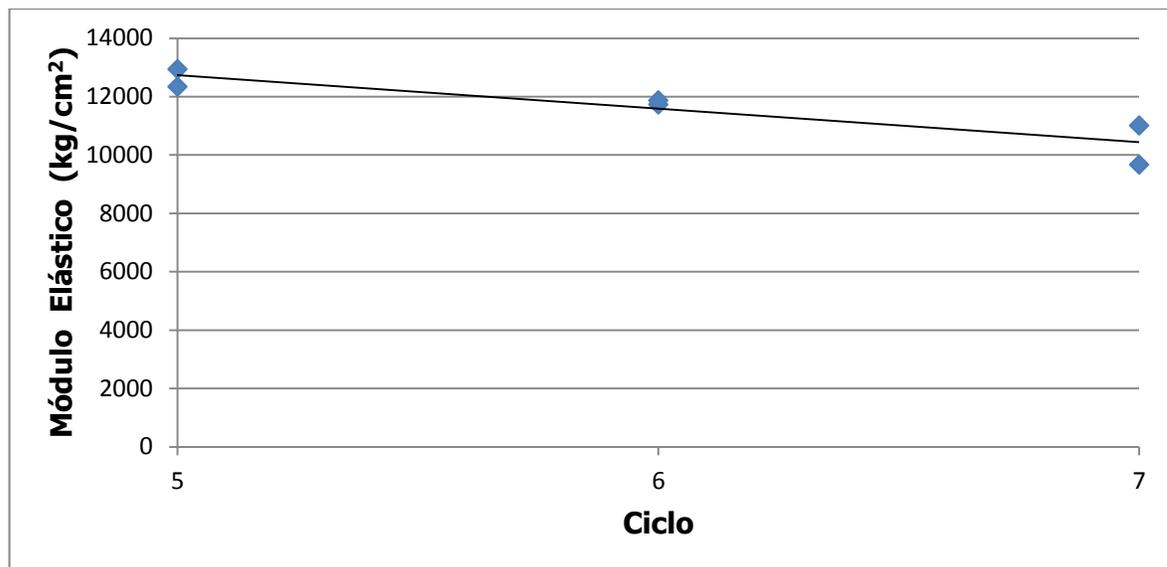


Figura 17 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 1.

En la Figura 17 se presentan los datos resultado del golpe del marro directamente sobre el elemento, en la gráfica se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

En la Tabla 5 se presentan los resultados correspondientes al arco 2 obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Este del arco 2 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Oeste.

Tabla 5 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	956.25	493.55	1723.87	0.32	4281.97	11291.03
2	827.03	425.00	1662.42	0.32	3061.96	8087.09
3	---	---	---	---	---	---
4	850.00	527.59	1673.85	0.19	4750.97	11275.52
5	728.57	463.64	1610.57	0.16	3530.32	8188.38
6	765.00	463.64	1630.34	0.21	3573.65	8646.25
7	651.06	485.71	1565.91	-0.13	3767.11	6573.18

Para esta configuración en la prueba realizada en el ciclo 3 se colocó mal el geófono y no se pudo determinar el módulo de elasticidad.

Tabla 6 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1020.00	493.55	1751.91	0.35	4351.62	11724.53
6	874.29	518.64	1685.68	0.23	4623.74	11360.54
7	827.03	456.72	1662.42	0.28	3536.02	9056.51

En la Tabla 7 se presentan los resultados correspondientes al arco 2 obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Oeste del arco 2 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Este.

Tabla 7 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	827.03	463.64	1662.42	0.27	3643.98	9261.83
2	805.26	566.67	1651.38	0.01	5407.30	10917.46
3	827.03	624.49	1662.42	-0.16	6611.07	11063.29
4	827.03	637.50	1662.42	-0.23	6889.40	10580.94
5	805.26	527.59	1651.38	0.12	4687.19	10536.41
6	765.00	450.00	1630.34	0.24	3366.52	8318.34
7	1176.92	577.36	1815.72	0.34	6171.90	16559.68

Tabla 8 Módulos elásticos del arco 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1055.17	566.67	1766.82	0.30	5785.32	15011.16
6	874.29	501.64	1685.68	0.25	4325.51	10853.64
7	874.29	437.14	1685.68	0.33	3284.74	8759.31

En las Figura 18 y Figura 19 se presentan las gráficas construidas a partir de los datos proporcionados en las Tabla 5, Tabla 7 y Tabla 6, Tabla 8 respectivamente.

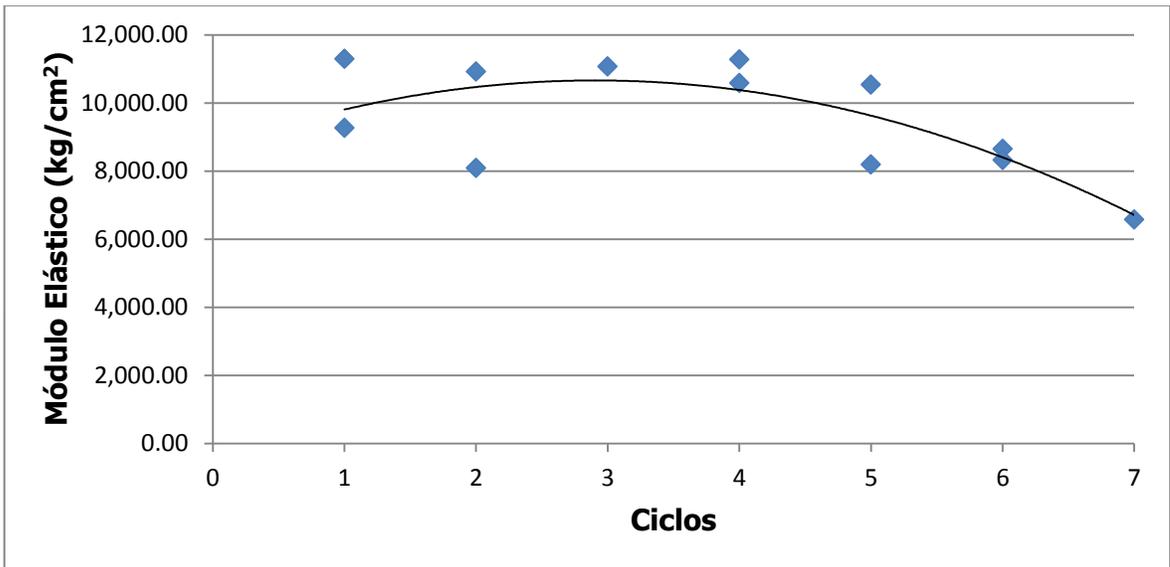


Figura 18 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 2.

En la Figura 17 se presentan los datos resultado del golpe del marro a la placa metálica apoyada sobre el elemento, se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

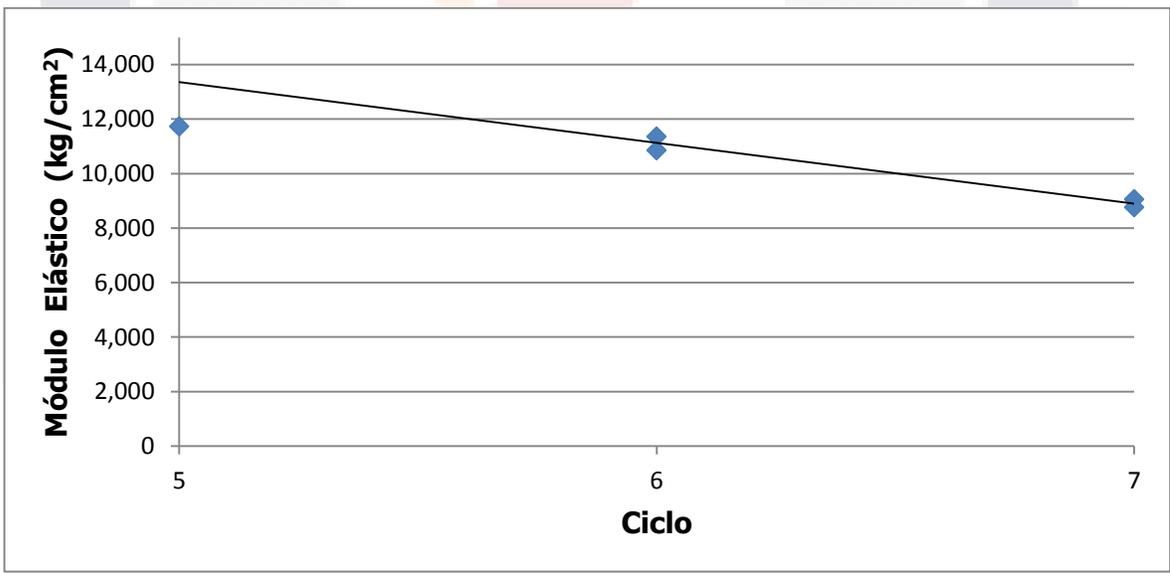


Figura 19 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del arco 2.

En la Figura 19 se presentan los datos resultado del golpe del marro directamente sobre el elemento, en la gráfica se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

En la Tabla 9 se presentan los resultados correspondientes al muro 1 obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Norte del muro 1 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Sur.

Tabla 9 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	746.34	437.14	1620.30	0.24	3157.35	7823.23
2	695.45	510	1591.95	-0.08	4222.29	7754.41
3	765	456.72	1630.34	0.22	3467.76	8482.76
4	784.62	588.46	1640.69	-0.14	5793.51	9931.72
5	805.26	493.55	1651.38	0.20	4101.90	9837.72
6	900	443.48	1697.94	0.34	3405.23	9123.75
7	1800	408	2019.20	0.47	3427.52	10096.91

Tabla 10 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	987.10	501.64	1737.61	0.33	4458.76	11823.79
6	927.27	443.48	1710.66	0.35	3430.74	9274.76
7	1275	392.31	1852.42	0.45	2907.18	8417.53

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para el muro 1 mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento y en la Tabla 12 se

presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Norte del muro 1 y el golpe se efectuó en la parte inferior de la pilastra Sur.

Tabla 11 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	792.68	457.75	1644.89	0.25	3514.52	8785.25
2	773.81	570.18	1635.01	-0.09	5420.22	9822.09
3	928.57	500	1711.26	0.30	4362.49	11306.13
4	1250	532.79	1843.27	0.39	5335.51	14822.02
5	1015.63	492.42	1750.03	0.35	4327.16	11651.65
6	2166.67	663.27	2115	0.45	9487.76	27482.23
7	984.85	433.33	1732.62	0.38	3325.28	9177.50

Tabla 12 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1083.33	507.81	1778.49	0.36	4676.69	12713.10
6	1250	427.63	1843.27	0.43	3437.23	9856.08
7	1120.69	411.39	1793.63	0.42	3095.46	8804.28

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 1 y en la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Sur del muro 1 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Norte.

Tabla 13 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	765	493.55	1630.34	0.14	4049.63	9261.46
2	680	485.71	1583.03	-0.02	3808.29	7457.90
3	765	577.36	1630.34	-0.16	5541.76	9291.27
4	765	546.43	1630.34	-0.02	4963.90	9720.97
5	850	665.22	1673.85	0.29	7553.06	10721.66
6	956.25	463.64	1723.87	0.35	3778.67	10174.74
7	987.1	443.48	1737.61	0.37	3484.78	9573.06

Para esta configuración en la prueba efectuada para el ciclo 5 se colocó mal geófono por lo cual no se pudo determinar el módulo de elasticidad

Tabla 14 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	---	---	---	---	---	---
6	987.10	413.51	1737.61	0.39	3029.78	8444.45
7	1457.14	651.06	1915.30	0.38	8278.73	22771.19

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 1 y en la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Sur del muro 1 y el golpe se efectuó en la parte inferior de la pilastra Norte.

Tabla 15 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	755.81	451.39	1625.42	0.22	3377.12	8259.01
2	755.81	515.87	1625.42	0.06	4410.93	9385.71
3	812.50	532.79	1655.07	0.12	4790.76	10758.30
4	928.57	433.33	1711.26	0.36	3276.72	8917.89
5	1048.39	485.07	1763.97	0.36	4232.42	11544.38
6	878.38	457.75	1687.65	0.31	3605.88	9473.29
7	2321.43	457.75	2151.79	0.48	4597.59	18339.32

Tabla 16 Módulos elásticos del muro 1 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	984.85	515.87	1736.62	0.31	4712.69	12356.09
6	984.85	471.01	1736.62	0.35	3928.73	10621.05
7	2321.43	532.79	2151.79	0.47	6228.55	18339.32

En las Figura 20 y Figura 21 se presentan las gráficas construidas a partir de los datos proporcionados en las Tabla 9, Tabla 11, Tabla 13, Tabla 15 y Tabla 10, Tabla 12, Tabla 14, Tabla 16 respectivamente.

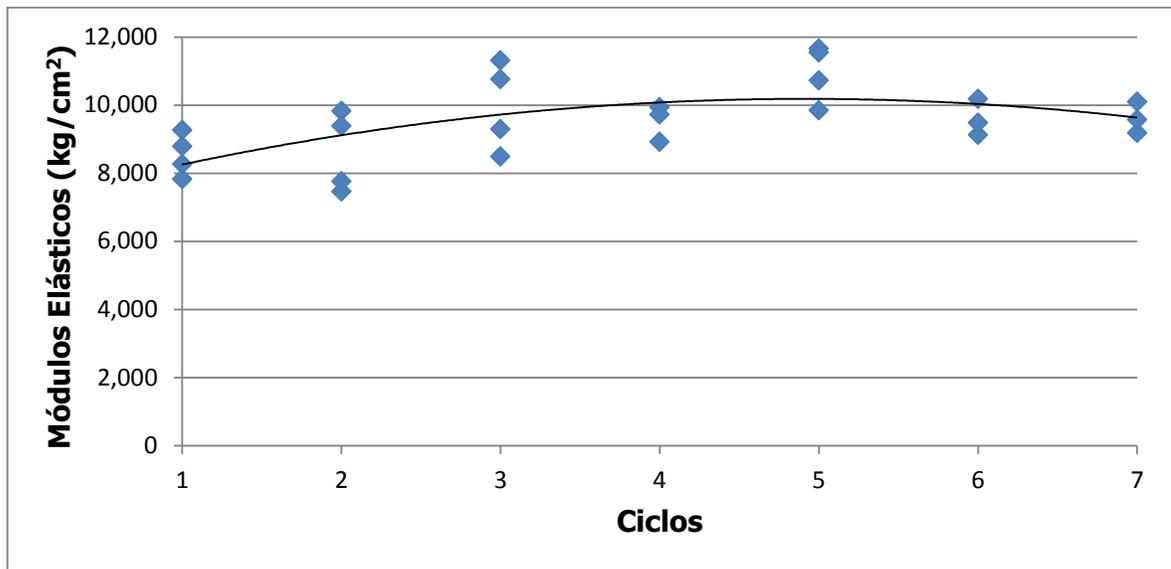


Figura 20 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 1.

En la Figura 20 se presentan los datos resultado del golpe del marro sobre la placa metálica apoyada al elemento, en la gráfica no se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

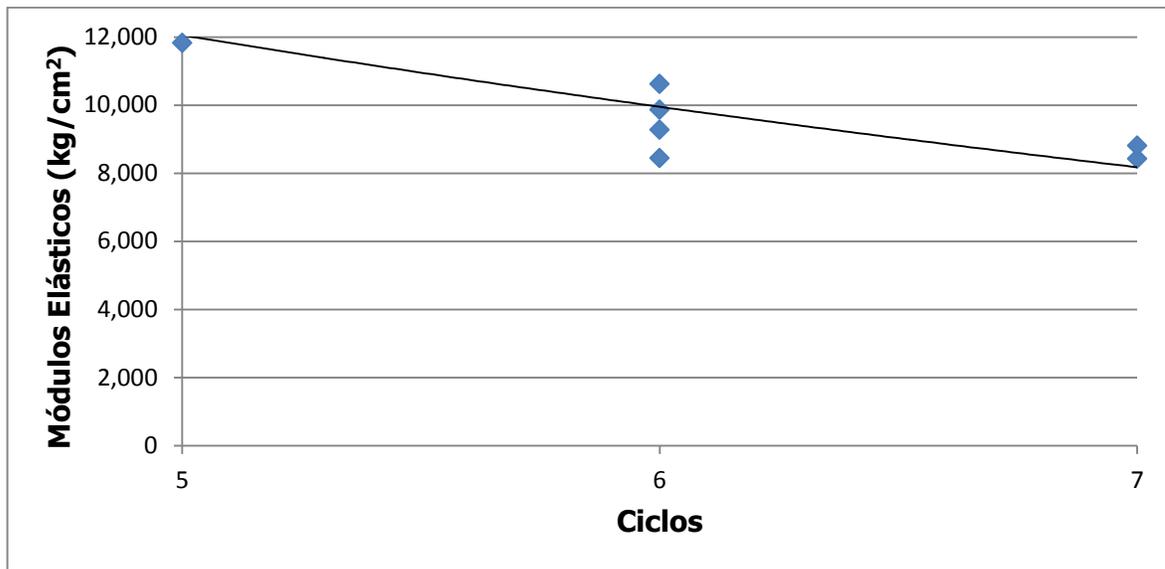


Figura 21 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 1.

En la Figura 21 se presentan los datos resultado del golpe del marro directamente sobre el elemento, en la gráfica se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 2 y en la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Este del muro 2 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Oeste.

Tabla 17 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	850	485.71	1673.85	0.26	4026.78	10127.95
2	874.29	485.71	1685.68	0.28	4055.24	10355.33
3	900	493.55	1697.94	0.28	4217.56	10838.87
4	765	443.48	1630.34	0.25	3269.65	8153.95
5	827.92	442.90	1662.87	0.30	3326.22	8645.16
6	805.26	413.51	1651.38	0.32	2879.42	7607.04
7	588.46	302.97	1526.83	0.32	1429.13	3771.93

Tabla 18 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	900	463.64	1697.94	0.32	3721.83	9820.98
6	1092.86	527.59	1782.39	0.35	5059.05	13639.82
7	900	355.81	1697.94	0.41	2192.04	6170.02

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 2 y en la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Este del muro 2 y el golpe se efectuó en la parte inferior de la pilastra Oeste.

Tabla 19 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	855.26	570.18	1676.43	0.10	5557.54	12226.60
2	755.81	433.33	1625.42	0.26	3112.35	7813.03
3	855.26	570.18	1676.43	0.10	5557.54	12226.60
4	902.78	500	1699.25	0.28	4331.88	11078.90
5	1121.46	590.69	1793.94	0.31	6382.82	16697.77
6	1015.63	445.21	1750.03	0.38	3537.08	9769.91
7	1120.69	457.75	1793.63	0.40	3832.33	10729.60

Tabla 20 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1160.71	541.67	1809.44	0.36	5413.61	14733.62
6	928.57	445.21	1711.26	0.35	3458.72	9343.78
7	1083.33	464.29	1778.49	0.39	3909.33	10848.39

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 2 y en la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6 y 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Oeste del muro 2 y el golpe se efectuó en la parte superior de la pilastra Este.

Tabla 21 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	850	437.14	1673.85	0.32	3261.69	8612.16
2	---	---	---	---	---	---
3	900	478.13	1697.94	0.30	3958.08	10317.93
4	1133.33	430.99	1798.67	0.42	3406.88	9644.66
5	987.10	443.48	1737.61	0.37	3484.78	9573.06
6	1390.91	463.64	1893.16	0.44	4149.74	11930.50
7	665.22	392.31	1574.35	0.23	2470.79	6094.78

Para esta configuración en la prueba realizada para el ciclo 2 se colocó mal el geófono por lo cual no fue posible determinar el módulo de elasticidad.

Tabla 22 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1224	510	1833.61	0.39	4863.25	13568.06
6	1390.91	425	1893.16	0.45	3486.93	10101.72
7	1176.92	382.50	1815.72	0.44	2708.89	7806.74

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro a una placa metálica apoyada en el elemento para el muro 2 y en la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos mediante el golpe del marro directamente al elemento, éstos sólo se efectuaron para los ciclos de degradación 5, 6, 7. Para esta determinación el geófono se colocó en la pilastra Oeste del muro 2 y el golpe se efectuó en la parte inferior de la pilastra Este.

Tabla 23 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre la placa.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
1	855.26	515.87	1676.43	0.21	4549.37	11046.42
2	---	---	---	---	---	---
3	928.57	416.67	1711.26	0.39	3029.51	8324.76
4	984.85	416.67	1736.62	0.39	3074.40	8552.94
5	1160.71	492.42	1809.44	0.39	4474.05	12440.17
6	1354.17	492.42	1880.53	0.42	4649.84	13240.97
7	984.85	477.94	1736.62	0.35	4045.13	10889.23

Para esta configuración en la prueba realizada para el ciclo 2 se colocó mal el geófono por lo cual no fue posible determinar el módulo de elasticidad.

Tabla 24 Módulos elásticos del muro 2 determinados a partir del golpe del marro sobre el elemento.

Ciclo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν	G _{din} (kg/cm ²)	E _{din} (kg/cm ²)
5	1547.62	524.19	1944.36	0.44	5448.04	15638.10
6	1250	532.79	1843.27	0.39	5335.51	14822.02
7	1048.39	422.08	1763.97	0.40	3204.47	8993.55

En las Figura 22 y Figura 23 se presentan las gráficas construidas a partir de los datos proporcionados en las Tabla 17, Tabla 19, Tabla 21, Tabla 23 y Tabla 18, Tabla 20, Tabla 22, Tabla 24 respectivamente.

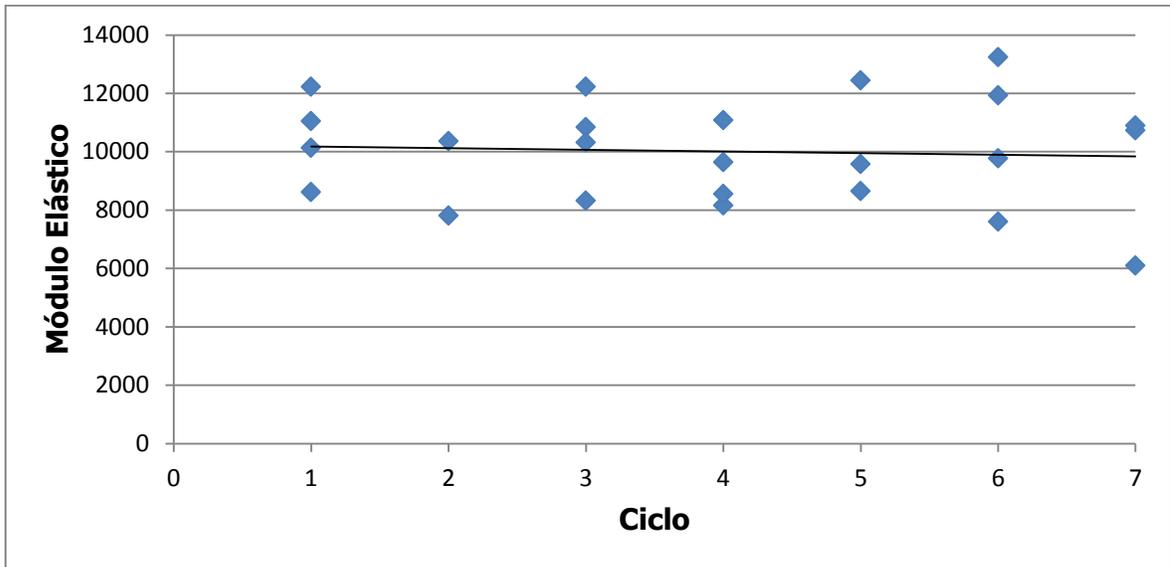


Figura 22 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 2.

En la Figura 22 se presentan los datos resultado del golpe del marro sobre la placa metálica apoyada al elemento, en la gráfica se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

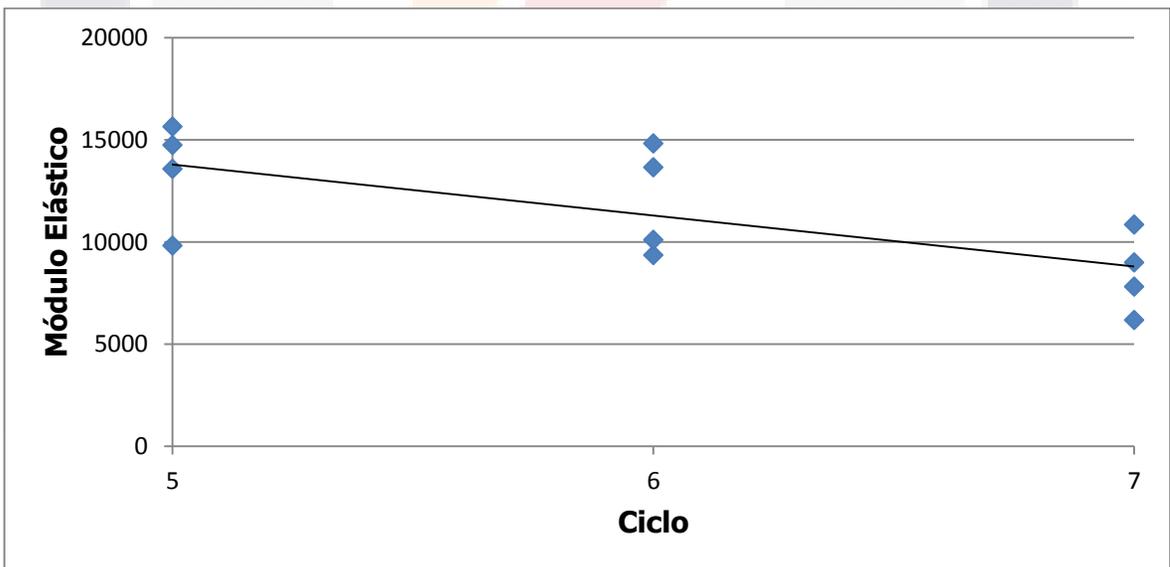


Figura 23 Gráfico Módulo Elástico-Ciclo de degradación del muro 2.

En la Figura 23 se presentan los datos resultado del golpe del marro directamente sobre el elemento, en la gráfica se observa una tendencia a la baja en los módulos elásticos conforme los ciclos de degradación aumentan.

4.2. MÓDULOS DE ELASTICIDAD ESTÁTICOS

Para la validación de los módulos de elasticidad se probaron 5 muretes con dimensiones de 7 cm de ancho, 28 cm de largo y 28 cm de alto teniendo una relación de esbeltez de 2. Los muretes corresponden a diferentes estados de degradación presentados en los elementos de prueba, esto se realizó degradando los muretes de la misma manera en la que se degradaron los elementos de prueba (muros y arcos).

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010, las norma dicta que se deben de probar previamente muretes para determinar esfuerzo máximo a compresión (f_m) que soportan y así tener un estimado del esfuerzo que soportarán los muretes que se utilizarán para la prueba. Se deben de tomar suficientes lecturas de desplazamiento y carga de modo que se pueda definir mediante interpolación o gráficamente el esfuerzo normal axial (σ_1) correspondiente a una deformación de 0,00005, así como la deformación correspondiente al 40% del esfuerzo normal máximo (σ_2). El cálculo para determinar los Módulos Elásticos se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \tag{19}$$

donde:

- E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería;
- σ_1 es el esfuerzo axial correspondiente a 0,00005 de deformación;
- σ_2 es el esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima;
- ε_2 es la deformación producida por el esfuerzo σ_2 .

La deformación ε se calcula como

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \tag{20}$$

donde:

δ es el acortamiento medido a lo largo de la longitud calibrada;

l_0 es la longitud calibrada media entre apoyos de transductores.

El esfuerzo medio \bar{f}_m que se obtenga de los ensayos de las probetas se debe corregir multiplicándolo por los factores correctivos de la siguiente tabla, interpolando linealmente para relaciones de esbeltez intermedias.

Tabla 25 Factores correctivos por esbeltez de las pilas.

Relación de esbeltez de la pila	2	3	4	5
Factor correctivo	0.75	0.90	1.00	1.05

Los resultados son los siguientes.

Murete 1.

El primer murete corresponde al elemento sano, su gráfica esfuerzo deformación es la siguiente:

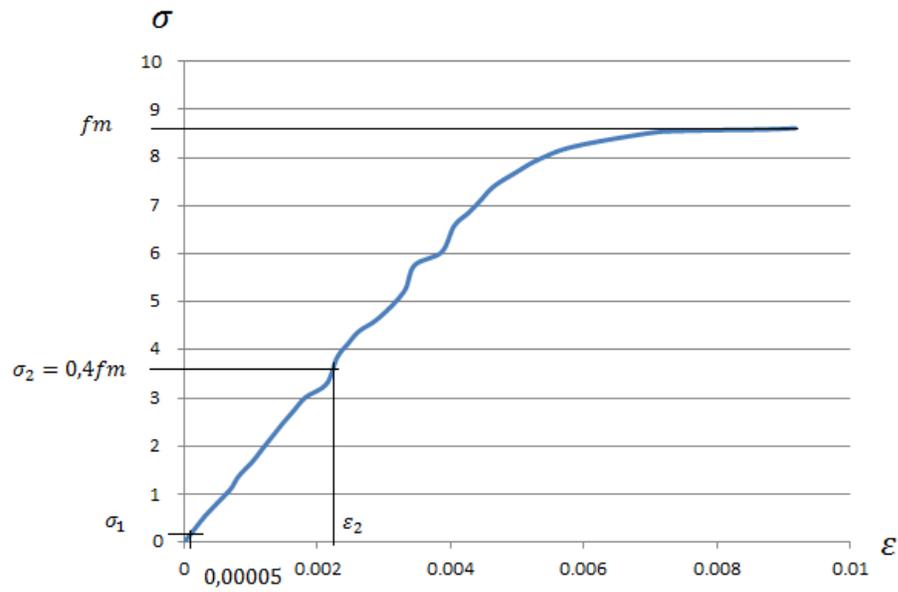


Figura 24 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 1.

De Figura 24 se obtienen los siguientes valores:

$$f_m = 8.61 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 3.45 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_1 = 0.1 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\epsilon_1 = 0.00005;$$

$$\epsilon_2 = 0.0021;$$

El valor del módulo de elasticidad es:

$$E_m = 1632.11 \text{ kg/cm}^2.$$

Murete 2.

Corresponde al elemento con el segundo ciclo de degradación:

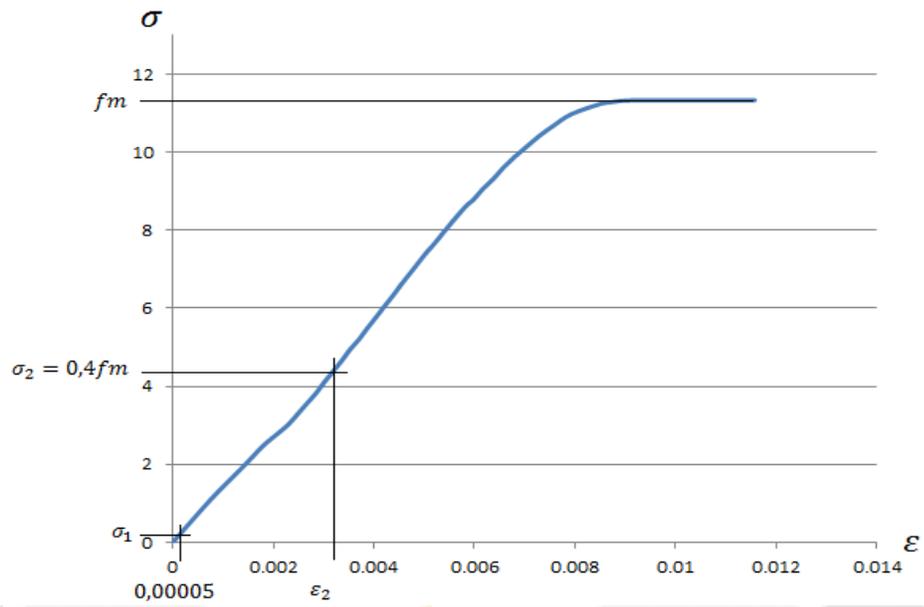


Figura 25 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 2.

De la Figura 25 se obtienen los siguientes valores:

$$f_m = 11.33 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 4.53 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_1 = 0.08 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\varepsilon_1 = 0.00005;$$

$$\varepsilon_2 = 0.0032;$$

El valor del módulo de elasticidad es:

$$E_m = 1413.41 \text{ kg/cm}^2.$$

Murete 3.

Corresponde al elemento con el tercer ciclo de degradación:

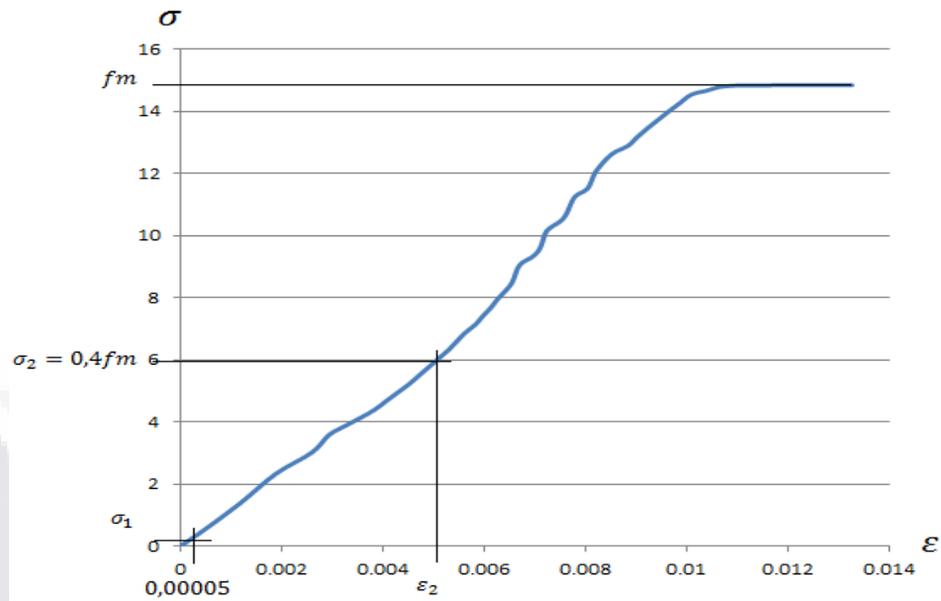


Figura 26 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 3.

De la Figura 26 se obtienen los siguientes valores:

$$f_m = 14.85 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 5.94 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_1 = 0.08 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\epsilon_1 = 0.00005;$$

$$\epsilon_2 = 0.00485;$$

El valor del módulo de elasticidad es:

$$E_m = 1220.42 \text{ kg/cm}^2.$$

Murete 4.

Corresponde al elemento con el cuarto ciclo de degradación:

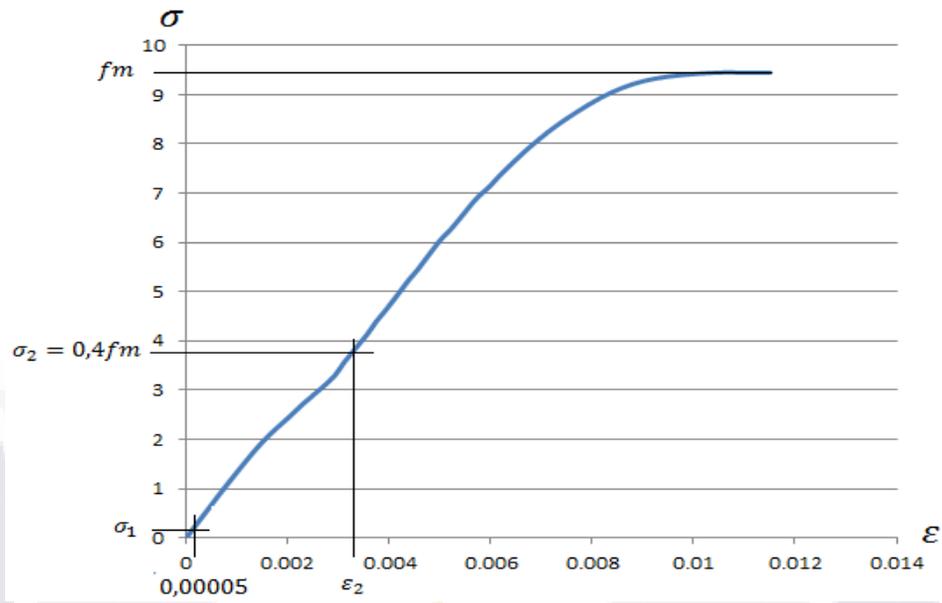


Figura 27 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 4.

De la Figura 27 se obtienen los siguientes valores:

$$f_m = 9.45 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 3.78 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_1 = 0.08 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\varepsilon_1 = 0.00005;$$

$$\varepsilon_2 = 0.0033;$$

El valor del módulo de elasticidad es:

$$E_m = 1138.28 \text{ kg/cm}^2.$$

Murete 5.

Corresponde al elemento con el cuarto ciclo de degradación:

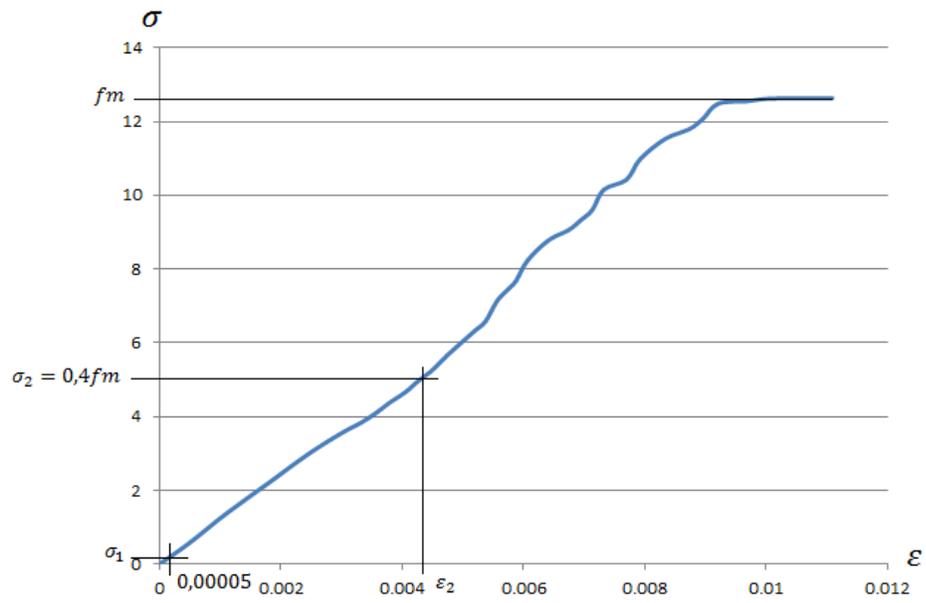


Figura 28 Gráfica Esfuerzo-Deformación de Murete 5.

De la Figura 28 se obtienen los siguientes valores:

$$f_m = 12.63 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_2 = 5.05 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_1 = 0.06 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\varepsilon_1 = 0.00005;$$

$$\varepsilon_2 = 0.0045;$$

El valor del módulo de elasticidad es:

$$E_m = 1121.88 \text{ kg/cm}^2.$$

Tabla 26 Resumen de Módulos elásticos obtenidos correspondientes a los muretes probados.

PROBETA	REPRESENTATIVA DEL CICLO	σ_u (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
M1	1	8.61	1632.11
M2	2	11.33	1413.41
M3	3	14.85	1220.42
M4	3	9.45	1138.38
M5	4	12.63	1121.88

4.3. FRECUENCIAS NATURALES

A continuación se presentan las gráficas (de la Figura 29 a la Figura 40) resultantes de las mediciones realizadas para cada uno de los elementos construidos durante el primer ciclo de pruebas y las frecuencias correspondientes para los ejes X, Y, Z de cada grupo de geófonos. Para los siguientes ciclos de prueba sólo se presentarán las frecuencias tabuladas para cada grupo de geófonos.

La frecuencia natural de vibración es la primera frecuencia que se presenta que tiene la mayor amplitud. Con esto como base los resultados de la primera fase de pruebas fue la siguiente:

Comenzaremos con los resultados obtenidos para el arco 1 el cual es el arco orientado en sentido Norte-Sur, para el primer grupo de geófonos se presenta la siguiente gráfica Amplitud-Frecuencia:

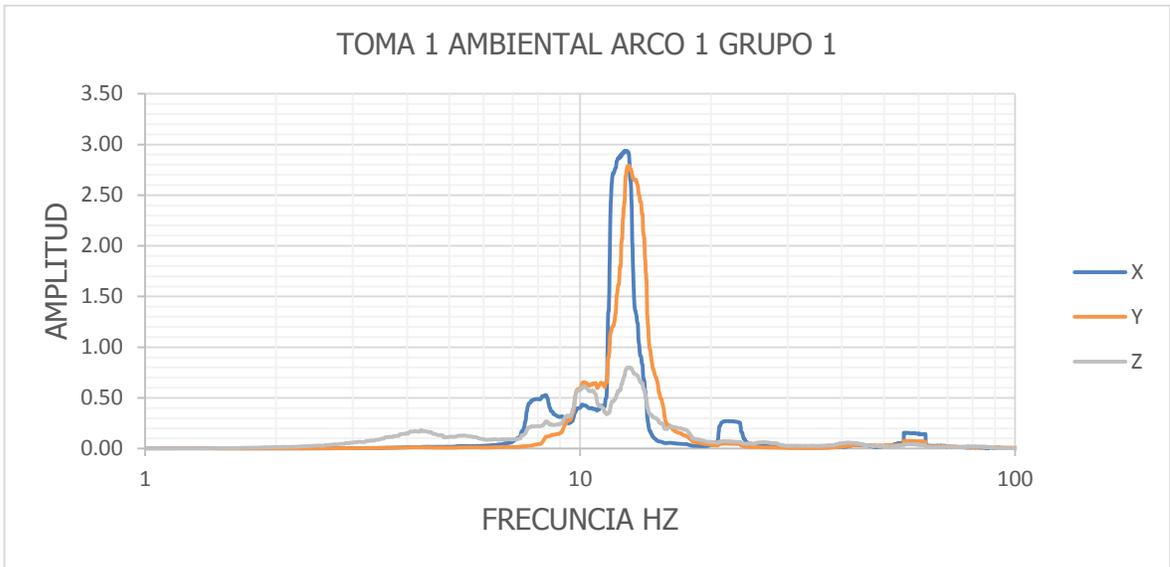


Figura 29 Gráfica Amplitud-Frecuencia, primer ciclo, arco 1, primer grupo de geófonos.

Para el sentido transversal del muro "X" se presentan frecuencia natural de 12.76 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural con una magnitud de 12.88 Hz y en sentido vertical de arco "Z" la frecuencia natural es la tiene una magnitud de 12.80 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos ubicados en el centro del arco 1 la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

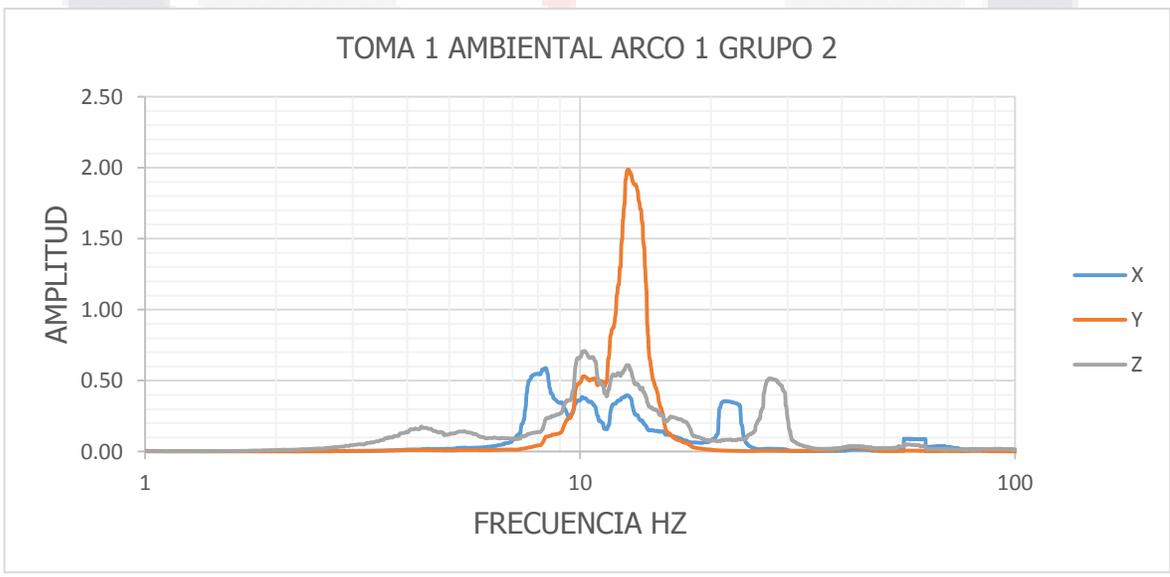


Figura 30 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 1, segundo grupo de geófonos.

Para el sentido transversal "X" del arco la frecuencia natural registrada fue de 8.33 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.88 Hz y para el sentido "Z" del arco la frecuencia natural es 10.18 Hz. El tercer grupo de geófonos se localizó en la pila Sur del arco 1 y su gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

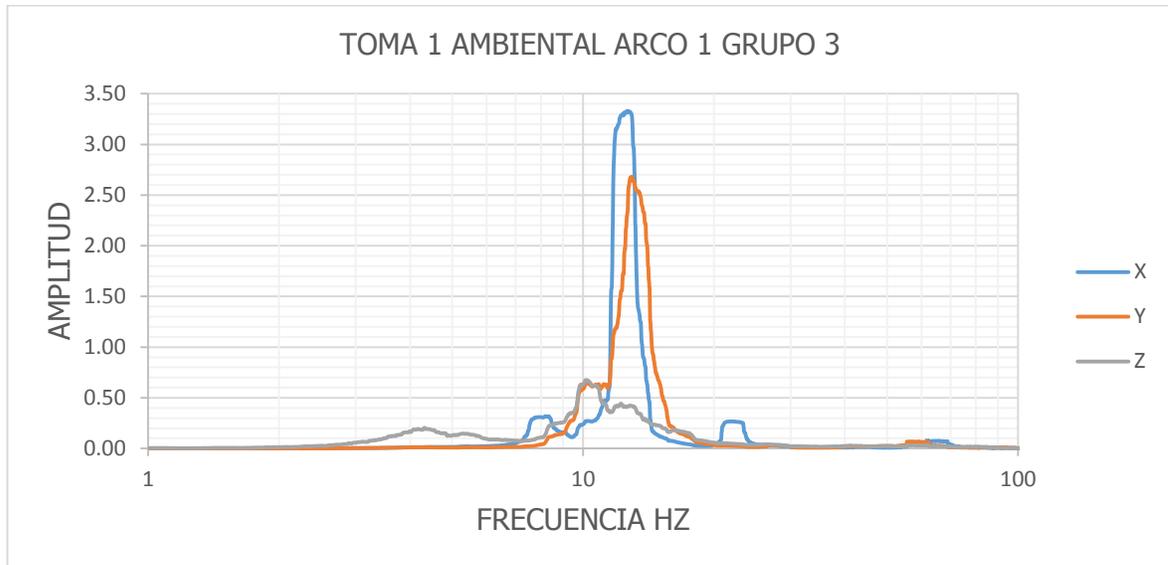


Figura 31 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 1, tercer grupo de geófonos.

Para el sentido transversal "X" del arco se observa que la frecuencia natural corresponde a una magnitud de 12.44 Hz, en el sentido longitudinal "Y" del arco se observa la frecuencia natural de 12.85 Hz y para el sentido vertical "Z" se observa una frecuencia natural de 10.13 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Norte del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

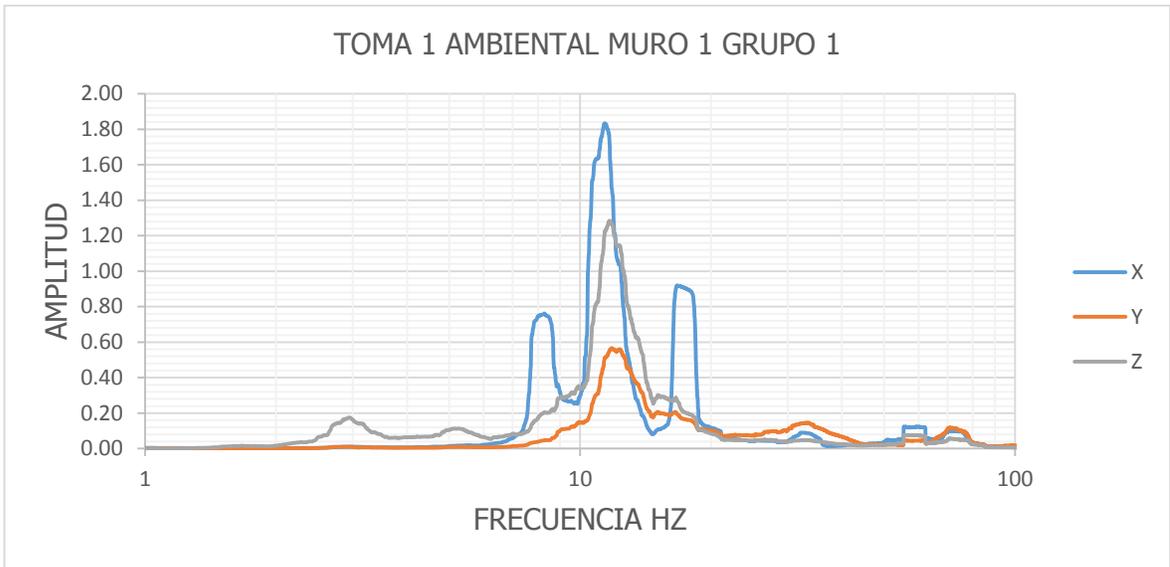


Figura 32 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, primer grupo de geófonos.

Para el sentido transversal del muro "X" se observa que su frecuencia natural de 11.38 Hz, en el sentido longitudinal del muro "Y" se observa una frecuencia natural de 11.81 Hz y en el sentido vertical del muro "Z" su frecuencias natural es 11.67 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos que están localizados en el centro del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

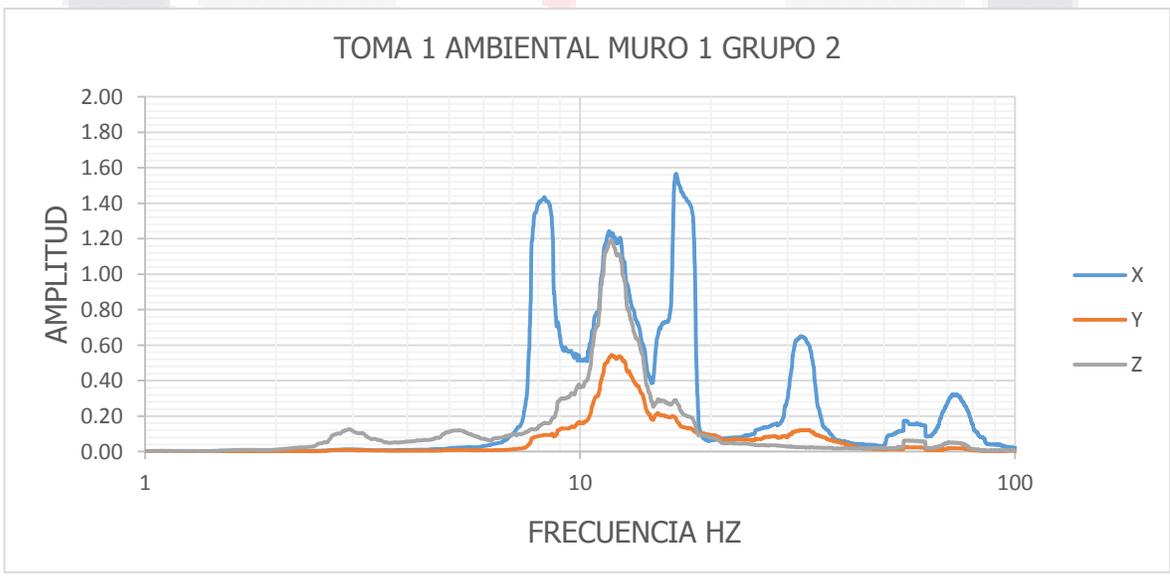


Figura 33 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, segundo grupo de geófonos.

En el sentido transversal "X" del muro la frecuencia natural es 16.63 Hz, en el sentido longitudinal "Y" se presenta una frecuencia natural de 11.80 Hz y en el sentido vertical "Z" presenta una frecuencia natural de 11.81 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos ubicado en la pilastra Sur del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

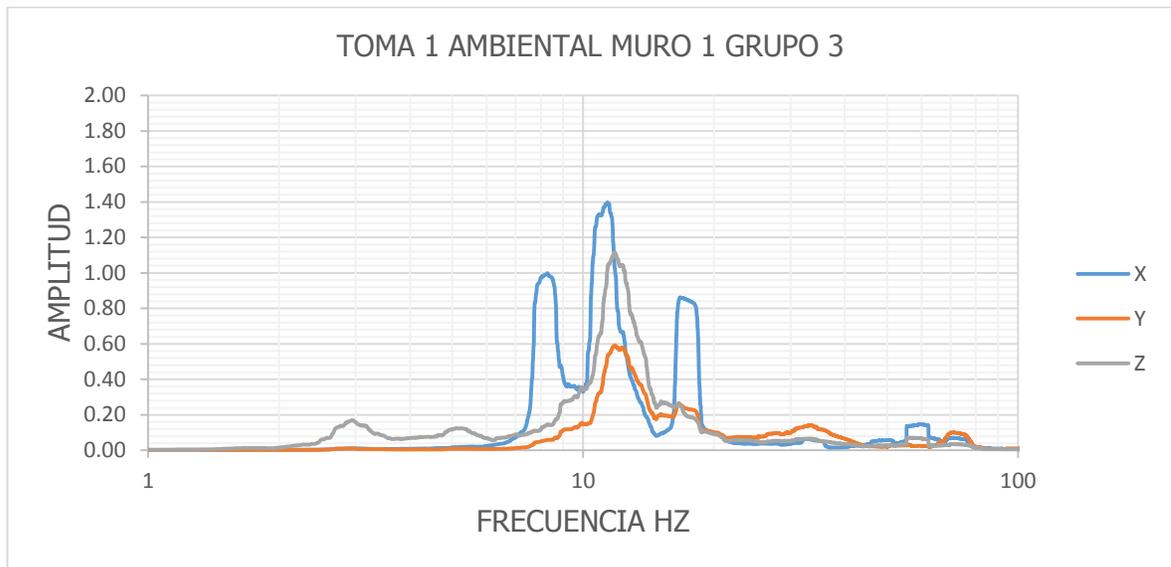


Figura 34 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 1, tercer grupo de geófonos.

Para el sentido transversal "X" del muro se registra una frecuencia natural de 11.4 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se registra una frecuencia natural de 11.81 Hz y para el sentido vertical "Z" del muro se registra una frecuencia natural de 11.81 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Oeste del arco la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

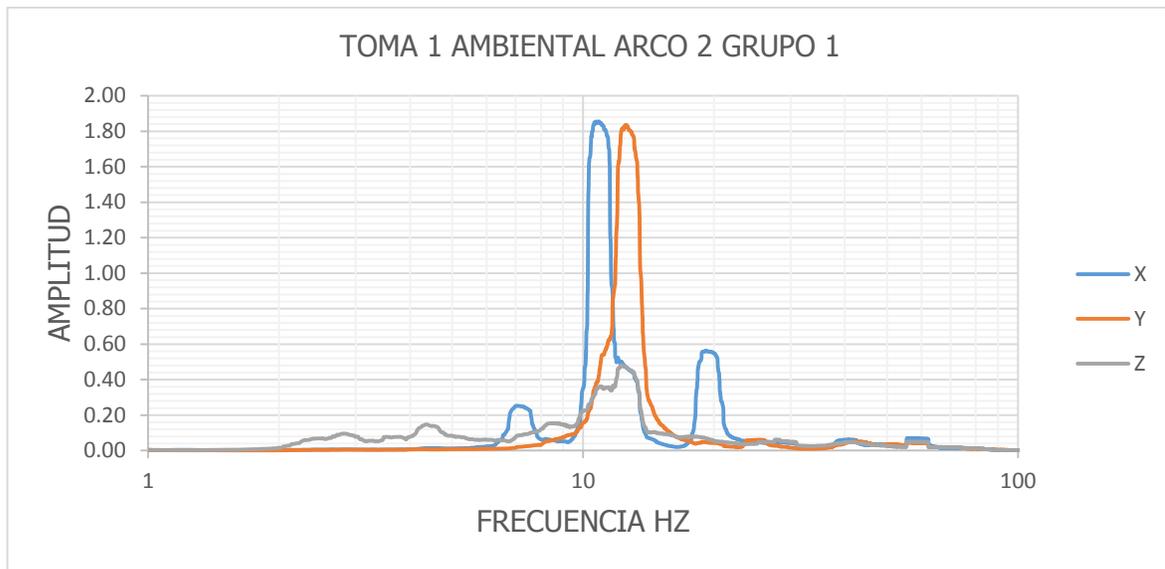


Figura 35 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, primer grupo de geófonos.

Se puede observar que en el sentido transversal al arco "X" presenta una frecuencia natural de 10.73 Hz, en el sentido longitudinal del arco "Y" se presenta una frecuencia natural de 12.54 Hz y en el sentido vertical del arco "Z" se presenta solamente una frecuencia natural de 12.24 Hz.

Para el arreglo 2 correspondiente a la parte central del Arco 2 la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

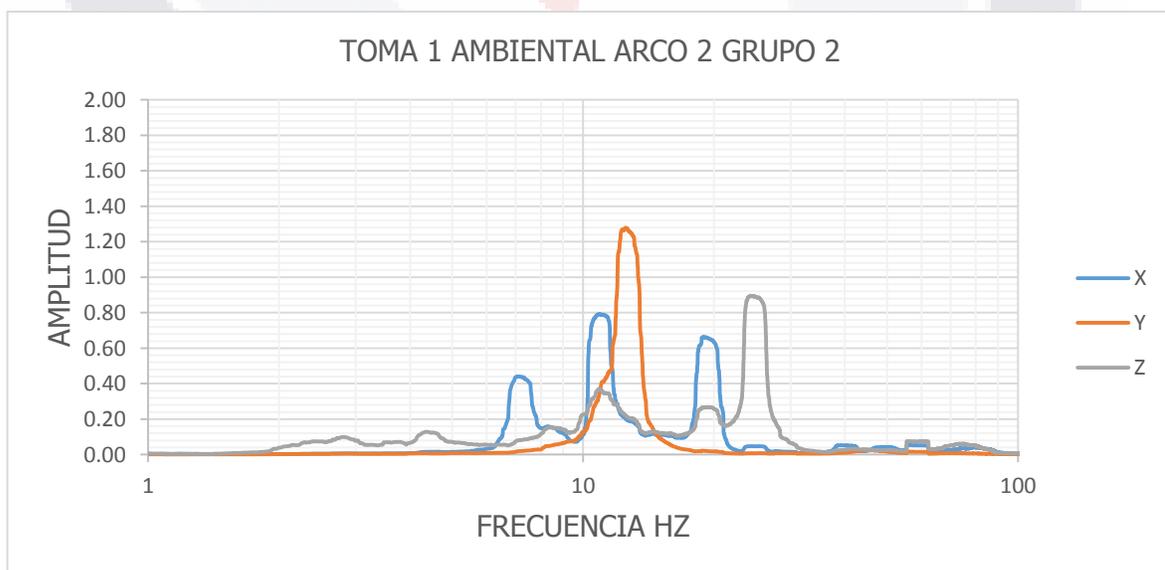


Figura 36 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, segundo grupo de geófonos.

Se puede observar que en el sentido transversal al arco "X" que su frecuencia natural es 10.85 Hz, en el sentido longitudinal del arco "Y" su frecuencia natural de 12.54 Hz y para el sentido vertical del arco "Z" se la frecuencia natural es 24.23 Hz.

Para el arreglo 3 correspondiente a la pila Este del Arco 2 la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

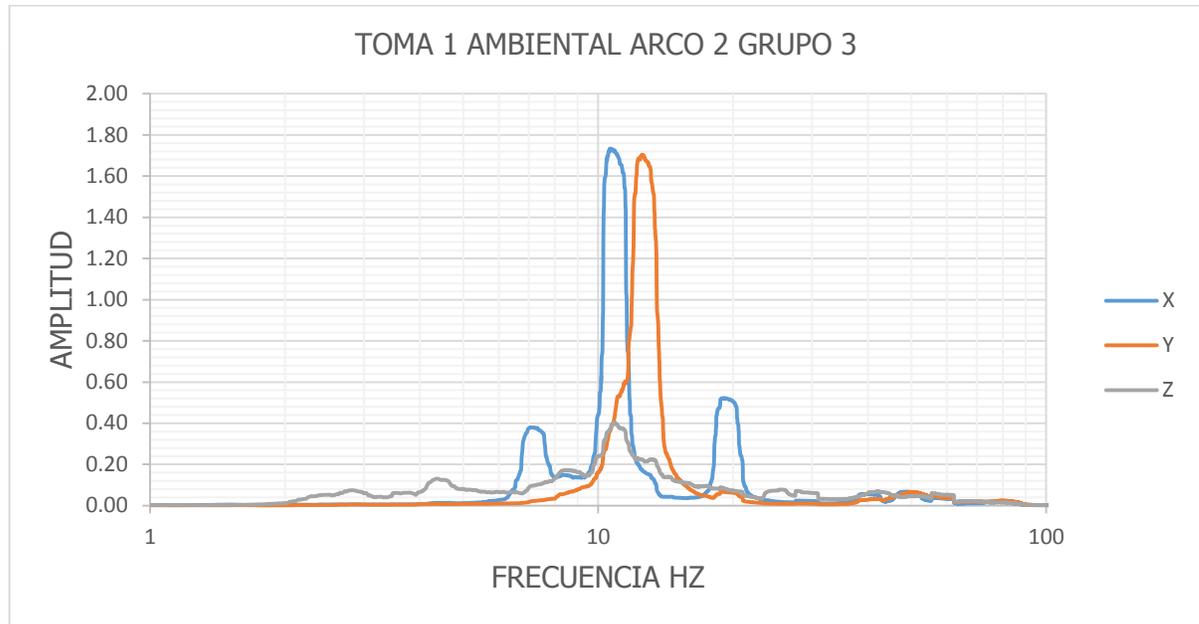


Figura 37 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, arco 2, tercer grupo de geófonos.

En el sentido transversal al arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.62 Hz, el sentido longitudinal del arco "Y" presenta una frecuencia natural de 12.48 Hz y en el sentido vertical del arco "Z" se presenta una frecuencia natural de 10.83 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos ubicados en la pilastra Oeste se obtuvo la siguiente gráfica Amplitud-Frecuencia:

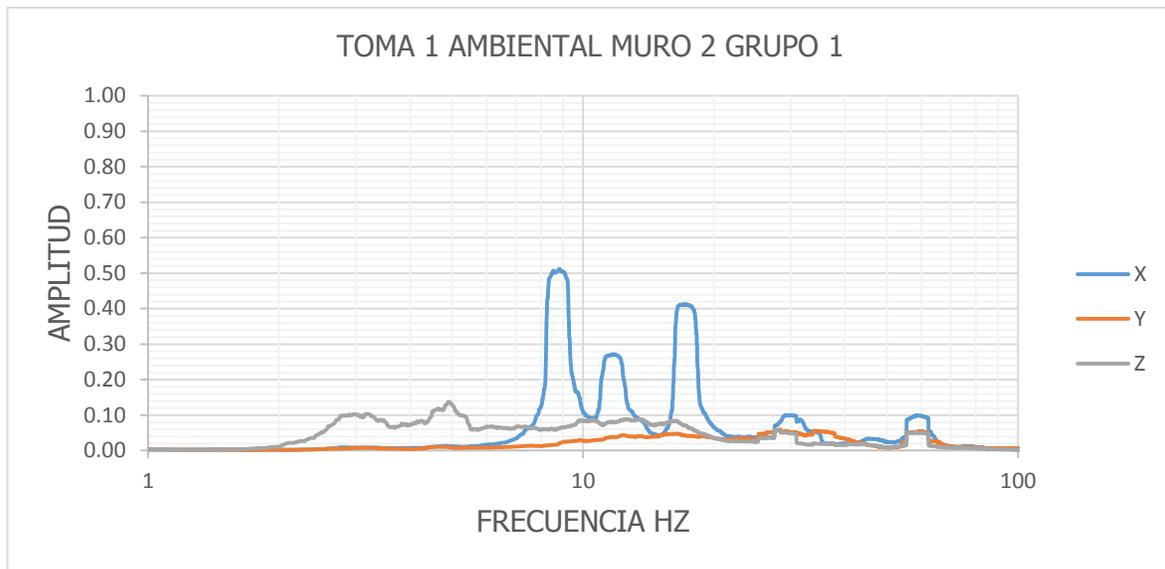


Figura 38 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, primer grupo de geófonos.

En el sentido transversal "X" del muro se presenta una frecuencia natural de 8.83 Hz, en el sentido longitudinal "Y" del muro no se puede identificar una frecuencia natural y el sentido vertical "Z" del muro se presenta una frecuencia natural de 4.90 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos ubicado en el centro del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

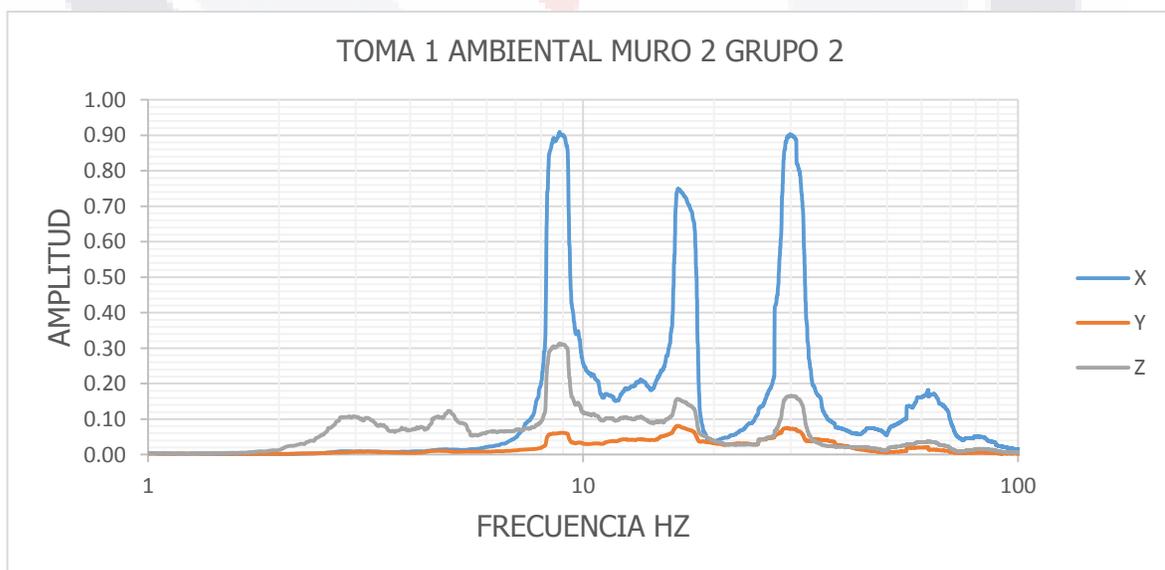


Figura 39 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, segundo grupo de geófonos.

En el eje transversal "X" se presentan la frecuencia natural de 8.83 Hz, en el eje longitudinal "Y" del muro presenta una frecuencia natural de 15.87 Hz, en el sentido vertical "Z" una frecuencia natural de 8.83 Hz.

Para el grupo tres ubicado en la pilastra Este del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

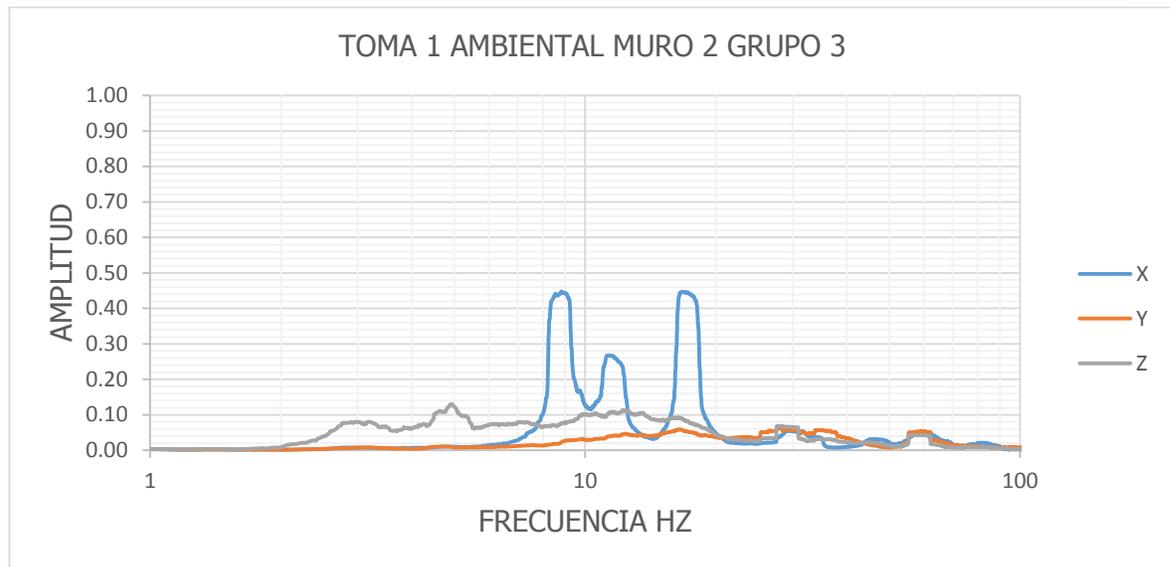


Figura 40 Gráfica Amplitud-Frecuencia primer ciclo, muro 2, tercer grupo de geófonos.

En el sentido transversal "X" del muro se presenta una frecuencia natural de 8.83 Hz, para el sentido transversal "Y" se observa una frecuencia natural de 16.94 Hz y para sentido vertical "Z" se observan una frecuencia natural de 4.93 Hz.

Descrito el método de obtención de frecuencias naturales para el primer ciclo de degradación se presentan de la Tabla 27 a la Tabla 38 a los resultados obtenidos para todos los elementos en los 7 ciclos de degradación, el procedimiento y las gráficas utilizadas para hacerlo se presenta en el Anexo "A".

Tabla 27 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 1 M1		
	X	Y	Z
1	11.38	11.81	11.67
2	7.98	9.83	9.81
3	9.35	23.21	12.13
4	9.2	24.32	11.11
5	7.29	23.97	4.07
6	8.19	88	9.63
7	7.68	13.65	9.32

Tabla 28 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 2 M1		
	X	Y	Z
1	16.63	11.8	11.81
2	7.97	9.83	9.81
3	9.51	23.19	9.37
4	15.72	24.32	10.22
5	7.29	24.48	4.09
6	8.19	29.27	9.64
7	7.68	13.6	8.88

Tabla 29 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Muro 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 3 M1		
	X	Y	Z
1	11.4	11.81	11.81
2	10.08	9.81	9.81
3	9.05	23.19	12.36
4	8.85	24.32	10.22
5	7.29	24.58	4.07
6	8.19	29.33	10.18
7	7.68	63.83	9.34

Tabla 30 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 1 M2		
	X	Y	Z
1	8.83	-	4.9
2	8.56	27.83	10.92
3	10.1	10.12	9.86
4	10.19	30.53	9.98
5	52.43	27.15	52.84
6	11.25	13.26	11.06
7	7.69	7.71	10.89

Tabla 31 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 2 M2		
	X	Y	Z
1	8.83	15.87	8.83
2	8.55	27.83	8.53
3	10.27	10.15	9.98
4	7.31	28.75	10.19
5	19.5	11.92	4.75
6	8.21	13.63	13.47
7	7.69	16.34	7.64

Tabla 32 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Muro 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 3 M2		
	X	Y	Z
1	8.83	16.94	4.93
2	8.53	27.83	27.8
3	10.19	10.16	10.12
4	10	28.75	9.98
5	10.62	11.26	4.75
6	8.21	13.49	8.27
7	10.28	10.69	10.15

Tabla 33 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 1 A1		
	X	Y	Z
1	12.76	12.88	12.8
2	12.48	13.34	13.28
3	12.63	13.7	11.12
4	11.02	12.91	12.31
5	12.51	14.07	10.93
6	12.25	13.6	13.46
7	7.31	11.67	12.56

Tabla 34 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 2 A1		
	X	Y	Z
1	8.33	12.88	10.18
2	7.29	13.35	28.1
3	7.71	13.69	27.25
4	7.26	12.91	22.67
5	7.75	14.04	10.96
6	7.81	13.56	13.55
7	7.31	11.67	22.52

Tabla 35 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Arco 1 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUENCIA NATURAL ARREGLO 3 A1		
	X	Y	Z
1	12.44	12.85	10.13
2	12.38	13.38	12.68
3	7.69	13.7	4.15
4	10.93	12.91	9
5	12.15	14.04	10.96
6	12.09	13.56	11.44
7	11.49	11.67	12.19

Tabla 36 Frecuencias naturales del Arreglo 1 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL ARREGLO 1 A2		
	X	Y	Z
1	10.73	12.54	12.24
2	11.15	13.05	4.09
3	12.62	11	11.84
4	6.59	12.31	9.64
5	7.26	13.4	-
6	10.19	12.89	13.14
7	10.85	12.04	10.89

Tabla 37 Frecuencias naturales del Arreglo 2 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL ARREGLO 2 A2		
	X	Y	Z
1	10.85	12.54	24.23
2	7.2	12.99	26.49
3	11.46	12.62	11.6
4	6.59	12.31	24.63
5	23.44	13.41	28.35
6	7.4	12.91	25.24
7	6.89	12.05	24.58

Tabla 38 Frecuencias naturales del Arreglo 3 Arco 2 para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL ARREGLO 3 A2		
	X	Y	Z
1	10.62	12.48	10.83
2	11.15	13.03	55.66
3	10.83	12.62	12.62
4	10.45	12.31	12.1
5	7.46	13.41	9.86
6	11.28	12.89	13.14
7	10.53	12.04	10.89

Con las tablas anteriores se realizaron las siguientes gráficas (Figura 41 a Figura 52) en las cuales se puede ver la tendencia que siguen los datos de frecuencias naturales a través de los ciclos de degradación.

Para el muro 1 en el primer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

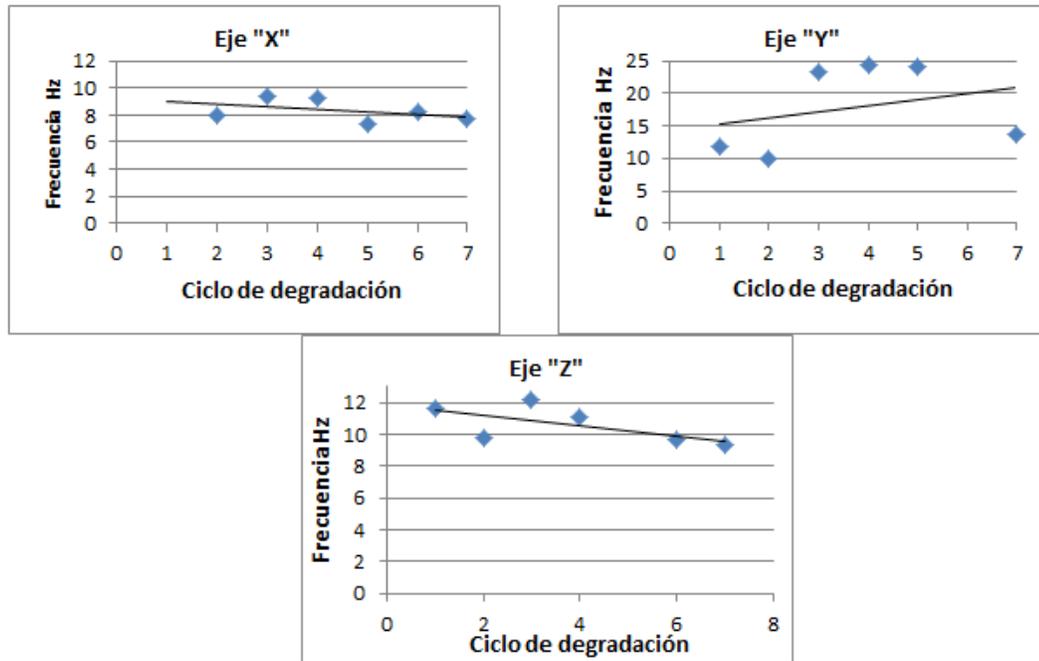


Figura 41 Gráfico "Frecuencias naturales-Ciclo de degradación" del muro 1 para el primer arreglo de geófonos.

Para el muro 1 en el segundo grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

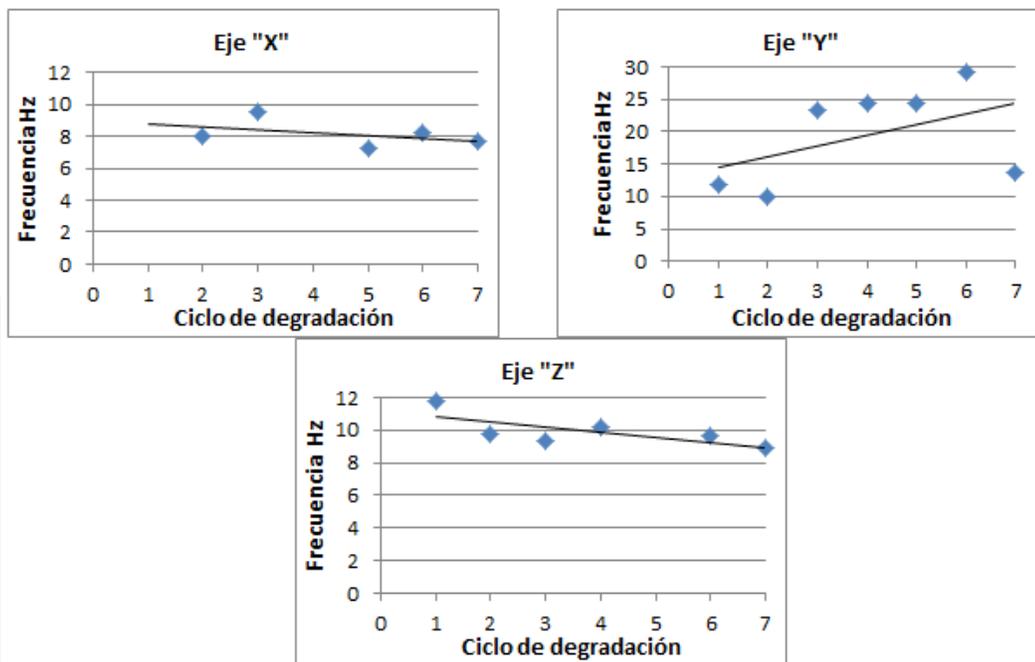


Figura 42 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del muro 1 para el segundo arreglo de geófonos.

Para el muro 1 en el tercer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

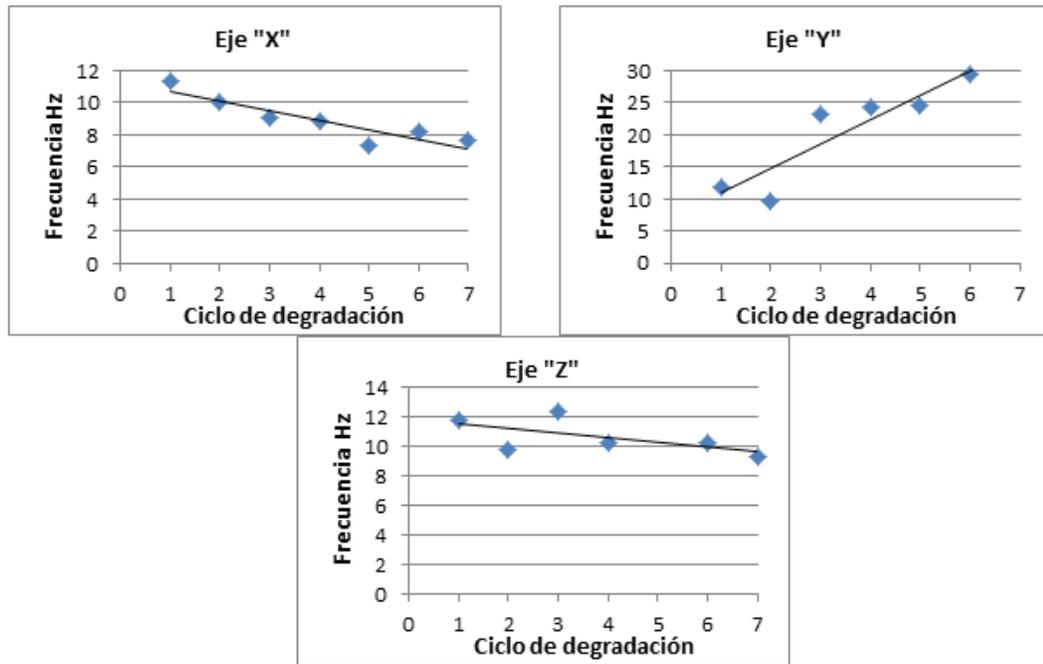


Figura 43 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del muro 1 para el tercer arreglo de geófonos.

La tendencia en los datos de las frecuencias natrales para el muro 1 para los ejes "X" y "Z" de las Figura 41, Figura 42 y Figura 43 siguen una tendencia a la baja a medida que los ciclos de degradación avanzan pero la tendencia de los datos correspondientes al eje "Y" no muestran esta tendencial la razón de esta conducta no se pudo determinar.

Para el muro 2 en el primer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

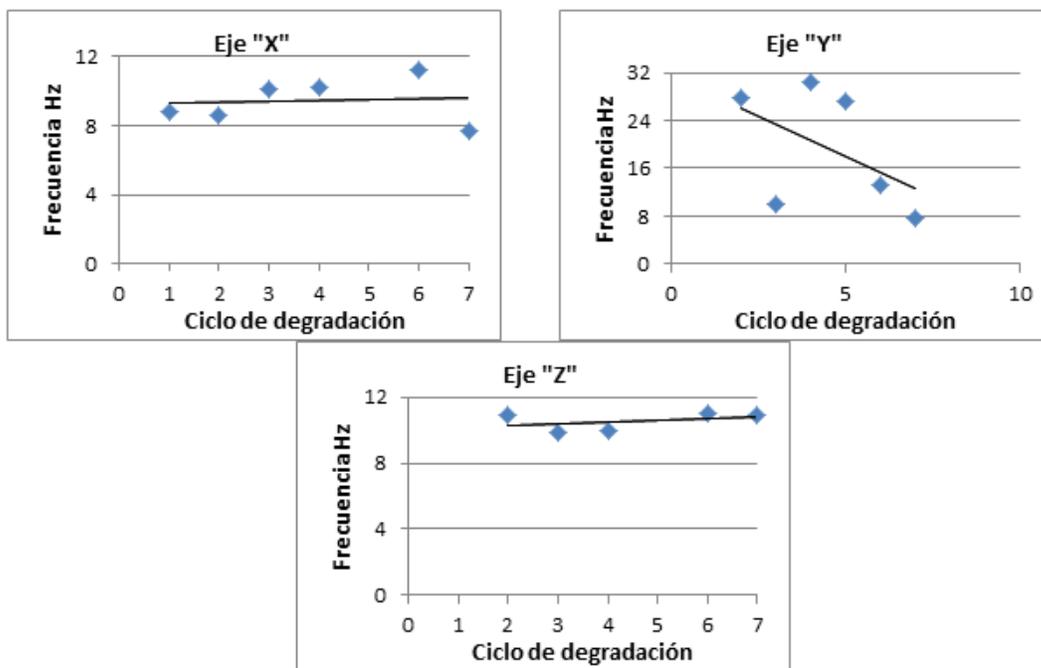


Figura 44 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del muro 2 para el primer arreglo de geófonos.

Para el muro 2 en el segundo grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

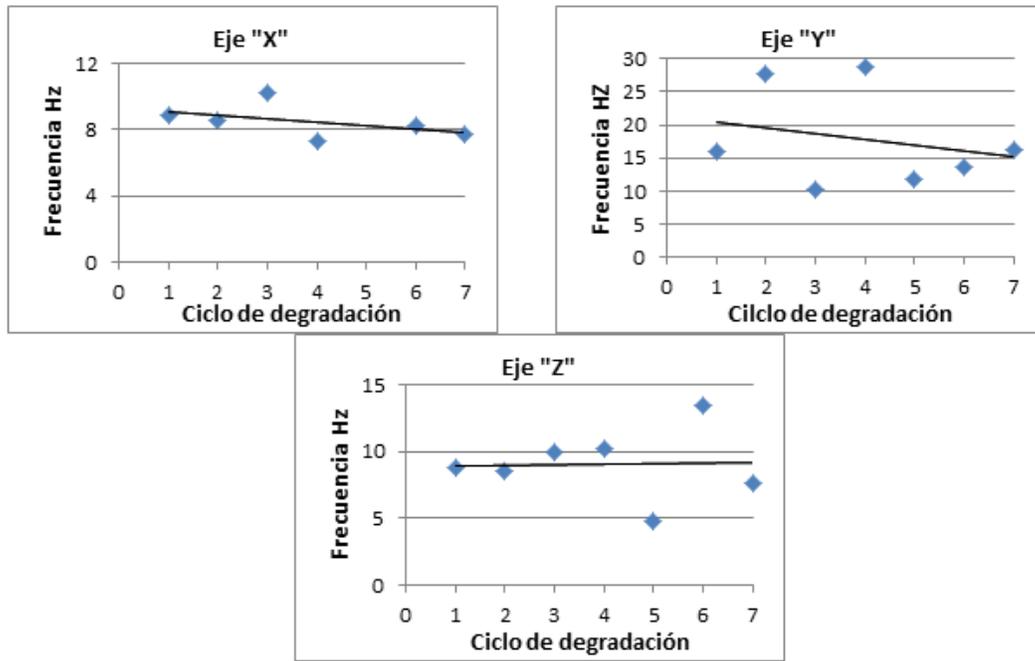


Figura 45 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del muro 2 para el segundo arreglo de geófonos.

Para el muro 2 en el tercer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

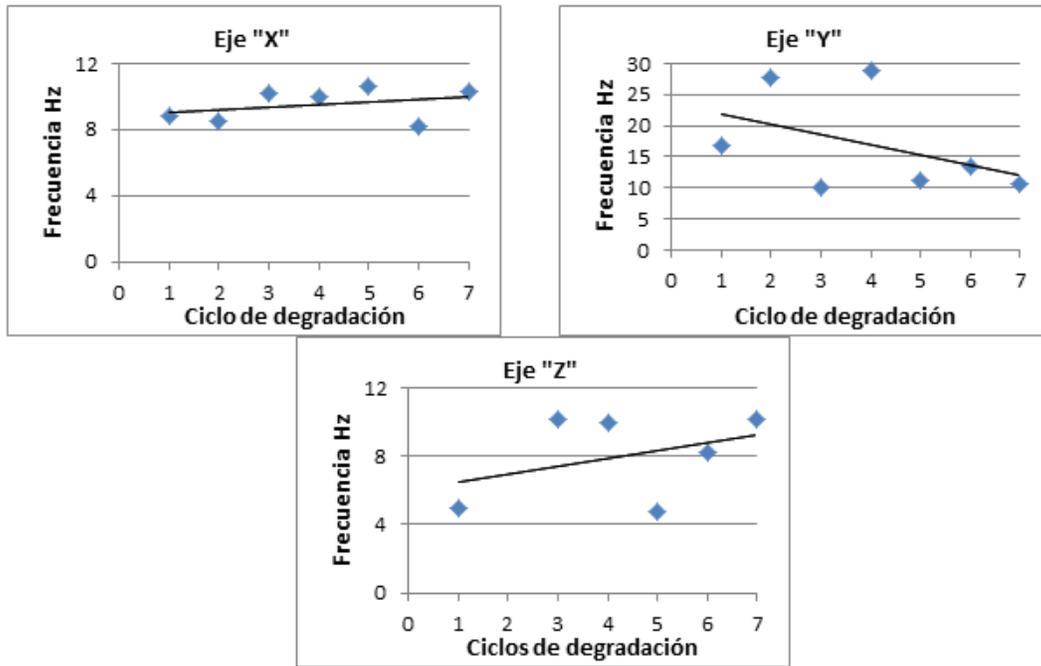


Figura 46 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del muro 2 para el tercer arreglo de geófonos.

La tendencia en los datos de las frecuencias naturales correspondientes al primer arreglo de geófonos (Figura 44) en los ejes "X" y "Z" muestran una tendencia a la alza a medida que los ciclos de degradación avanzan, para el eje "Y" se puede observar que la tendencia es a la baja. Para el segundo arreglo de geófonos (Figura 45) en los ejes "X" y "Y" la tendencia de los datos es a la baja y para el eje "Z" se mantiene estable. Para el tercer arreglo de geófonos (Figura 46) la tendencia de los datos es similar a los del primer arreglo de geófonos.

Para el arco 1 en el primer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

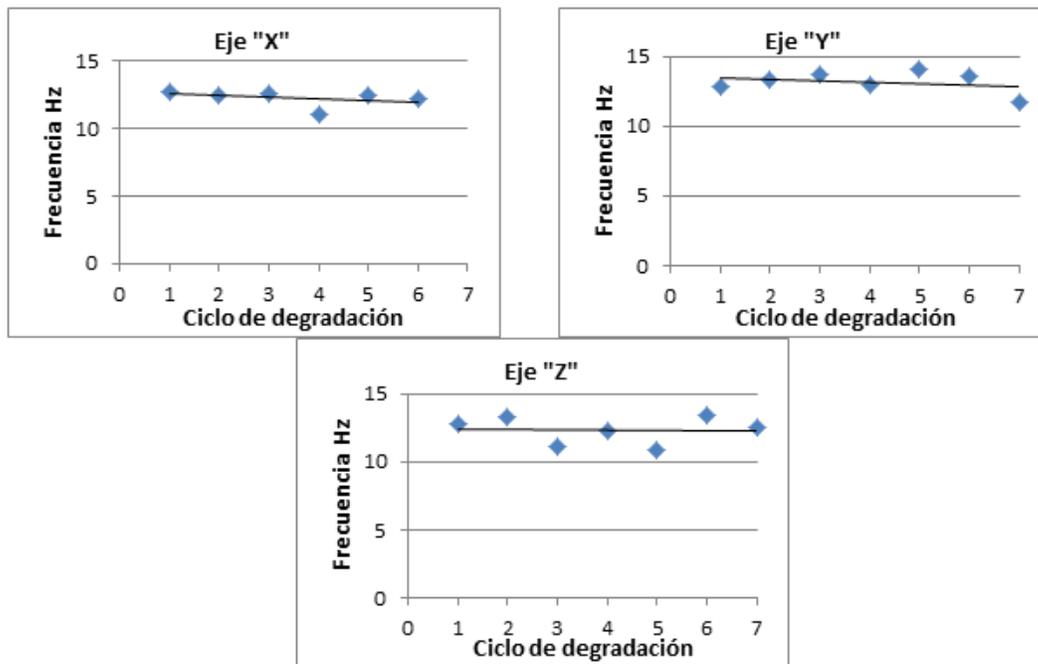


Figura 47 "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 1 para el primer arreglo de geófonos.

Para el arco 1 en el segundo grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas.

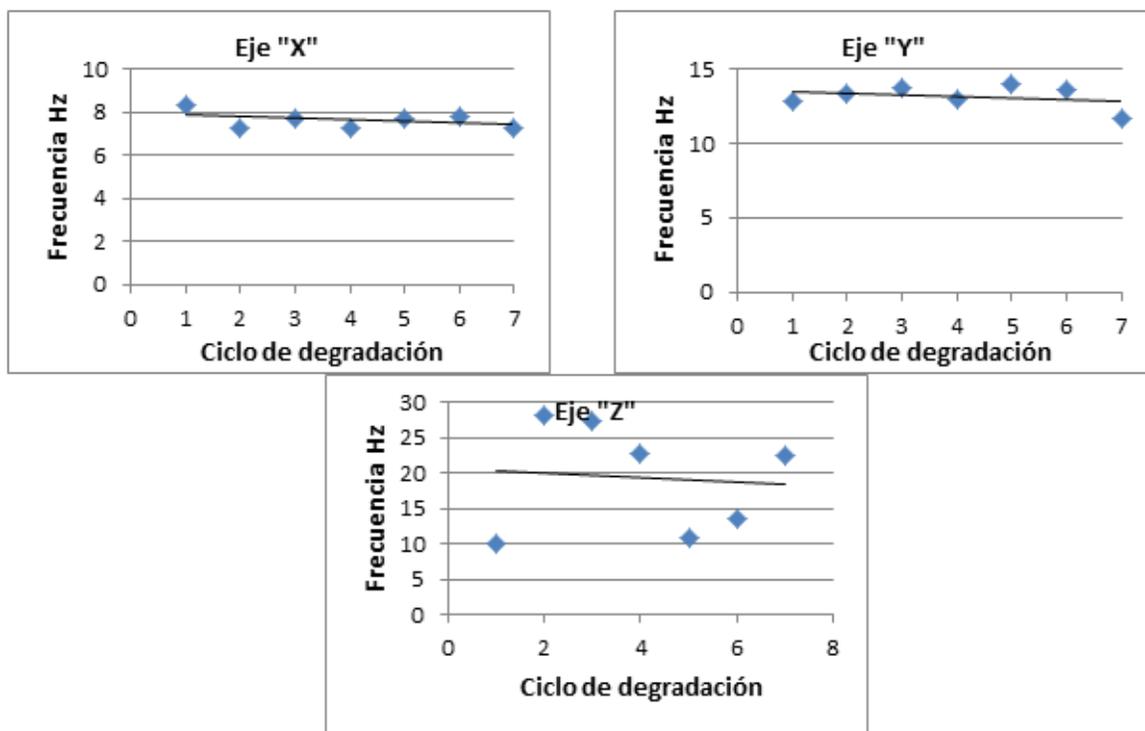


Figura 48 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 1 para el segundo arreglo de geófonos.

Para el arco 1 en el tercer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

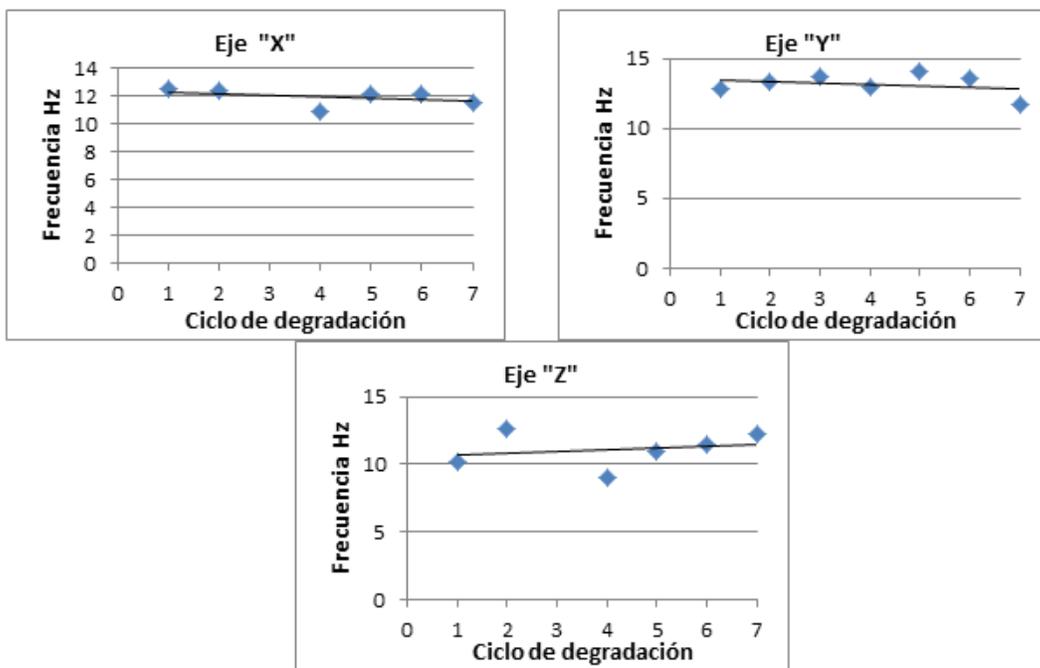


Figura 49 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 1 para el tercer arreglo de geófonos.

La tendencia en los datos de las frecuencias naturales para el arco 1 en los tres arreglos de geófonos (Figura 47, Figura 48 y Figura 49) para los ejes "X", "Y" y "Z" tienen una clara tendencia a la baja a excepción de los datos para el eje "Z" del tercer arreglo (Figura 49).

Para el arco 2 en el primer grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

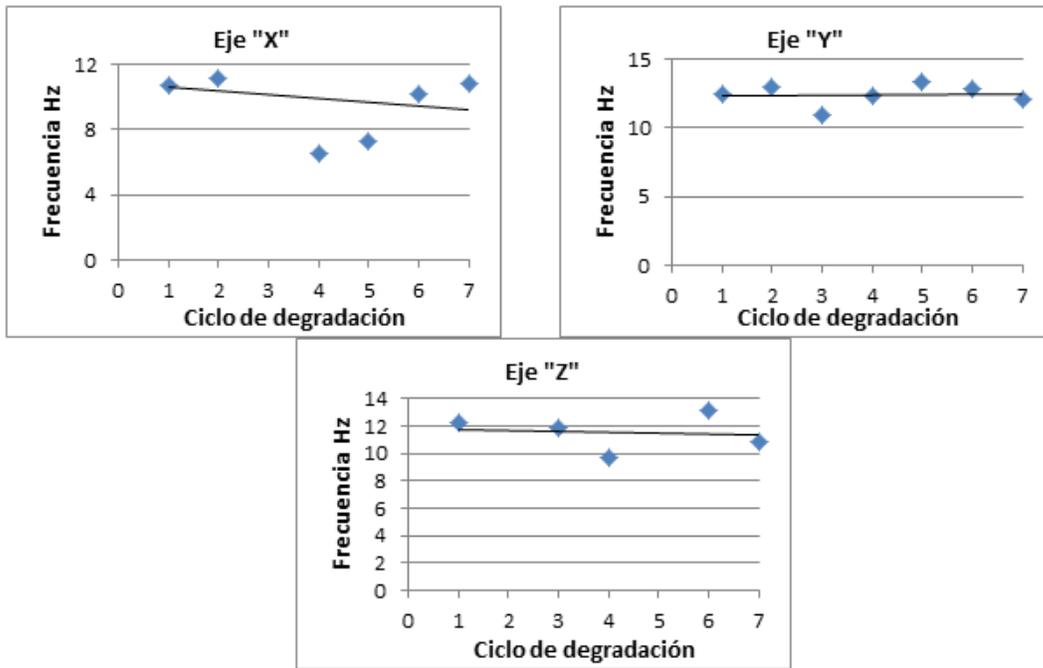


Figura 50 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 2 para el primer arreglo de geófonos.

Para el arco 2 en el segundo grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

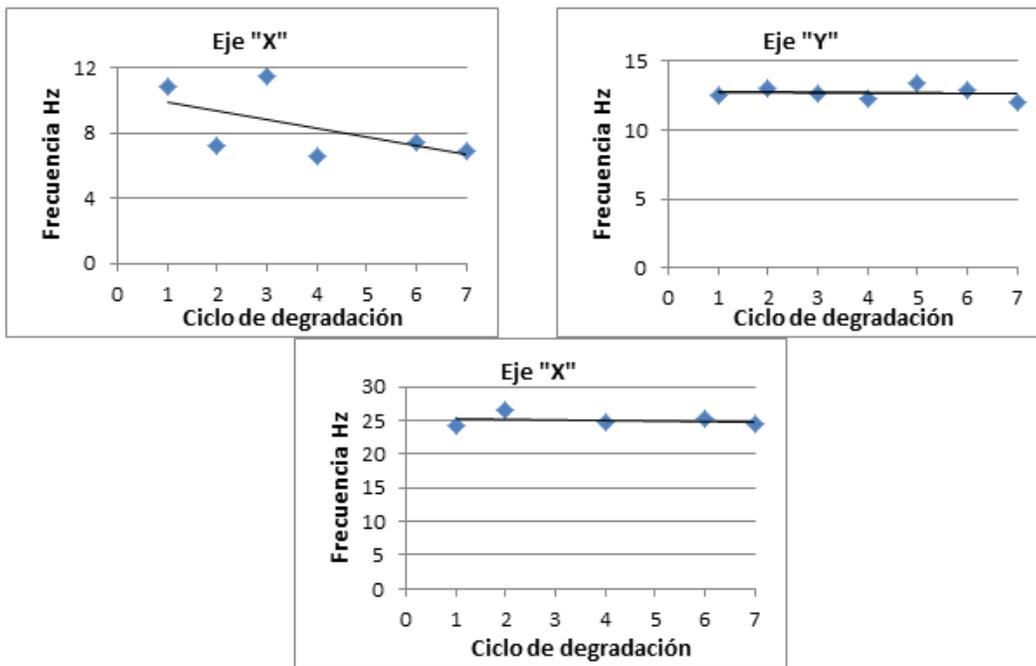


Figura 51 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 2 para el segundo arreglo de geófonos.

Para el arco 2 en el segundo grupo de geófonos se obtuvieron las siguientes gráficas

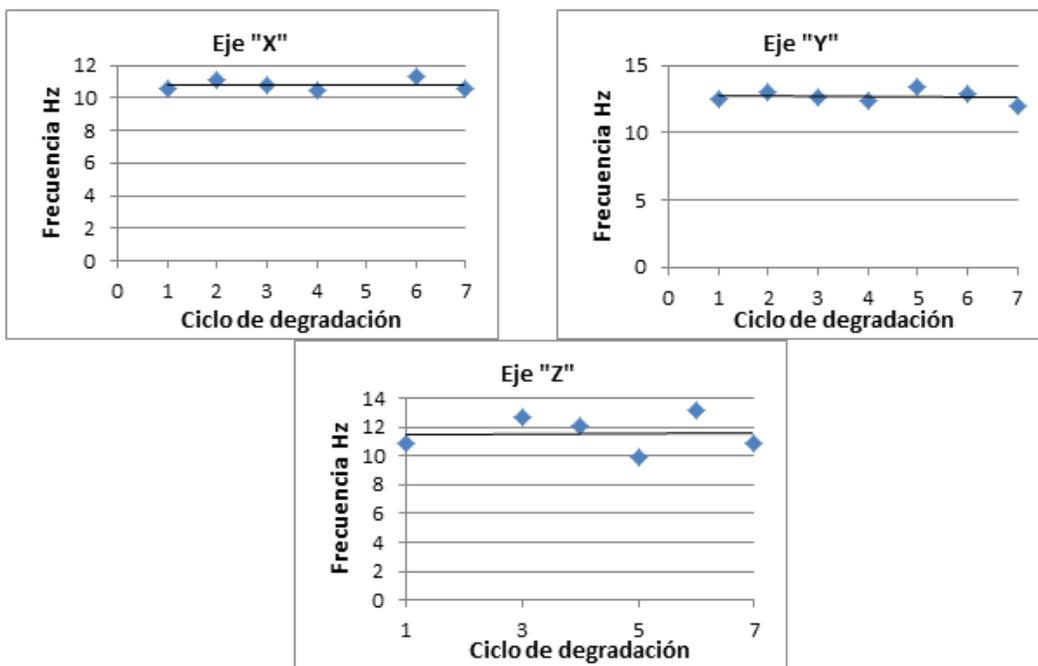


Figura 52 Gráfico "Frecuencias naturales -Ciclo de degradación" del arco 2 para el tercer arreglo de geófonos.

La tendencia de los datos de los tres arreglos (Figura 50, Figura 51 y Figura 52) al igual que en el arco 1 es a la baja.

Con el fin de observar de mejor manera el cambio en las frecuencias naturales durante los 7 ciclos de degradación se agruparon los resultados de los 3 arreglos para el sentido transversal en una sola gráfica para cada elemento. La razón por la que sólo se realizó este ejercicio para el sentido transversal de los elementos es que en los resultados numéricos arrojan que la frecuencia natural de los elementos se presenta en este sentido. No se tomaron en cuenta los valores de las frecuencias que se dispersen en más de un 30% el valor de la segunda mayor frecuencia registrada para el mismo ciclo siempre y cuando los datos sigan la tendencia de los demás ciclos, para el caso contrario los datos eliminados son estos. Los resultados se muestran de la Figura 53 a la Figura 56 mostradas a continuación.

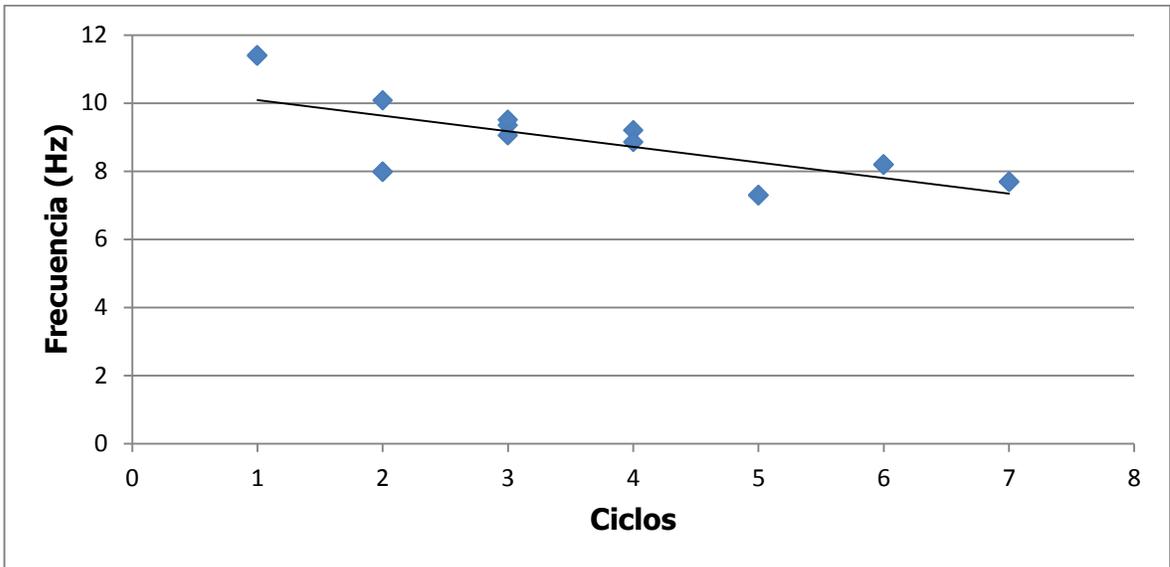


Figura 53 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del muro 1 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal.

En el muro 1 (Figura 53) se observa claramente la tendencia a la baja en las frecuencias naturales al pasar los distintos ciclos de degradación.

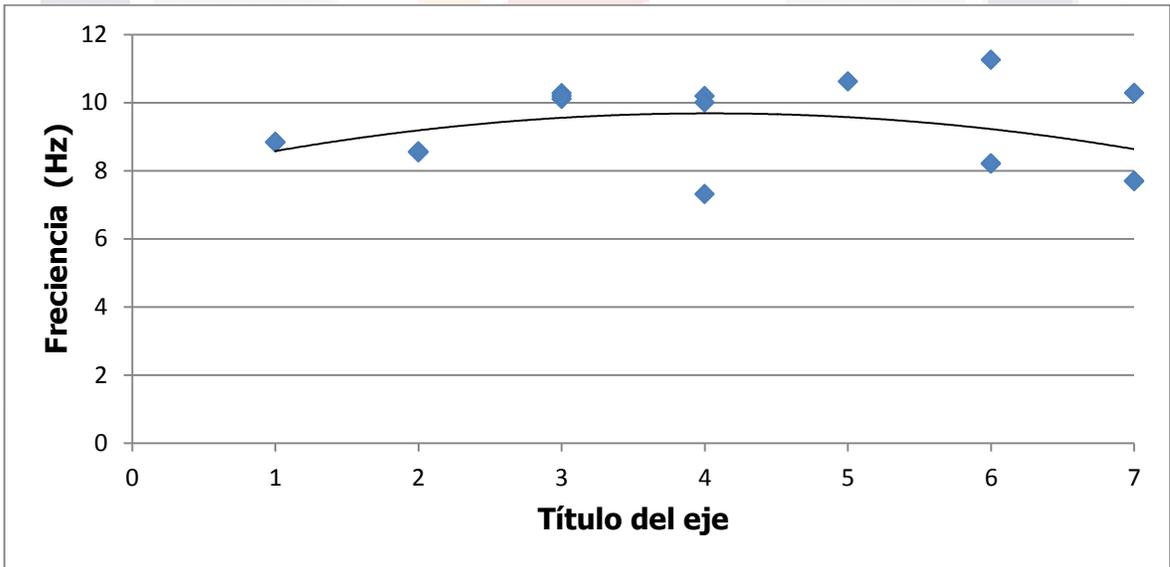


Figura 54 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del muro 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal.

En el caso del muro 2 (Figura 54) se observa un incremento en los valores de las Frecuencias de los ciclos 1, 2 y 3 y las frecuencias de los datos 4, 5, 6 y 7 presentan una tendencia a la baja a medida que los ciclos aumentan.

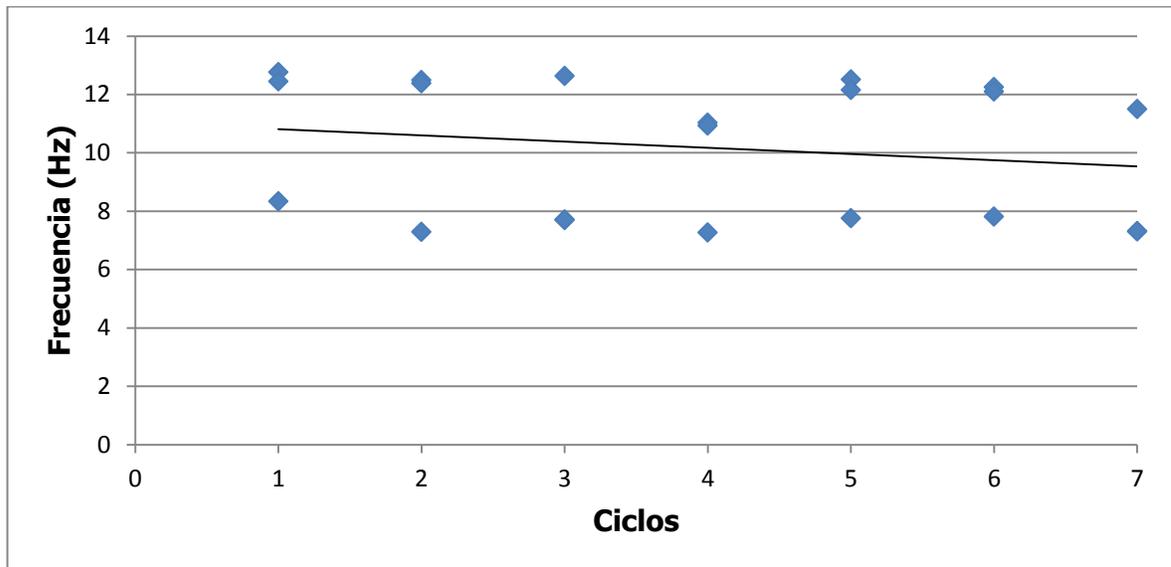


Figura 55 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del arco 1 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal.

En el caso del arco 1 (Figura 55) no se eliminaron los datos que se dispersaron más del 30% de la frecuencia del segundo mayor valor ya que la línea de datos menores que se observa corresponde a la parte central del arco 1 lo que hace pensar que su menor rigidez hace que esta parte del arco vibre con menos frecuencia que las pilastras. Aun así se observa que la tendencia de los datos de las frecuencias de las pilastras y la parte central es a la baja a medida que la degradación del elemento es mayor.

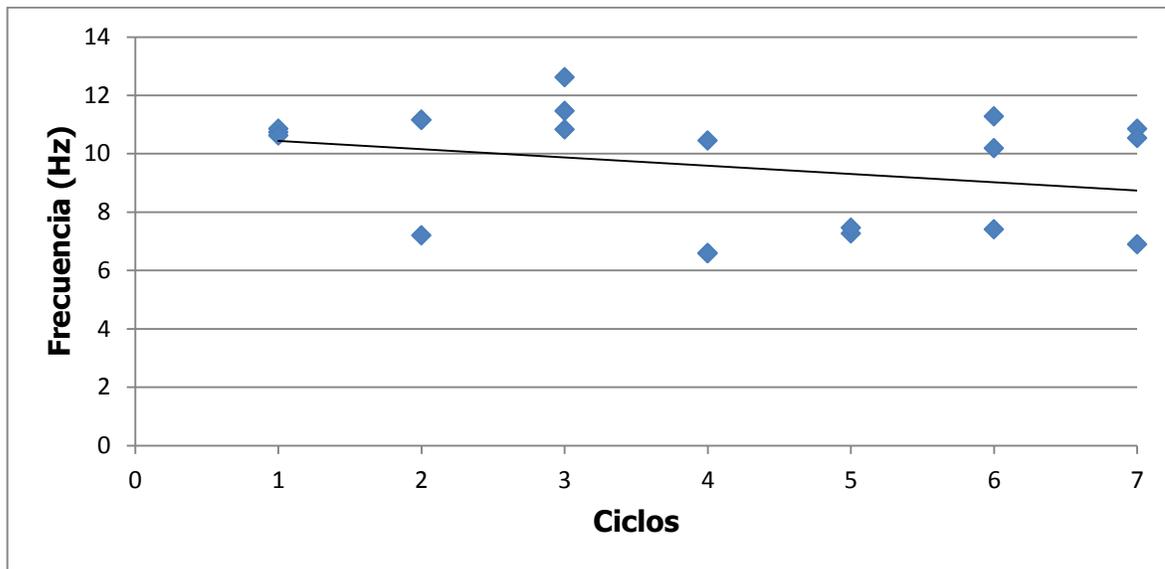


Figura 56 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del arco 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal.

En el arco 2 (Figura 56) al igual que en el arco 1 no se eliminaron los datos que se dispersaron más del 30% de la frecuencia del segundo mayor valor pues la parte central del arco vibra con menor frecuencia que las pilastras. Los datos siguen la tendencia a la baja a medida que los ciclos de degradación se incrementan.

Para las frecuencias naturales determinadas mediante excitación se fijó el límite de 30 Hz ya que los resultados arrojados por el modelo numérico no llegan a esa magnitud. Sólo se presentan las frecuencias naturales para el sentido transversal de los elementos ya que en los sentidos longitudinal y vertical no fue posible determinar las frecuencias naturales para todos los ciclos de degradación debido a que la onda generada por el golpe inducía demasiada energía a los elementos y hacía que las frecuencias se disparaban fuera del rango establecido, además que los resultados numéricos indican que la frecuencia natural de los elementos se presenta en este sentido. Las gráficas Frecuencia-Amplitud y el método para determinar las frecuencias naturales se presenta en el Anexo B.

Los resultados se presentan a continuación de la Tabla 39 a la Tabla 42.

Tabla 39 Frecuencias naturales del Arco 1 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL ARCO 1		
	ARREGLO 1	ARREGLO 2	ARREGLO 3
1	12.69	21.5	12.07
2	11.71	25	26
3	21	22	21
4	18.55	18.55	9.76
5	7.81	7.81	18.55
6	7.81	7.81	18.55
7	10.74	19.53	11.23

Tabla 40 Frecuencias naturales del Arco 1 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL MURO 1		
	ARREGLO 1	ARREGLO 2	ARREGLO 3
1	7.56	7.57	7.56
2	17	30	16
3	16	15	8.78
4	15.63	16.11	15.63
5	18	18	17.57
6	18.55	19	19
7	18.31	18.31	18.55

Tabla 41 Frecuencias naturales del Arco 2 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL ARCO 2		
	ARREGLO 1	ARREGLO 2	ARREGLO 3
1	10.25	6.34	10.25
2	20	19	19
3	10.74	20	9.7
4	10.25	21.48	10.25
5	19.53	19.53	19.53
6	20.5	20	20.5
7	10.74	18.55	12.21

Tabla 42 Frecuencias naturales del Muro 2 en el sentido transversal para los 7 ciclos de degradación.

CICLO	FRECUANCIA NATURAL MURO 2		
	ARREGLO 1	ARREGLO 2	ARREGLO 3
1	8.3	28	8.54
2	8	8.5	8.3
3	17.6	17.6	17.6
4	18	17.58	17.57
5	19.53	3.78	1.95
6	20	19.53	20.51
7	18.31	18.31	18.55

Con los datos presentados en las tablas anteriores se construyeron las siguientes gráficas Frecuencia-Ciclos de degradación. Con el fin de observar la tendencia de los datos obtenidos se agruparon los tres arreglos en una sola gráfica y no se tomaron en cuenta los valores de las frecuencias que se dispersen en más de un 30% el valor de la segunda mayor frecuencia registrada para el mismo ciclo. Las gráficas se muestran a continuación.

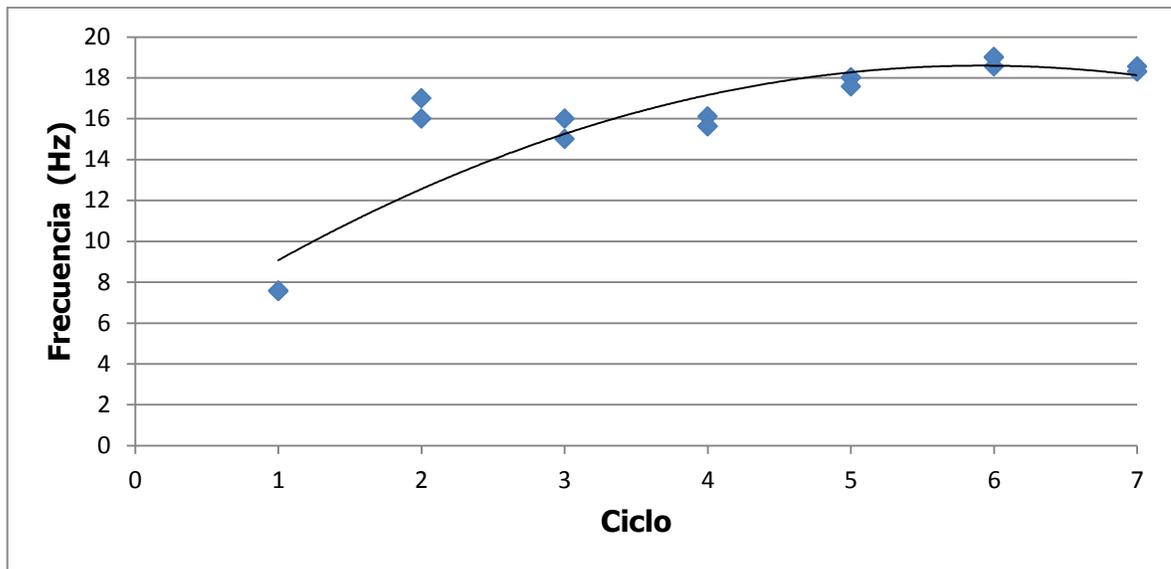


Figura 57 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del muro 1 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal.

Para el muro 1 (Figura 57) se observa los datos de las frecuencias no siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan. El primer ciclo arrojó una frecuencia muy baja respecto a los otros ciclos. Los datos de los ciclos 2, 3 y 4 se agrupan alrededor de los 16 Hz siguiendo una tendencia a la baja pero los datos de los ciclos 5, 6 y 7 se agrupan alrededor de los 18 Hz y no siguen una tendencia a la baja.

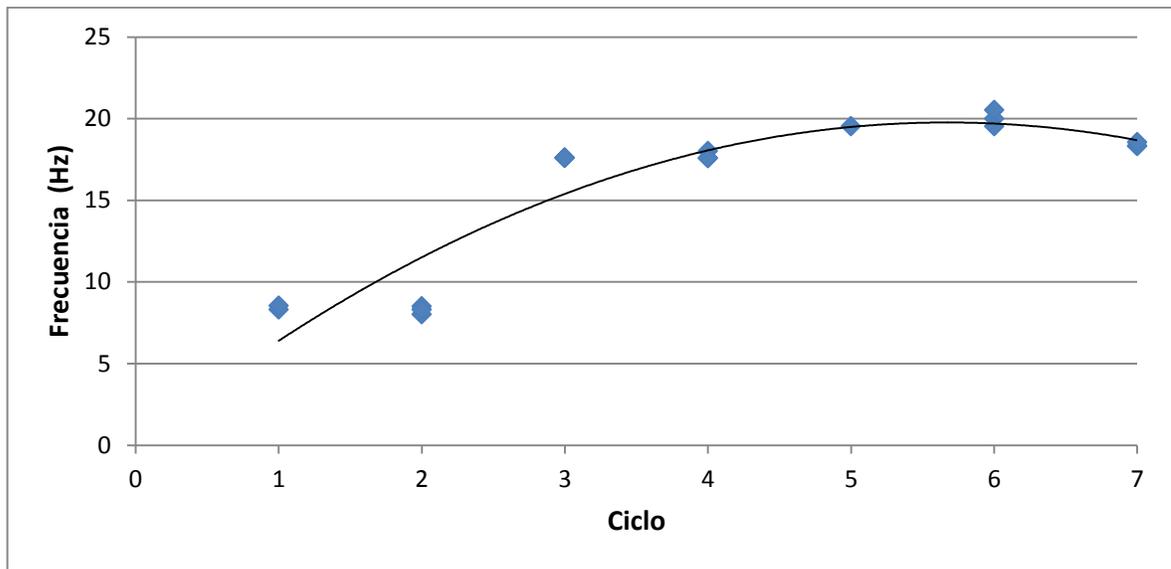


Figura 58 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del muro 2 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal.

En el muro 2 (Figura 58) se observa que los datos de las frecuencias tampoco siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan. El primer y segundo ciclo la frecuencia se agrupó entre los 8 y los 9 Hz. Para los datos 3, 4, 5, 6 y 7 los datos se agruparon alrededor de los 19 Hz.

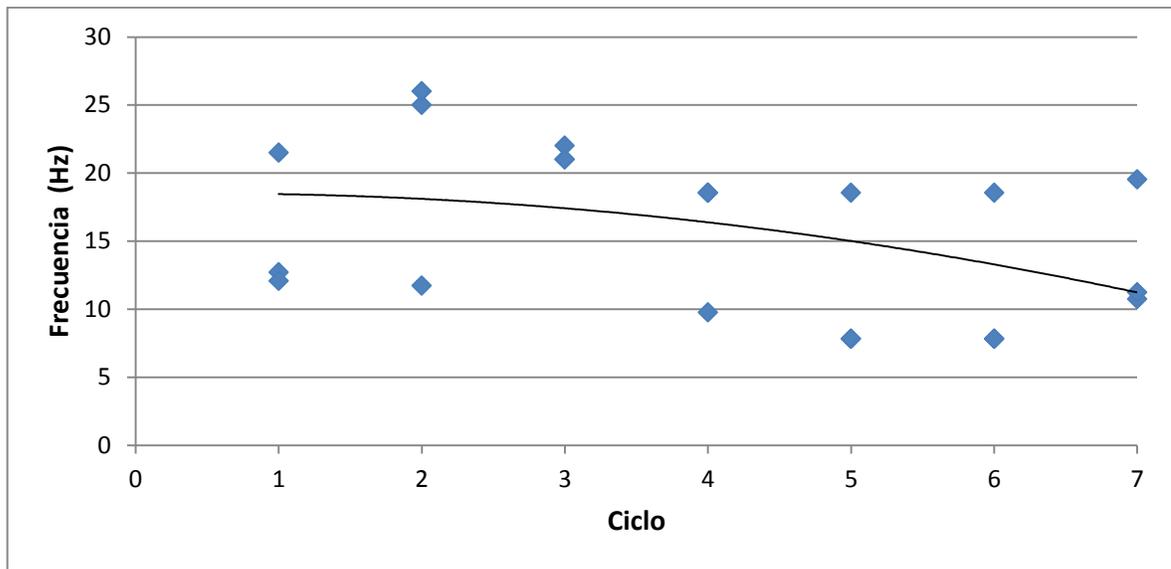


Figura 59 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del arco 1 para los 7 ciclos de degradación en su dirección transversal.

En el arco 1 (Figura 59) no se eliminó ningún dato debido a que las frecuencias menores que se observan corresponden a la parte central del arco lo cual se debe a que este elemento tiene una menor rigidez respecto a las pilastras. Se observa que los datos de las frecuencias siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan.

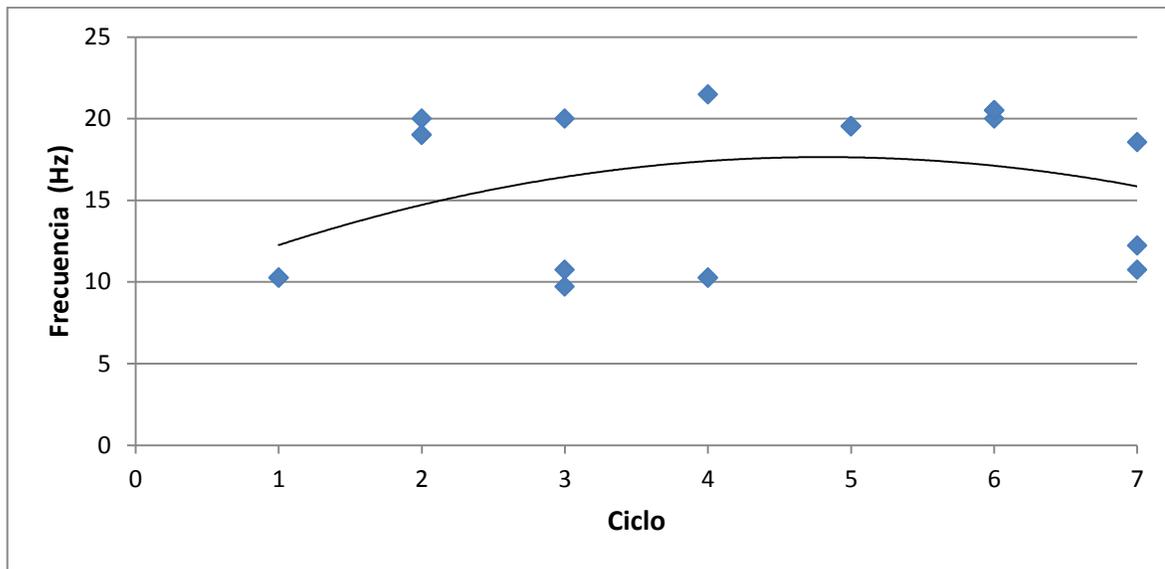


Figura 60 Gráfico "Frecuencia Natural-Ciclos de degradación" del arco 2 para los 7 ciclos de degradación en la dirección transversal.

En el aro 2 (Figura 60) tampoco se eliminó ningún dato debido a que las frecuencias menores que se observan corresponden a la parte central del arco lo cual se debe a que este elemento tiene una menor rigidez respecto a las pilastras. Se observa que los datos de las frecuencias siguen una tendencia a la baja aunque no tan marcada como en el caso del arco 1 conforme los ciclos de degradación avanza

4.4. MODELO NUMÉRICO

Para la modelización numérica se utilizó el software SAP 2000. Los elementos se modelaron considerando el tamaño y la forma de los reales. Para la determinación de sus formas modales se realizó un modelo de elementos finitos, el método de los elementos finitos consiste en discretizar o dividir un sistema en "n" elementos con el objeto de hacerlo más manejable y así poder aproximarnos a su comportamiento real. La altura de los muros se dividió en 19 partes de 7.89 cm cada una, el lado longitudinal de las pilastras se dividió en cuatro partes de 11 cm, el lado transversal de las pilastras se dividió en 3 partes, las 2 partes extremas de 15 cm y la parte central de 14 cm, la parte central del muro se dividió en 23 partes de 11.39 cm.

Para los arcos la altura de las pilastras se dividió en 19 partes de 7.89 cm cada una, para el arco 1 el lado longitudinal de la pilastra se dividió en 4 partes de 11 cm cada una y el lado transversal en 4 partes, las 2 partes extremas de 7 cm y las 2 internas de 15 cm, la parte central del arco en el sentido longitudinal se dividió en 12 partes con las dimensiones que se muestra en la Figura 61.

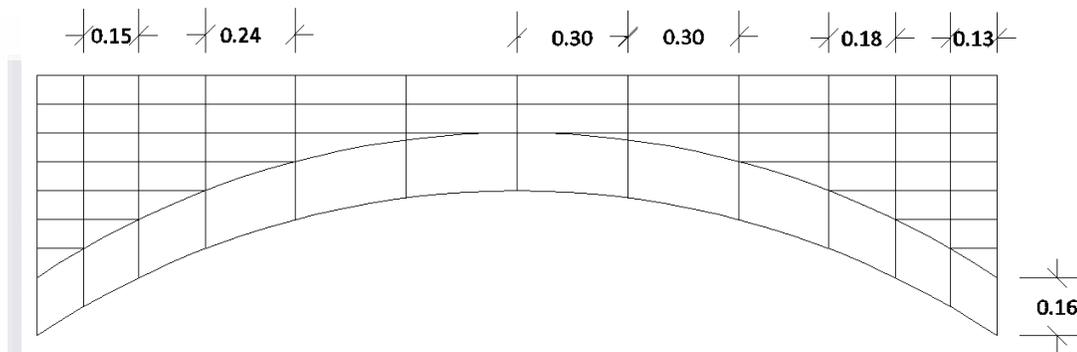


Figura 61 Discretización de parte central de los arcos.

Para la parte transversal de la parte media del arco se dividió en 2 partes de 15 cm cada una.

Para el arco 2 se modeló de la misma manera que el arco 1 con la diferencia que el lado transversal de la pilastra se dividió en tres partes 2 de 15 cm coincidentes con la parte central del arco y una de 14 cm.

Sap 2000 ofrece varias opciones para la construcción del modelo (Frame Element, Shell Element, Plane Element, Asolid Element, Solid Element), para el caso de estudio se eligió el Solid Element, este es un elemento de ocho nodos utilizado para la modelización de estructuras tridimensionales y sólidos. Cada elemento tiene su propio sistema local de coordenadas para la definición de las propiedades del material, para las cargas y para la interpretación de los resultados. El elemento tiene seis caras cuadradas con nodos en cada una de sus ocho esquinas. Cada nodo cuenta con tres grados de libertad traslacionales y sus grados de libertad rotacionales no están activados. Este elemento contribuye con

rigidez a todos los grados de libertad traslacional. Las propiedades de los sólidos son definidas independientemente de los objetos y son asignadas a los elementos.

Los apoyos de los modelos numéricos se consideraron empotrados con el terreno, en el caso de los muros se consideró empotramiento tanto en las pilastras como en el cuerpo central y mientras que para los arcos sólo las pilastras fueron empotradas.

Los modelos discretizados se muestran en las Figura 62, Figura 63 y Figura 64.

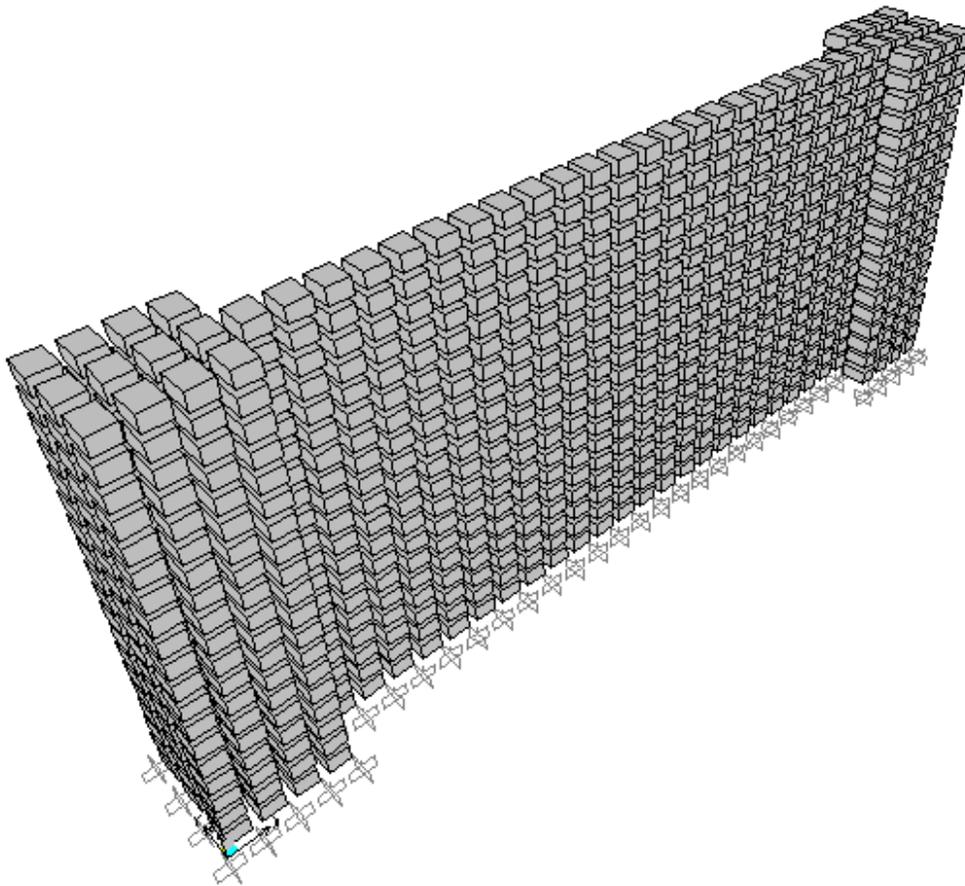


Figura 62 Discretización para el modelo numérico de muros.

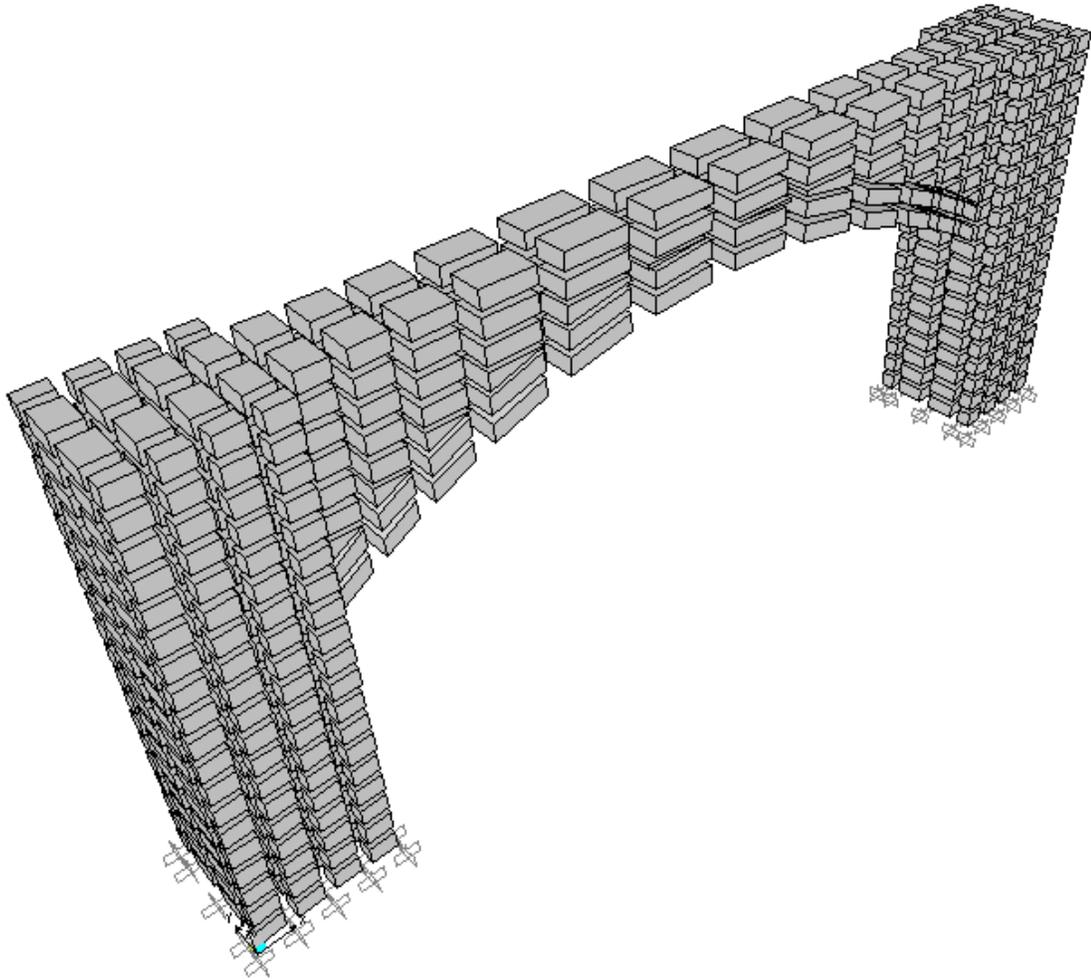


Figura 63 Discretización para el modelo numérico del arco 1.

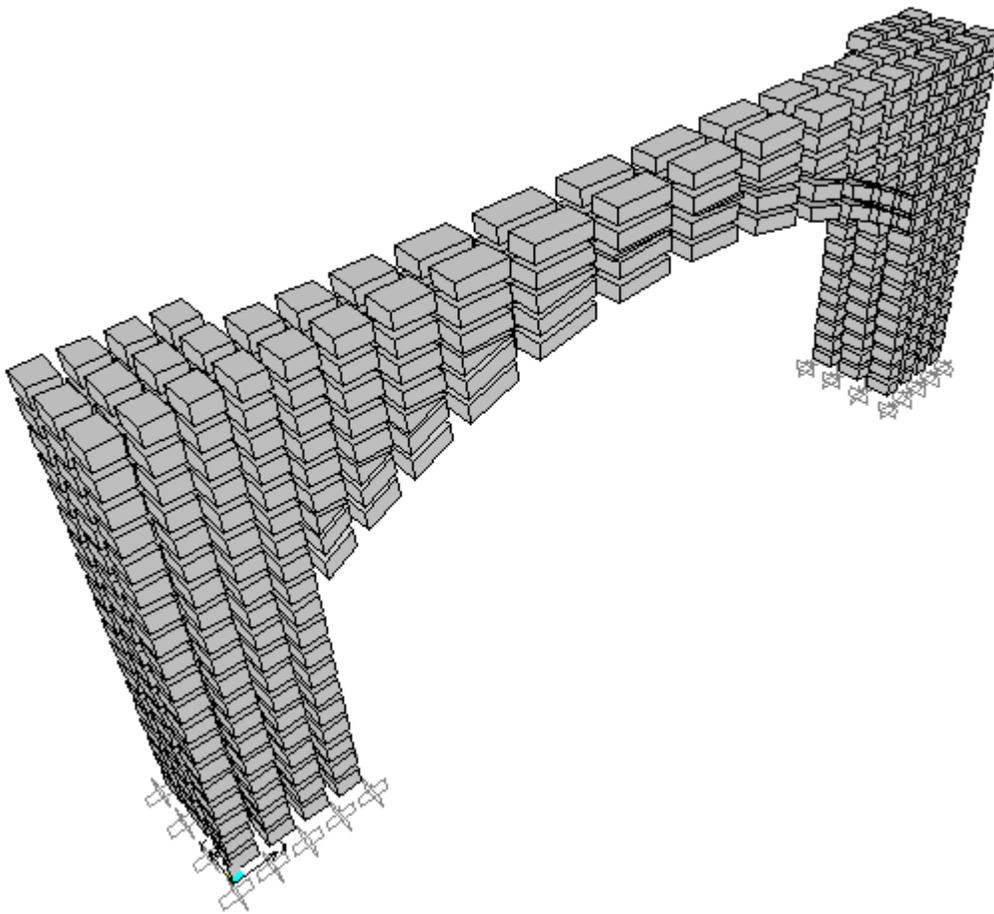


Figura 64 Discretización para el modelo numérico del arco 2.

4.4.1. CALIBRACIÓN DE MODELO NUMÉRICO

Para calibrar el modelo numérico realizado se seleccionaron las frecuencias naturales representativas en el sentido transversal de cada elemento medidas in situ de acuerdo al capítulo 4.3 para compararlas con los resultados del análisis modal del modelo numérico. Se realizaron ajustes en el valor del módulo de elasticidad hasta obtener una correspondencia entre la frecuencia natural obtenida del análisis moda del modelo numérico con cada frecuencia determinada experimentalmente in situ. Para los datos de entrada de las propiedades del material del modelo numérico se promedió el valor del peso volumétrico y la relación de poisson determinado de acuerdo al capítulo 4.1.

Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 43 a la Tabla 46.

Tabla 43 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	11.4	1689.46	0.33	6000
2	10.08	1689.46	0.33	4675
3	9.51	1689.46	0.33	4200
4	9.2	1689.46	0.33	3900
5	7.29	1689.46	0.33	2450
6	8.19	1689.46	0.33	3080
7	7.68	1689.46	0.33	2700

Tabla 44 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	8.83	1724.8	0.34	3670
2	8.56	1724.8	0.34	3450
3	10.27	1724.8	0.34	3930
4	10.19	1724.8	0.34	4890
5	10.62	1724.8	0.34	5320
6	8.21	1724.8	0.34	3175
7	7.69	1724.8	0.34	2780

Tabla 45 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	12.76	1739.56	0.28	10590
2	12.48	1739.56	0.28	10130
3	12.63	1739.56	0.28	10380
4	11.02	1739.56	0.28	7900
5	12.51	1739.56	0.28	10170
6	12.25	1739.56	0.28	9770
7	11.49	1739.56	0.28	8590

Tabla 46 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 2. usando las frecuencias determinadas a partir de vibración ambiental.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	10.85	1675.85	0.22	7370
2	11.15	1675.85	0.22	7780
3	10.83	1675.85	0.22	7340
4	10.45	1675.85	0.22	6840
5	7.46	1675.85	0.22	3490
6	11.28	1675.85	0.22	7980
7	10.85	1675.85	0.22	7370

A continuación se muestra de la Tabla 47 a la Tabla 50 los resultados de la calibración del modelo usando las frecuencias determinadas a partir de la excitación del elemento.

Tabla 47 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	7.56	1689.46	0.33	2630
2	17	1689.46	0.33	13350
3	16	1689.46	0.33	11810
4	15.63	1689.46	0.33	11280
5	18	1689.46	0.33	14960
6	19	1689.46	0.33	16670
7	18.31	1689.46	0.33	15480

Tabla 48 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el muro 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	8.54	1724.8	0.34	3430
2	8.3	1724.8	0.34	3240
3	17.6	1724.8	0.34	14580
4	17.58	1724.8	0.34	14540
5	19.53	1724.8	0.34	17960
6	20	1724.8	0.34	18840
7	18.31	1724.8	0.34	15780

Tabla 49 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 1 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	12.69	1739.56	0.28	10480
2	26	1739.56	0.28	44000
3	22	1739.56	0.28	31500
4	18.55	1739.56	0.28	22380
5	7.81	1739.56	0.28	3970
6	7.81	1739.56	0.28	3970
7	11.23	1739.56	0.28	8210

Tabla 50 Módulo de elasticidad determinado mediante modelo numérico para el arco 2 usando las frecuencias determinadas a partir de vibración forzada.

CICLO	FRECUENCIA (Hz)	ρ (kg/m ³)	ν	E (kg/cm ²)
1	10.25	1675.85	0.22	6580
2	19	1675.85	0.22	22630
3	10.74	1675.85	0.22	7230
4	10.25	1675.85	0.22	6580
5	19.53	1675.85	0.22	23880
6	20.5	1675.85	0.22	26320
7	12.21	1675.85	0.22	9340

4.5. COMPARACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS RESULTANTES

A continuación se presentan de la Tabla 51 a la Tabla 54 los módulos elásticos resultantes de las pruebas dinámicas y estáticas, además de los módulos elásticos determinados numéricamente correspondientes a las vibraciones registradas tanto para vibración ambiental como para vibración forzada además de las relaciones entre ellos con el fin de comparar y analizar los resultados.

Tabla 51 Módulos de elasticidad para el muro 1.

Ciclo	E_{Est} (kg/cm ²)	E_{Din} (kg/cm ²)	E_{VA} (kg/cm ²)	E_{VF} (kg/cm ²)	E_{Din}/E_{Est}	E_{Din}/E_{VA}	E_{Din}/E_{VF}	E_{VF}/E_{VA}
1	1632.11	8532.24	6000	2630	5.23	1.42	3.24	0.44
2	1413.41	8605.03	4675	13350	6.09	1.84	0.64	2.86
3	1220.42	9959.62	4200	11810	8.16	2.37	0.84	2.81
4	1138.38	9523.53	3900	11280	8.37	2.44	0.84	2.89
5	1121.88	10938.85	2450	14960	9.75	4.46	0.73	6.11
6		9590.59	3080	16670		3.11	0.58	5.41
7		9615.82	2700	15480		3.56	0.62	5.73

Tabla 52 Módulos de elasticidad para el muro 2.

Ciclo	E_{Est} (kg/cm ²)	E_{Din} (kg/cm ²)	E_{VA} (kg/cm ²)	E_{VF} (kg/cm ²)	E_{Din}/E_{Est}	E_{Din}/E_{VA}	E_{Din}/E_{VF}	E_{VF}/E_{VA}
1	1632.11	10503.28	3670	3430	6.44	2.86	3.06	0.94
2	1413.41	9084.18	3450	3240	6.42	2.63	2.80	0.94
3	1220.42	10427.04	3930	14580	8.54	2.65	0.72	3.71
4	1138.38	9357.61	4890	14540	8.22	1.91	0.64	2.97
5	1121.88	10219.46	5320	17960	9.11	1.92	0.57	3.38
6		10637.10	3175	18840		3.35	0.56	5.93
7		9237.87	2780	15780		3.32	0.59	5.68

Tabla 53 Módulos de elasticidad para el arco 1

Ciclo	E_{Est} (kg/cm ²)	E_{Din} (kg/cm ²)	E_{VA} (kg/cm ²)	E_{VF} (kg/cm ²)	E_{Din}/E_{Est}	E_{Din}/E_{VA}	E_{Din}/E_{VF}	E_{VF}/E_{VA}
1	1632.11	11337.27	10590	10480	6.95	1.07	1.08	0.99
2	1413.41	9214.73	10130	44000	6.52	0.91	0.21	4.34
3	1220.42	12854.50	10380	31500	10.53	1.24	0.41	3.04
4	1138.38	10764.40	7900	22380	9.46	1.36	0.48	2.83
5	1121.88	12784.16	10170	3970	11.40	1.26	3.22	0.39
6		9717.51	9770	3970		0.99	2.45	0.41
7		11401.37	8590	8210		1.33	1.39	0.96

Tabla 54 Módulos de elasticidad para el arco 2.

Ciclo	E_{Est} (kg/cm ²)	E_{Din} (kg/cm ²)	E_{VA} (kg/cm ²)	E_{VF} (kg/cm ²)	E_{Din}/E_{Est}	E_{Din}/E_{VA}	E_{Din}/E_{VF}	E_{VF}/E_{VA}
1	1632.11	10276.43	7370	6580	6.29	1.39	1.56	0.89
2	1413.41	9502.28	7780	22630	6.72	1.22	0.42	2.91
3	1220.42	11063.29	7340	7230	9.07	1.51	1.53	0.99
4	1138.38	10928.23	6840	6580	9.60	1.60	1.66	0.96
5	1121.88	9362.39	3490	23880	8.35	2.68	0.39	6.84
6		8482.29	7980	26320		1.06	0.32	3.29
7		6573.18	7370	9340		0.89	0.70	1.27

En las tablas se observa que la relación entre el módulo dinámico y el módulo estático para el muro 1 (Tabla 51) varía entre 5.23 a 9.75, para el muro 2 (Tabla 52) varía entre 6.42 a 9.11 para el arco 1 (Tabla 53) varía entre 6.52 a 11.40 y para el arco 2 (Tabla 54) varía entre 6.29 a 9.60. Nie (1998) reporta que los valores en la relación de módulo dinámico y estático varían de 7 a 8; Quian et al. (1986) encuentra la relación es de 10. La mayoría de las relaciones entre módulos mostradas en la tabla coinciden con los resultados reportados por estos autores.

Sin embargo las relaciones de los módulos dinámicos y los obtenidos numéricamente tanto para la vibración ambiental como para la vibración forzada no coinciden con los valores reportados en la literatura. La relación encontrada para el módulo dinámico y el módulo numérico para la vibración ambiental en el muro 1 varía de 1.42 a 4.46, para el muro 2 la relación varía de 1.91 a 3.35, para el arco 1 la relación varía de 0.91 a 1.36 y para el arco 2 la relación varía de 0.89 a 2.68.

La relación de módulos dinámicos y los obtenidos numéricamente para la vibración forzada en el muro 1 varía de 0.62 a 3.24, para el muro 2 la relación varía de 0.56 a 3.06, para el arco 1 la relación varía de 0.21 a 3.22 y para el arco 3 la relación varía de 0.32 a 1.66.

La relación entre los módulos elásticos obtenidos numéricamente para vibración forzada y para vibración ambiental en el muro 1 varía de 0.44 a 6.11, en el muro 2 la relación varía de 0.94 a 5.93, para el arco 1 la relación varía de 0.39 a 4.34 y en el arco 2 la relación varía de 0.89 a 6.84.

CAPITULO 5. DISCUSION DE RESULTADOS

A continuación se presentan observaciones sobre los resultados obtenidos.

a) Módulos elásticos Dinámicos.

Se puede observar claramente que los valores de los módulos elásticos dinámicos para el arco 1 disminuyen a medida que los ciclos de degradación avanzan. En el caso de los módulos elásticos dinámicos para el arco 2 tienden a disminuir a medida que los ciclos de degradación avanzan. En el caso del muro 1 los valores de los módulos elásticos no siguen una tendencia marcada a disminuir, en los primeros 5 ciclos de degradación los módulos tienen la tendencia incrementarse y disminuyen para los ciclos 6 y 7. En el muro 2 los valores de los módulos elásticos tienen una tendencia a disminuir aunque no tan marcada como en los arcos 1 y 2.

La posible variación de las tendencias entre los de los datos de las Módulos Elásticos de los arcos y de los Módulos Elásticos de los muros puede deberse al efecto que tiene la humedad en la determinación de estos, ya que los muros cuentan con una mayor superficie que los arcos y la parte central de los arcos es más ancha que la de los muros. Estos factores hacen que los muros tiendan a absorber mayor cantidad de agua que los arcos y por lo tanto mayor humedad.

b) Módulos elásticos estáticos

Los módulos de elasticidad estáticos disminuyeron a medida que los ciclos de degradación avanzaron, cabe mencionar que los muretes construidos para estas pruebas además de la degradación impuesta se dejaron a la intemperie con el fin de que estuvieran sujetos a las mismas condiciones climatológicas de los muros y arcos construidos.

c) Frecuencias Naturales

En las frecuencias naturales determinadas a partir de la vibración ambiental se observa que en el muro 1 se observa claramente la tendencia a la baja en las frecuencias naturales al pasar los distintos ciclos de degradación. En el caso del muro 2 se observa un incremento en los valores de las Frecuencias de los ciclos 1, 2 y 3 y las frecuencias de los datos 4, 5, 6 y 7 presentan una tendencia a la baja a medida que los ciclos aumentan, esto puede ser provocado igualmente a la cantidad de humedad alojada en el elemento p a un mala colocación de los sensores. En el caso del arco 1 no se eliminaron los datos que se dispersaron más del 30% de la frecuencia del segundo mayor valor ya que la línea de datos menores que se observa corresponde a la parte central del arco 1 lo que hace pensar que su menor rigidez hace que esta parte del arco vibre con menos frecuencia que las pilastras. Aun así se observa que la tendencia de los datos de las frecuencias de las pilastras y la parte central es a la baja a medida que la degradación del elemento es mayor. En el arco 2 al igual que en el arco 1 no se eliminaron los datos que se dispersaron más del 30% de la frecuencia del segundo mayor valor pues la parte central del arco vibra con menor frecuencia que las pilastras. Los datos siguen la tendencia a la baja a medida que los ciclos de degradación se incrementan.

En el caso de las frecuencias naturales determinadas a partir de la vibración forzada se observa para el muro 1 se observa los que los datos de las frecuencias no siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan. El primer ciclo arrojó una frecuencia muy baja respecto a los otros ciclos esto debido quizá a una mala colocación de los sensores. Los datos de los ciclos 2, 3 y 4 se agrupan alrededor de los 16 Hz siguiendo una tendencia a la baja pero los datos de los ciclos 5, 6 y 7 se agrupan alrededor de los 18 Hz y no siguen una tendencia a la baja, estos resultados probablemente se debieron a la mala colocación de los geófonos, debido a que la energía transferida por la excitación sobre el muro fue muy dispersa , a la humedad presente en los elementos en el momento en que se desarrolló la prueba. En el muro 2 se observa que los datos de sus frecuencias son muy parecidos a los del muro 1 (sus gráficas siguen un mismo patrón) y por lo tanto tampoco no siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan. El primer y segundo ciclo la frecuencia se agrupó entre los 8 y los 9 Hz. Para los datos 3, 4, 5, 6 y 7 los datos se agruparon alrededor de los 19 Hz. Las razones de esto pueden ser

las mismas descritas para los datos del muro 1. En el arco 1 como en el caso de la vibración ambiental tampoco se eliminó ningún dato debido a que las frecuencias menores que se observan corresponden a la parte central del arco lo cual se debe a que este elemento tiene una menor rigidez respecto a las pilastras. Se observa que los datos de las frecuencias siguen una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan. En el arco 2 tampoco se eliminó ningún dato y se observa que los datos de las frecuencias siguen una tendencia a la baja aunque no tan marcada como en el caso del arco 1 conforme los ciclos de degradación avanzan.

d) Módulos elásticos numéricos

Los módulos elásticos numéricos determinados a partir de la vibración ambiental y la vibración forzada siguen la tendencia de los datos de las vibraciones.

En la comparación de los resultados de los módulos elásticos dinámicos, estáticos y numéricos se observa que la relación entre los módulos dinámico y estático en general aumenta a medida que los ciclos de degradación avanzan, esto puede deberse a que al almacenar los muretes al aire libre y por su tamaño fueron más propensos a degradarse debido al intemperismo o que debido al método de obtención del módulo dinámico este presente un resultado más representativo para los elementos. Las relaciones entre los módulos dinámicos y los módulos numéricos tanto para los determinados a partir de vibración ambiental como para los determinados a partir de vibración forzada también presentan una tendencia a incrementarse al aumentar los ciclos de degradación. Y para finalizar la relación entre los módulos elásticos numéricos obtenidos mediante vibración ambiental y vibración forzada tiende a incrementarse a medida que los ciclos avanzan esto puede deberse a que a medida que el elemento es degradado la influencia de la excitación se hace mayor.

CONCLUSIONES

Los módulos Elásticos Estáticos determinados a partir de los muretes construidos para los ciclos de degradación 1, 2, 3, 4 y 5 presentan una tendencia a hacerse menores a medida que los ciclos de avanzan. Los Módulos Elásticos Dinámicos de los elementos presentan una tendencia a hacerse menores a medida que los ciclos de degradación avanzan. Los módulos Elásticos calculados numéricamente a partir de las frecuencias correspondientes a la vibración ambiental disminuyen a medida que la degradación de los elementos avanza.

Las propiedades dinámicas (Frecuencias Naturales) de los elementos construidos determinadas mediante vibración ambiental para los muros no presentan una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan, sin embargo en los arcos las Frecuencias Naturales sí presentan una tendencia a la baja a medida que los ciclos de degradación avanzan.

Las propiedades dinámicas (Frecuencias Naturales) de los elementos construidos determinadas mediante vibración forzada en los muros y arcos presentan una tendencia a la baja conforme los ciclos de degradación avanzan.

GLOSARIO

Constantes de lamé Son las constantes elásticas que caracterizan por completo el comportamiento elástico de un sólido isótropo para pequeñas deformaciones.

Frecuencia natural de vibración (F_n) Es la frecuencia a la que un objeto seguirá vibrando después de que se retira la excitación que lo hizo vibrar.

Módulo de elasticidad (E) Es la relación entre el incremento de esfuerzo aplicado a un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria que experimenta.

Módulo volumétrico (k) Relación que indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dada.

Ondas mecánicas Son aquellas que se desplazan a través de un medio deformable o elástico

Relación de poisson (ν) Es la relación entre la deformación longitudinal y la deformación transversal resultado de la aplicación de un esfuerzo a un cuerpo.

Vibración libre Es la que ocurre naturalmente sin que se le añada energía al sistema vibratorio.

Vibración forzada Es la oscilación de un sistema en respuesta a una excitación continua, por ejemplo la vibración de un edificio durante un sismo.

REFERENCIAS

- Brincker Rune et al, 2000, Modal identification of output-only systems using frequency domain Decomposition, Disponible en: www.iop.org/Journals/sm.
- Chiostrini S et al, 1992, Structural analysis and damage evaluation of existing masonry buildings by dynamic experimentation and numerical modeling, Rotterdam, 1992, Earthquake Engineering, Tenth World Conference.
- Cruz Díaz Jorge I., Rojas Rojas Rafael y Aguiñiga Gaona Francisco, 2007, Estudio analítico y con vibración ambiental de las gradas de un estadio, *Ciencia nicolaita*, 43, 123-134.
- De Sortis A. et al, 2004, Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests, Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Elmenschawi Abdelsamie et al, 2011, Elastic moduli of stone masonry based on static and dynamic tests, Minneapolis, Mn, USA, 2011, 11º North American Masonry Conference.
- Farrar, C.R., Duffey, T.A., Cornwell, P.J., Doebling, S.W., 1999. Excitation methods for bridge structures, in: Proceedings of IMAC-XVII, Applied Modal Analysis. Orlando, Florida.
- Flores, Estrella H., Lomnitz, C. y Yussim, S., 2004. Estimación de velocidad de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC, *Geos*, 24, 438-445.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974. Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophys.*, 39, 770-780.
- Gentile C. y Saisi A., 2006, Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, 2006, Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Hola, J., Schabowicz, K., 2010. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10, 5 – 18.
- Malhotra, V.M., 1976. Testing Hardened Concrete; Nondestructive Methods, ACI Monograph No.9, ACI/Iowa State University Press, 204 p.
- Lourenço Paulo B. 2006, Workshop on civil engineering research, 1, Braga, 2006 - "1st Workshop on Civil Engineering Research" <http://hdl.handle.net/1822/6436>.
- Meli, R., 1988. Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos. Fundación ICA, México D.F.
- NDTH, 1996. Nondestructive Testing Handbook. American Society for Nondestructive Testing, Inc., U.S.A.
- Nie, Y.J., (1988), Evaluation of dynamic compaction by elastic wave method, *Journal of Hydroscience and Engineering*, 2, 55-65.
- Pau Annamaria y Vestroni Fabrizio (2011). Dynamic Characterization of Ancient Masonry Structures, *Advances in Vibration Analysis Research*, Dr. Farzad Ebrahimi (Ed.), ISBN: 978-953-307-209-8, InTech, Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-vibration-analysis-research/dynamic-characterization-of-ancient-masonry-structures>.
- Quian, J.H., Quian, X.D., and Zhao, W.B. (1986). Theory and Practice of Dynamic Consolidation, *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 6, 26-30.
- Roberts, J y Asten, M (2004). Resolving a velocity inversión at the geotechnical scale using the microtemor(passive seismic) survey method, *Journal of Exploration Geophysics*, 35, 14-18.
- SAP, 2012. Structural Analisis Program, desarrollado por Computers Structures Inc. Fecha de consulta 08/10/2012 <http://www.csiberkeley.com/sap2000>.
- SMIS, 2013. Sociedad Mexicana de Ingeniería sísmica, <http://www.smis.org.mx/htm/sm4.htm>
- Young, Hugh D. y Freedman ,Roger A. (2009). Física Universitaria. México: Pearson education.

ANEXOS



ANEXO "A"

FRECUENCIAS NATURALES DETERMINADAS MEDIANTE VIBRACIÓN AMBIENTAL

A continuación se presentan las gráficas resultantes de las mediciones realizadas para cada uno de los elementos construidos durante los ciclos de prueba 2, 3 4 5 6 y 7 y las frecuencias que se derivaron de estas gráficas correspondientes a los ejes X, Y, Z de cada grupo de geófonos.

Comenzaremos con el segundo ciclo de degradación, los resultados obtenidos para el arco 1 el cual está orientado en sentido Norte-Sur se presentan en la siguiente gráfica Amplitud-Frecuencia:

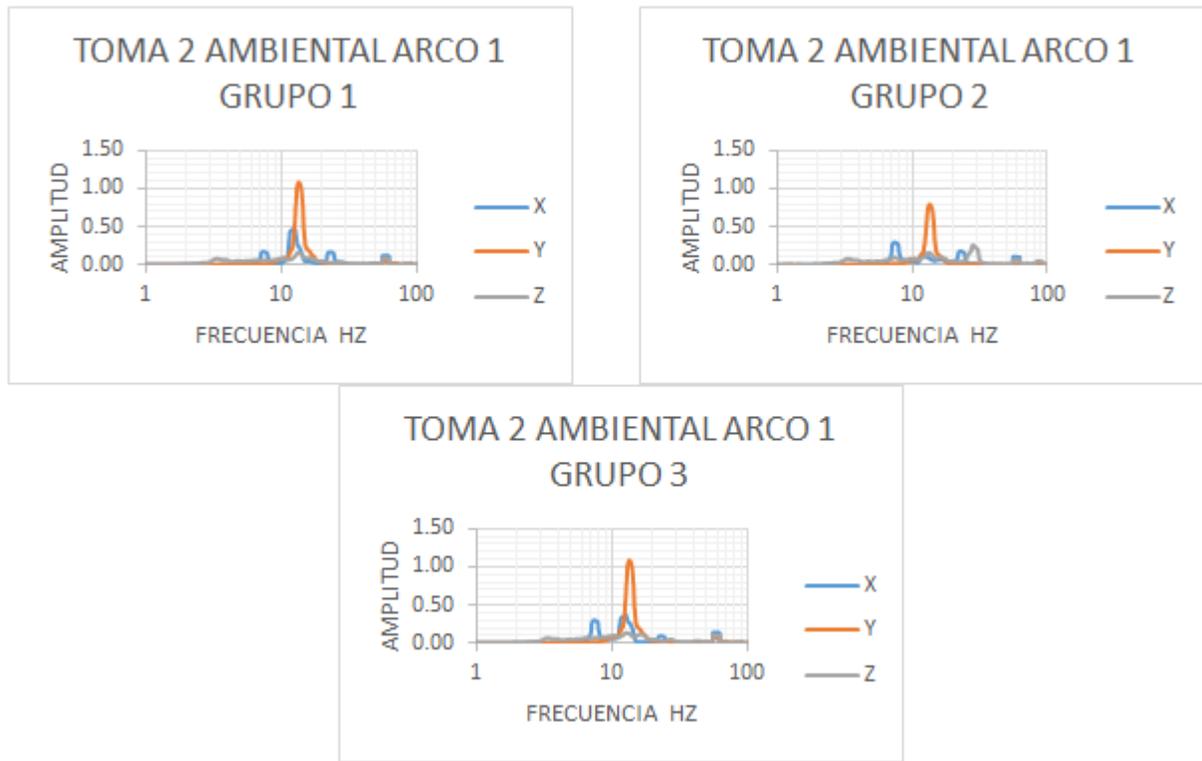


Figura A.1. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.48 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.34 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.28 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.29 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.35 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 28.1 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.38 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.38 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 12.68 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

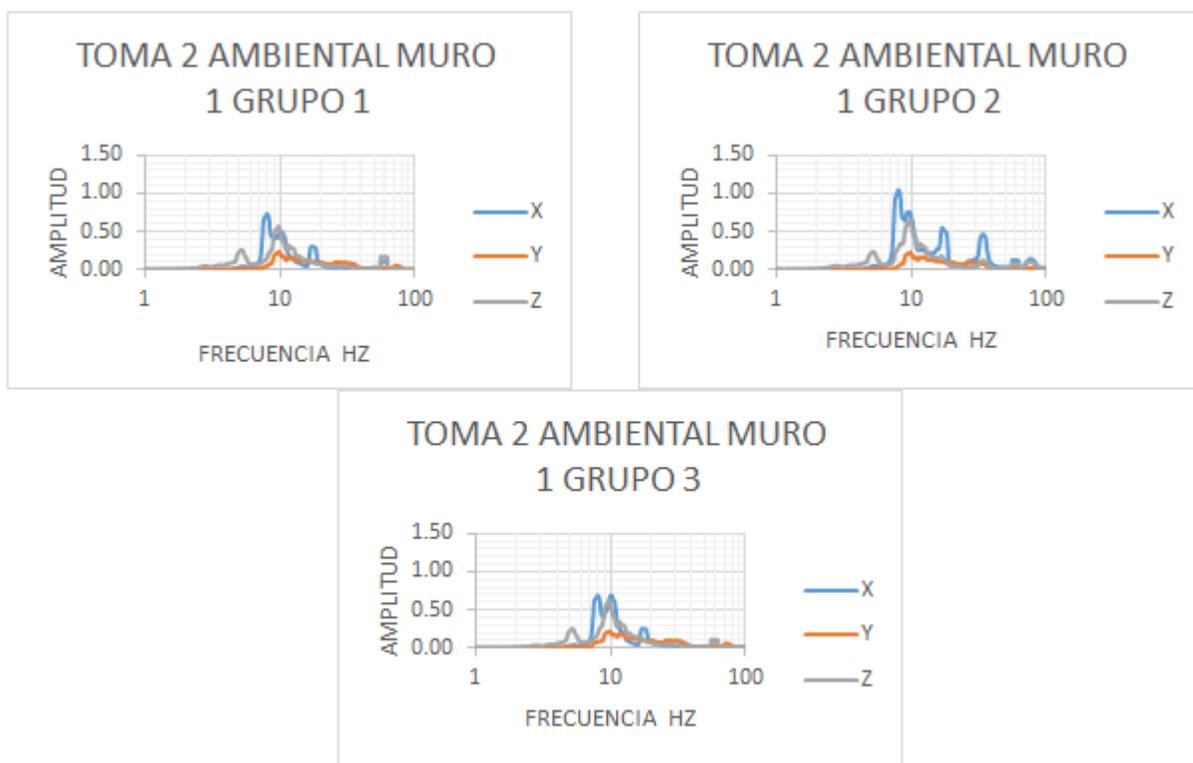


Figura A.2. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el segundo ciclo de degradación.

Para primer grupo de geófonos el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.98 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una

frecuencia natural de 9.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.81 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.97 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 9.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.81 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.08 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 9.81 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.81 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

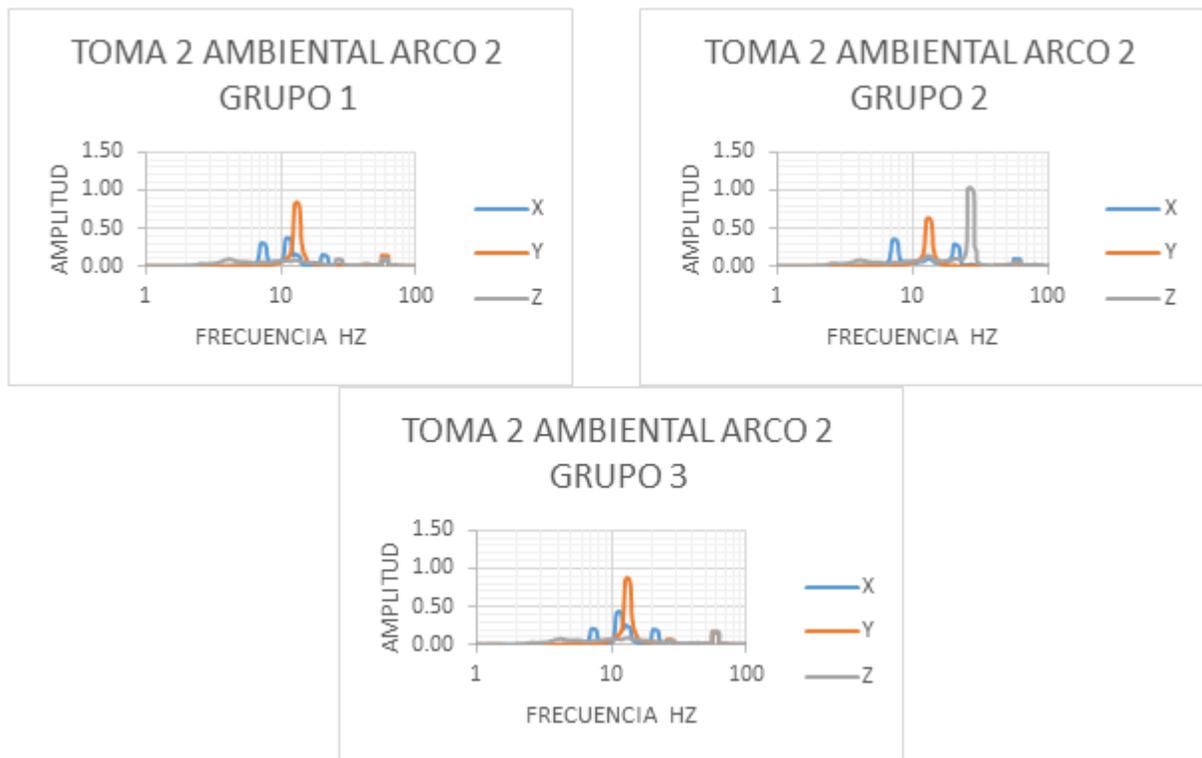


Figura A.3. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.15 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.05 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 4.09 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.2 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.99 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 26.49 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.15 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.03 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 55.66 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Este del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

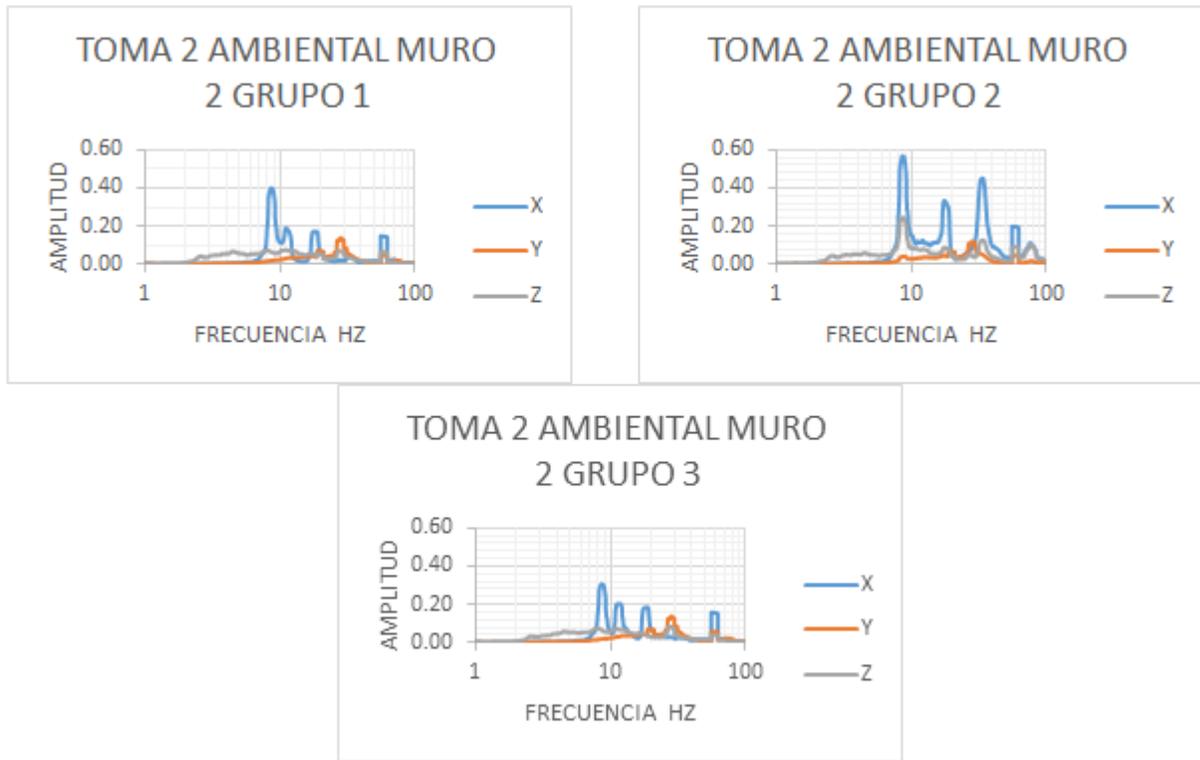


Figura A.4. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.56 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 27.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.92 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 27.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 8.53 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 27.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 27.8 Hz.

Para el tercer ciclo de degradación, los resultados obtenidos para el arco 1 el cual está orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

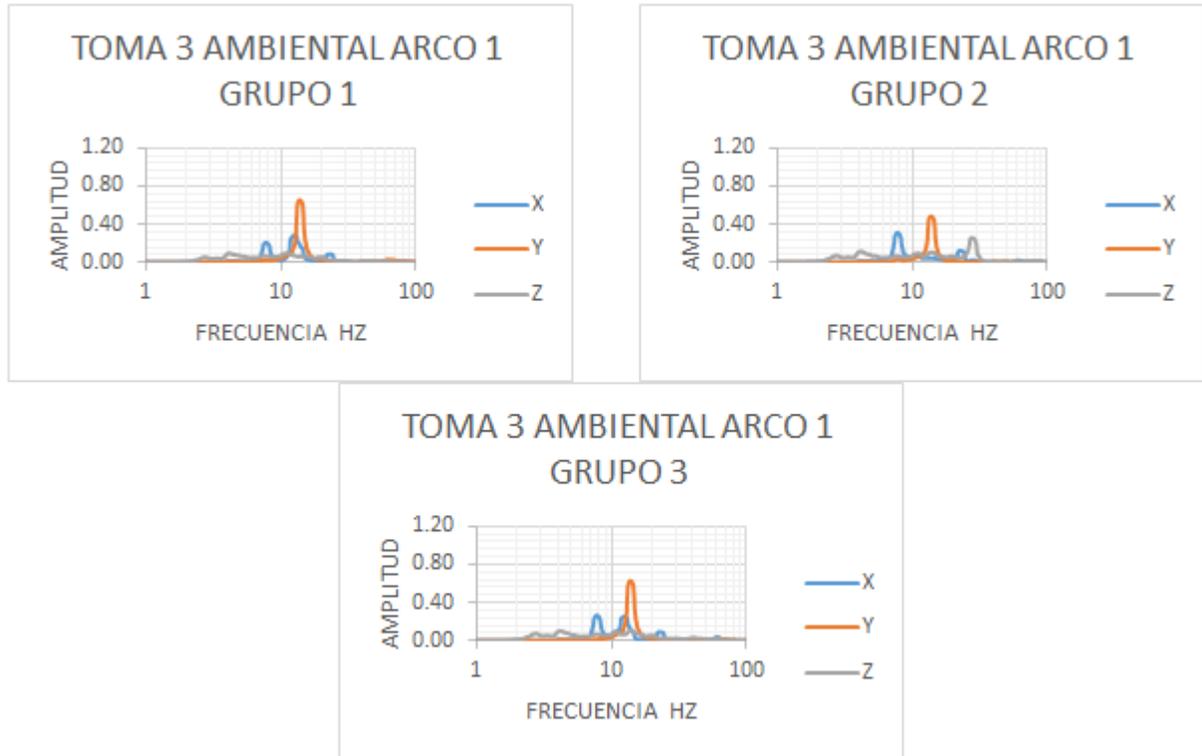


Figura A.5. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.63 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.7 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 11.12 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.71 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 27.25 Hz.

Para el tercer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.69 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 13.7 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 4.15 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

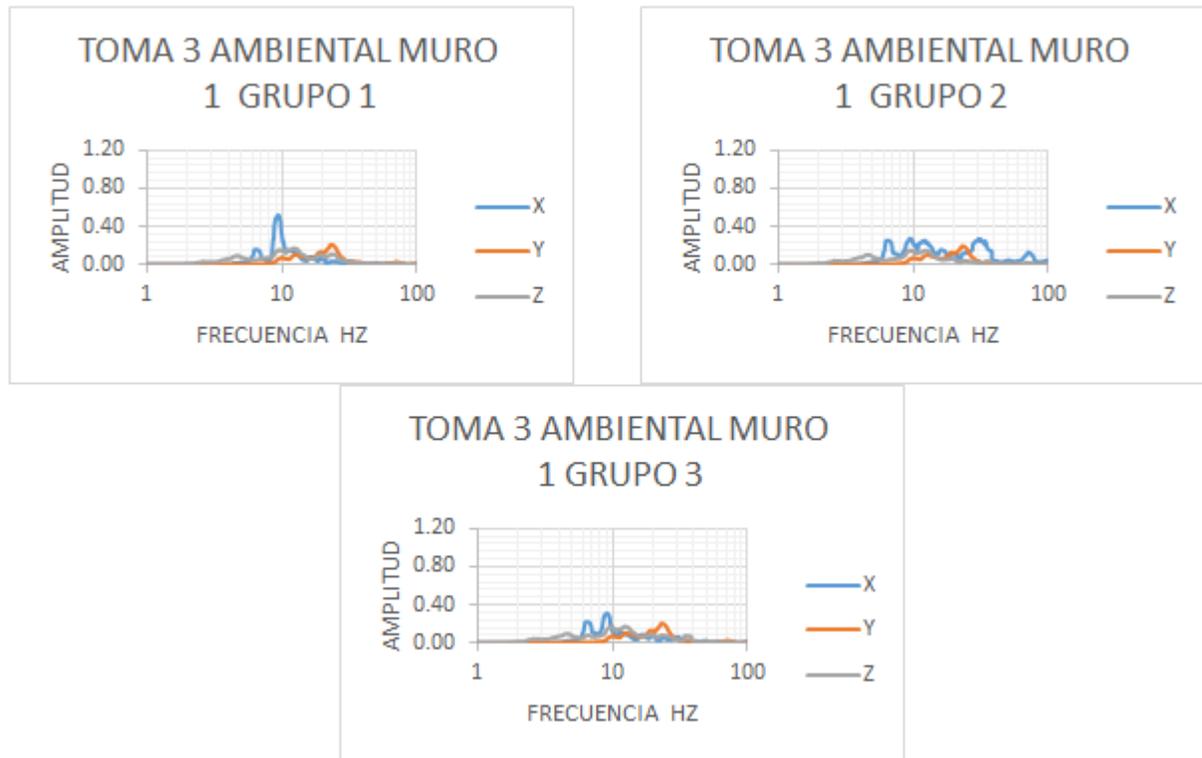


Figura A.6. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 9.35 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23.21 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 12.13 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 9.51 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23.19 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.37 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 9.05 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23.19 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 12.36 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

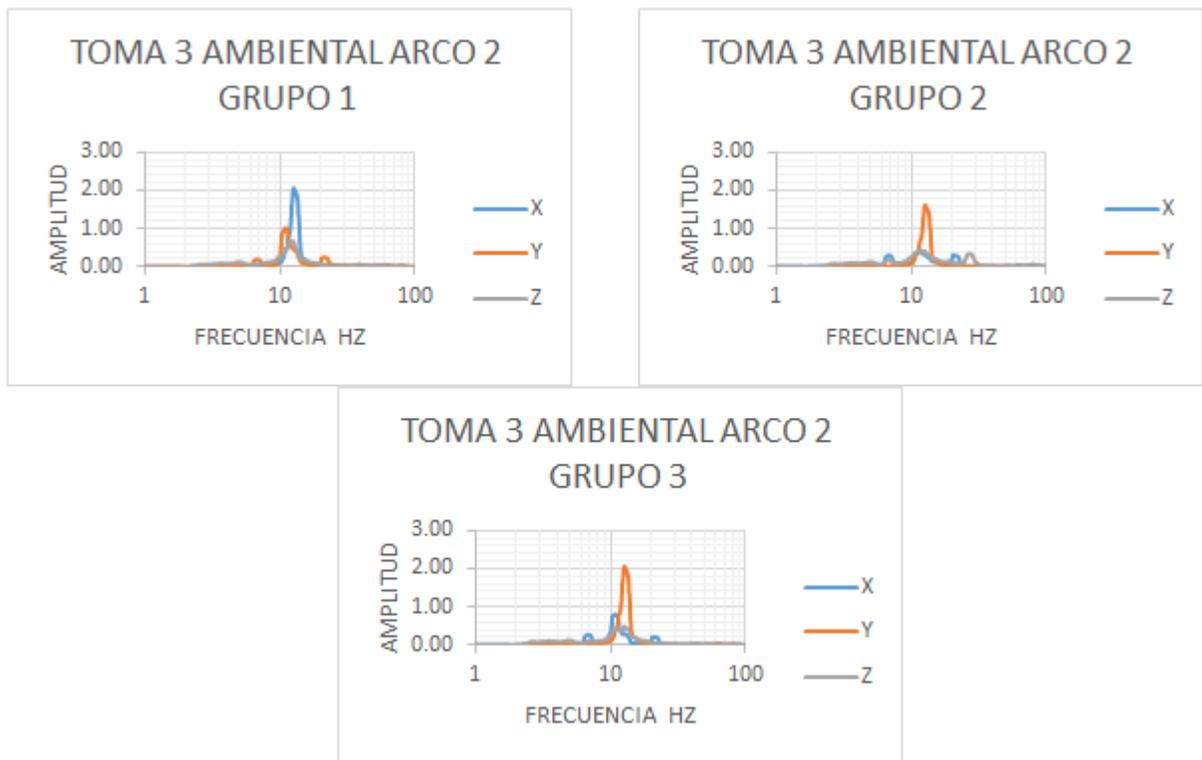


Figura A.7. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.62 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 11.84 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.46 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 12.6 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 11.6 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.83 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.62 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 12.62 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

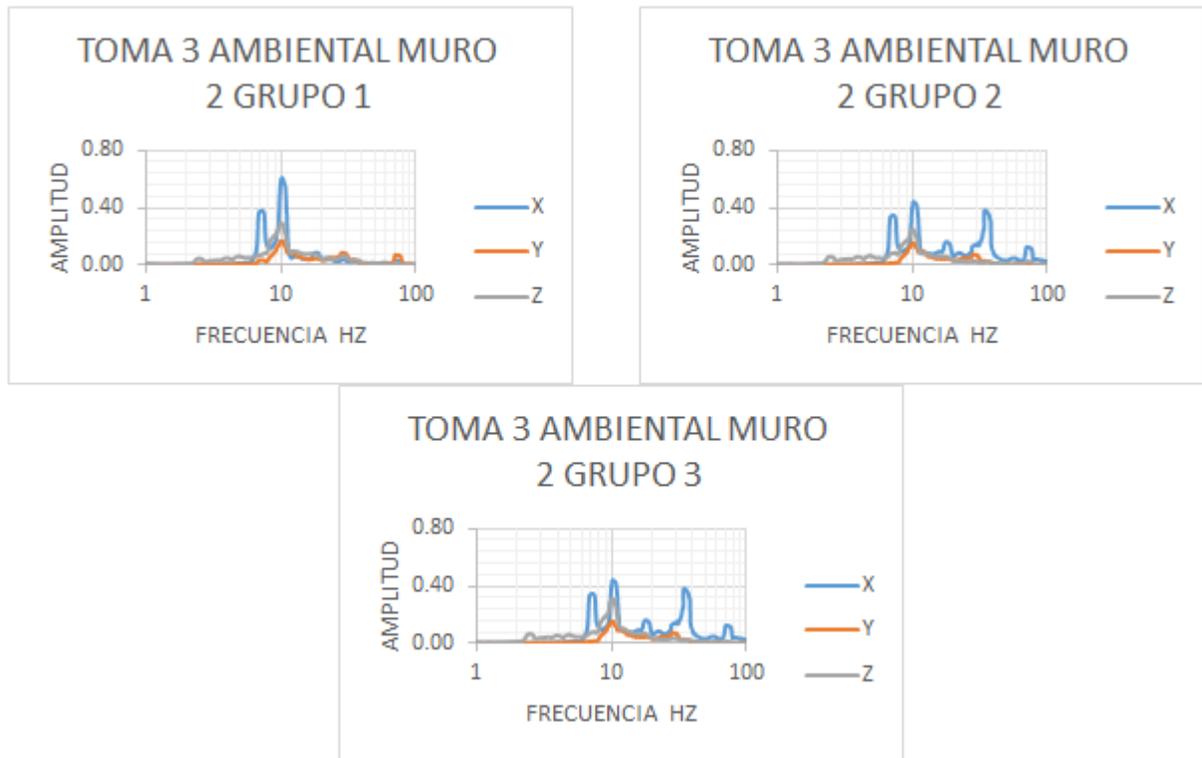


Figura A.8. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.10 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 10.12 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.86 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.27 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 10.15 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.98 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 10.16 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.12 Hz.

Para el cuarto ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

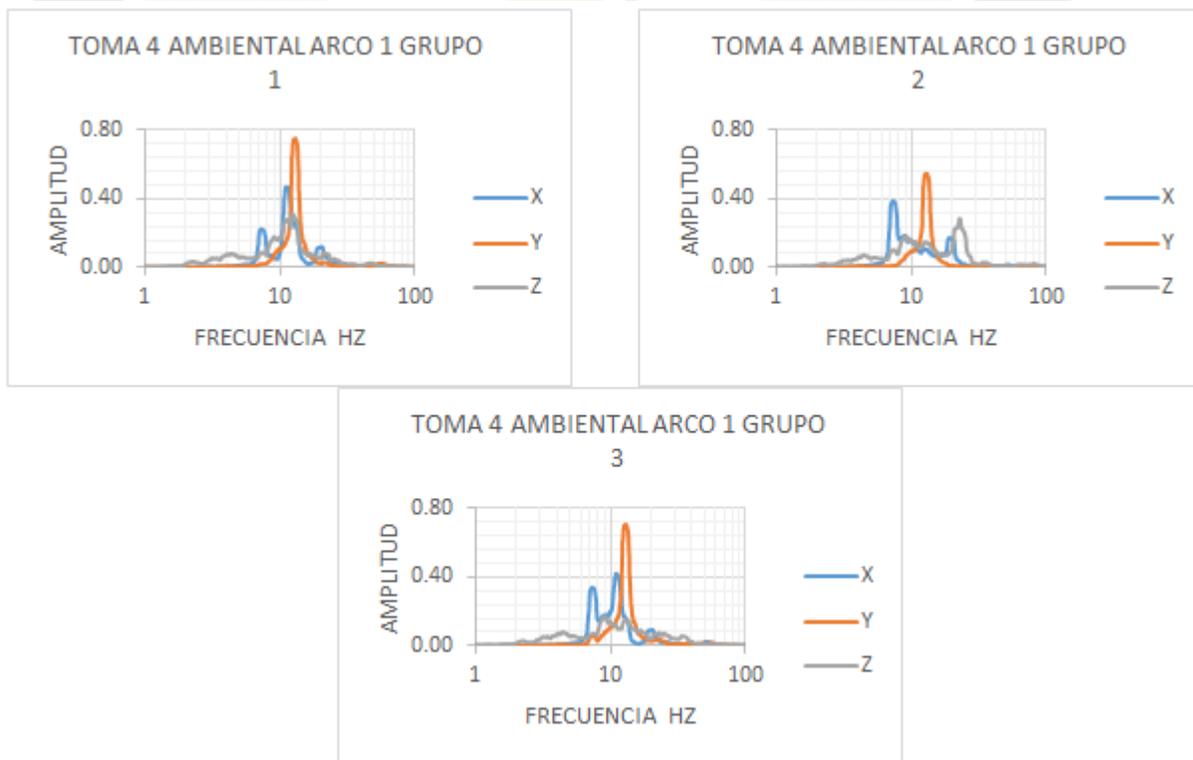


Figura A.9. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.02 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra

una frecuencia natural de 12.91 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.31 Hz.

Para el segundo grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.26 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.91 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 22.67 Hz.

Para el tercer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.93 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.91 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 9 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

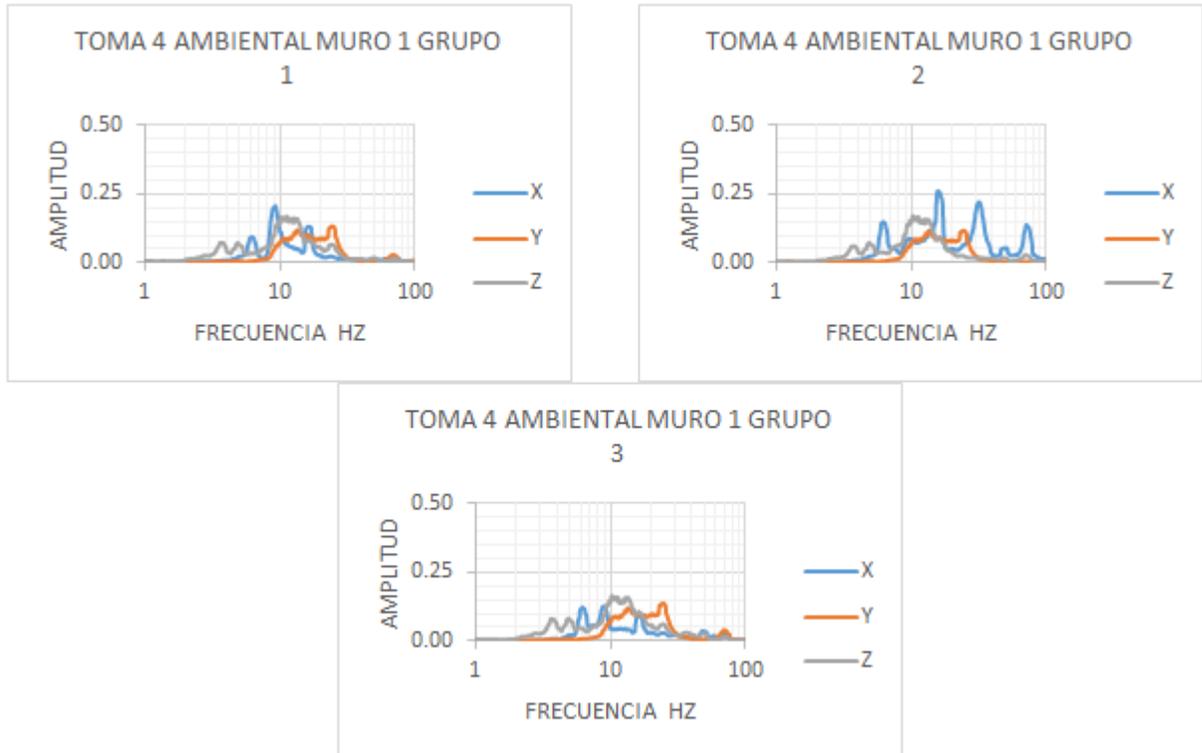


Figura A.10. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 9.2 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 24.32 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 11.11 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 15.72 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 24.32 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.22 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.85 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 24.32 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.22 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

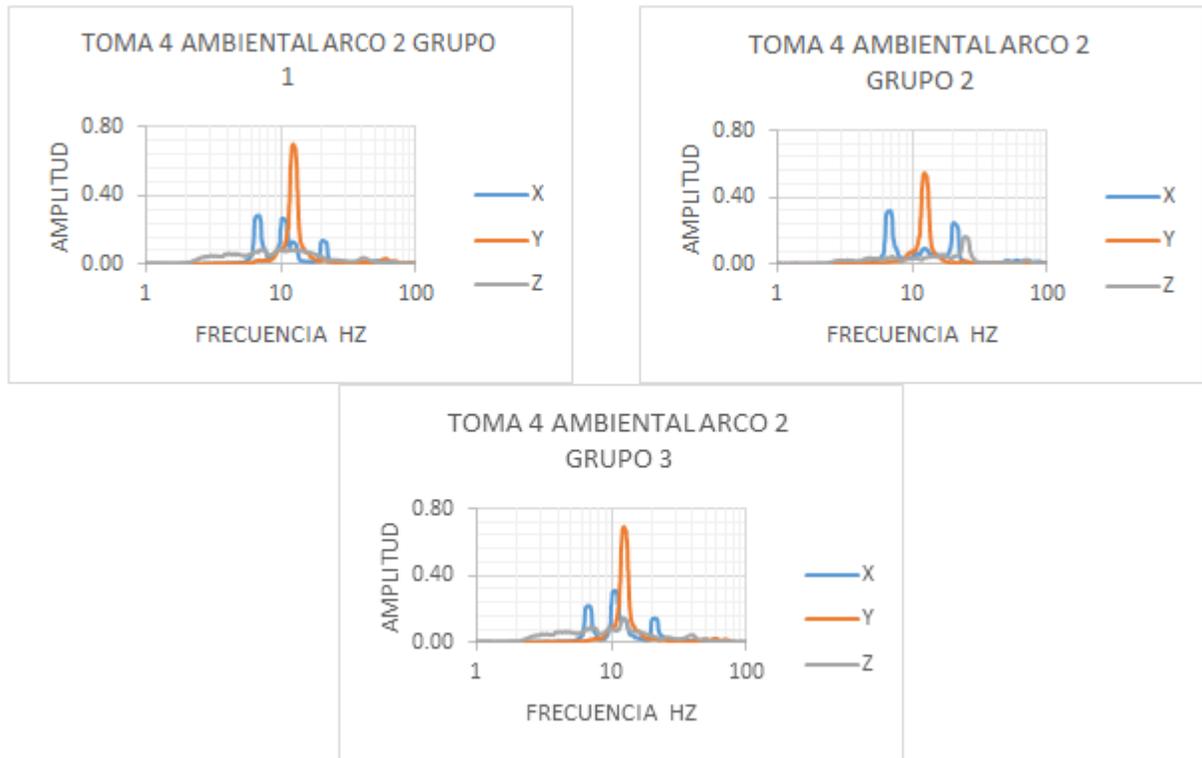


Figura A.11. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 6.9 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.31 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 9.64 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 6.59 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.31 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24.63 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.45 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.31 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 12.10 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

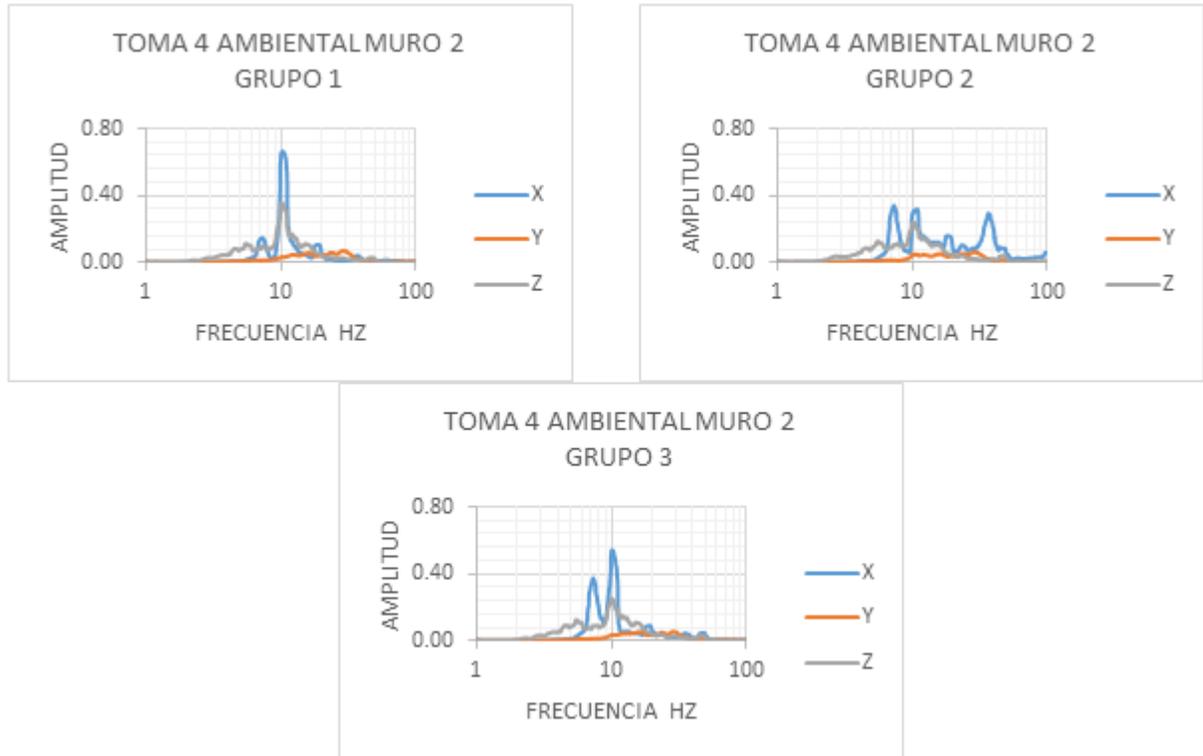


Figura A.12. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 30.53 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.98 Hz.

Para el segundo grupo de en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.31 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 28.75 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.19 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra

una frecuencia natural de 28.75 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.98 Hz.

Para el quinto ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

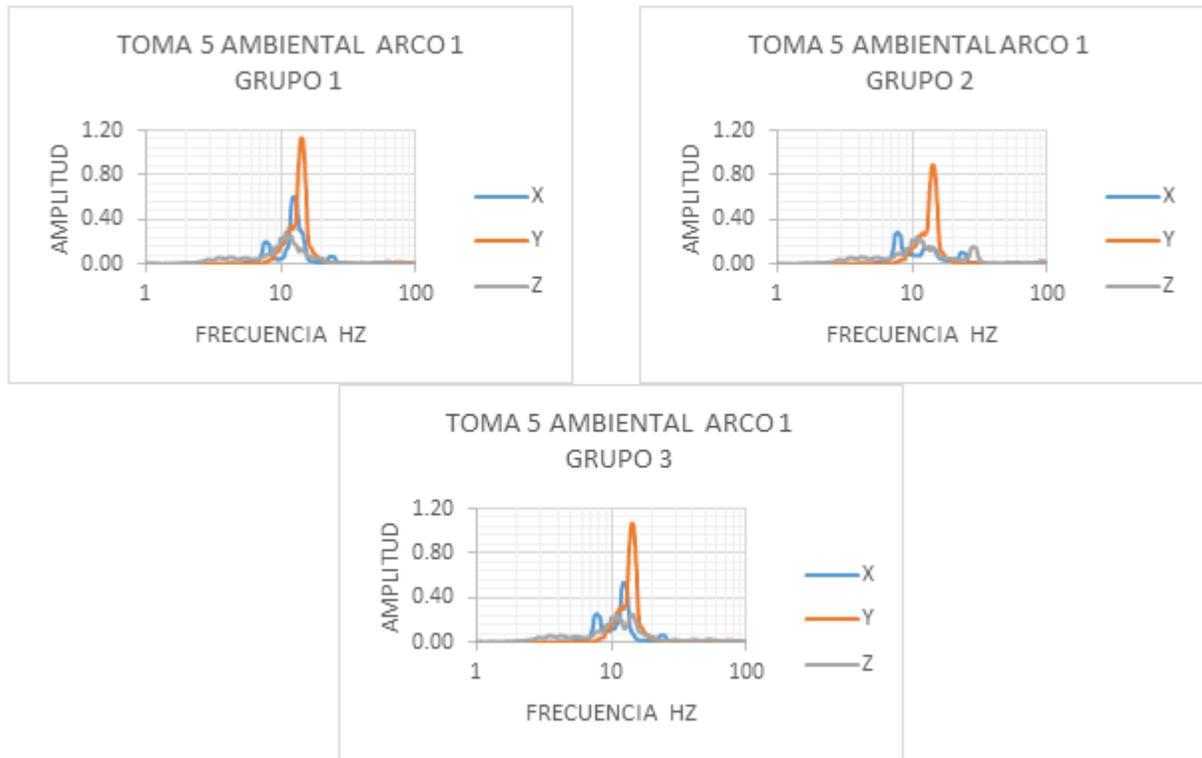


Figura A.13. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.51 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.07 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 10.93 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.75 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.04 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 10.96 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.15 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.04 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 10.96 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

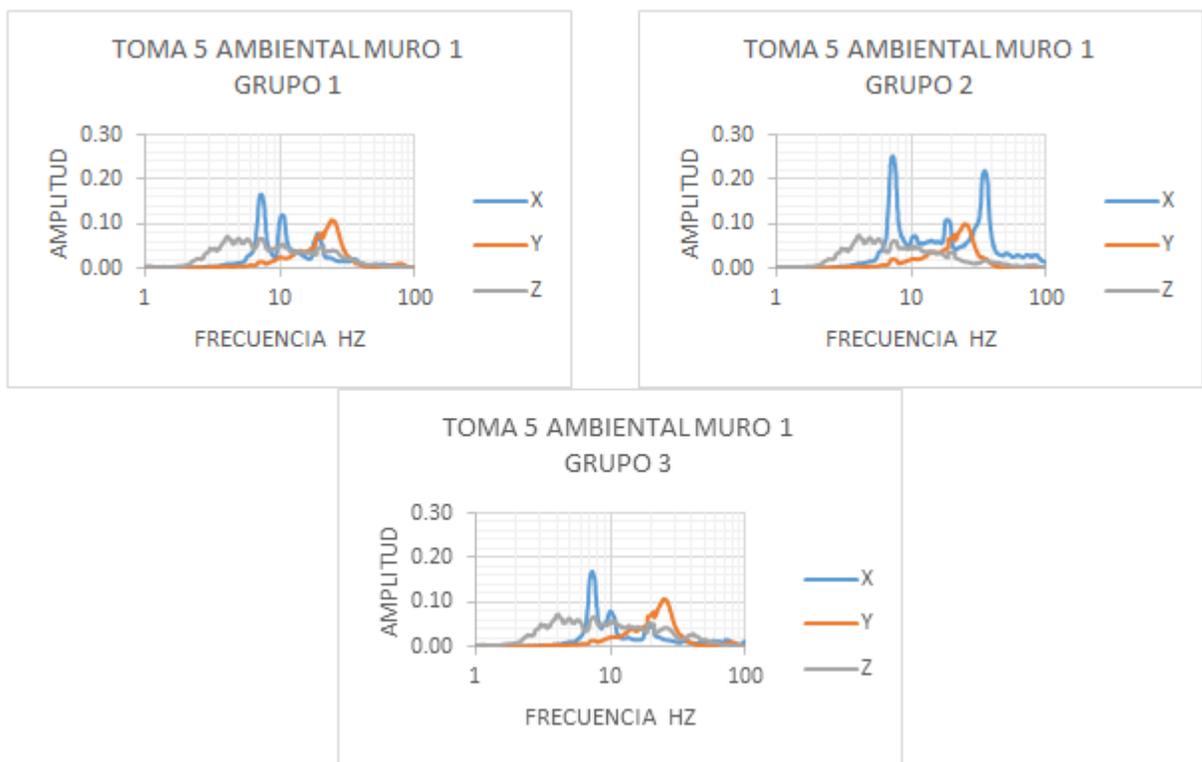


Figura A.14. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.29 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23.97 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural de fue 4.07 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.29 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se

encuentra una frecuencia natural de 23.48 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 4.09 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.29 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 24.58 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 4.07 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

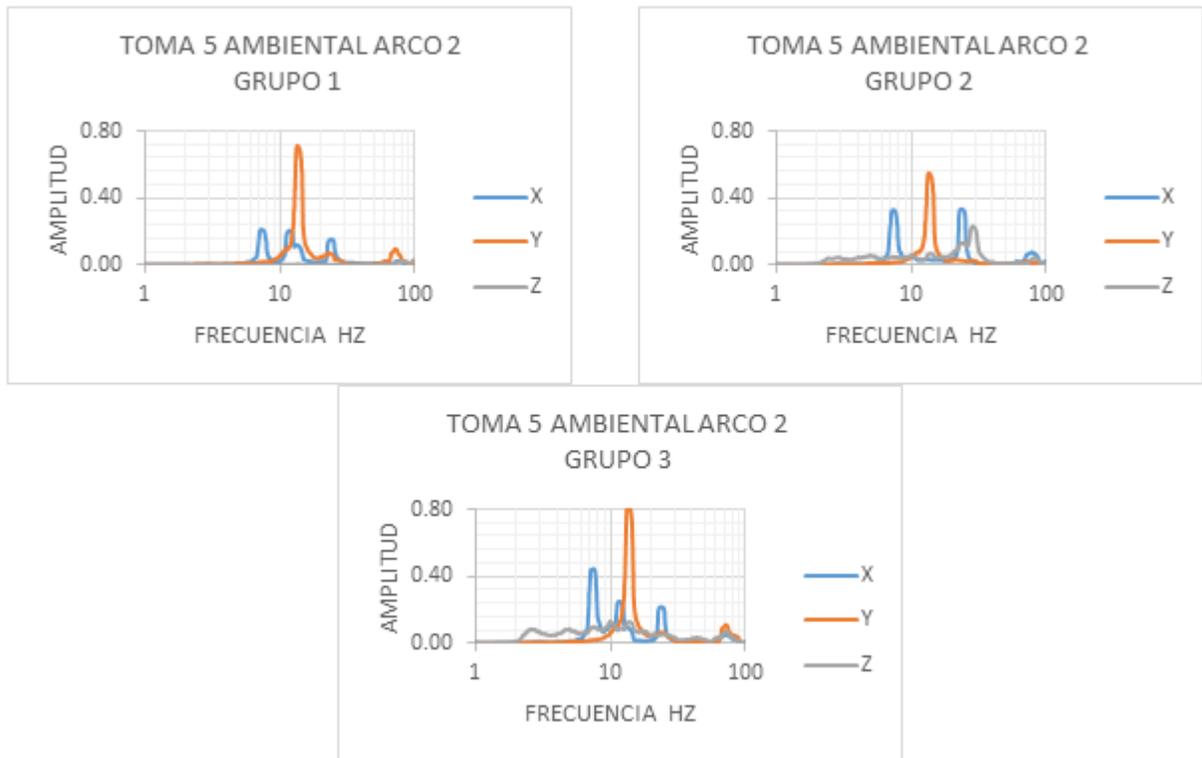


Figura A.15. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.26 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.40 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 23.44 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.41 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 28.35 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.46 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.41 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 9.86 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

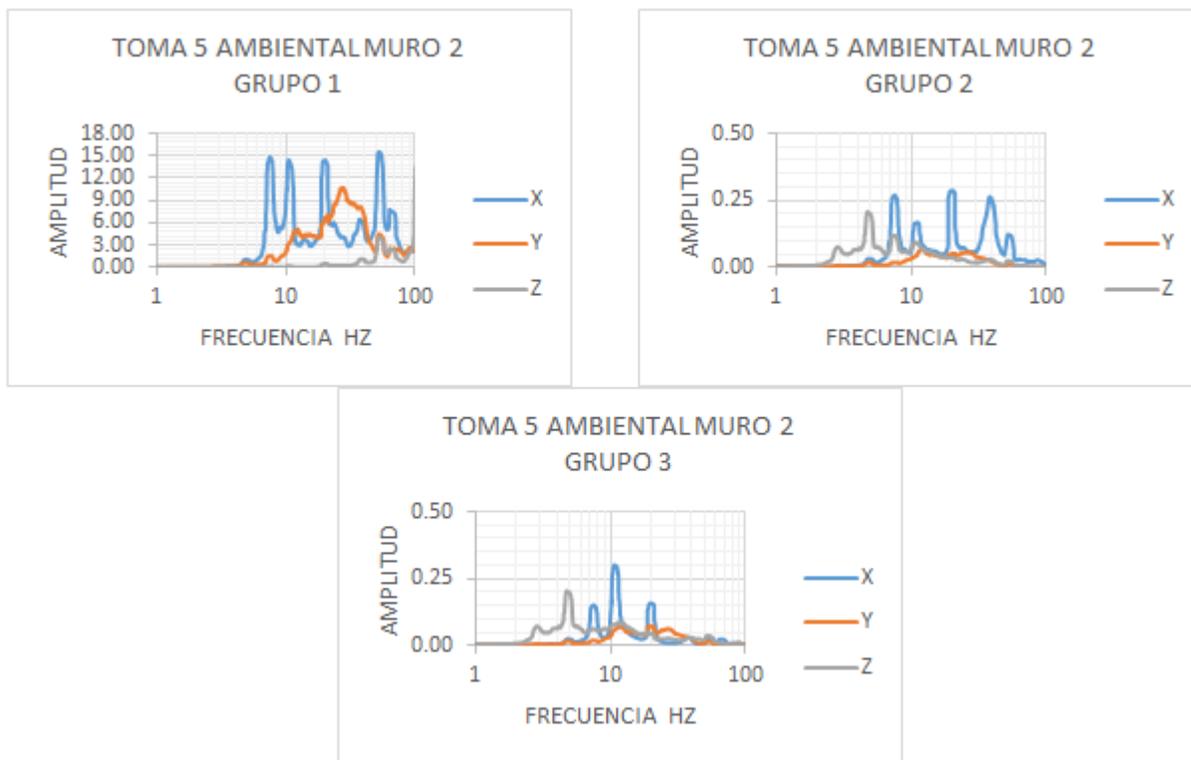


Figura A.16. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 52.43 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra

una frecuencia natural de 27.15 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 52.84 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 19.5 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 11.92 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 4.75 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.62 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 11.26 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 4.75 Hz.

Para el sexto ciclo de degradación en el arco 1 la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

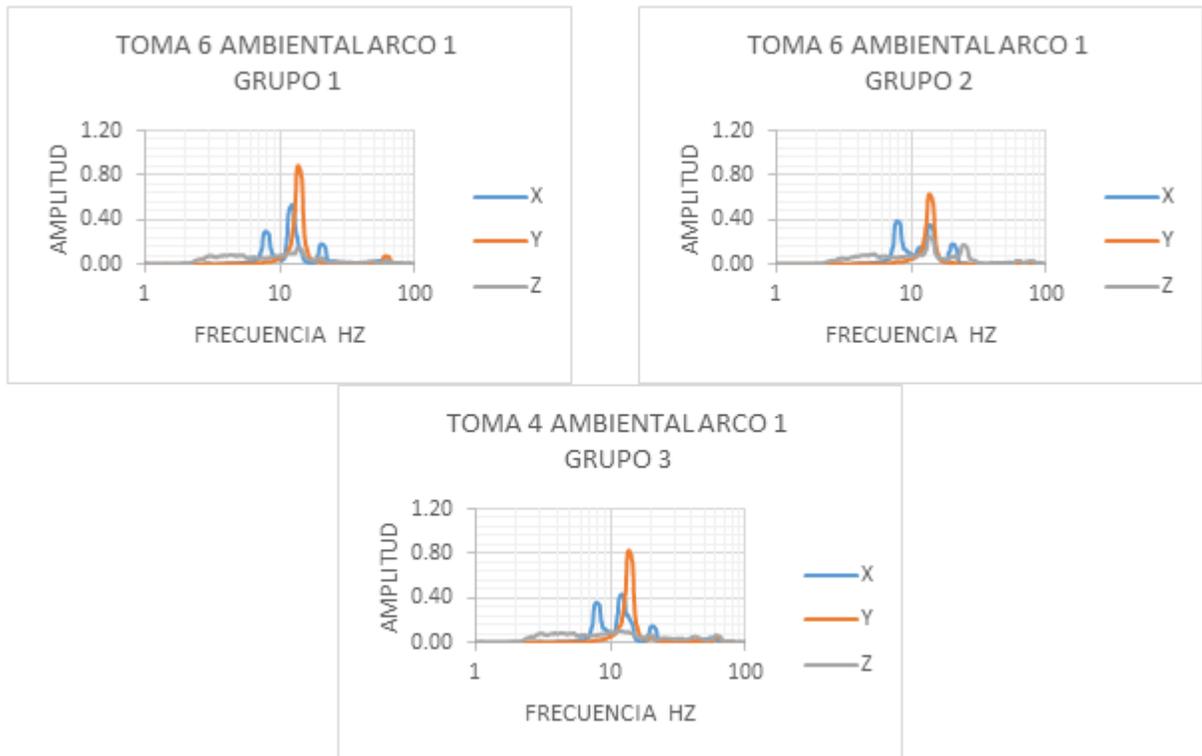


Figura A.17. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.6 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.46 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.81 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.56 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.55 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.09 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.56 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 11.44 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

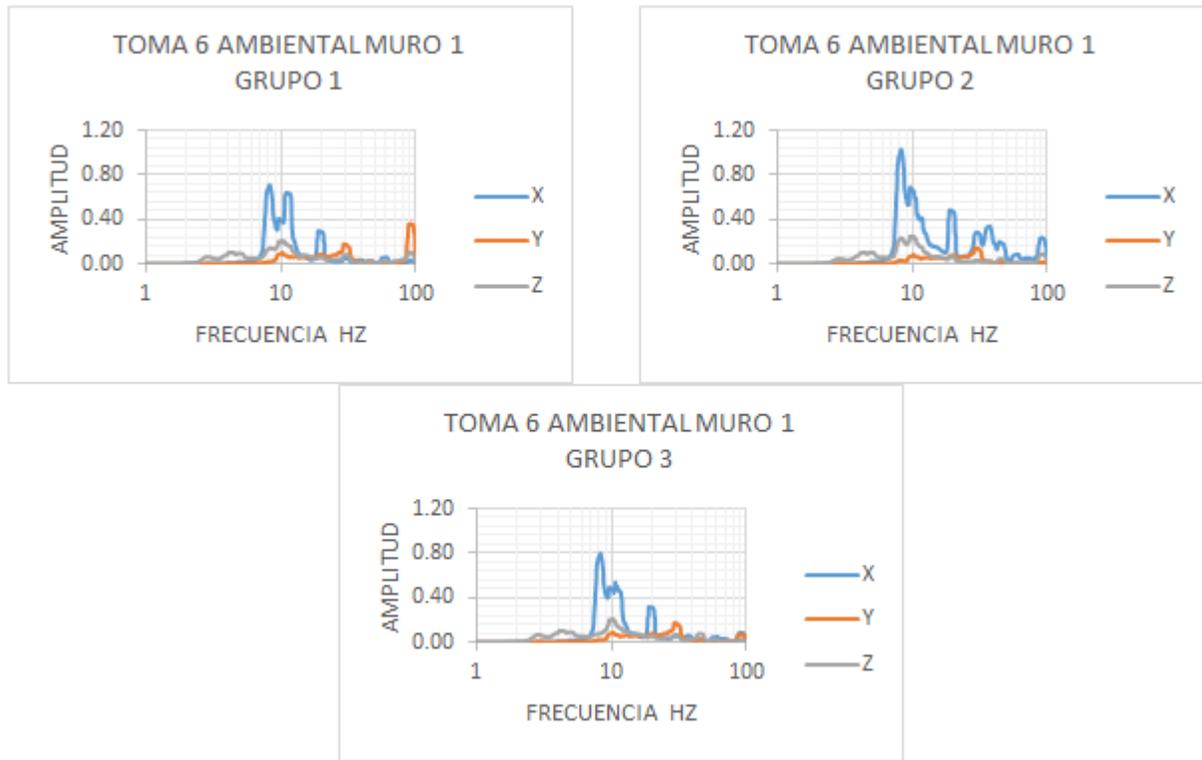


Figura A.18. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 88 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.63 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29.27 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.64 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29.33 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.18 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

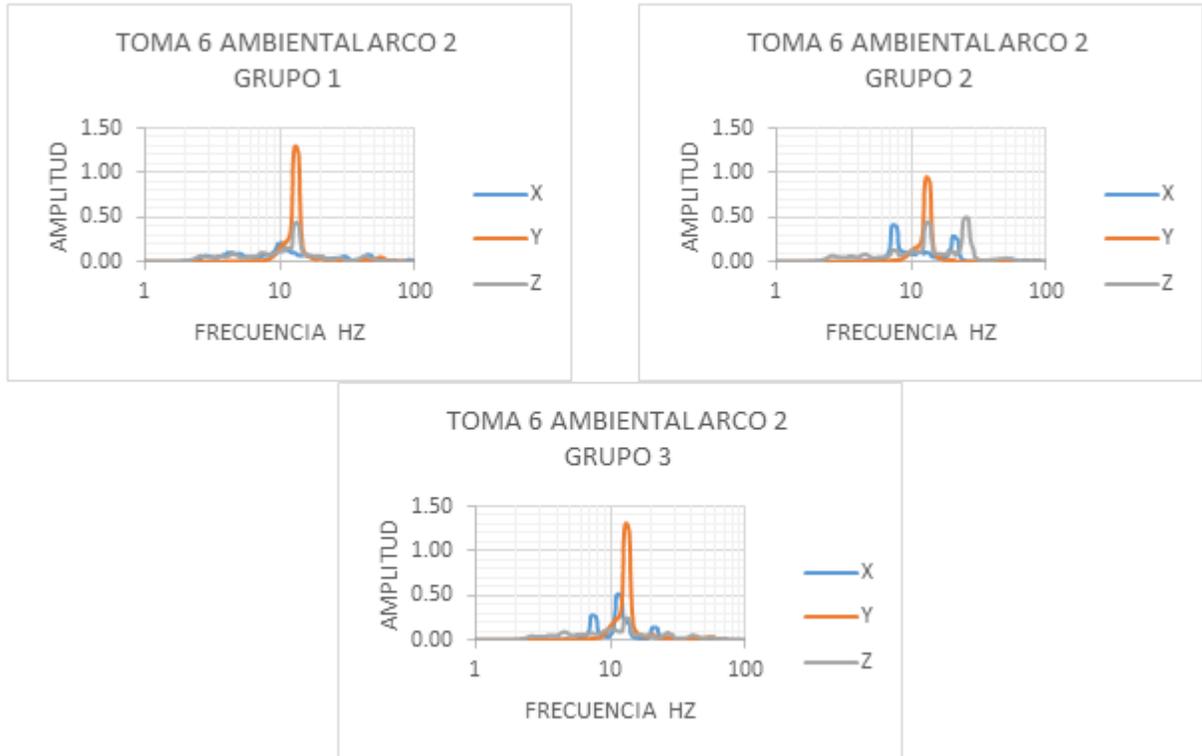


Figura A.19. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.89 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.14 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.4 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.91 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 25.24 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.28 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra

una frecuencia natural de 12.89 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 13.14 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Este del arco la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

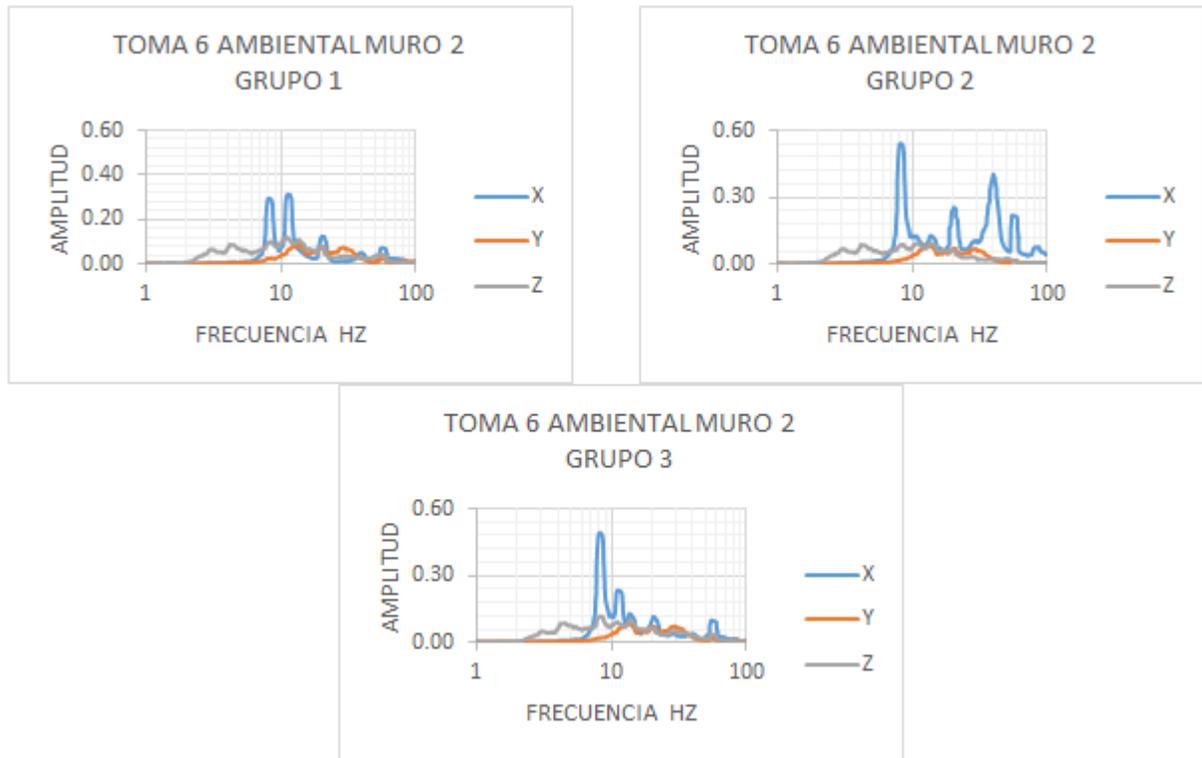


Figura A.20. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 11.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 13.26 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 11.06 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.21 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 13.63 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 13.47 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.21 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 13.49 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 8.27 Hz.

Para el séptimo ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

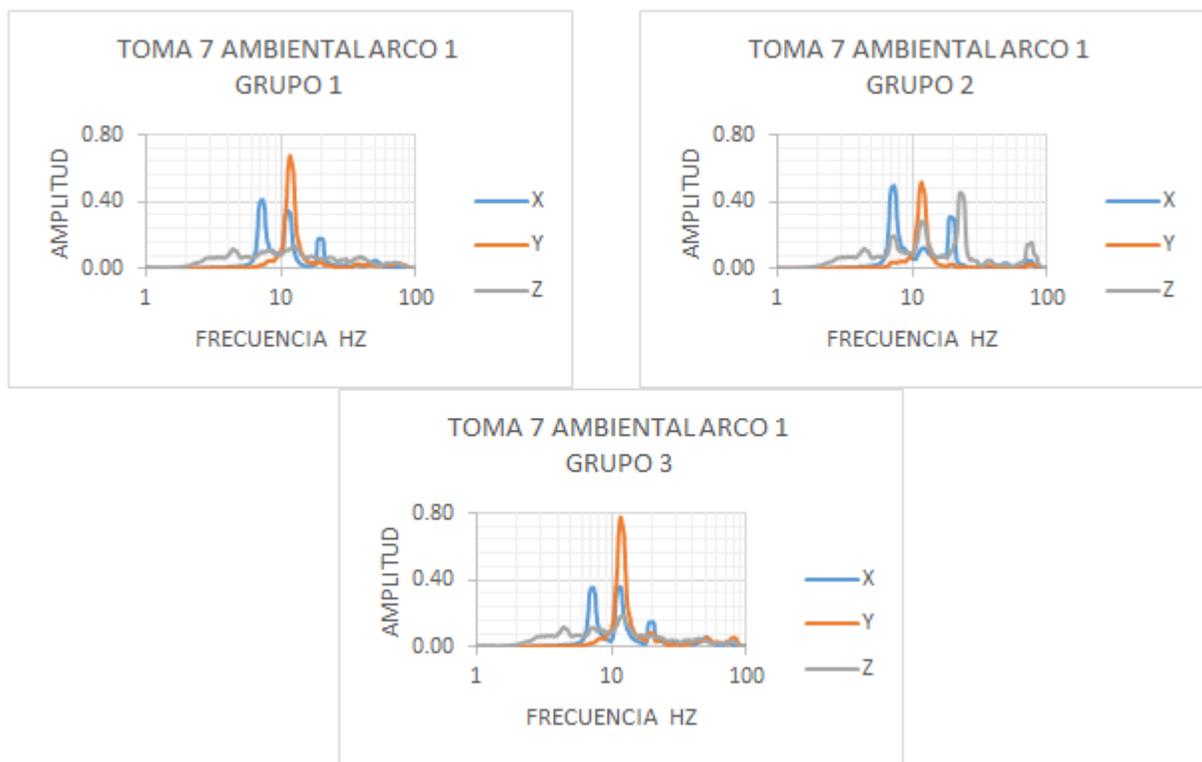


Figura A.21. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.31Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.67 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 12.56 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.31Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 11.67 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 22.52 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.49 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.67 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 12.19 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

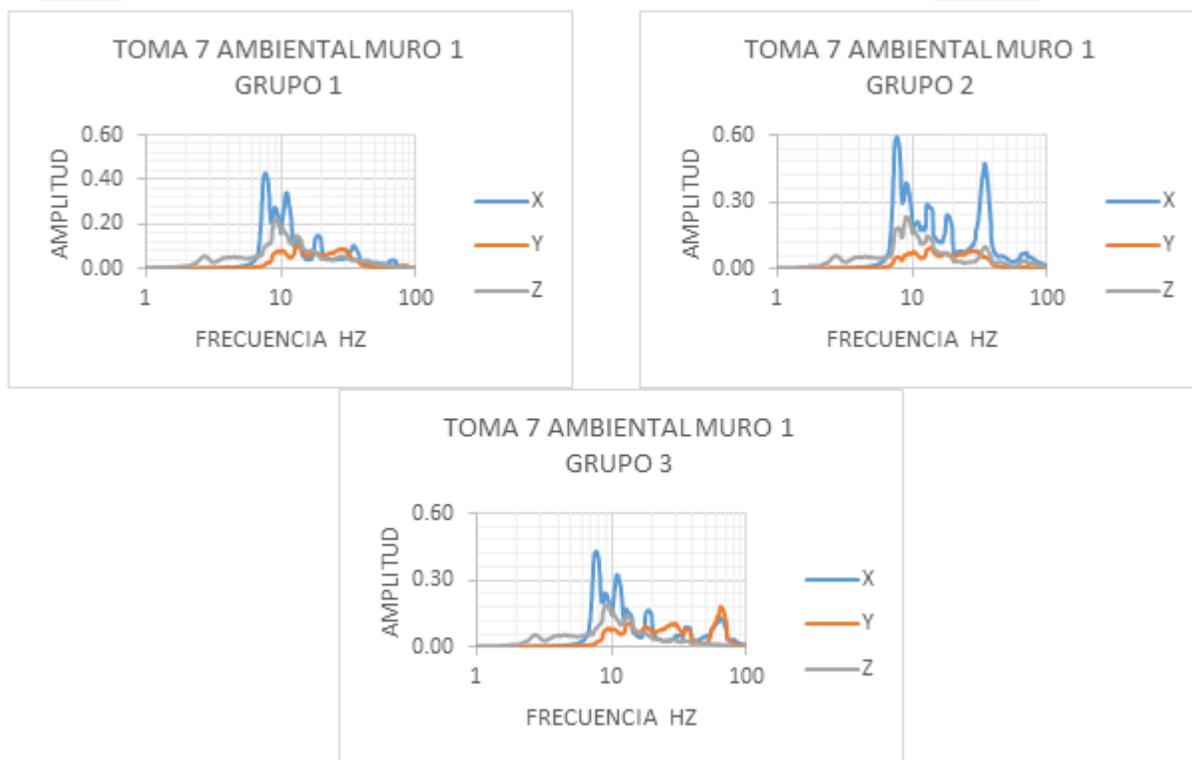


Figura A.22. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.68 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 13.65 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.32 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.68 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 13.60 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 8.88 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.68 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 63.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.34 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

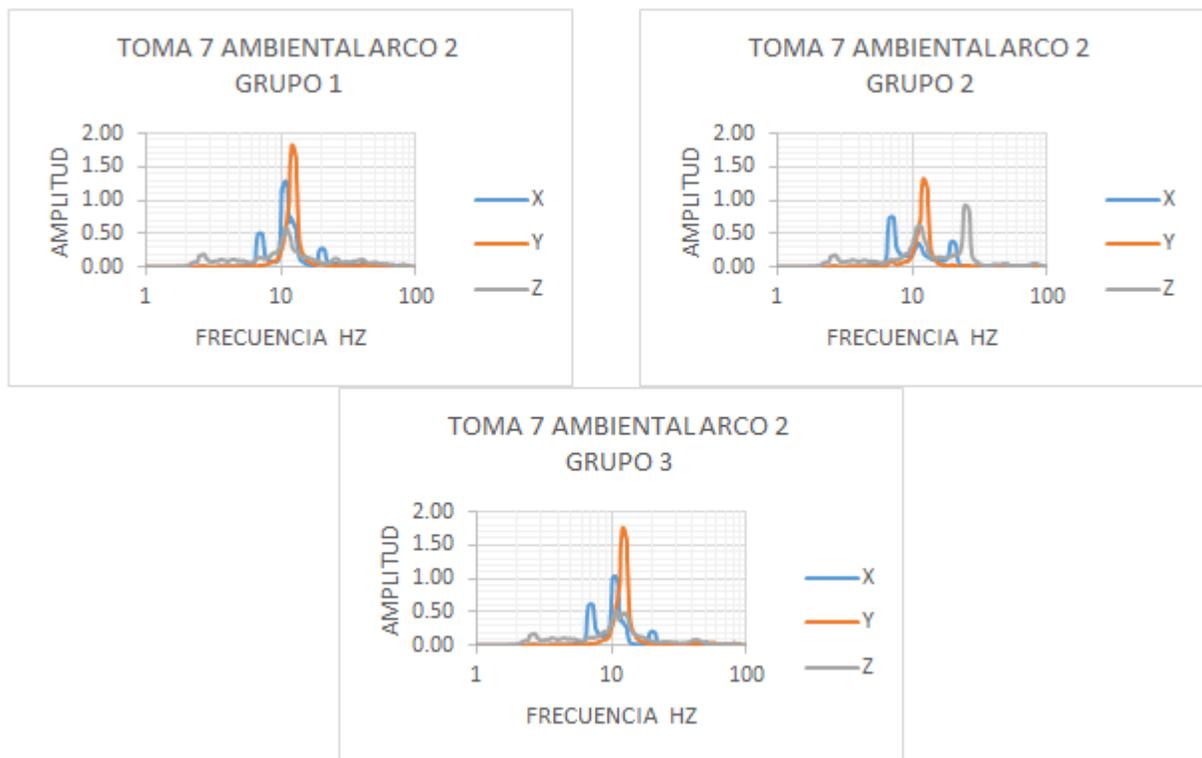


Figura A.23. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.85 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra

una frecuencia natural de 12.04 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 10.89 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 6.89 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.05 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24.58 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.04 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 10.89 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

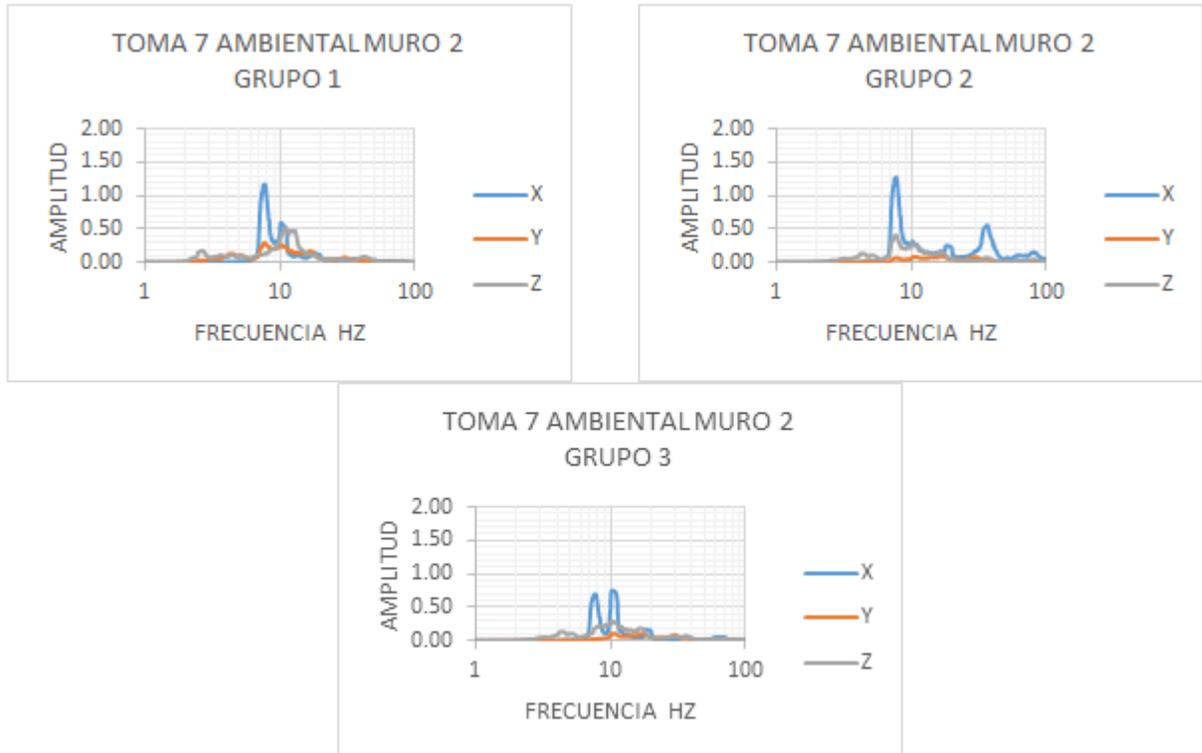
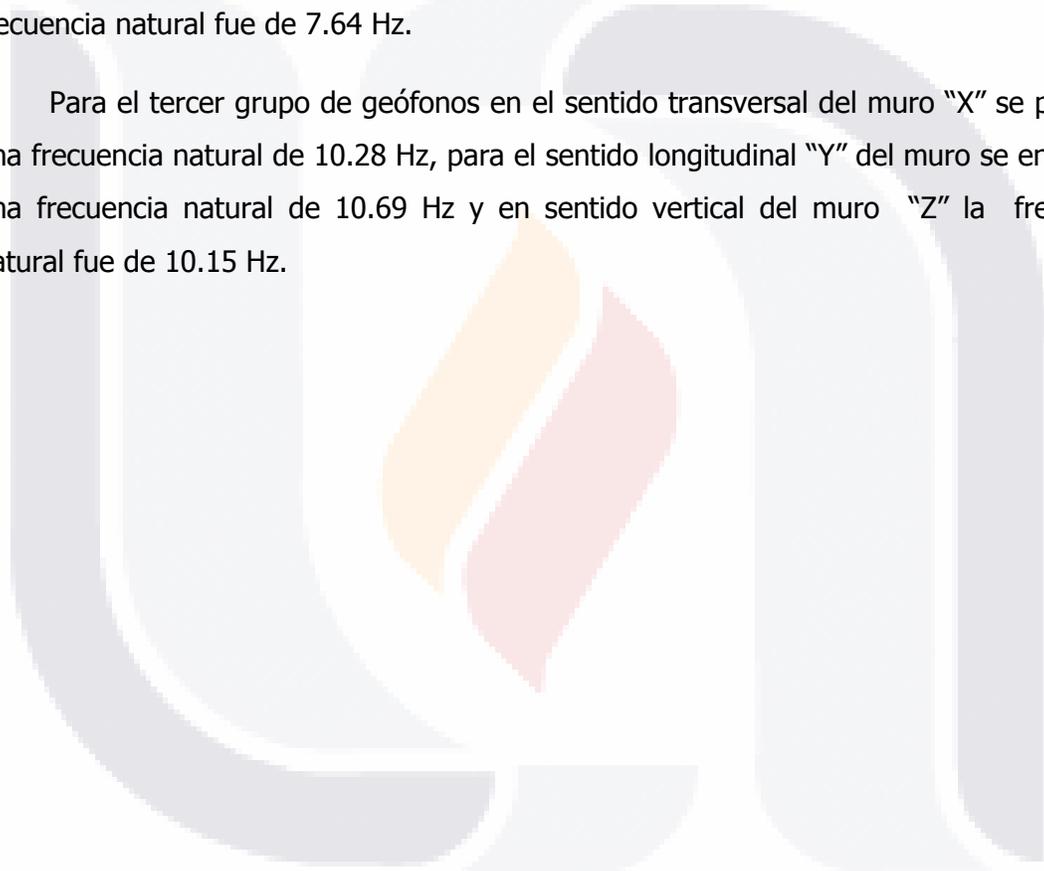


Figura A.24. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.69 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 7.71 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.89 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.69 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 16.34 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 7.64 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 10.28 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 10.69 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 10.15 Hz.



ANEXO "B" FRECUENCIAS NATURALES DETERMINADAS MEDIANTE VIBRACIÓN FORZADA

A continuación se presentan las gráficas resultantes de las mediciones realizadas para cada uno de los elementos construidos durante los ciclos de prueba 1, 2, 3 4 5 6 y 7 y las frecuencias que se derivaron de estas gráficas correspondientes a los ejes X, Y, Z de cada grupo de geófonos.

Para el primer ciclo de degradación, los resultados obtenidos para el arco 1 el cual está orientado en sentido Norte-Sur se presentan en la siguiente gráfica Amplitud-Frecuencia:

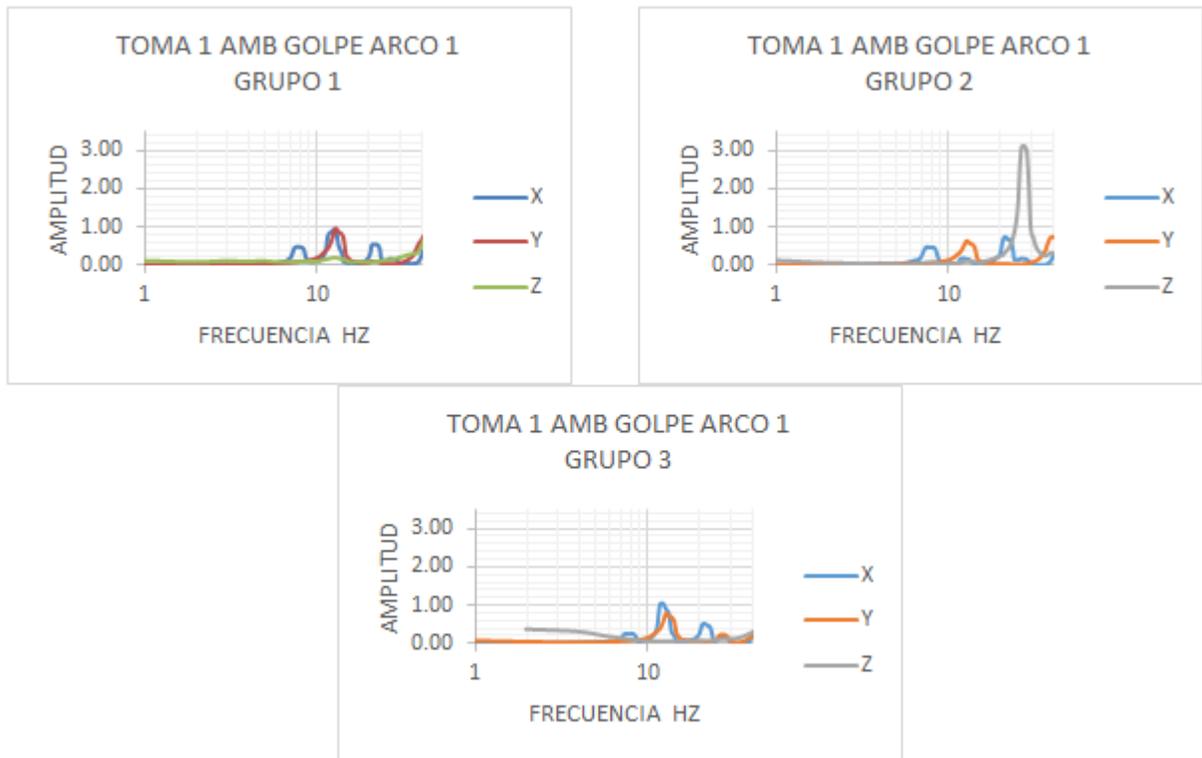


Figura B.1. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el primer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.69 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" no se pudo determinar la frecuencia natural.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 21.50 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 27.30 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.07 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" no se pudo determinar la frecuencia natural.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

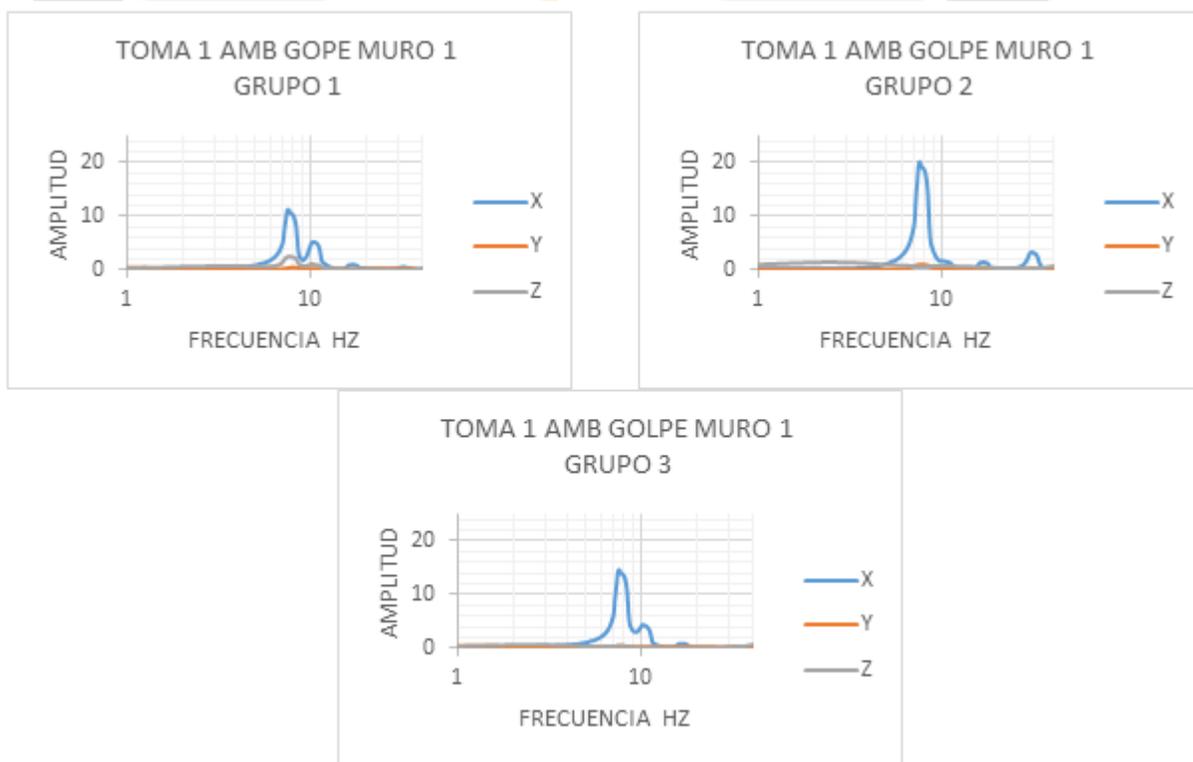


Figura B.2. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el primer ciclo de degradación.

Para primer grupo de geófonos el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.56 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una

frecuencia natural de 7.81 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.57 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 7.81 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.56 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

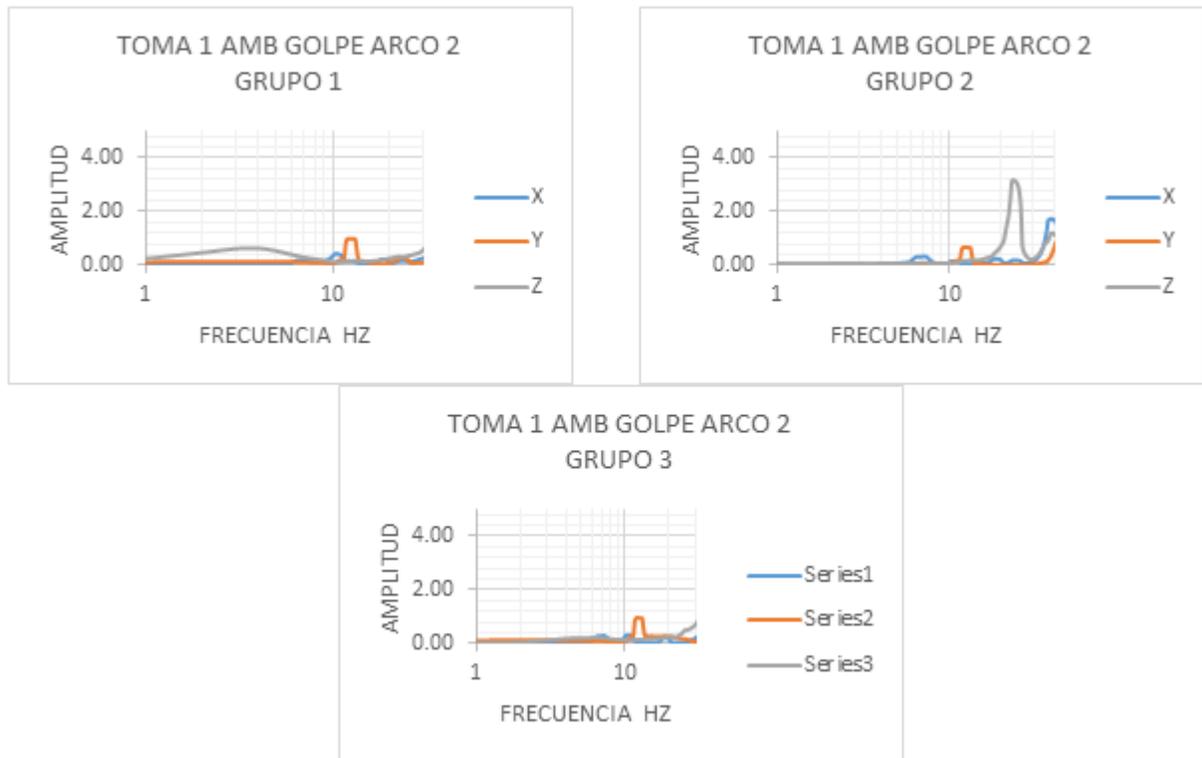


Figura B.3. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el primer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.96 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 6.34 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.96 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.96 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Este del muro la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

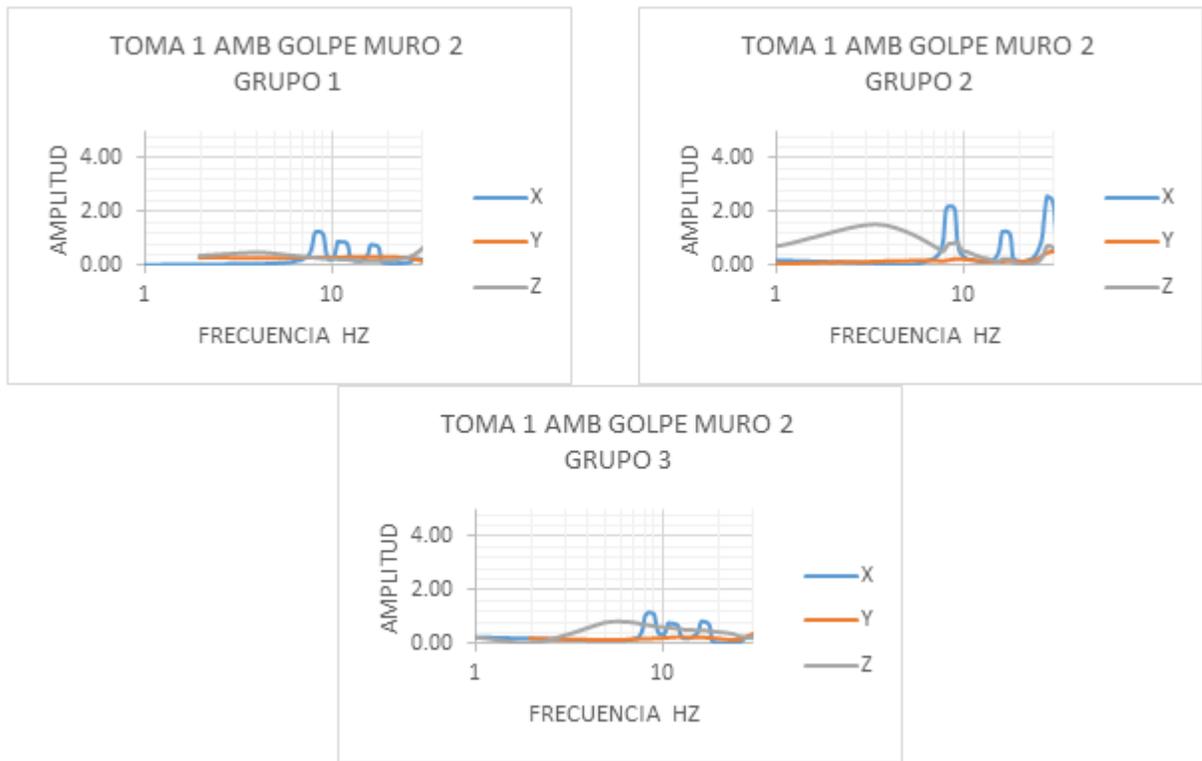


Figura B.4. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el primer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.30 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 28 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.54 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural de 27.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo ciclo de degradación, los resultados obtenidos para el arco 1 el cual está orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

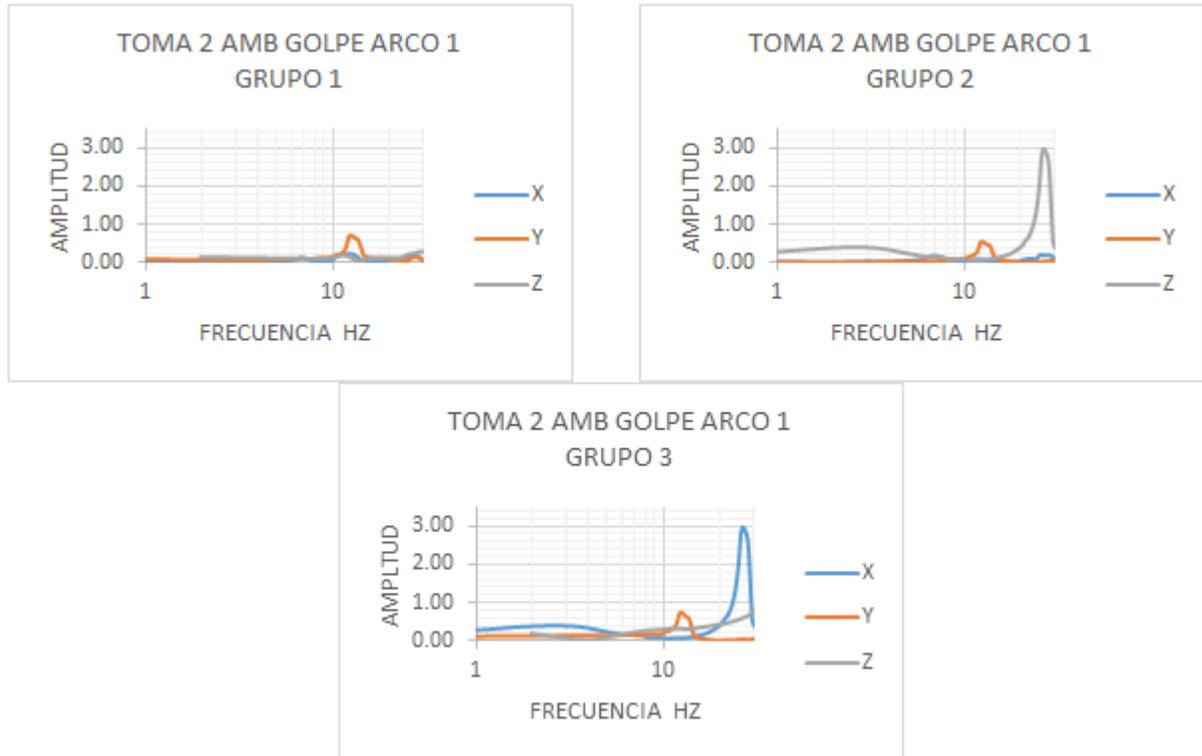


Figura B.5. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.71 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 11.71 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 26 Hz.

Para el tercer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.07 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

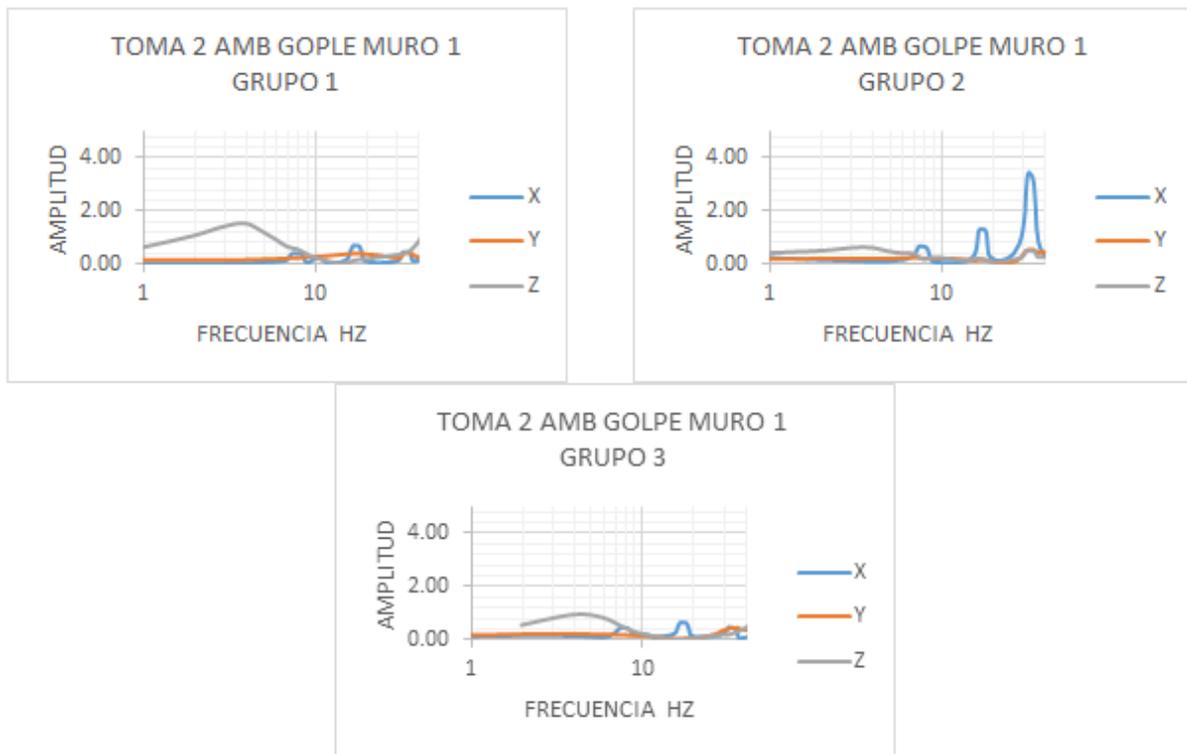


Figura B.6. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 36 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 32 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 33 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 33 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 16 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 36 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

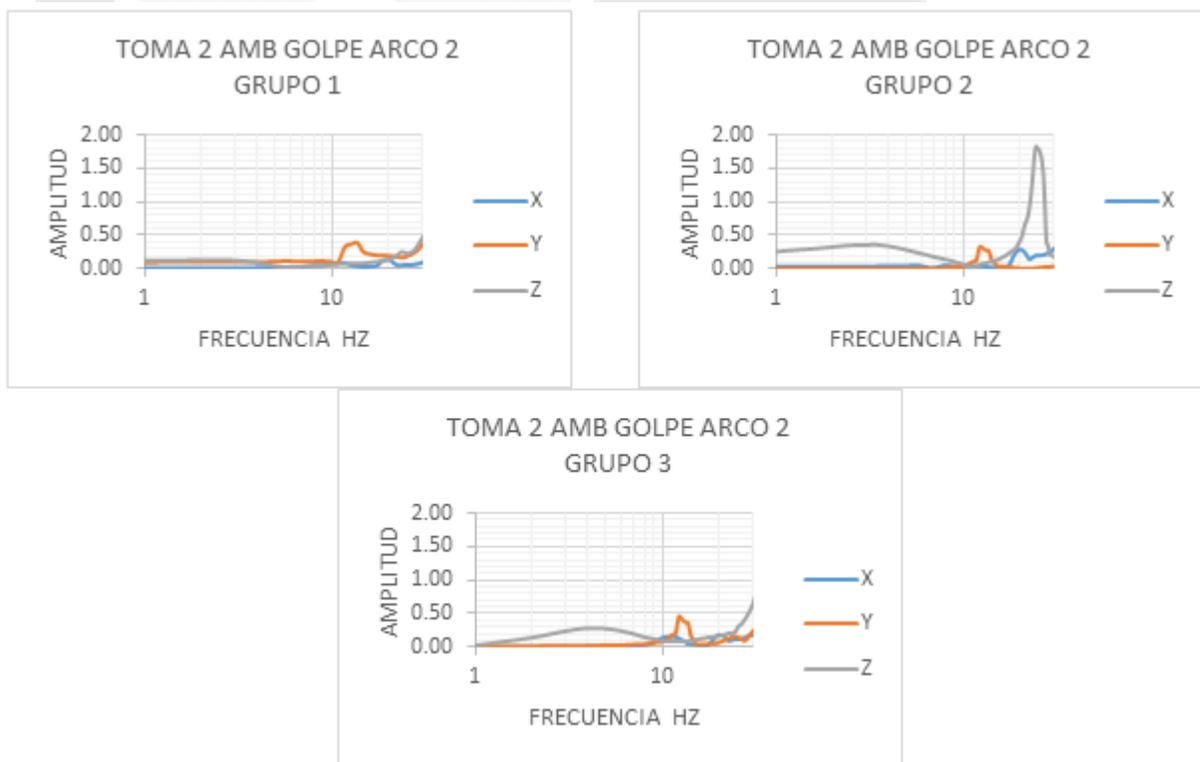


Figura B.7. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 20 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.61 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 23 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

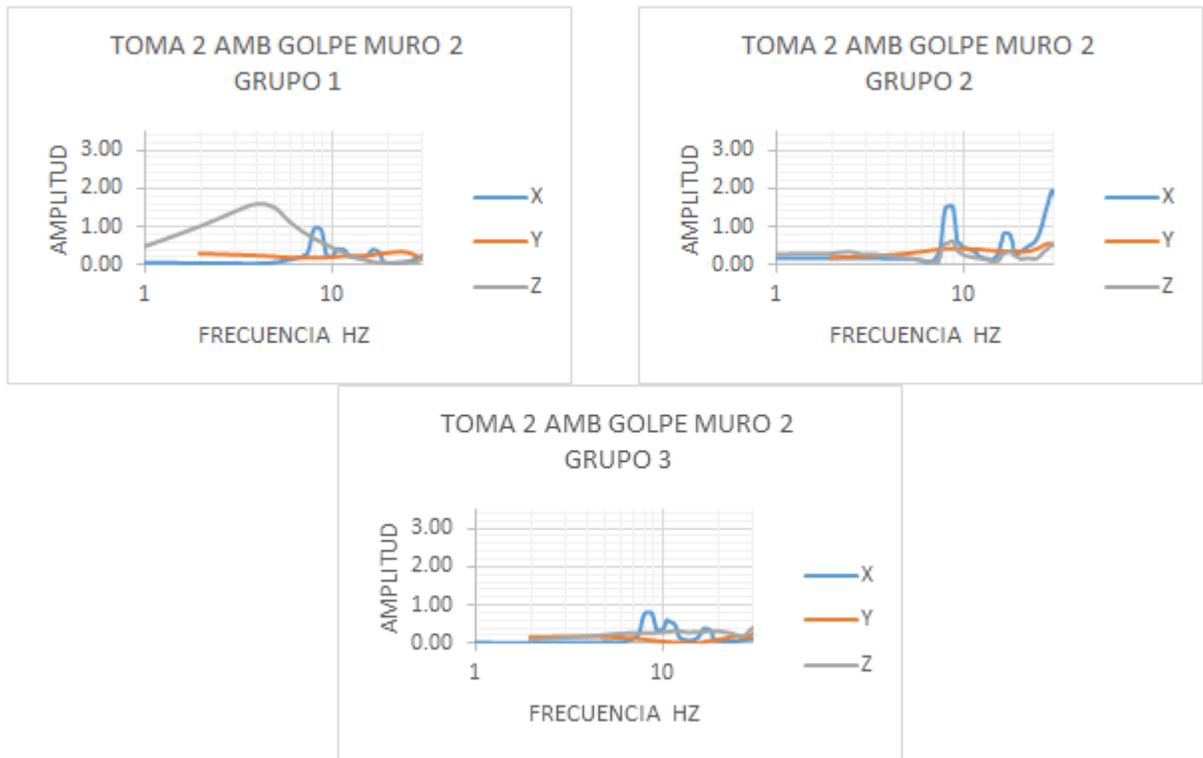


Figura B.8. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el segundo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.50 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 8.70 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.5 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro la frecuencia natural fue 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 8.7 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.3 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

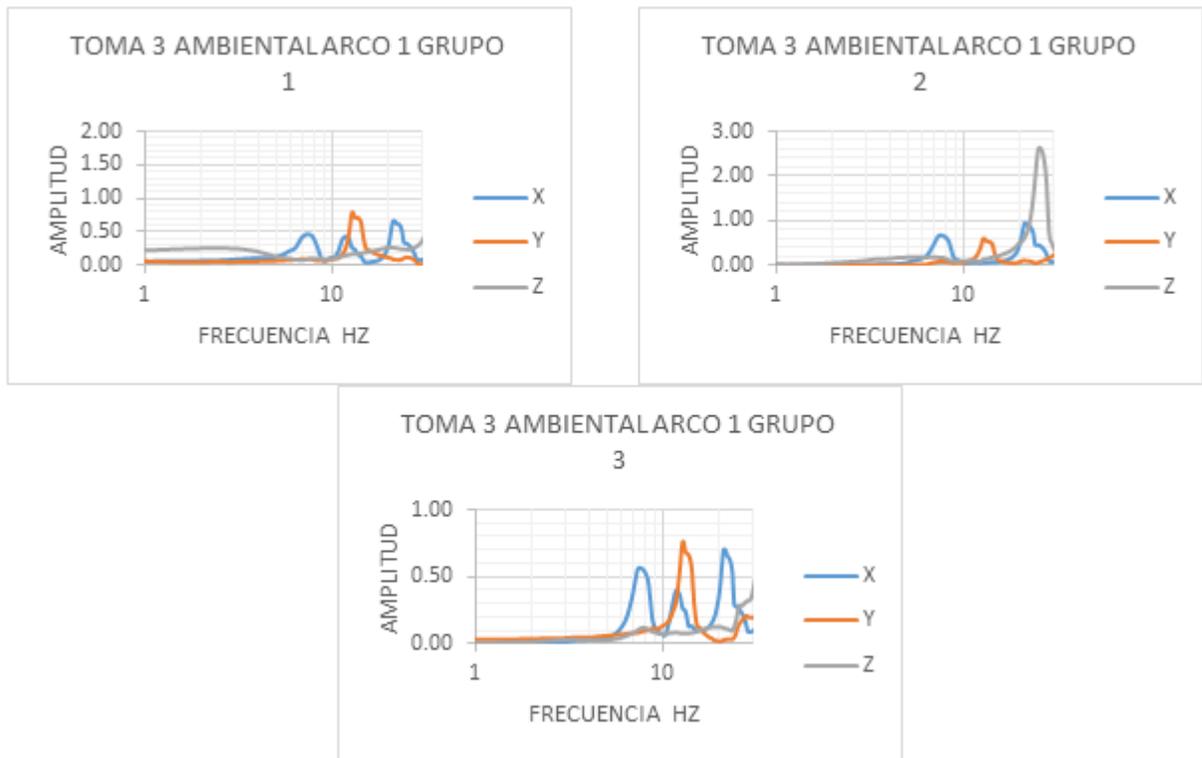


Figura B.9. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 21 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una

frecuencia natural de 12.70 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 22 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.70 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 25 Hz.

Para el tercer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 21 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.70 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 7.81 Hz.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

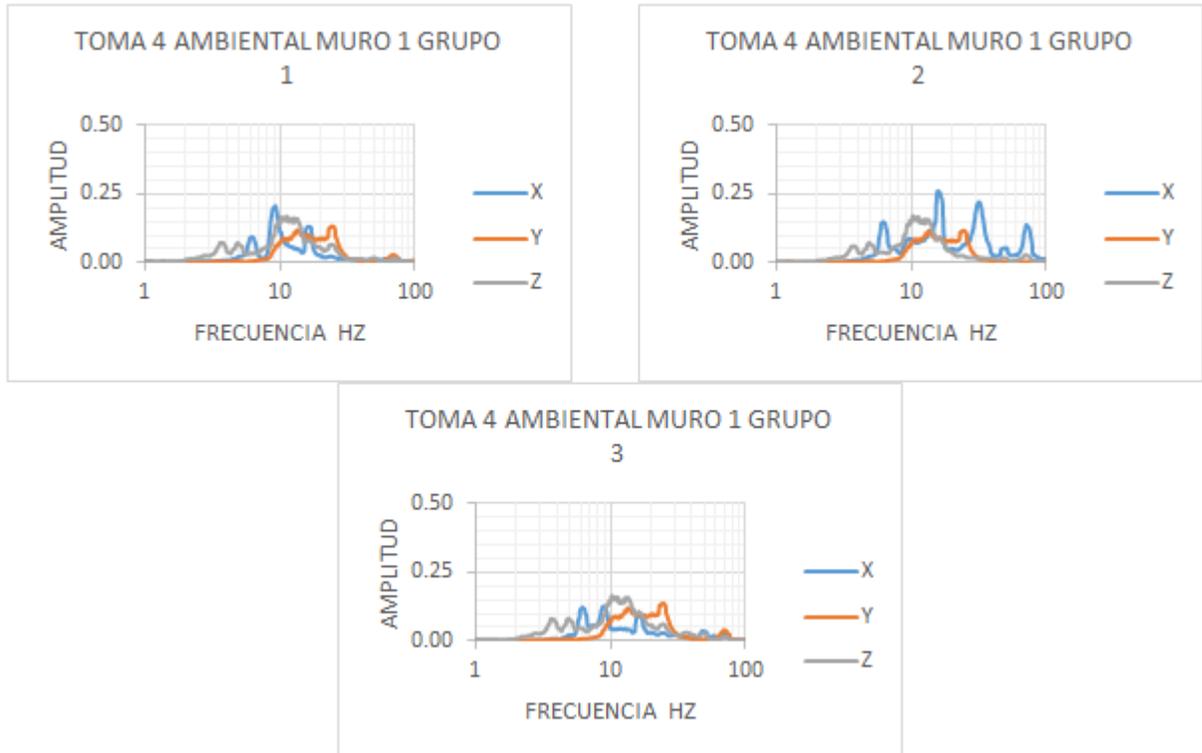


Figura B.10. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 16 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 15 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 8.78 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 23 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

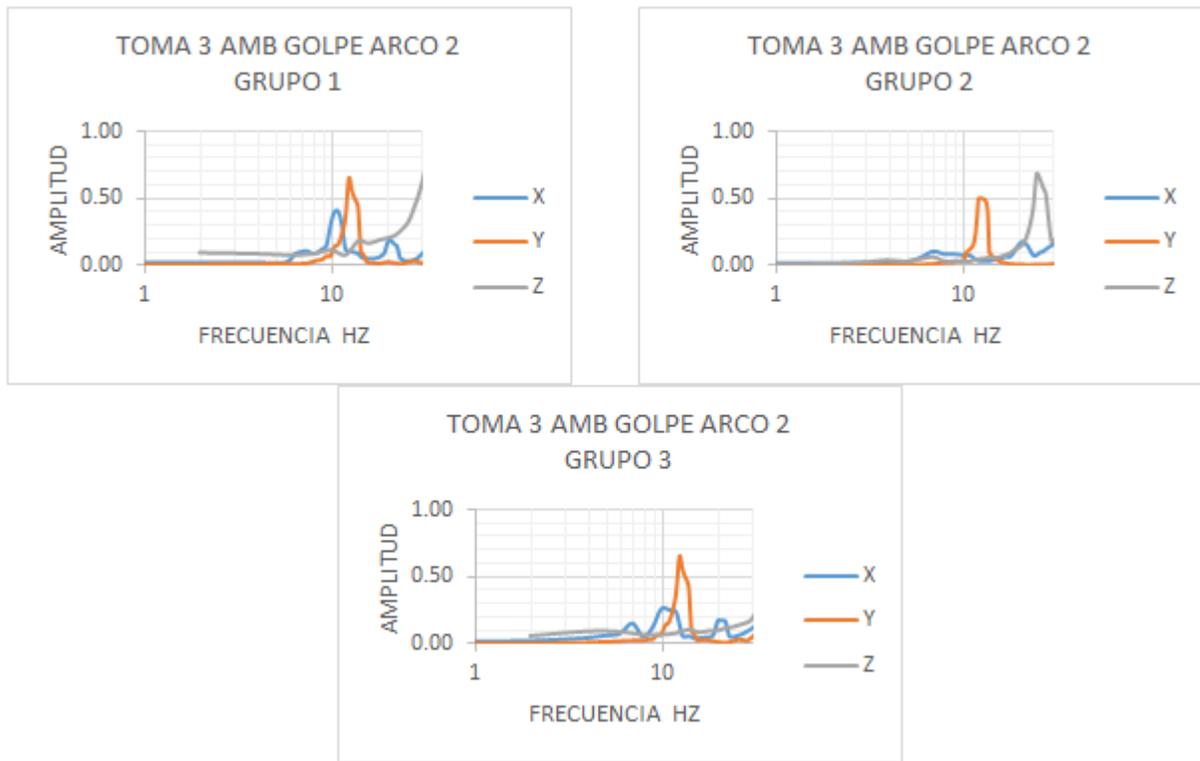


Figura B.11. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.74 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 20 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.96 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 9.70 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

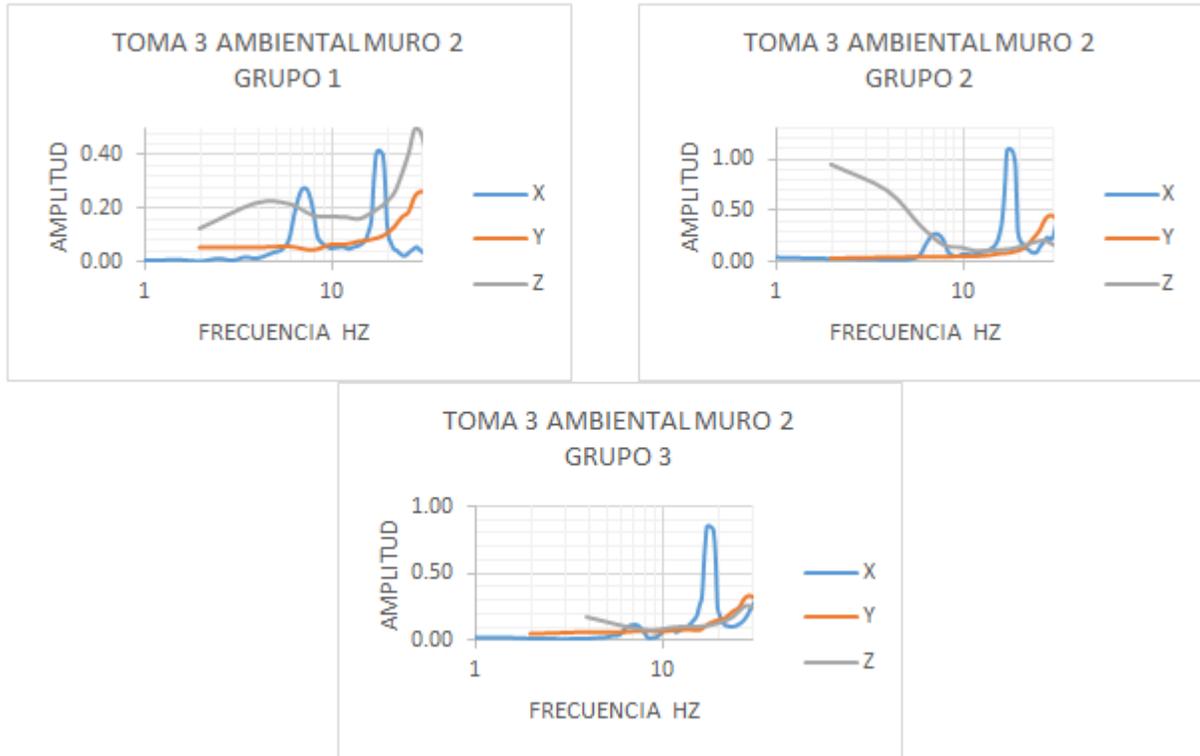


Figura B.12. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el tercer ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.60 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 27 Hz.

Para el segundo grupo de en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.6 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 27 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.6 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra

una frecuencia natural de 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 27 Hz.

Para el cuarto ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

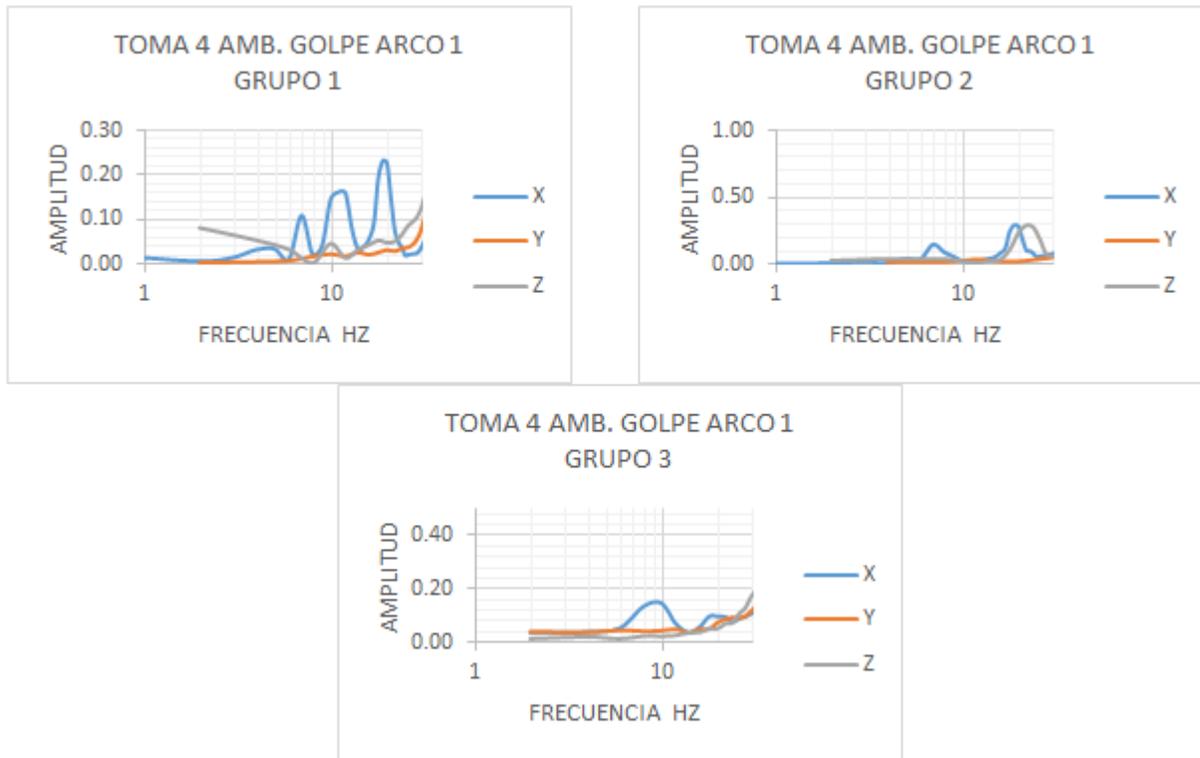


Figura B.13. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 17.57 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco ni se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 21.48 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 9.76 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

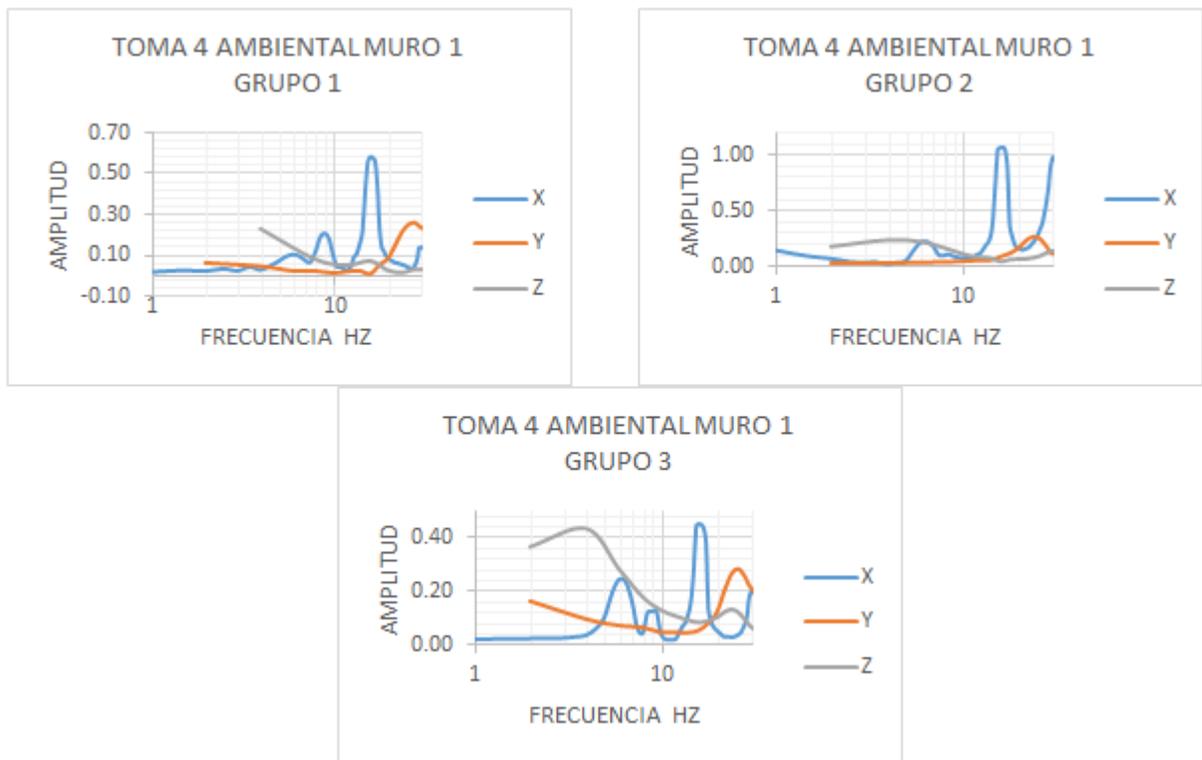


Figura B.14. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 15.63 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 27 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural de fue 15.65 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 16.11 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se

encuentra una frecuencia natural de 23.44 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 15.63 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 25.40 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 23.44 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

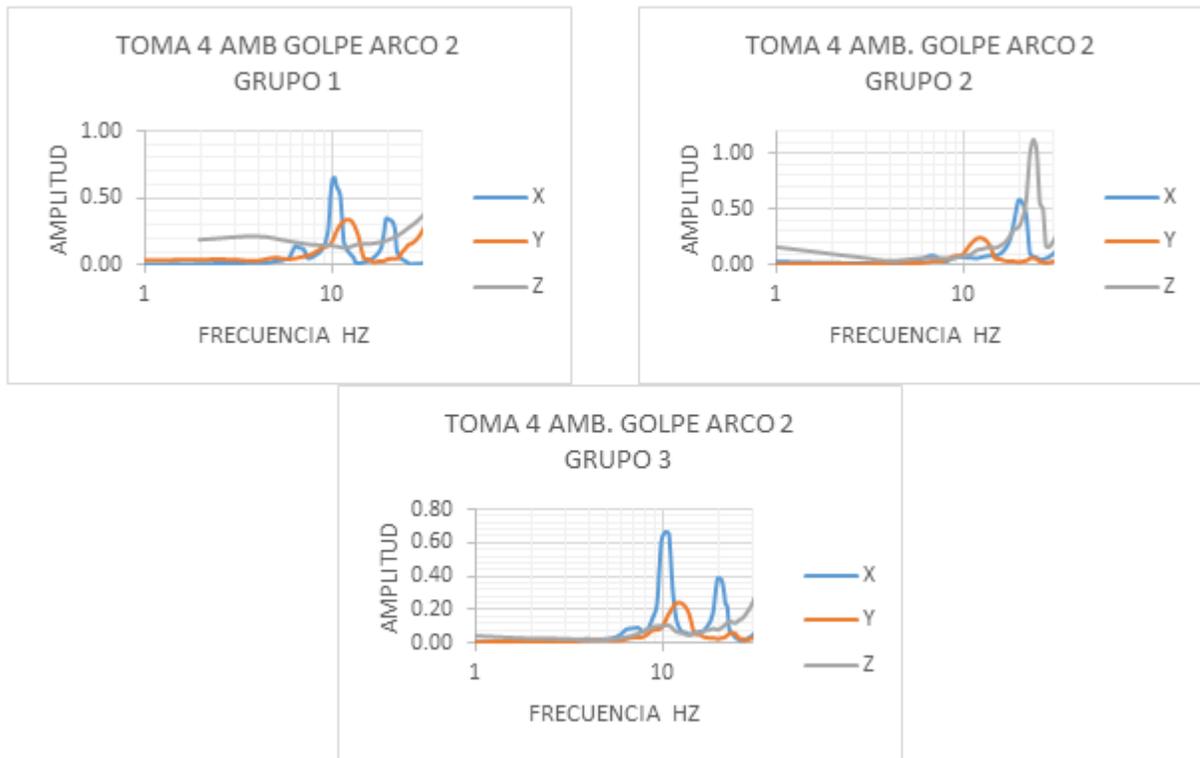


Figura B.15. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de degradación en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.71 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 21.48 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.72 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 23.44 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.25 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.71 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

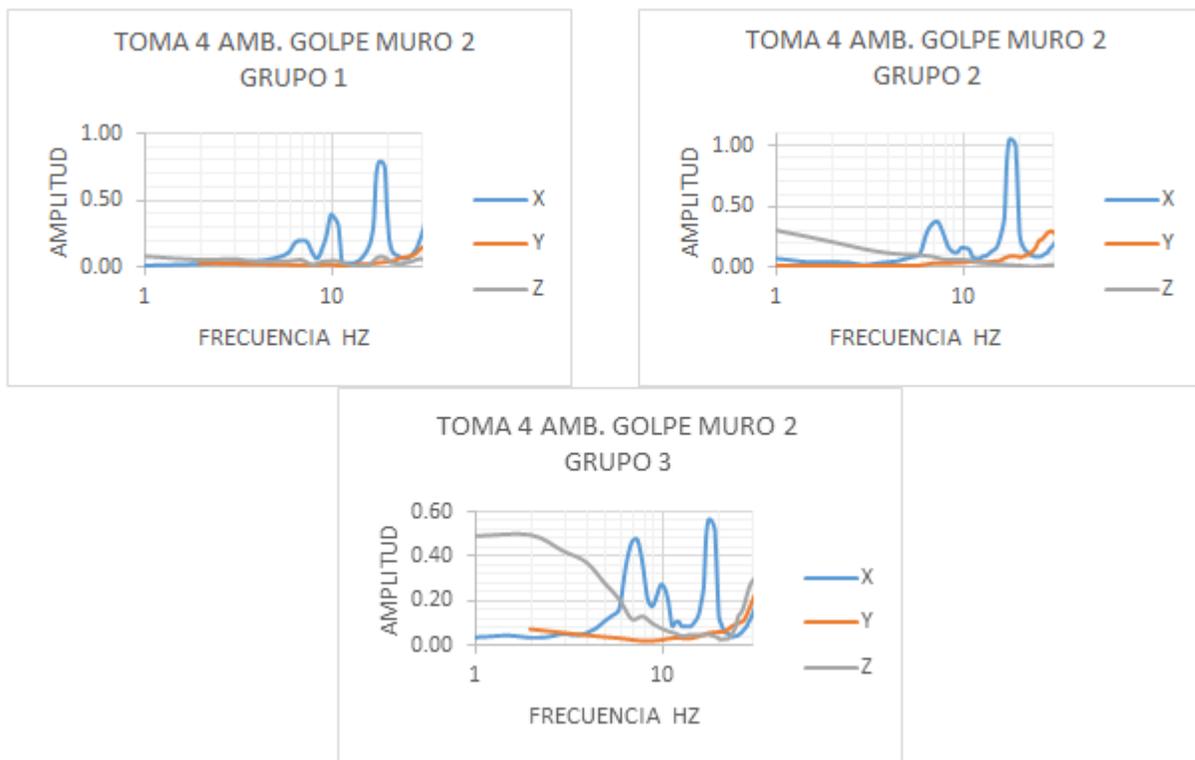


Figura B.16. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el cuarto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo

determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 18.5 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.58 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.57 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el sexto ciclo de degradación en el arco 1 la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

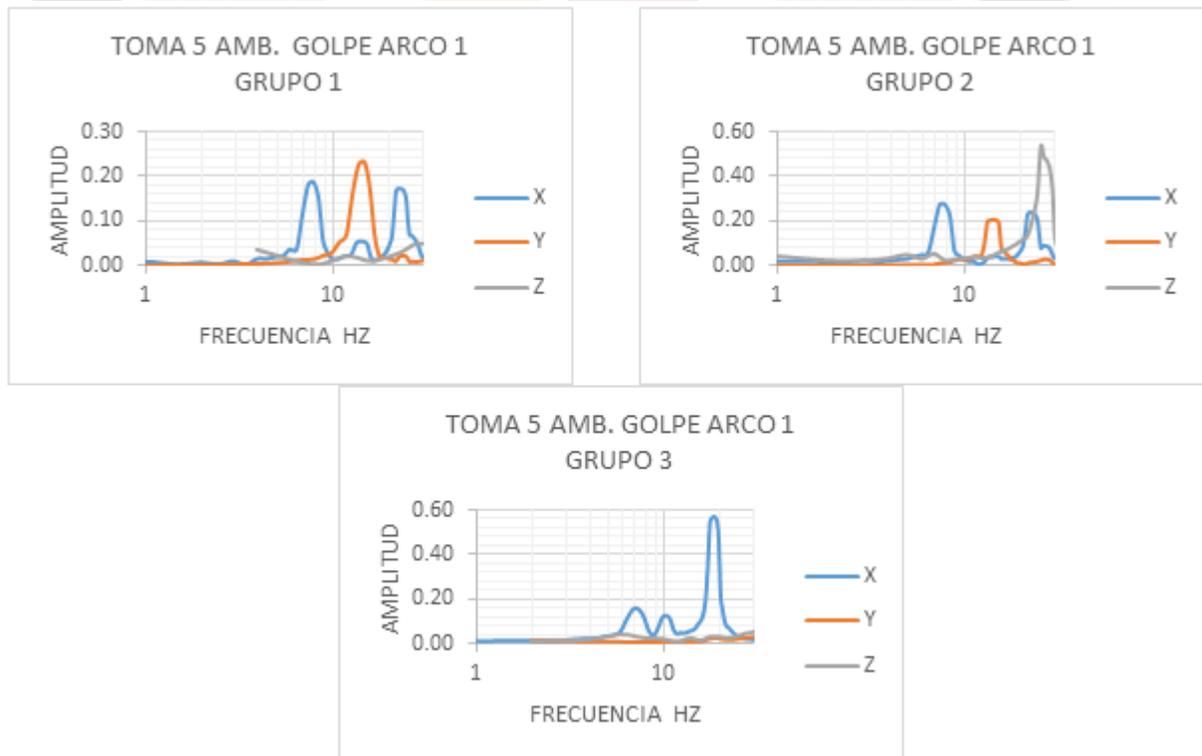


Figura B.17. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.81 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.65 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 27.34 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.81 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.16 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 25 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

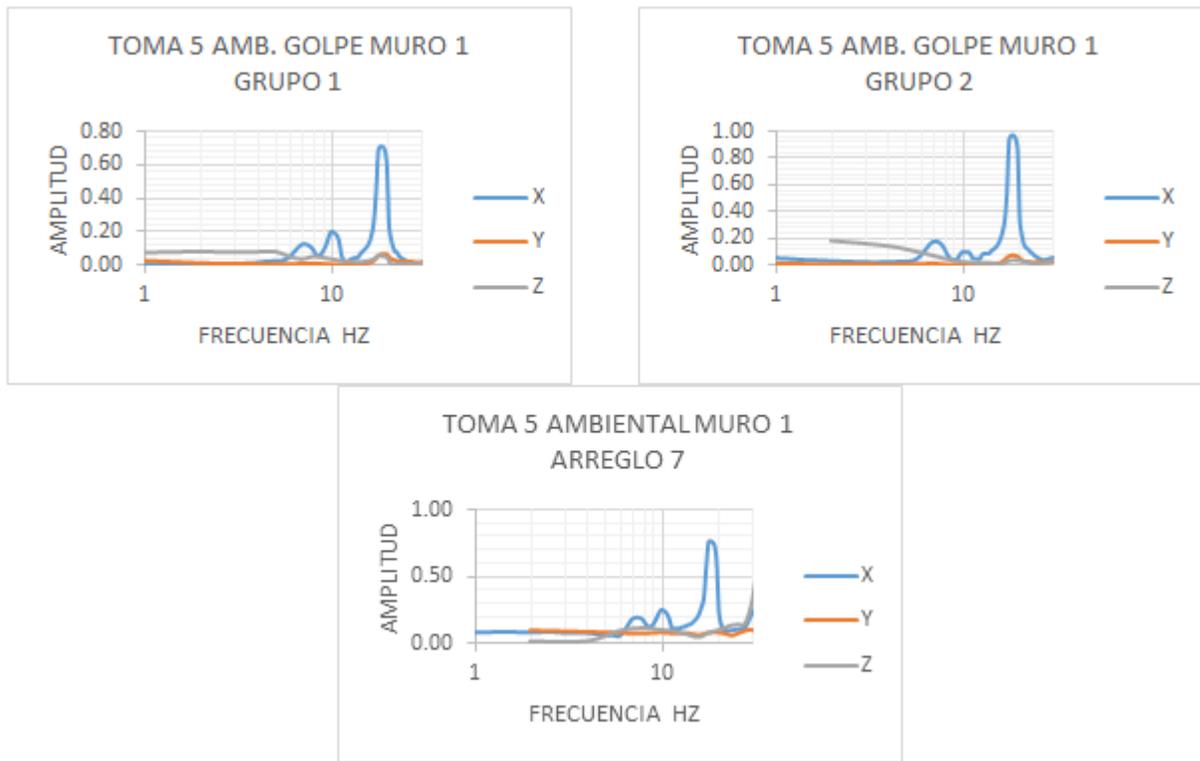


Figura B.18. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 18.58 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 17.57 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 18.58 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 17.57 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 17.57 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

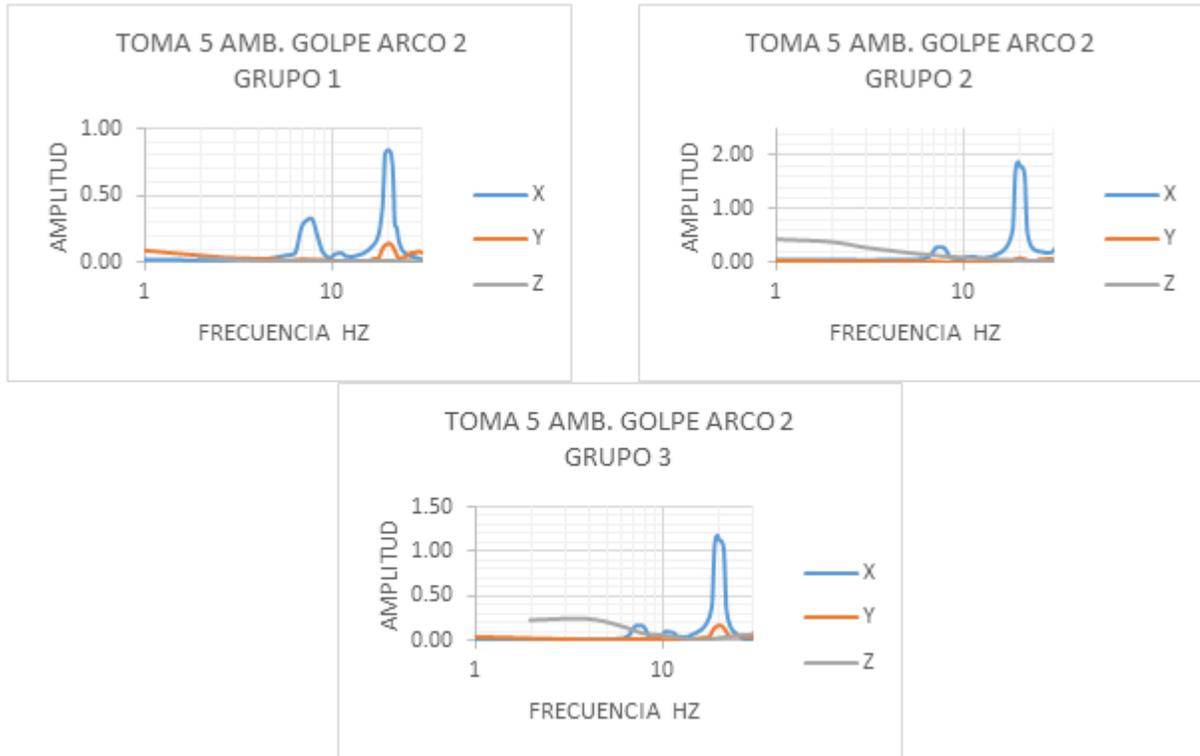


Figura B.19. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 19.53 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra

una frecuencia natural de 19.53 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste para el primer grupo de geófonos correspondiente a la pila Este del arco la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

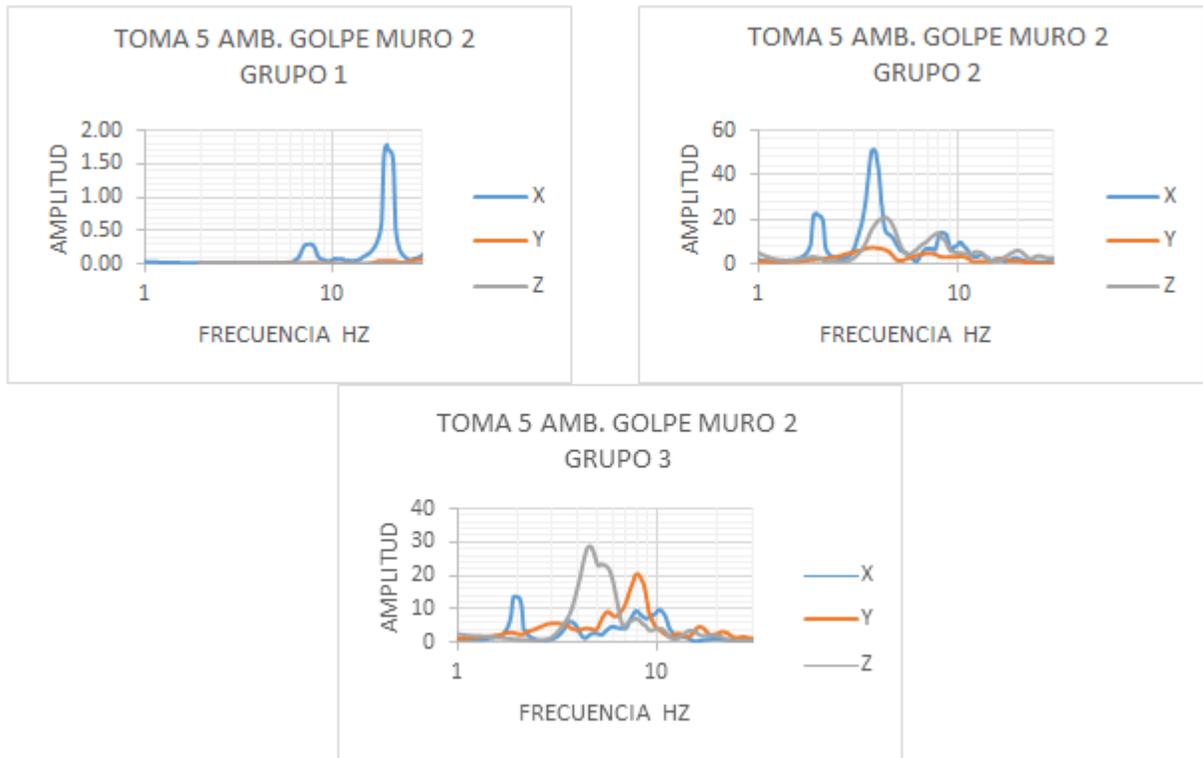


Figura B.20. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el quinto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural de 13.26 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 3.78 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 4.29 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 3.72 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 1.95 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 8 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 4.69 Hz.

Para el sexto ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

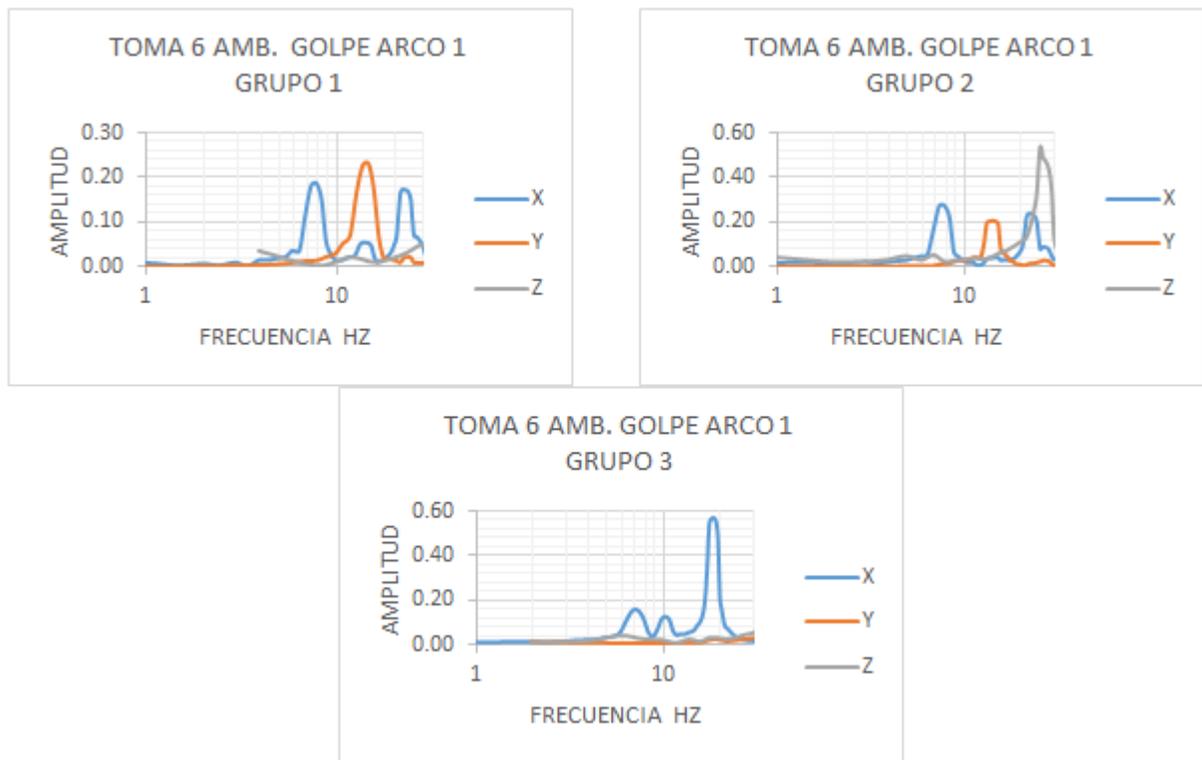


Figura B.21. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.81Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 14.64 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 27 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 7.81 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se

encuentra una frecuencia natural de 14.10 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 25 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

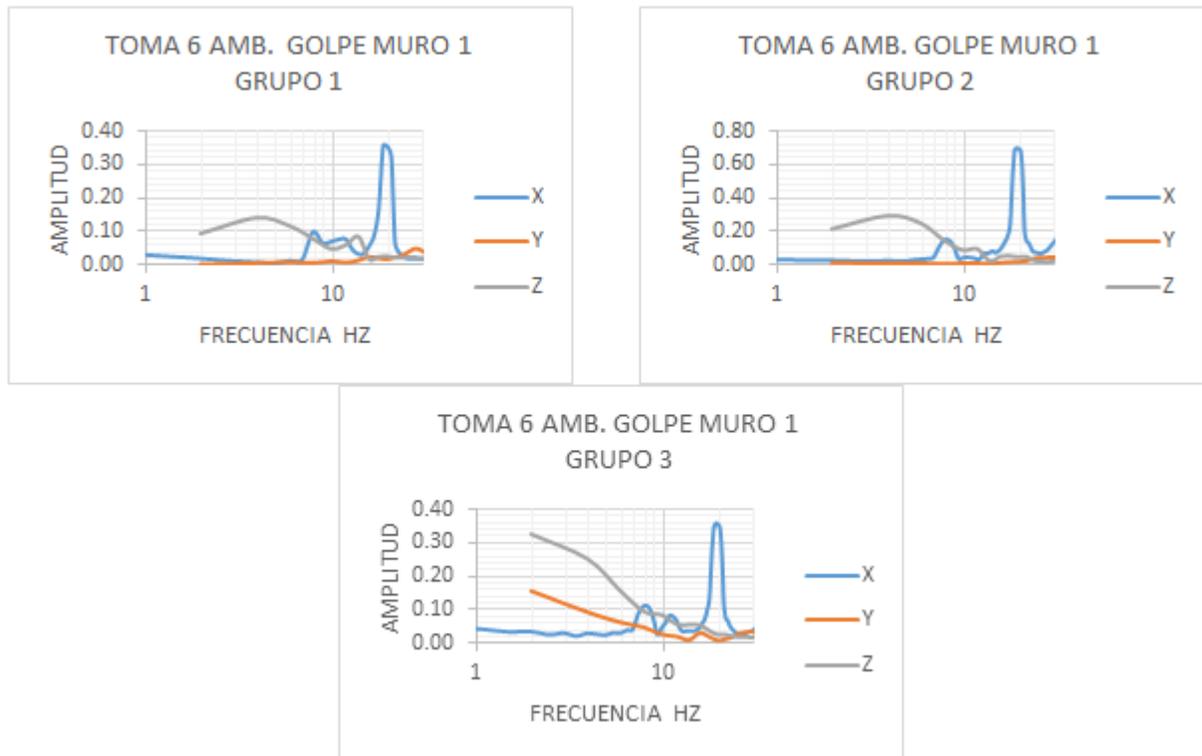


Figura B.22. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 27.34 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 13.67 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 19 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

Para el tercer grupo de geófonos el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 7.68 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una frecuencia natural de 63.83 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 9.34 Hz.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

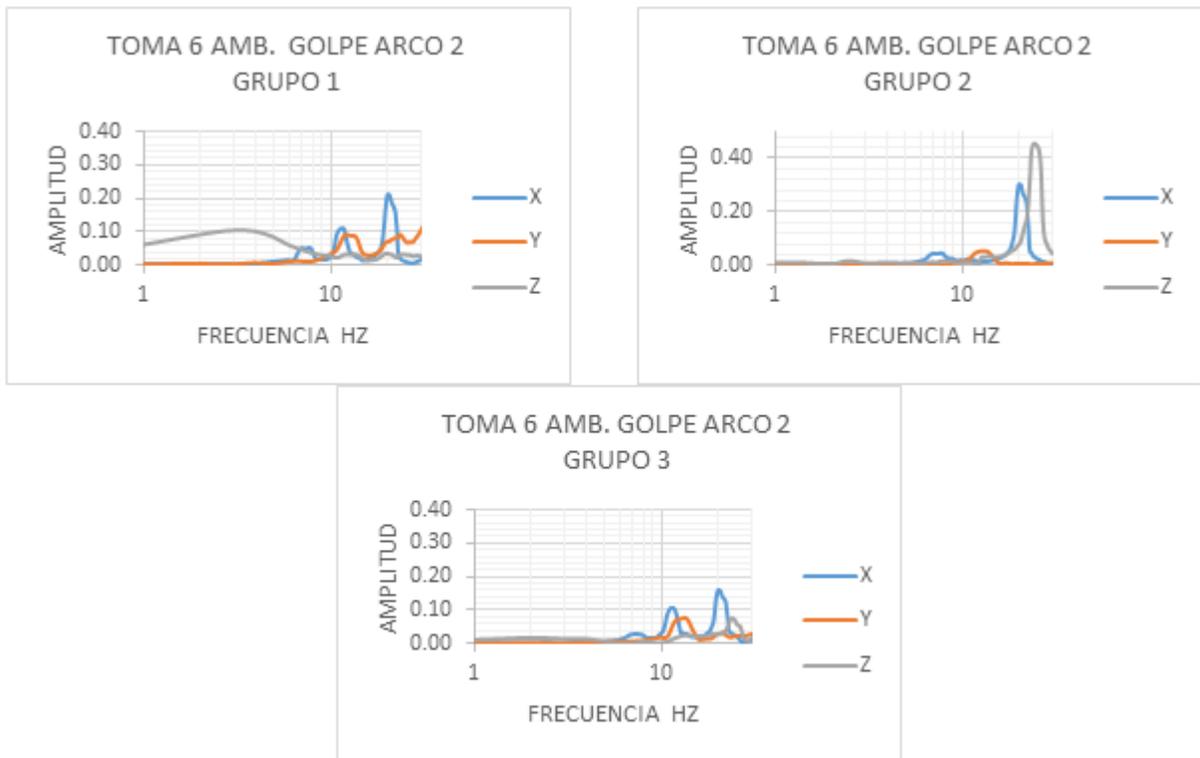


Figura B.23. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 20.50 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra

una frecuencia natural de 11.72 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 19.53 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 20 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24.40 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 20.50 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 13.67 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 24.40 Hz.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

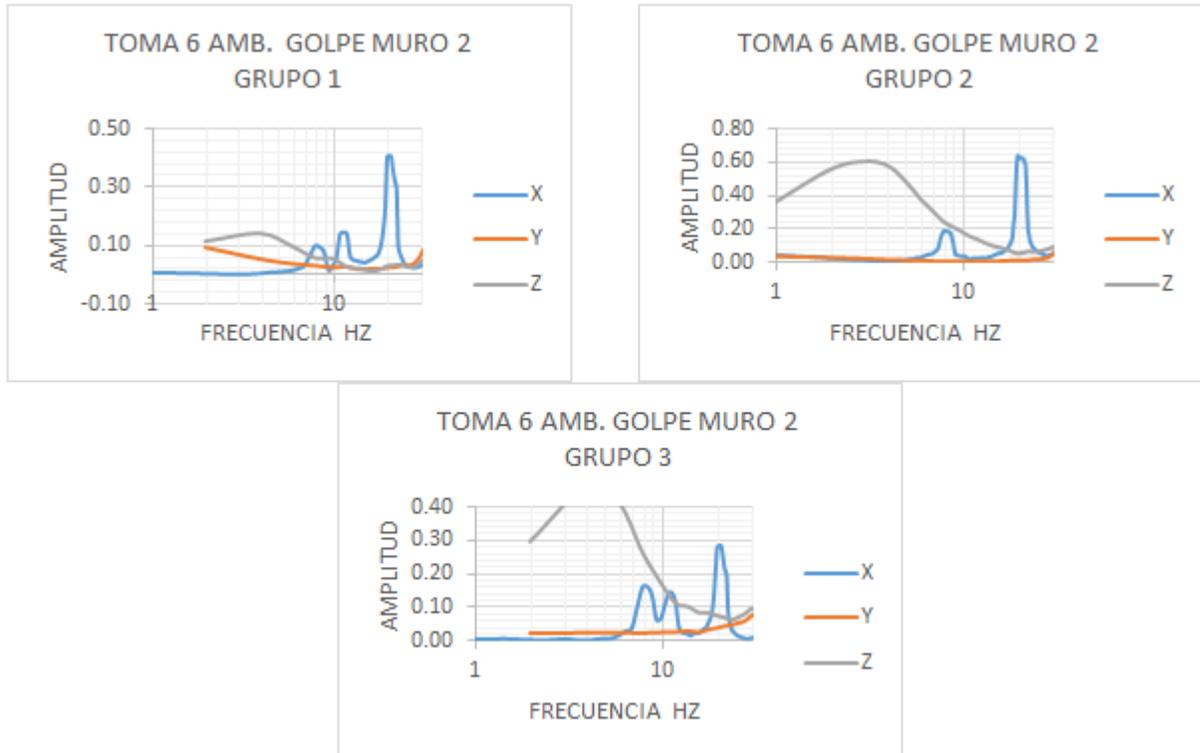


Figura B.24. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el sexto ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 20 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no pudo ser determinada.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue determinada.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 20.51 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se pudo determinar la frecuencia natural de y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no fue determinada.

Para el séptimo ciclo de degradación en el arco 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

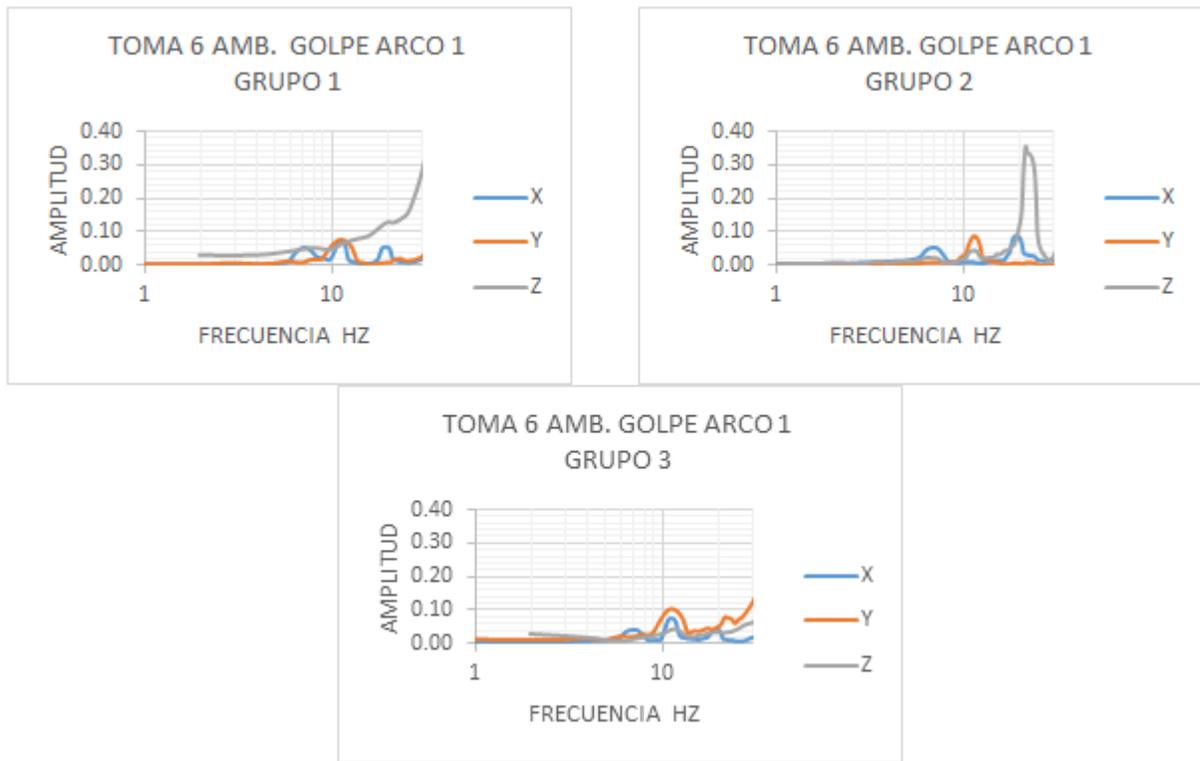


Figura B.25. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 1 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.74 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.71 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no fue determinada.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 19.53 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 11.23 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 21.48 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 11.23 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 10.74 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se pudo determinar.

En el muro 1 orientado en sentido Norte-Sur la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

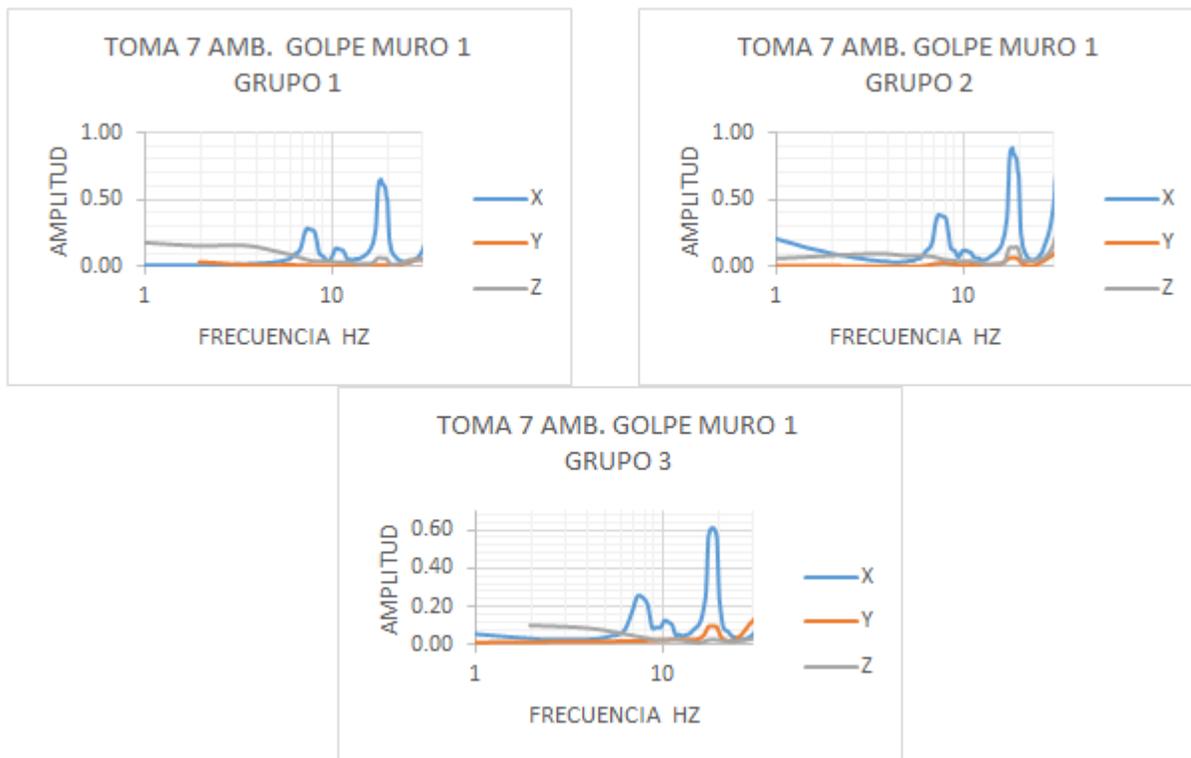


Figura B.26. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 1 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.31 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no se determinó la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 17.57 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.31 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro la frecuencia natural fue de 18.55 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 17.58 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro se encuentra una

frecuencia natural de 17.57 Hz y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se determinó.

En el arco 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

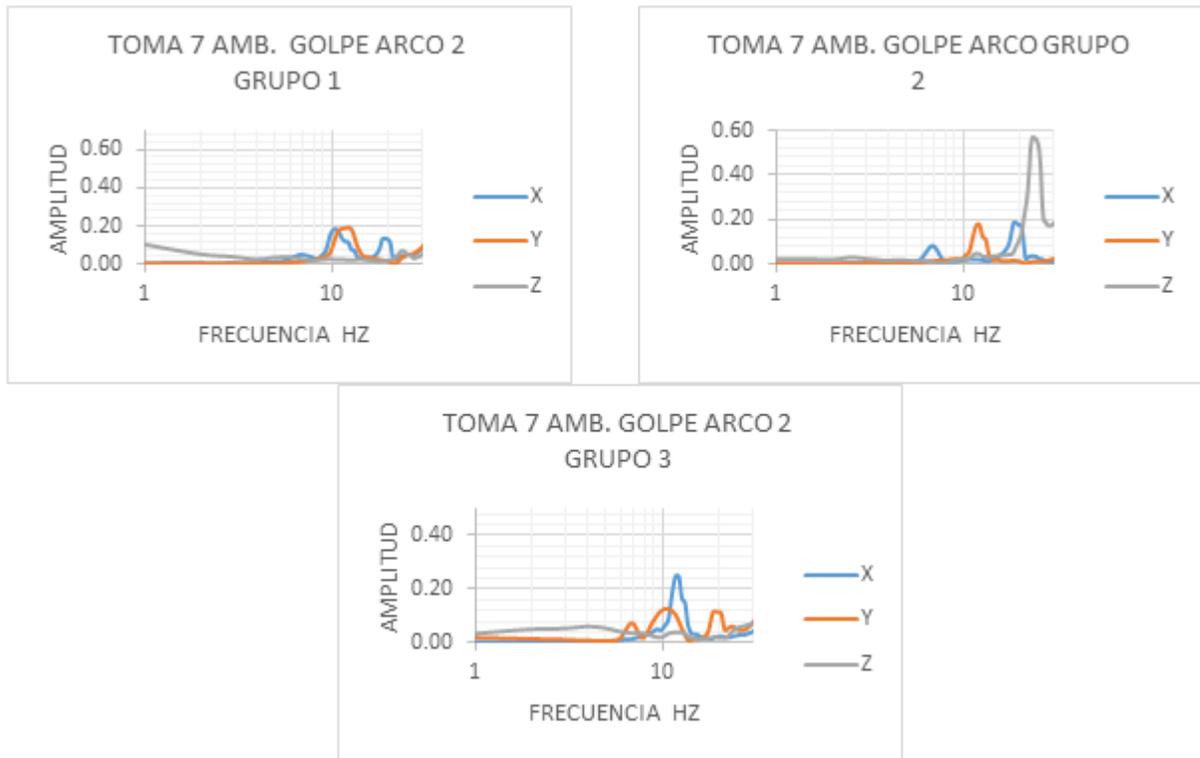


Figura B.27. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el arco 2 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 10.74 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.69 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 2.44 Hz.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 12.21 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural fue de 23.44 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del arco "X" se presenta una frecuencia natural de 12.21 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del arco se encuentra una frecuencia natural de 10.74 Hz y en sentido vertical del arco "Z" la frecuencia natural no se determinó.

En el muro 2 orientado en sentido Este-Oeste la gráfica Amplitud-Frecuencia es la siguiente:

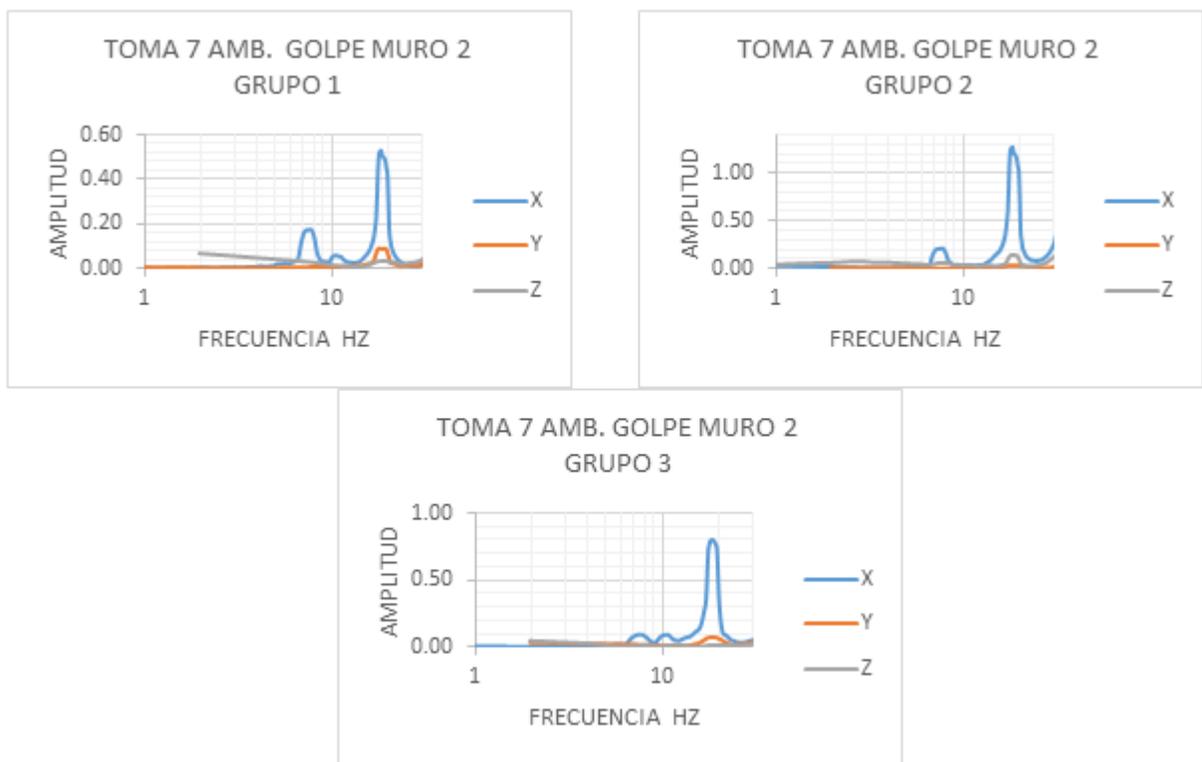


Figura B.28. Gráfica Amplitud-Frecuencia para el muro 2 en el séptimo ciclo de degradación.

Para el primer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.31 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro la frecuencia natural fue de 17.57 y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no pudo ser determinada.

Para el segundo grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.31 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro no

se determinó la frecuencia natural y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural fue de 18.55 Hz.

Para el tercer grupo de geófonos en el sentido transversal del muro "X" se presenta una frecuencia natural de 18.55 Hz, para el sentido longitudinal "Y" del muro la frecuencia natural fue de 18.53 y en sentido vertical del muro "Z" la frecuencia natural no se determinó.

