



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

INTERACIÓN SUELO ESTRUCTURA MEDIANTE MODELO SIMPLIFICADO

KATYA ALEJANDRA MÉNDEZ LUCERO

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

DR. CHRISTIAN LEDEZMA ARAYA

Santiago de Chile, junio, 2022.

A Dios por enseñarme que los sueños pueden ser realidad, así como a mis padres, mi abuela, hermanos y sobrinos, quienes me apoyaron durante todo mi proceso de estudio.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la sabiduría, salud y la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en la Pontificia Universidad Católica de Chile, y de esta manera permitirme especializarme en el área de Estructuras y Geotécnica.

A mi padre **Gabriel Méndez** y mi abuela **Paulina Recinos**, por ser mi mayor motivación para seguir estudiando, mi apoyo en cada una de mis decisiones y mi mejor ejemplo de vida.

A la **Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo** por haberme otorgado la beca “PROGRAMA DE BECAS DE COOPERACIÓN HORIZONTAL REPÚBLICA DE CHILE CONVOCATORIA AÑO 2020”; además agradezco el apoyo recibido por parte de la entidad gubernamental de mi país el **Ministerio de Obras Públicas y de Transporte de El Salvador**, y en especial a la **Dirección de Investigación y Desarrollo de la Obra Pública**.

A mi profesor guía **Christian Ledezma** por todo el soporte técnico y su dedicación en instruirme en conocimiento durante toda la Actividad de Graduación. De manera particular, además agradezco a **Francisco Pinto** por su colaboración y buena disposición.

Y finalmente agradezco a mis compañeros y amigos por la ayuda que cada uno de ellos me brindo durante el desarrollo del Magister en Ingeniería Estructural y Geotécnica.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	2
RESUMEN	4
ABSTRACT	6
I. INTRODUCCIÓN	8
I.1 Generalidades	8
I.2 Objetivo General.....	11
I.3 Objetivos Específicos.....	11
II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	13
II.1 Modelación Estructural.....	14
III. ALTERNATIVAS DE MODELACIÓN	18
III.1 Modelo Base.....	18
III.2 Modelo I.....	19
III.3 Modelo II.....	20
III.3.1 Perfil Estratigráfico en DEEPSOIL.....	20
III.3.1.2 Análisis con Registro de Desplazamientos en SAP2000.....	30
III.4 Modelo III.....	33
IV. TIPOS DE ANÁLISIS	35
IV.1 Análisis Modal.....	35
IV.2 Análisis Tiempo Historia Modal.....	37
V. RESULTADOS DE ANALISIS DEL MODELO BASE	39
V.1 Respuesta de Desplazamientos de Piso y Subterráneos	39
V.2 Respuesta Comparativas de Desplazamientos de Piso y Subterráneos.....	43

V.3	Respuesta de Cortante Basal, Momentos Flectores y Drift de Entrepiso....	49
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
VI.1	Conclusiones.....	57
VI.2	Recomendaciones	61
	BIBLIOGRAFIA	62
	A N E X O S.....	64
	Anexo A: gráficas de desplazamientos	65

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla II.1. Valores de Masa y Rigidez concentradas por piso y subterráneos	14
Tabla III.1. Alternativas y Criterios de modelación aplicadas al Modelo base.	18
Tabla III.2. Propiedades de estratigrafía usada en DEEPSOIL	24
Tabla III.3. Características de los registros utilizados en el análisis DSSI	27
Tabla IV.I. Períodos y porcentaje de participación de masas modales.	36
Tabla V.1. Resultados de Análisis (DSSI) para Rapel	41
Tabla V.2. Resultados de Análisis (DSSI) para Cerro EL Roble	41
Tabla V.3. Resultados de Análisis (DSSI) para Santa Lucía.	42
Tabla V.4. Resultados de Análisis (DSSI) para Cerro Viejo.	42
Tabla V.5. Resultados de Análisis (DSSI) para Pangué.	43
Tabla V.6. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para Rapel	44
Tabla V.7. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para Cerro El Roble.	45
Tabla V.8. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para Santa Lucía	46
Tabla V.9. Resultados Comparativos Análisis (DSSI) para Cerro Viejo	47
Tabla V.10. Resultados de Comparativos Análisis (DSSI) para Pangué	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura II-1: Vista 2D del modelo simplificado del edificio en estudio	15
Figura II-2. Propiedades definidas para los “links” del modelo base.	16
Figura II-3. Definición de las propiedades de los “links”	17
Figura III-1. Muestra la definición del tipo de análisis en DEEPSOIL.	22
Figura III-2. Perfil estratigráfico utilizado en DEEPSOIL.....	25
Figura III-3. Perfil estratigráfico analizado en DEEPSOIL	26
Figura III-4. Selección del registro de aceleraciones para el análisis.	28
Figura III-5. Selección de las ecuaciones del módulo de corte y estratos a analizar. .	29
Figura III-6. Resultados del análisis en DEEPSOIL para Rapel	30
Figura III-7. Definición de Análisis Tiempo Historia.....	31
Figura III-8. Definición del “caso de carga” para modelo II.....	32
Figura III-9. Restricciones en subterráneos.....	33
Figura III-10. Definición del “caso de carga” para modelo III	34
Figura V-1. Esquema de ubicación de los resultados obtenidos en SAP2000	40
Figura V-2. Gráfica de Desplazamientos (Rapel).....	44
Figura V-3. Gráfica de Desplazamientos (Cerro El Roble).	45
Figura V-4. Gráfica de Desplazamientos (Santa Lucía).	46
Figura V-5. Gráfica de Desplazamientos (Cerro Viejo).	47
Figura V-6. Gráfica de Cortante Basal (Pangue).....	48

Figura V-7. Gráfica de Cortante Basal (Rapel)	49
Figura V-8. Gráfica de Momentos Flectores (Rapel)	50
Figura V-9. Gráfica de Drift de entrepiso (Rapel).....	50
Figura V-10. Gráfica de Cortante Basal (Cerro El Roble)	51
Figura V-12. Gráfica de Drift de entrepiso (Cerro El Roble).....	52
Figura V-13. Gráfica de Cortante Basal (Santa Lucía)	52
Figura V-14. Gráfica de Momentos Flectores (Santa Lucía)	53
Figura V-15. Gráfica de Drift de entrepiso (Santa Lucía).....	53
Figura V-16. Gráfica de Cortante Basal (Cerro Viejo)	54
Figura V-17. Gráfica de Momentos Flectores (Cerro Viejo).	54
Figura V-18. Gráfica de Drift de entrepiso (Cerro Viejo).....	55
Figura V-20. Gráfica de Momentos Flectores (Pangue).	56
Figura V-21. Gráfica de Drift de entrepiso (Pangue).....	56

RESUMEN

Este estudio considera el análisis de un edificio de oficinas de 20 niveles con 4 subterráneos, cimentado en una estratigrafía de tipo Grava de Santiago, analizado a través de un modelo simplificado de Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI), que involucra estimar la posible demanda sísmica en cada subterráneo a partir de la evaluación de la respuesta de sitio, a través del software DEEPSOIL, y la imposición de las cargas en cada subterráneo en el modelo estructural simplificado de la edificación desarrollado en SAP2000. Esto con el fin de considerar la interdependencia del movimiento sísmico entre el suelo y la parte enterrada de la edificación.

Un modelo simplificado de la estructura (DSSI) implica que, se han considerado valores de rigideces y masas concentradas por cada nivel y subterráneo del edificio. Para el modelo simplificado en SAP2000 se desarrolló un modelo base, el cual está conformado por elementos tipo “link” para representar cada nivel y subterráneos del edificio. Además, se incluye la demanda sísmica bajo tres condiciones, la primera condición imponiendo la aceleración de un registro, la segunda condición es analizar el modelo base bajo la acción de una historia de los desplazamientos impuesto, proveniente del DEEPSOIL; software que se utilizó como una herramienta para obtener la caracterización del estrato de cimentación, en él se simula el comportamiento dinámico de los estratos ante un movimiento sísmico ; y la tercera condición fue la de analizar el modelo base incluyendo la primera y la segunda condición actuando simultáneamente.

Para este estudio se ha tomado algunas consideraciones contenidas en el informe para el Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería de esta Universidad, denominado “Dynamic Response of Tall Buildings with Basement Considering Soil-Structure Interaction” (Pinto, 2021), y además se establecen algunas comparaciones de resultados entre esta Actividad de Graduación y ese mismo documento.

ABSTRACT

This study considers the analysis of a 20-story building office with 4 basements, which is founded in stratigraphy type Gravel of Santiago, analyzed through a simplified model, of Dynamic Soil-Structure Interaction (DSSI), that involves estimating the possible seismic demand of each basement from the evaluation of the site response, through the DEEPSOIL software, and the imposition of the loads in each basement in the simplified structural model of the building developed in SAP2000. This in order to consider the interdependence of the seismic movement between the ground and the buried part of the building.

A simplified model of the structure (DSSI) implies that values of stiffness and concentrated masses have been considered for each story and basement of the building. For the simplified model using the software SAP2000, a base model was developed, which is made up of "link" type elements to represent each story and basement of the building. In addition, the seismic demand is included under three conditions, the first condition was imposing the acceleration of a record, the second condition was to analyze the base model under the action of an imposed displacement history, that was obtained from the analysis using the software DEEPSOIL; software that was used as a tool to obtain the characterization of the stratum of foundation, in which the dynamic behavior of the strata is simulated when a seismic movement occurs; and the third condition was to analyze the base model where the first and second conditions acting simultaneously.

For this study, some considerations contained in the report for the Degree of Doctor of Engineering Sciences of this University, called "Dynamic Response of Tall Buildings

with Basement Considering Soil-Structure Interaction" (Pinto, 2021), and some comparisons of results are also established between this Graduation Activity and the aforementioned document.

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

Chile es uno de los países de mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado Cinturón de fuego del Pacífico, región donde se concentra el 75% de los volcanes del planeta, incluye más de 450 estructuras volcánicas, y se registra el 90% de la actividad sísmica a nivel mundial. El 81% de los sismos más grandes se han originado a lo largo de esa zona (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2020), lo que hace la necesidad de estudiar la influencia de los sismos en la respuesta de las estructuras.

En la práctica de la Ingeniería Civil, el diseño sísmico de estructuras se hace a partir de un modelo con la suposición de una base fija, al cual se le ingresa un registro sísmico con propiedades de acuerdo a la normativa vigente. La norma chilena de diseño sísmico NCh 433 considera un espectro de diseño, cuyas características dependen del tipo de suelo, tipo de estructura (materialidad) y zona en la que se ubica la estructura, pero no toma en cuenta criterios de diseño que incorporen el efecto de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura (Christie et al, 2017; Pinto, 2021; FEMA, 2020). Igualmente, las recomendaciones locales como el código chileno para el sísmico de edificaciones NCh433 (NCh433, 2009) o; estándares internacionales como, el Código Internacional de Construcción (IBC por sus siglas en inglés) o el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NITS por sus siglas en inglés) no dan claridad al tratamiento de condición de base fija en edificios con niveles de sótanos o con una significativa proporción enterrada en el suelo.

Durante un sismo la base de las edificaciones interactúa con el suelo que la rodea imponiendo deformaciones, dicha interacción produce cambios de comportamiento en la respuesta en las estructuras. La Interacción Dinámica Suelo-Estructura considera el efecto de flexibilizar la base de apoyo, por lo tanto, genera movimientos de entrada más reales provocando un aumento en el periodo fundamental, así como un aumento en el amortiguamiento del sistema en comparación con el modelo de base fija, que no considera al suelo alrededor de la cimentación (Pinto y Ledezma, 2019). La consideración de la base fija es un criterio muy limitado, y hoy en día se cuenta con programas adecuados para la realización de un análisis más integral que involucre la dependencia del movimiento sísmico entre la edificación, la cimentación y el suelo.

Para un análisis completo de un problema de DSSI se debería de tomar en cuenta (Pecker, 1984):

- Las variaciones espaciales de las características del suelo, especialmente con profundidad.
- El comportamiento inelástico del suelo.
- Las características tridimensionales del problema.
- Los fenómenos de propagación y de reflexión de ondas.
- La interacción entre estructuras vecinas.

La Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI por sus siglas en inglés) corresponde a los esfuerzos y deformaciones que se presentan tanto en el suelo como en la estructura debido a la interacción entre ambos, causada por la diferencia entre ambas rigideces de los materiales que los constituyen. (Marín, 2016). La metodología de análisis para

estructuras considerando DSSI, se divide en dos categorías: método de la subestructura y método directo (Kramer, 1996).

El método subestructura utiliza el principio de superposición de las dos principales causas de DSSI, la interacción cinemática y la interacción inercial.

El movimiento en la superficie del suelo en ausencia de una estructura y sus cimientos se denomina movimiento de campo libre. Por lo general, es más grande que el movimiento de entrada de la base que excita efectivamente la estructura y su base. La modificación del movimiento de campo libre en el movimiento de entrada de la base proviene de la interacción cinemática. (FEMA P-2091, 2020).

El objetivo del análisis de interacción cinemática consiste en determinar la excitación efectiva de la cimentación que se origina por el movimiento sísmico.

El movimiento de entrada de la cimentación se puede ver como el movimiento aplicado a los extremos de los resortes de cimentaciones horizontales; difiere del movimiento real de la cimentación debido a la respuesta inercial de la estructura y las deflexiones que esa respuesta produce en los resortes de la cimentación. Esa respuesta se conoce como interacción inercial. (FEMA P-2091, 2020).

La interacción inercial está relacionada con las fuerzas inerciales que actúan sobre la estructura, estos producen momentos y fuerzas cortantes en la base y, generan deformaciones en el estrato de cimentación modificando el movimiento en la base del edificio.

En este estudio se presenta una metodología simplificada para el análisis de edificios con subterráneos cimentadas en suelo granular considerando la Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI). Además, se realiza una comparación de los resultados

obtenidos para los desplazamientos laterales, así como la respuesta del edificio obtenido por análisis simplificado (DSSI) y la metodología de simulaciones numéricas realizada en 3D utilizando elementos finitos de código abierto (FE) desarrollada en OpenSees. Esto último corresponde a los resultados de Pinto (2021).

I.2 Objetivo General

Desarrollar un modelo simplificado para la evaluación de la respuesta sísmica de una edificación de 20 pisos con 4 subterráneos, ubicado en suelo gravoso del tipo Grava de Santiago, incorporando elementos de Interacción Dinámica Suelo-Estructura.

I.3 Objetivos Específicos

- a) Analizar el edificio de oficinas en referencia utilizando un modelo de masas concentradas para cada piso del edificio.
- b) Analizar el modelo base bajo la acción de un registro de aceleraciones en la base de cimentación y así poder obtener los desplazamientos laterales en los distintos niveles del edificio de oficinas en estudio.
- c) Proponer un perfil estratigráfico de tipo grava de Santiago para ser analizada por el programa DEEPSOIL y así obtener un registro de desplazamientos en el perfil estratigráfico propuesto.
- d) Analizar la cimentación del modelo base bajo la influencia del registro de desplazamientos obtenido del análisis en DEEPSOIL y así obtener los desplazamientos laterales de los subterráneos en los distintos niveles del edificio de oficinas en estudio.

- e) Analizar el modelo base bajo la acción de un registro de aceleraciones y desplazamientos laterales actuando simultáneamente y así obtener los desplazamientos en los distintos niveles del edificio de oficinas en estudio.
- f) Comparar las respuestas de los desplazamientos laterales obtenidos para el análisis simplificado DSSI con los obtenidos de un modelo avanzado de elementos finitos 3D desarrollado en OpenSees.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo se describen las características y la modelación del edificio en estudio, el cual posee una geometría típica de un edificio de oficinas de la ciudad de Santiago, Chile. El edificio posee 20 pisos y 4 niveles de subterráneos.

El modelo del edificio en estudio está basado en una estructura simplificada, es decir que cada piso y subterráneo del edificio estará representado por un nodo, y que los grados de libertad en cada nodo del edificio serán reducidos de tres grados de libertad a un grado de libertad por piso dando libertad de desplazarse solamente en la dirección horizontal X, y de esta forma poder obtener los desplazamientos laterales de los distintos niveles del edificio en estudio.

Para el desarrollo del modelo simplificado de Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI) se han considerado valores de rigideces y masas concentradas por piso y subterráneo. Los valores adoptados de la concentración de la masa y rigidez del estudio provienen del trabajo de Pinto (2021). Se adoptó un valor de cero para las masas concentradas de todos los subterráneos en base a que se desea simular el efecto del suelo en los subterráneos y, si los nodos de los subterráneos poseen un valor de masa diferente de cero, tendrán un valor de inercia mayor y por lo tanto una mayor resistencia a modificar su estado de movimiento o reposo.

El resumen de los valores de las masas y rigidez concentradas para cada piso y nivel de se muestran en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Valores de Masa y Rigidez concentradas por piso y subterráneos.

Nivel	Altura entrepiso (m)	Altura Total (m)	Masa (ton)	Rigidez (kN/m)
20	3.5	82	7,575	9,436,365
19	3.5	78.5	7,575	9,436,365
18	3.5	75	7,575	9,436,365
17	3.5	71.5	7,575	9,436,365
16	3.5	68	7,575	9,436,365
15	3.5	64.5	7,575	9,436,365
14	3.5	61	7,575	9,436,365
13	3.5	57.5	7,575	9,436,365
12	3.5	54	7,575	9,436,365
11	3.5	50.5	7,575	9,436,365
10	3.5	47	7,575	9,436,365
9	3.5	43.5	7,575	9,436,365
8	3.5	40	7,575	9,436,365
7	3.5	36.5	7,575	9,436,365
6	3.5	33	7,575	9,436,365
5	3.5	29.5	7,575	9,436,365
4	3.5	26	7,575	9,436,365
3	3.5	22.5	7,575	9,436,365
2	3.5	19	7,575	9,436,365
1	3.5	15.5	7,575	9,436,365
S1	3.0	12.0	0	28,223,269
S2	3.0	9.0	0	28,223,269
S3	3.0	6.0	0	28,223,269
S4	3.0	3.0	0	28,223,269

II.1 Modelación Estructural

El análisis simplificado de Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI) del edificio de oficinas en referencia fue desarrollado y analizados en SAP 2000, para un análisis de tipo lineal tiempo-historia.

Para representar los elementos de cada entrepiso se usaron elementos tipo “link”. Los “links” del modelo fueron restringidos en sus conexiones para evitar que puedan rotar y desplazarse en las direcciones Z e Y, y se estableció que solo puedan tener

desplazamiento en la dirección X. En la Figura II-1 se muestra una vista 2D del modelo.

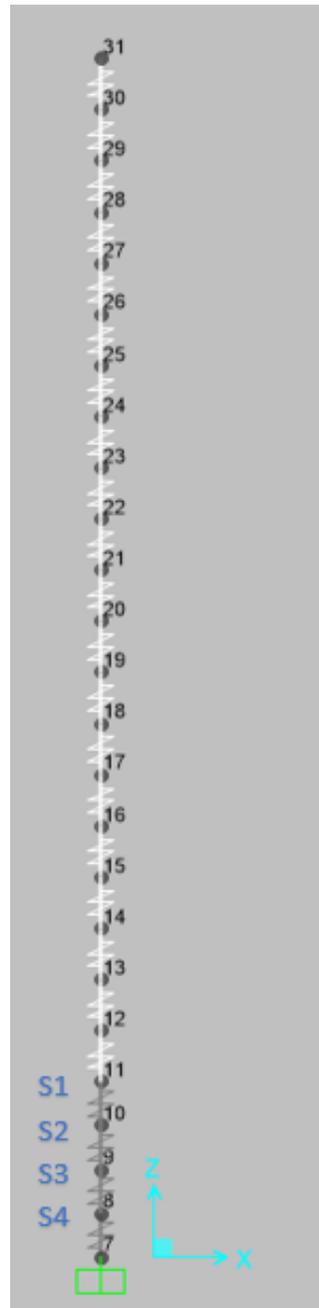


Figura II-1: Vista 2D del modelo simplificado del edificio en estudio.

La figura II-2 muestra la selección del tipo de “links” a utilizar en el análisis, para nuestro caso se usará “links” de tipo lineal. Además, en esta ventana se selecciona las direcciones en las que el “link” no podrá desplazarse. Para nuestro caso el “link” solo podrá desplazarse en U2 (en la dirección X).

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Linear

Property Name: Columna

Property Notes

Total Mass and Weight

Mass	0.	Rotational Inertia 1	0.
Weight	0.	Rotational Inertia 2	0.
		Rotational Inertia 3	0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

P-Delta Parameters

Advanced...

OK

Cancel

Figura II-2. Propiedades definidas para los “links” del modelo base.

La figura II-3 se ingresó el valor de rigidez que los elementos “links” adoptaran para el análisis (DSSI).

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2: 0.

U3:

Units: KN, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
Fixed	9436365.	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
Fixed	0.	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

OK Cancel

Figura II-3. Definición de las propiedades de los “links”.

III. ALTERNATIVAS DE MODELACIÓN

En este capítulo se presentan las alternativas a desarrollar en el modelo base, así como los criterios establecidos para el análisis del modelo base desarrollado bajo el concepto un procedimiento simplificado de análisis Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI).

III.1 Modelo Base

Se desarrolló un modelo base del edificio de oficinas, el cual será analizado con los diferentes criterios de modelación establecidos en la Tabla III.1.

Tabla III.1. Alternativas y Criterios de modelación aplicadas al Modelo base.

Modelo	Movimiento de Entrada	Descripción
Modelo I	Base del edificio	Al modelo base se le impusieron 5 registros de aceleraciones. La respuesta se analizó individualmente para cada uno de los registros y, se consideró una base fija para la cimentación del edificio.
Modelo II	Losas de Subterráneo	El modelo base se analiza con una historia de desplazamientos en cada una de las losas de los subterráneos. La historia de desplazamientos impuestos proviene de un análisis previo realizado en DEEPSOIL para 5 registros de aceleraciones y, se consideró una base fija para la cimentación del edificio.

Modelo III	Base del edificio y losas de subterráneo	Al modelo base se le aplicó la condición de análisis del modelo I y el modelo II simultáneamente. La respuesta obtenida se evaluó para cada uno de los 5 registros y, se consideró una base fija para la cimentación del edificio.
-------------------	--	--

III.2 Modelo I

Es el modelo base al cual se le impusieron cinco registros de aceleraciones. Los registros corresponden a los de las estaciones de Rapel, Cerro El Roble, Santa Lucía, Cerro Viejo y Pangué para el terremoto Mw8.8 del 2010 (Terremoto del Maule).

El modelo I se analizó individualmente para cada uno de los 5 registros bajo un análisis lineal tiempo historia en el Software SAP 2000¹, este es un software comercial que se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF) y es utilizado para el cálculo de todo tipo de estructuras en el sector de la edificación.

Para el análisis tiempo historia desarrollada en SAP2000, se consideró un empotramiento en la base del edificio, lo que considera que el suelo es infinitamente rígido en la cimentación.

¹ <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>.

III.3 Modelo II

El modelo II se desarrolló sobre el modelo base. En este análisis se le impuso un registro de desplazamientos a cada una de las losas del subterráneo. Los desplazamientos impuestos a cada una de las losas del subterráneo a los subterráneos provienen de un previo análisis realizado en el programa DEEPSOIL² del perfil estratigráfico propuesto.

III.3.1 Perfil Estratigráfico en DEEPSOIL

DEEPSOIL es un programa de análisis de respuesta de sitio unidimensional que puede realizar análisis no lineal en el dominio del tiempo con y sin generación de presión de agua intersticial, y el análisis equivalente en el dominio de frecuencia lineal que incluyen convolución y deconvolución (Hashash, Y.M., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., 2020). El programa se utiliza como una herramienta para simular el comportamiento dinámico al suscitarse un movimiento sísmico; para ello el programa hace uso de las curvas de degradación de módulo de corte.

La metodología de análisis para el estrato de suelo es de tipo lineal equivalente (Seed e Idriss, 1969). En dicho análisis el módulo de corte y el amortiguamiento son modelados mediante un resorte lineal y un amortiguador, respectivamente. Los parámetros se calculan sobre la base del módulo de corte secante y la relación de

² "DEEPSOIL 7, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, (<http://deepsoil.cee.illinois.edu>).

amortiguamiento para un determinado nivel de deformación. A continuación, se describen los pasos definidos para el análisis del perfil estratigráfico en DEEPSOIL.

La Figura III -1 muestra el tipo de análisis usado: un análisis de tipo lineal equivalente el cual emplea un procedimiento iterativo en la selección del módulo de corte (Hashash, et al., 2020).

Se seleccionó dominio de la frecuencia el cual modifica el movimiento de entrada de los espectros de amplitud de Fourier por medio de la Ecuación 3.1 de transferencia definida como:

$$H(f) = \frac{-fn^2}{(f^2 - fn^2) - 2i\xi ffn} \quad (3.1)$$

Donde:

fn : es la frecuencia natural del oscilador y se calcula con la Ecuación 3.2

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (3.2)$$

ξ : Es el amortiguamiento y se calcula con la Ecuación 3.3

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.3)$$

El uso de la solución en el dominio de la frecuencia requiere FFT (Transformada Rápida de Fourier) para moverse entre el dominio de la frecuencia, donde la función de transferencia del oscilador es aplicada, y donde se estima la respuesta máxima del oscilador.

Analysis Type Definition

Analysis Method

Solution Type

Default Soil Model
 Note: The selected default soil model will be assigned to all newly generated layers.

Default Hysteretic Re/Unloading Formulation

Automatic Profile Generation
 On Off

Unit System
 English Metric

Complementary Analyses
 Equivalent Linear - Frequency Domain
 Linear - Frequency Domain (Under development)
 Linear - Time Domain (Under development)

Figura III-1. Muestra la definición del tipo de análisis en DEEPSOIL.

El programa DEEPSOIL requiere que se le defina el valor de velocidad de onda de corte (V_s) para cada estrato que compone el perfil como dato de ingreso para la realización del análisis. Cabe indicar que la velocidad de onda de corte (V_s) es uno de los parámetros más importantes para la clasificación sísmica de los suelos y rocas, ya que tiene relación directa con la rigidez de los materiales.

Los valores de ondas de corte (V_s) del perfil estratigráfico propuesto para este estudio se tomaron de Pinto (2021). La estratigrafía considerada para la cimentación del edificio de tipo Grava de Santiago está posee una alta competencia geotécnica.

Las propiedades mecánicas de la Grava de Santiago son bien conocidas y poseen un contenido de finos del 3%, un índice de plasticidad entre 5 y 20, y granos gruesos de hasta 30 cm de tamaño nominal (Pinto, 2021).

Asimismo, se sabe que los estratos superiores de la Grava de Santiago están constituidos por rellenos heterogéneos compuestos por gravas arenosas o arcillas limosas con bajas plasticidad de consistencia media a alta y con un espesor dentro del rango de 1.5-5 m.

Posteriormente a una profundidad de 5-7 m se encuentran las gravas gruesas a finas arenosas; a este estrato se le conoce como la segunda depositación del Río Mapocho. Y para finalizar a una profundidad de aproximadamente 33 m se encuentra el estrato denominado la primera depositación del Río Mapocho; en este estrato se logran alcanzar velocidades de ondas de corte mayores a 900 m/s (roca).

La Figura III-2 muestra el perfil estratigráfico usado para el análisis en DEEPSOIL, y las propiedades para cada estrato de suelo se muestra en la Tabla III.2.

Tabla III.2. Propiedades de estratigrafía usada en DEEPSOIL.

N° Estrato	Tipo	Espesor del Estrato (m)	Peso Unitario (kN/m³)	Vs (m/s)
1	Arcillas Limosas	1.5	16	100
2	Arcillas Limosas	1.5	16	100
3	Gravas Arenosas	1.0	16	100
4	Gravas Arenosas	1.0	16	100
5	Grava gruesa	2.0	20	800
6	Grava gruesa	1.0	20	800
7	Grava gruesa	1.5	20	800
8	Grava gruesa	1.5	20	800
9	Arena Gravosa Densa	1.0	22.5	1100
10	Arena Gravosa Densa	1.5	22.5	1100
11	Arena Gravosa Densa	1.5	22.5	1100
12	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
13	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
14	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
15	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
16	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
17	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
18	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
19	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
20	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
21	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
22	Arena Gravosa Densa	5.0	22.5	1100
23	Arena Gravosa Densa	4.0	22.5	1100

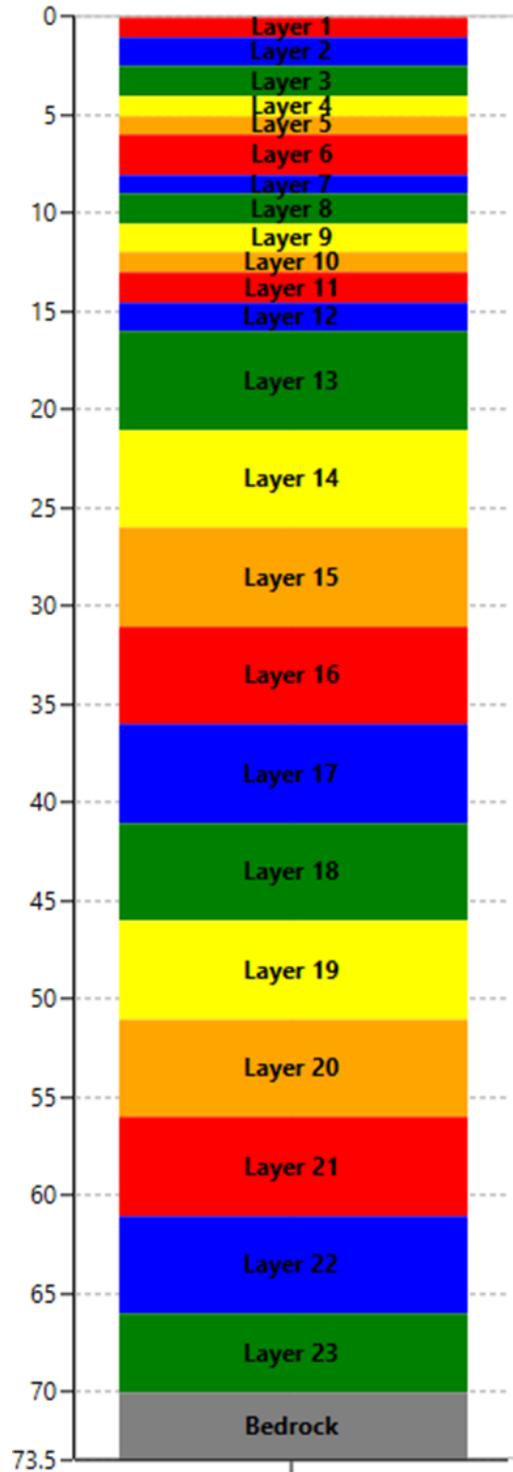


Figura III-2. Perfil estratigráfico utilizado en DEEPSOIL.

En la Figura III -3 se muestra la definición de las propiedades del perfil estratigráfico a analizar. En esta ventana el programa DEEPSOL nos permite seleccionar si el análisis incluye nivel de aguas freáticas. Para nuestro caso esta opción estará deshabilitada debido a que el nivel freático en algunas zonas del centro de Santiago se encuentra a profundidades mayores de 89 metros bajo el nivel del suelo (Lorca, 2018).

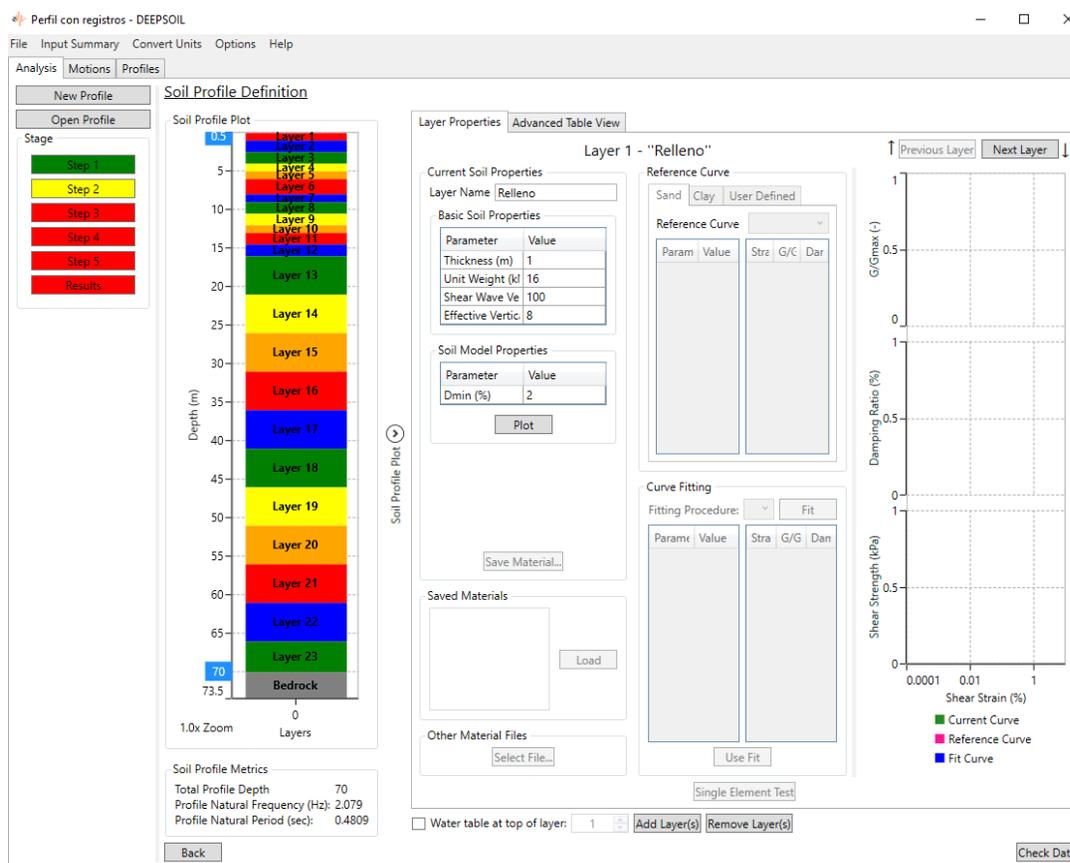


Figura III-3. Perfil estratigráfico analizado en DEEPSOL.

En la ventana que se muestra en la Figura III-4 se debe de seleccionar el registro de aceleraciones a utilizar en el análisis del perfil estratigráfico. En este caso se seleccionarán uno a uno para cada registro de Rapel, Cerro El Roble, Santa Lucía,

Cerro Viejo y Pangué. Los registros fueron ingresados mediante un formato de archivos de texto de EXCEL.

Los registros sísmicos fueron registrados en una roca o un suelo rígido ($V_s > 900 \text{ m/s}$), se seleccionaron bajo el criterio que cubren una variedad de contenidos de frecuencia, duraciones, y amplitudes de eventos sísmicos tanto de campo lejano como de campo cercano (Pinto, 2021).

Las características de los registros de aceleraciones a utilizar en el análisis (DSSI) son presentados en la Tabla III.3. Donde PGA es la aceleración pico del terreno, PGV la velocidad, PGD es el desplazamiento, D5-95 la duración significativa (Trifunac, 1975) e IA la Intensidad de Arias (Arias, 1970).

Tabla III.3. Características de los registros utilizados en el análisis DSSI.

Estación	PGA(g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	AI (m/s)	D5-95
Rapel	0.20	31.5	16.1	1.3	33.4
Cerro El Roble	0.18	20.2	12.6	1.0	17.4
Santa Lucía	0.31	40.7	47.1	1.4	37.2
Cerro Viejo	0.19	26.6	10.5	0.7	30.7
Pangué	0.09	28.1	15.2	0.6	38.1

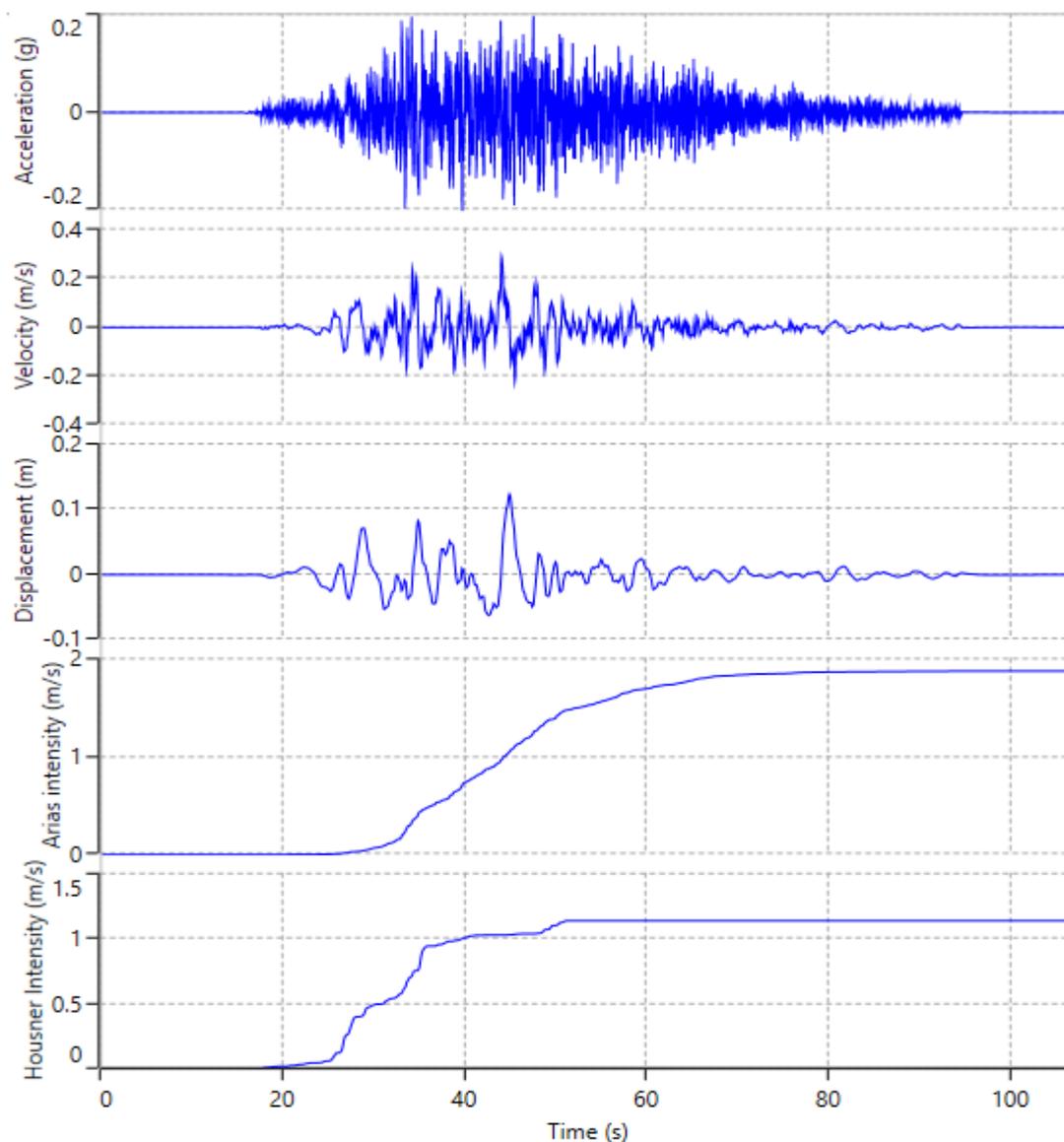


Figura III-4. Selección del registro de aceleraciones para el análisis.

En la ventana de la Figura III-5 se debe de seleccionar el número de iteraciones a requeridas. La ecuación que se utilizará para el cálculo del módulo de corte del suelo es la del módulo de corte independiente de la frecuencia, esta opción es la recomendada por el software.

Otro de los datos que se debe de seleccionar en esta ventana es donde requerimos que el programa nos proporcione los resultados de nuestro análisis, para nuestro caso se seleccionaron todos los estratos del perfil estratigráfico.

Analysis Control Definition

Frequency Domain
Number of iterations: 1

Effective Shear Strain Definition

$$SSR = \frac{M-1}{10}$$
 Effective Shear Strain Ratio (SSR): 0.65

Complex Shear Modulus Formulation
 Frequency Independent (Recommended)

$$G^* = G(1 + 2i\xi)$$
 Frequency Dependent (Use with Caution)

$$G^* = G(1 - 2i\xi^2 + 2i\xi\sqrt{1 - \xi^2})$$
 Simplified

$$G^* = G(1 - i\xi^2 + 2i\xi)$$

Time Domain
Step Control
 Flexible Fixed
 Maximum Strain Increment (%): 0
 Number of Sub-increments: 1

Integration Scheme
 Implicit: Newmark Beta Method ($\beta=0.25, \gamma=0.5$)
 Explicit: Heun's Method ($P(EC)^nE$)

Time-history Interpolation Method
 Linear in time domain
 Zero-padded in frequency-domain

Output Settings
Layers
 Surface Only
 All Layers
 At Specific Depth
 At Specific Layers

Profile 1

Layer #	Layer Name	Want Output
1	Relleno	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Relleno 1	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Relleno 2	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Arena Fina	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Arena Fina 1	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Arena Fina 2	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Limo	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Limo 1	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Limo 2	<input checked="" type="checkbox"/>

Bedrock
 Output deconvolution result at top of rock

Displacement Animation
 Output displacement animation. (Warning: Generating the displacement animation will slow down the speed of analysis!)

Figura III-5. Selección de las ecuaciones del módulo de corte y estratos a analizar.

En la Figura III-6 se observan las gráficas de los resultados del análisis en DEEPSOIL, dentro de los cuales están: Intensidad de Arias, Desplazamientos Relativos, Velocidad Relativa, y Aceleración.

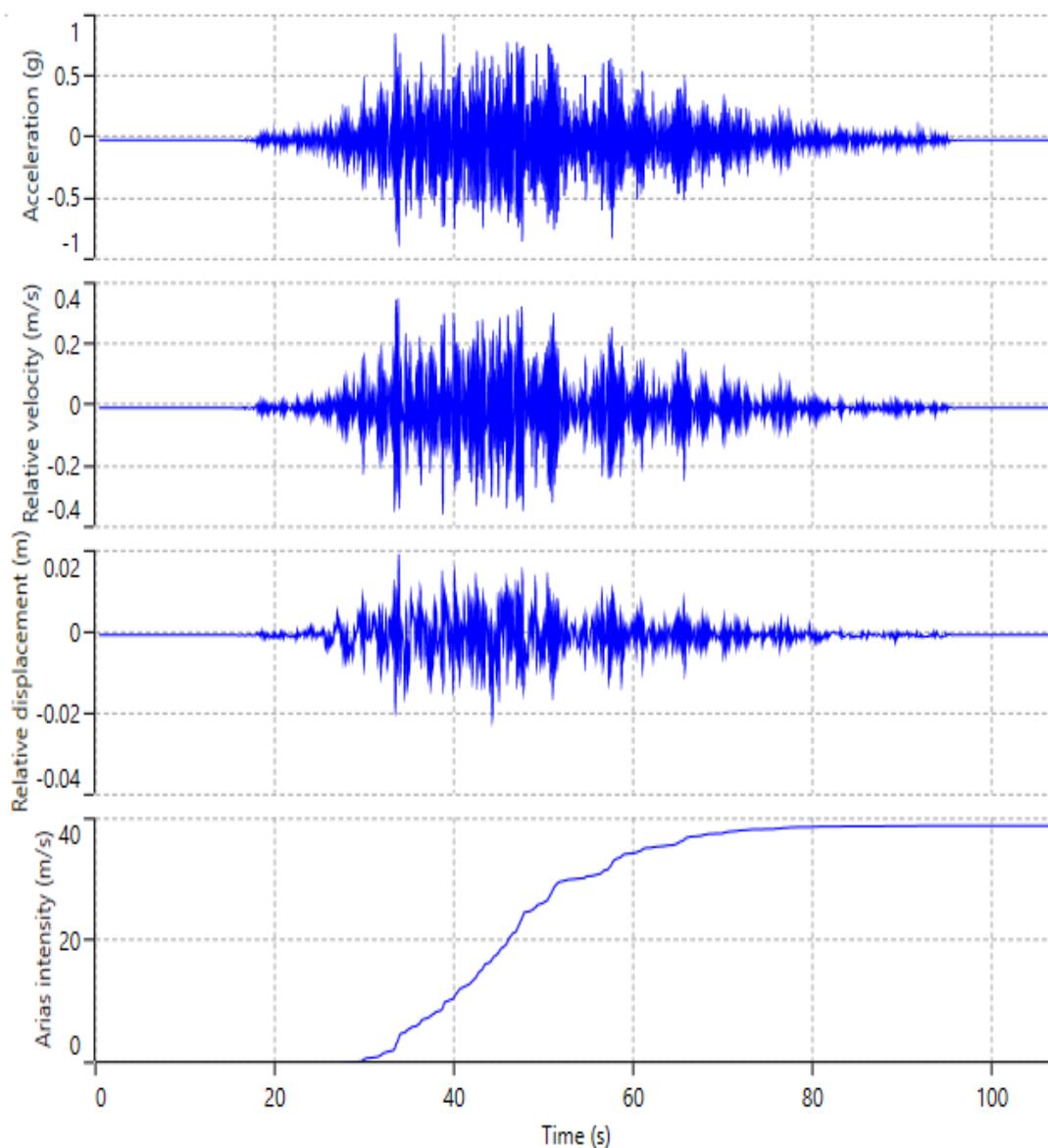


Figura III-6. Resultados del análisis en DEEPSOIL para Rapel.

III.3.1.2 Análisis con Registro de Desplazamientos en SAP2000

Una vez analizado el perfil estratigráfico propuesto en DEEPSOIL los datos que interesan son los registros de los desplazamientos en donde se ubican cada una de las losas de subterráneos (S1, S2, S3 y S4). Estos registros de desplazamientos son

llevados al software SAP2000 para cada uno de los 5 registros y analizados mediante un análisis tiempo historia en SAP2000.

En la Figura III-7 se observa la definición de la función tiempo historia de Rapel (S1FM9) en el cual para la definición se utilizó los registros de desplazamientos provenientes del análisis estratigráfico en DEEPSOIL:

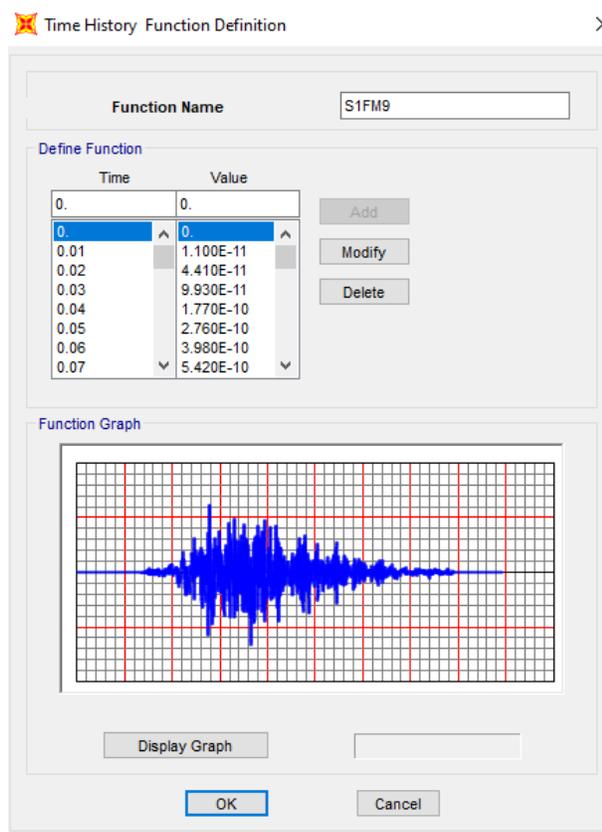


Figura III-7. Definición de Análisis Tiempo Historia.

Posteriormente se debe de definir el “caso de carga” a utilizar en el análisis, en este caso S1-9 corresponde a registro de Rapel, y se debe de utilizar la respectiva función de tiempo historia definida para cada registro como se observa en la Figura III-8:

Load Case Data - Linear Direct Integration History

Load Case Name: S1-9 Set Def Name Modify/Show...

Notes

Load Case Type: Time History Design...

Stiffness to Use: Zero Initial Conditions - Unstressed State
 Stiffness at End of Nonlinear Case ▼

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case MODAL ▼

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	S1	S1FM9	1.
Load Pattern	S1	S1FM9	1.

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 10725

Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters

Damping: Proportional Modify/Show...

Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...

Mass Source: MSSSRC1

Analysis Type: Linear Nonlinear

History Type: Transient Periodic

Solution Type: Modal Direct Integration Frequency Domain

OK Cancel

Figura III-8. Definición del “caso de carga” para modelo II.

Antes de correr el análisis tiempo historia debe de restringir el modelo en los nodos que representan los subterráneos, con el propósito de que el edificio se desplace de acuerdo al registro de desplazamientos impuesto para cada una de las losas lo cual se puede observar en la Figura III-9.

Para el desarrollo de este análisis realizado en SAP2000, se deben definir dos funciones tiempo historia una para los desplazamientos provenientes del DEEPSOIL para cada una de las losas (sección III.3.1.2) y otra para los desplazamientos proveniente del análisis de las aceleraciones. Ambas funciones deben ser integradas en un solo “caso de carga” como se muestra en la Figura III-10 para el registro de Rapel (DS1-09).

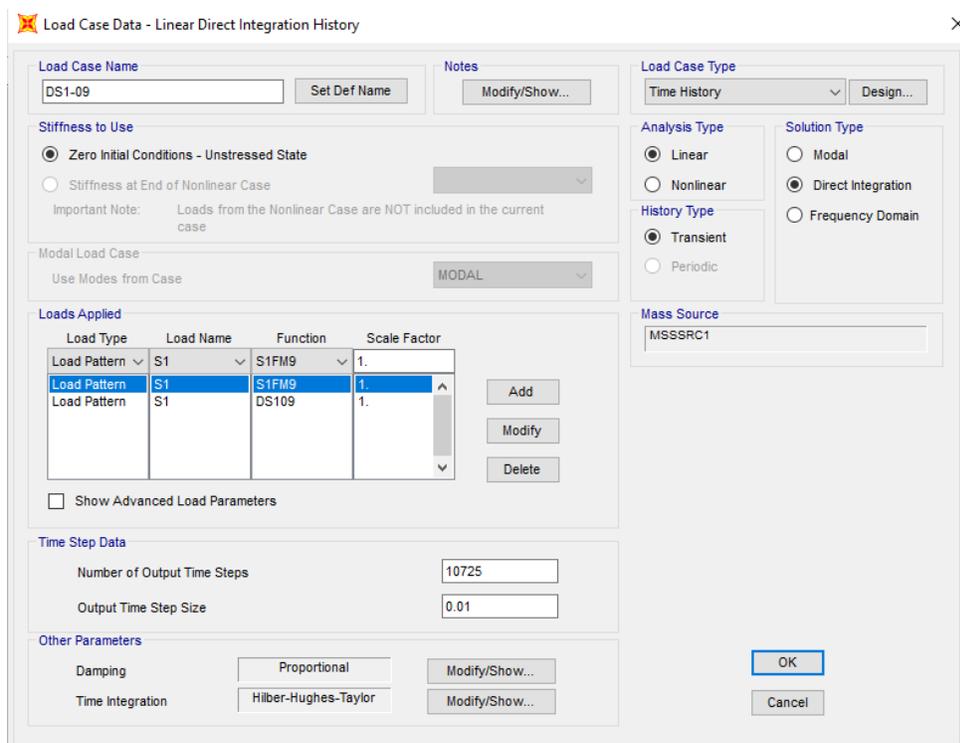


Figura III-10. Definición del “caso de carga” para modelo III.

Antes de correr el análisis tiempo historia debe de restringir el modelo en los nodos que representan los subterráneos tal como se mencionó en la sección III.3.1.2.

IV. TIPOS DE ANÁLISIS

En este capítulo se describen los tipos de análisis realizados para el desarrollo del modelo simplificado de Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI).

IV.1 Análisis Modal

El análisis modal se utiliza para determinar la respuesta de una estructura a un movimiento inducido por un sismo $\ddot{u}(t)$, idéntico en todos los puntos de apoyo de la estructura. (Chopra, 2014).

La respuesta dinámica de los sistemas lineales con amortiguamiento clásico, que es un modelo razonable para muchas estructuras puede determinarse mediante el análisis modal clásico. (Chopra, 2014).

Para tales sistemas existen frecuencias naturales y modos de vibración clásicos y sus ecuaciones de movimiento se desacoplan al transformarlas a coordenadas modales. Así, la respuesta en cada modo natural de vibración puede calcularse en forma independiente de las otras, y las respuestas modales pueden combinarse para determinar la respuesta total. (Chopra, 2014).

Cuando se incluye el amortiguamiento, las ecuaciones de movimiento para un sistema VGDL se determinan con la ecuación (4.1):

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad (4.1)$$

Donde:

M=matriz de masas.

C=matriz de amortiguamiento.

K=matriz de rigidez.

t =vector (o matriz) de influencia.

La ecuación de movimiento (4.1) se puede resolver de forma modal (amortiguamiento clásico), reemplazando:

$$u(t) = \Phi_n q(t). \text{ Donde } \Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3 \quad \dots \quad \phi_n]$$

Donde Φ : Se le llama matriz modal

La matriz modal es de dimensión $N \times N$ con los modos de vibración de la estructura.

La frecuencia o periodos y modos de vibrar se pueden obtener al resolver la Ecuación 4.2:

$$(K - \omega_n^2 M)\phi_n = 0 \quad (4.2)$$

Se realizó el análisis modal para el modelo base en SAP2000 y se determinaron los periodos (T) y la participación de las masas modales (ver Tabla IV.1). Se observa que los tres primeros periodos del modelo base son: 2.47 s, 0.82 s, y 0.49 s.

Tabla IV.I. Períodos y porcentaje de participación de masas modales.

Modo	T(s)	Ux (%)
1	2.47	87.05
2	0.82	8.54
3	0.49	2.47
4	0.35	0.96
5	0.27	0.43
6	0.22	0.22
7	0.19	0.11
8	0.16	0.06
9	0.14	0.04
10	0.13	0.02
11	0.12	0.01
12	0.11	0.01

IV.2 Análisis Tiempo Historia Modal

Análisis Tiempo Historia Modal es un análisis empleado para analizar la respuesta dinámica de una estructura frente a una carga determinada, la cual puede variar respecto al tiempo (Nieto y Rivero, 2016).

El Análisis Tiempo historia con amortiguamiento modal, está definido por la ecuación de movimiento y se expresa según la Ecuación 4.3:

$$\phi_n^t M \phi_n \ddot{q}_n(t) + \phi_n^t C \phi_n \dot{q}_n(t) + \phi_n^t M \phi_n q_n(t) = -\phi_n^t M l_x \ddot{u}_{gx}(t) \quad (4.3)$$

Donde:

$$\phi_n^t M \phi_n = M_n \text{ y } \phi_n^t M l_x = L_{nx}$$

Se obtiene la Ecuación 4.4:

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2\phi_n^t M \phi_n q_n(t) = \ddot{u}_{gx}(t)\Gamma_{nx} \quad (4.4)$$

Donde:

$$\frac{\phi_n^t C \phi_n}{M_n} = 2\zeta\omega_n; \frac{\phi_n^t K \phi_n}{M_n} = \omega_n^2; \frac{l_{nx}}{M_n} = \Gamma_{nx} \quad (4.5)$$

Γ_{nx} : Factor de participacion modal

Sin embargo Γ_{nx} :

- Depende de la normalización de los modos
- No es una medida de la contribución de un modo a una cierta respuesta.

La respuesta en el tiempo se obtiene con la Ecuación 4.6:

$$q_n(t) = \Gamma_{nx} D_n(t) \quad (4.6)$$

Desplazamientos nodales se obtienen con la Ecuación 4.7:

$$u(t) = \Phi q(t) = \sum_n \Phi_n \Gamma_{nx} D_n(t) \quad (4.7)$$

Mediante la Ecuación 4.8 se obtienen las fuerzas estáticas equivalentes:

$$f_s(t) = Ku(t) = \sum_n k\Phi_n\Gamma_{nx}D_n(t) = \sum_n s_n\omega_n^2 D_n(t) \quad (4.8)$$

Entonces el esfuerzo de corte basal se obtiene por medio de la Ecuación 4.9:

$$V_{bx}(t) = \sum_n \frac{L_{nx}^2}{M_n} \omega_n^2 D_n(t) \quad (4.9)$$

El análisis tiempo historia modal se utilizó para la obtención de la respuesta dinámica de la estructura analizada en SAP 2000.

Existen varios documentos técnicos que sugieren y recomiendan el valor del amortiguamiento que se puede tomar de acuerdo al material empleado en la estructura en estudio, la Norma Nch433Of1996, establece que para estructuras de hormigón armado se debe de considerar un valor del amortiguamiento del 5%. En este estudio se adoptó este valor para todos los modelos analizados.

V. RESULTADOS DE ANALISIS DEL MODELO BASE

En este capítulo se presentan las respuestas obtenidas para el análisis simplificado (DSSI), para el modelo base de la Figura V-1.

Además, se realizará una comparación de las respuestas obtenidos por el análisis simplificado (DSSI) en SAP2000 y el análisis en OpenSees de Pinto (2021).

V.1 Respuesta de Desplazamientos de Piso y Subterráneos

Las tablas V.1 a V.5 contienen los resultados de los desplazamientos laterales del análisis (DSSI) simplificado para el modelo I, modelo II y Modelo III. Por practicidad los resultados se presentan como: modelo I (definida en las tablas como Aceleraciones), modelo II (definida en las tablas como Despl.) y modelo III (definida en las tablas como Aceleraciones +Despl.). Estas tablas se generaron a partir de la información contenidas en las gráficas de los pisos 4, 20 y los subterráneos (ANEXO A) para cada uno de los registros de aceleraciones.

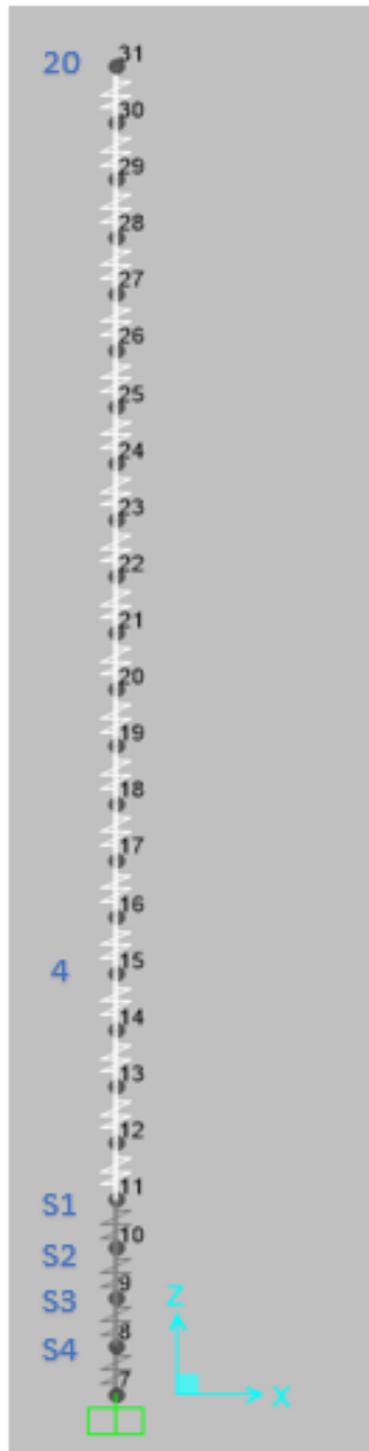


Figura V-1. Esquema de ubicación de los resultados obtenidos en SAP2000.

Tabla V.1. Resultados de Análisis (DSSI) para Rapel.

Rapel			
Piso	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones +Despl. (cm)
S1	-0.21	-2.00	-2.02
S2	-0.16	-1.61	-1.63
S3	-0.10	-0.11	-1.20
S4	-0.05	-1.17	-1.18
4	-0.82	-1.86	-2.19
20	-2.07	-2.75	-3.94
	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones +Despl. (cm)
S1	0.22	1.87	2.00
S2	0.16	1.29	1.39
S3	0.11	0.87	0.90
S4	0.05	0.87	0.88
4	0.81	1.86	2.32
20	2.35	2.70	3.54

Tabla V.2. Resultados de Análisis (DSSI) para Cerro EL Roble.

Cerro El Roble			
Piso	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	-0.10	-1.41	-1.45
S2	-0.07	-1.07	-1.10
S3	-0.05	-0.72	-0.74
S4	-0.02	-0.71	-0.72
4	-0.35	-1.57	-1.65
20	-0.95	-1.74	-1.93
	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	0.10	1.52	1.54
S2	0.08	0.98	0.99
S3	0.05	0.75	0.77
S4	0.02	0.75	0.76
4	0.43	1.64	1.73
20	1.02	1.95	2.00

Tabla V.3. Resultados de Análisis (DSSI) para Santa Lucía.

Santa Lucía			
Piso	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	-0.29	-2.41	-2.57
S2	-0.22	-2.03	-2.16
S3	-0.14	-1.63	-1.70
S4	-0.07	-1.60	-1.65
4	-1.16	-2.27	-3.05
20	-3.17	-4.24	-4.96
	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	0.29	2.17	2.19
S2	0.22	1.32	1.33
S3	0.14	0.74	0.70
S4	0.07	0.75	0.75
4	1.51	2.00	2.51
20	2.90	3.93	4.99

Tabla V.4. Resultados de Análisis (DSSI) para Cerro Viejo.

Cerro Viejo			
Piso	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	-0.19	-2.31	-2.30
S2	-0.14	-1.64	-1.63
S3	-0.09	-1.01	-1.01
S4	-0.04	-1.00	-1.00
4	-0.76	-2.22	-2.54
20	-2.02	-2.68	-2.87
	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	0.21	1.31	1.37
S2	0.15	0.94	0.95
S3	0.10	0.63	0.60
S4	0.05	0.62	0.61
4	0.81	1.43	1.37
20	2.22	2.18	2.36

Tabla V.5. Resultados de Análisis (DSSI) para Pangué.

Pangué			
Piso	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	-0.39	-1.14	-1.10
S2	-0.29	-1.04	-0.92
S3	-0.19	-0.93	-0.85
S4	-0.09	-0.93	-0.89
4	-1.55	-1.43	-1.46
20	-4.24	-2.53	-2.60
	Aceleraciones (cm)	Despl. (cm)	Aceleraciones (cm) +Despl. (cm)
S1	0.40	0.67	0.84
S2	0.30	0.63	0.74
S3	0.20	0.60	0.66
S4	0.10	0.60	0.63
4	1.59	1.23	1.07
20	4.28	2.65	2.21

V.2 Respuesta Comparativas de Desplazamientos de Piso y Subterráneos

En las tablas V.6 a V.10 se muestran los resultados de los desplazamientos correspondientes al análisis simplificado DSSI desarrollado en SAP2000 (Aceleraciones +Despl) y los desplazamientos obtenidos por medio del análisis en OpenSees de Pinto (2021).

Con respecto a los resultados mostrados en las Figuras V-2 a V-6 se puede observar una marcada diferencia en cuanto a los valores obtenidos para el modelo simplificado DSSI (Aceleraciones +Despl), ya que los resultados reflejan valores mucho mayores para los desplazamientos de los subterráneos, en comparación a los que se obtuvieron mediante el análisis en OpenSees de Pinto (2021), para los 5 registros analizados.

Para el desplazamiento de piso 20 (techo) se obtuvo para el análisis simplificado DSSI y el análisis en OpenSees valores bastante cercanos para los registros de Rapel, Cerro el Roble y Santa Lucía.

Tabla V.6. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para el Registro Rapel.

Desplazamientos (Rapel)		
Piso	Modelo simplificado DSSI (cm)	Modelo OpenSees (cm)
20	3.94	3.96
4	2.19	0.83
-1 (S1)	2.02	0.21
-2 (S2)	1.63	0.13
-3(S3)	1.20	0.07
-4 (S4)	1.18	0.02

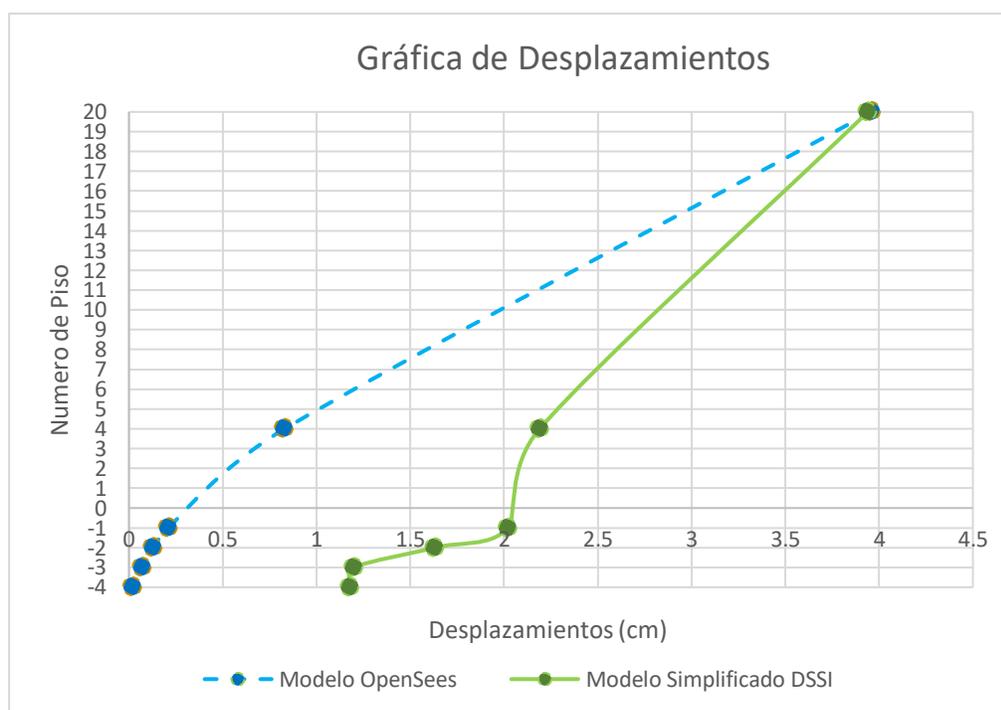


Figura V-2. Gráfica de Desplazamientos (Rapel).

Tabla V.7. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para el Registro de Cerro El Roble.

Desplazamientos (Cerro El Roble)		
Piso	Modelo simplificado DSSI (cm)	Modelo OpenSees (cm)
20	1.93	1.76
4	1.65	0.37
-1 (S1)	1.45	0.13
-2 (S2)	1.10	0.08
-3(S3)	0.74	0.05
-4 (S4)	0.72	0.01

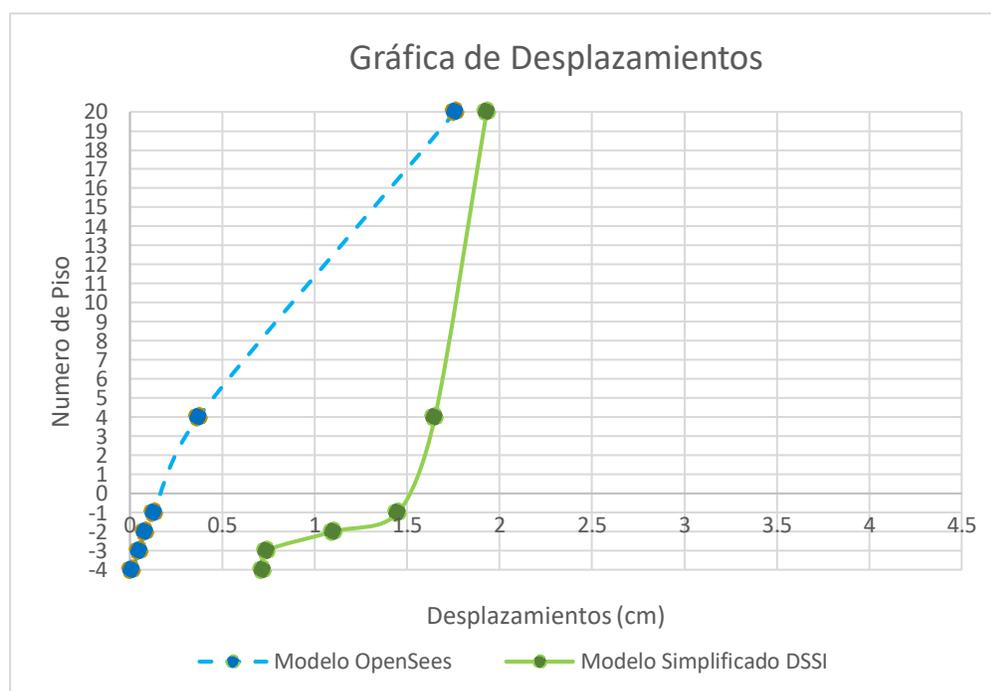


Figura V-3. Gráfica de Desplazamientos (Cerro El Roble).

Tabla V.8. Resultados Comparativos de Análisis (DSSI) para el Registro de Santa Lucía.

Santa Lucía		
Piso	Modelo simplificado DSSI (cm)	Modelo OpenSees (cm)
20	4.96	4.54
4	3.05	1.06
-1 (S1)	2.57	0.28
-2 (S2)	2.16	0.18
-3 (S3)	1.70	0.09
-4 (S4)	1.65	0.03

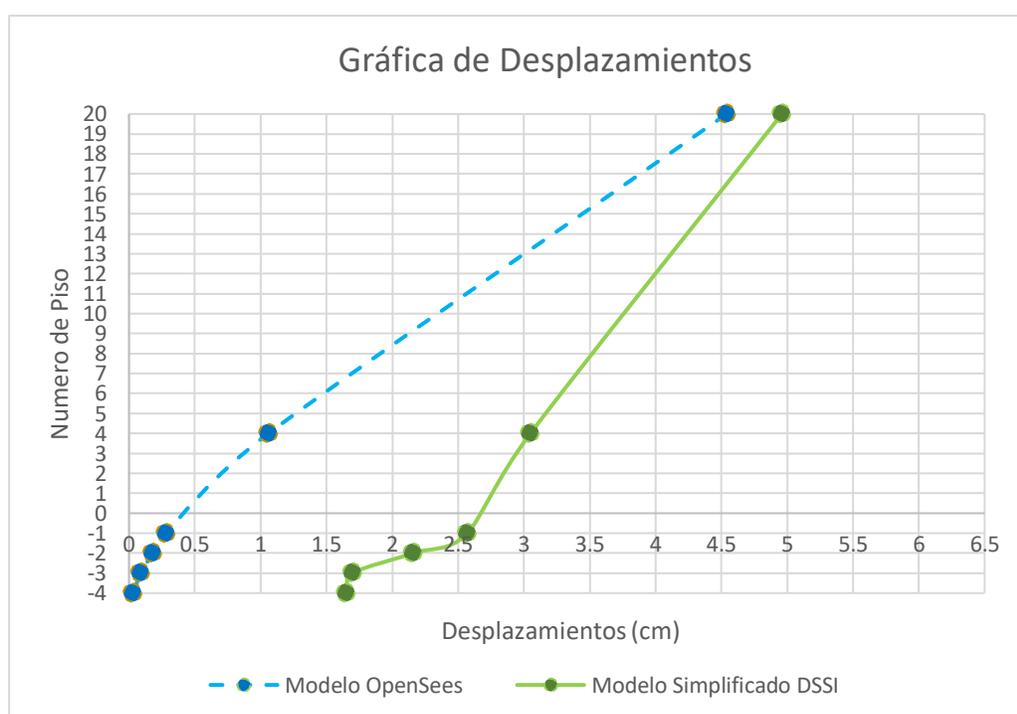


Figura V-4. Gráfica de Desplazamientos (Santa Lucía).

Tabla V.9. Resultados Comparativos Análisis (DSSI) para el Registro de Cerro Viejo.

Cerro Viejo		
Piso	Modelo simplificado DSSI (cm)	Modelo OpenSees (cm)
20	2.87	4.09
4	2.54	0.97
-1 (S1)	2.30	0.24
-2 (S2)	1.63	0.15
-3(S3)	1.01	0.07
-4 (S4)	1.00	0.02

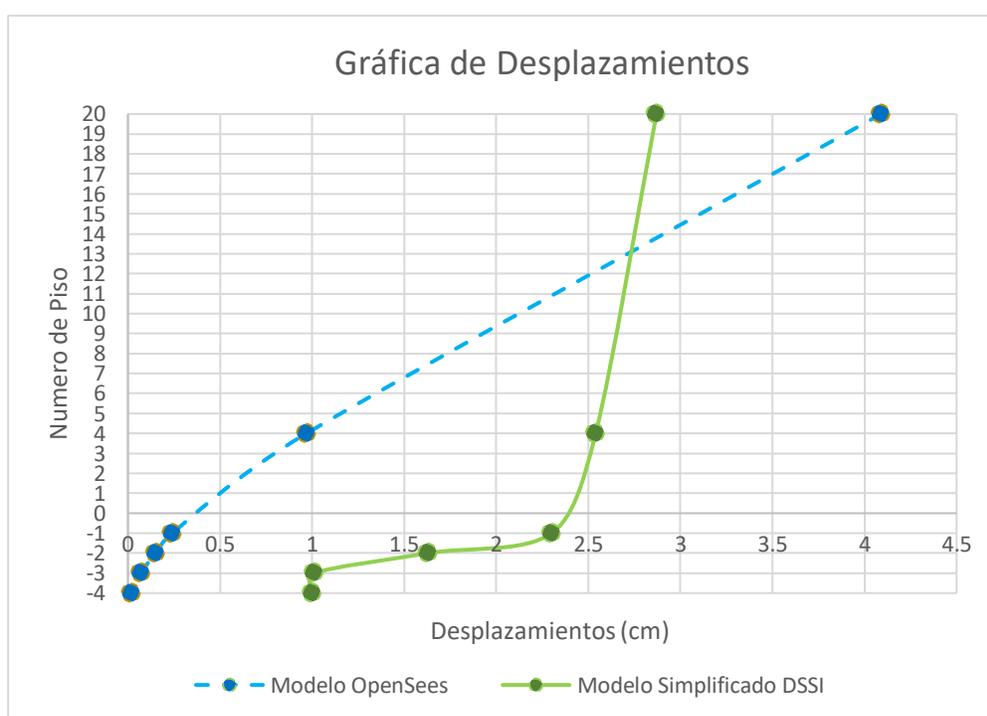


Figura V-5. Gráfica de Desplazamientos (Cerro Viejo).

Tabla V.10. Resultados de Comparativos Análisis (DSSI) para el Registro de Pangué.

Pangué		
Piso	Modelo simplificado DSSI (cm)	Modelo OpenSees (cm)
20	2.60	6.88
4	1.46	1.92
-1 (S1)	1.10	0.29
-2 (S2)	0.92	0.28
-3(S3)	0.85	0.14
-4 (S4)	0.89	0.04

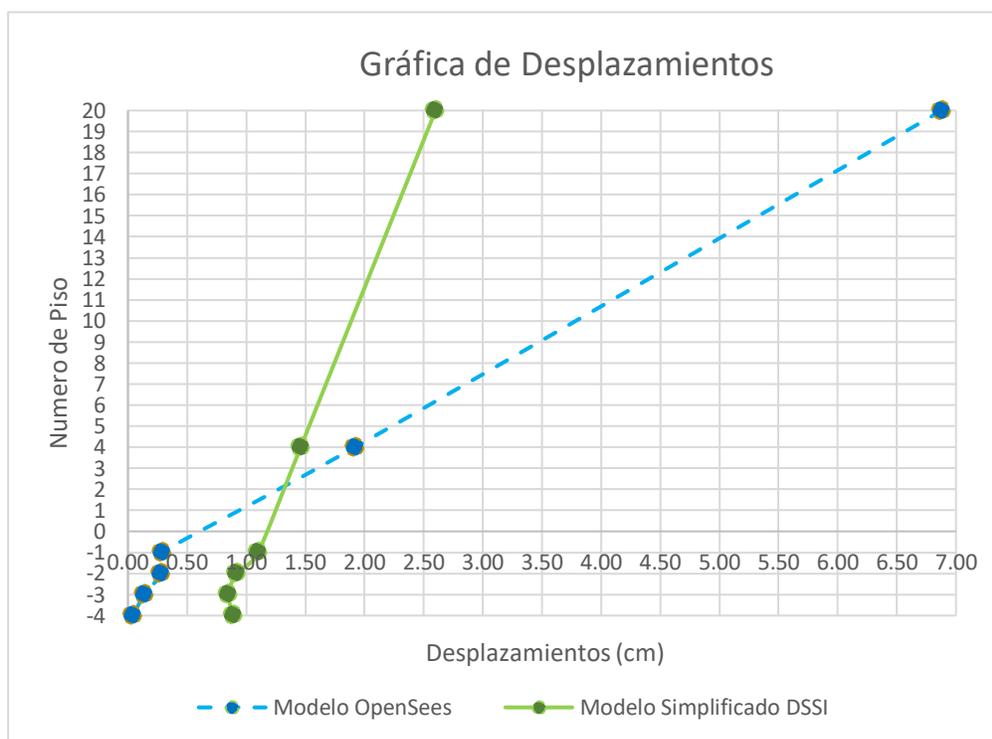


Figura V-6. Gráfica de Cortante Basal (Pangué).

V.3 Respuesta de Cortante Basal, Momentos Flectores y Drift de Entrepiso

Los resultados del cortante basal, los momentos flectores máximos y mínimos y los drift (derivas de entrepiso) que actúan en el edificio en estudio, producto de la aplicación del registro de aceleraciones, historia de desplazamientos y registro de aceleraciones e historia de desplazamientos fueron graficadas para cada uno de los registros del análisis (DSSI) y se presenta en las figuras V-7 a V-21.

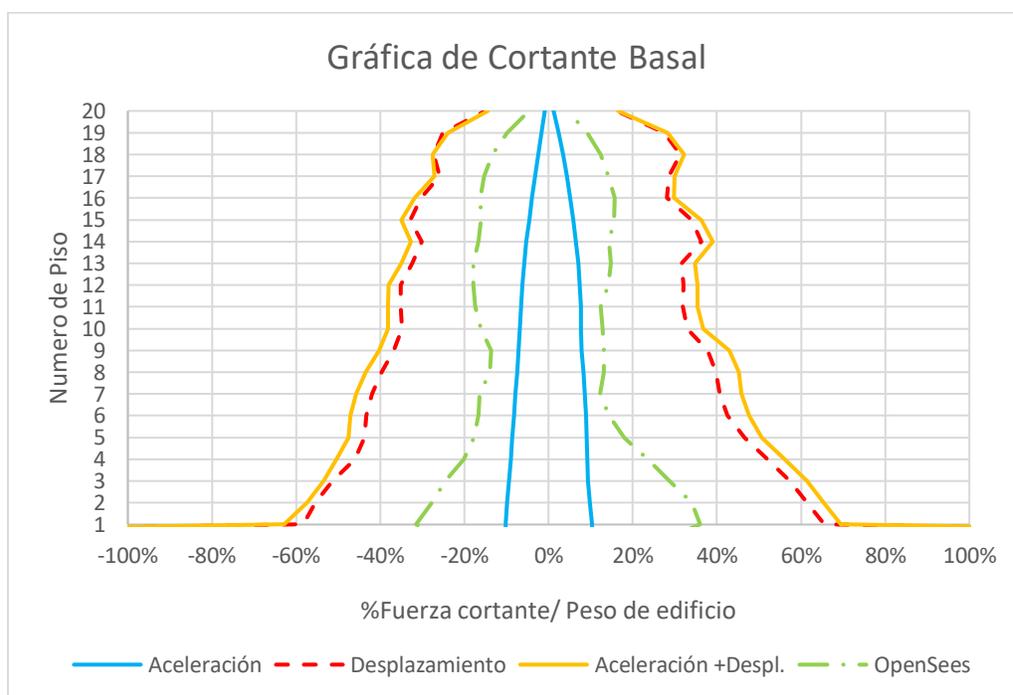


Figura V-7. Gráfica de Cortante Basal (Rapel).

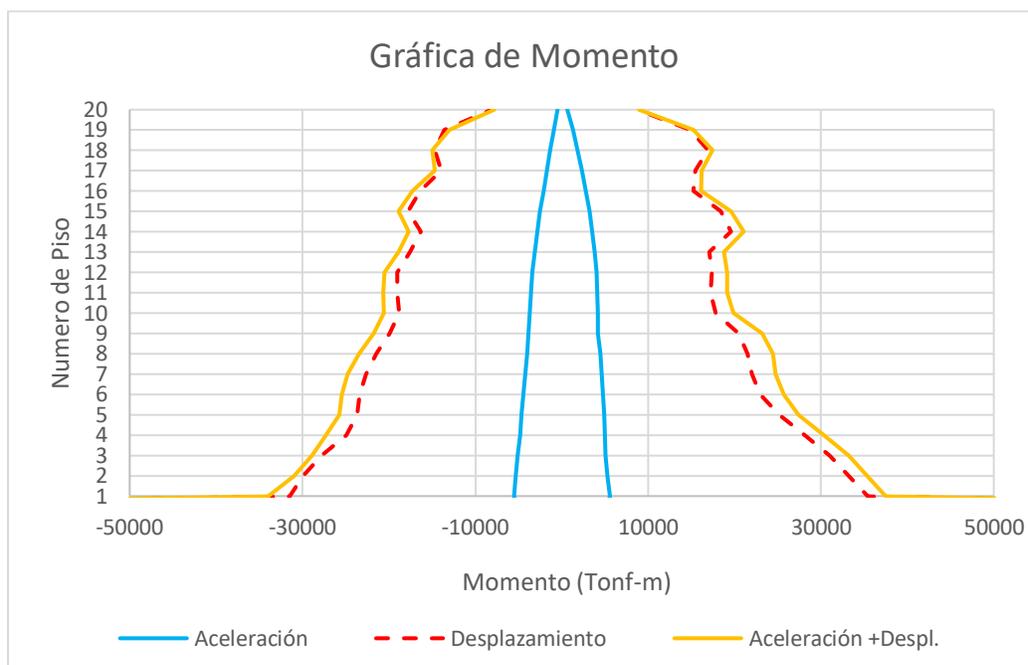


Figura V-8. Gráfica de Momentos Flectores (Rapel).

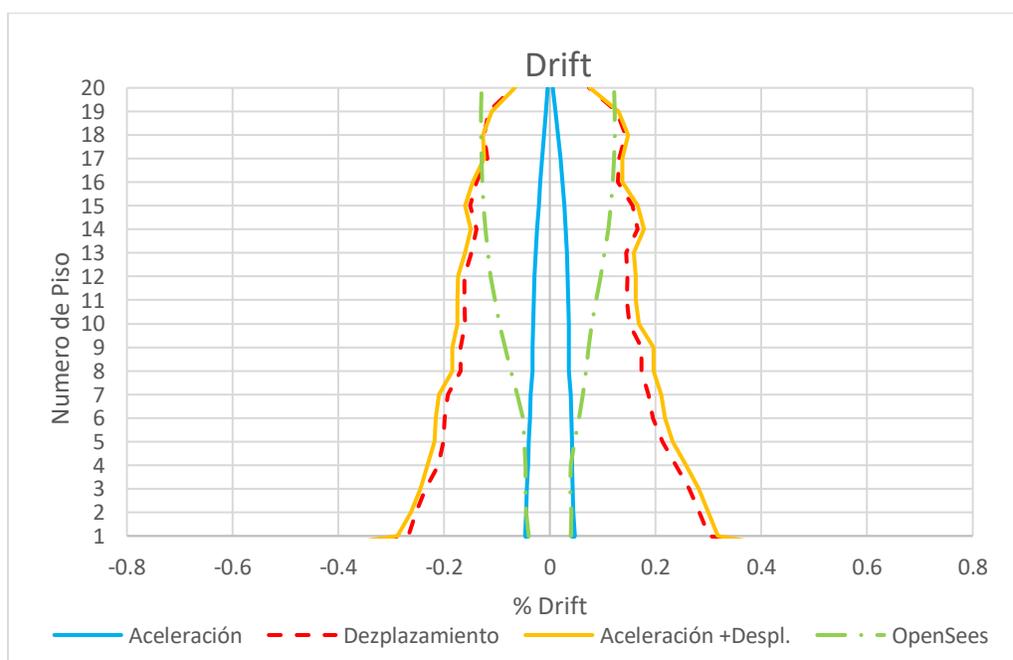


Figura V-9. Gráfica de Drift de entrepiso (Rapel).

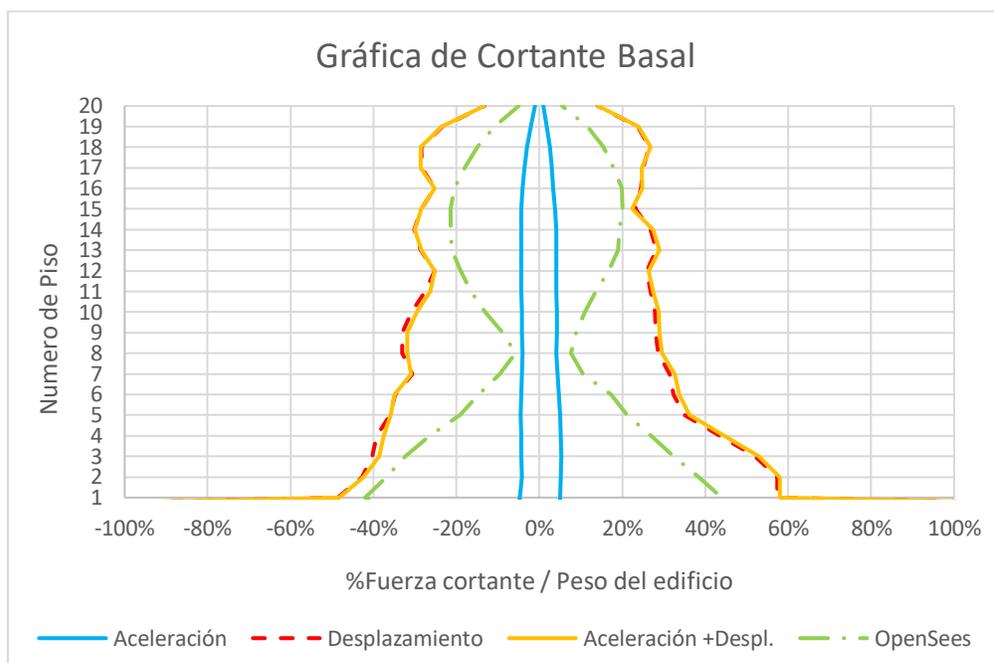


Figura V-10. Gráfica de Cortante Basal (Cerro El Roble).

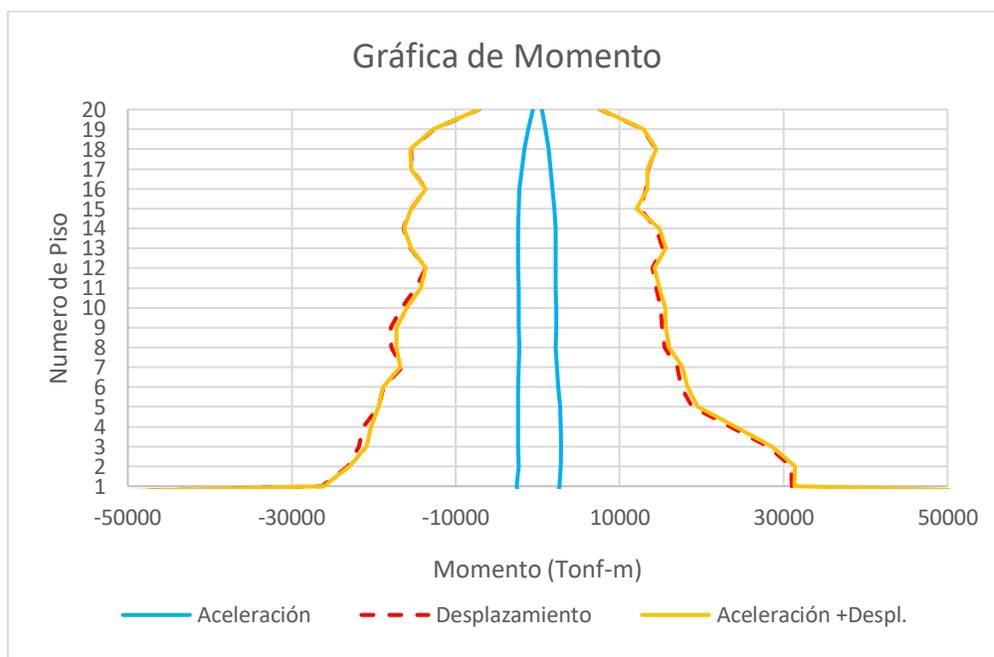


Figura V-11. Gráfica de Momentos Flectores (Cerro El Roble).

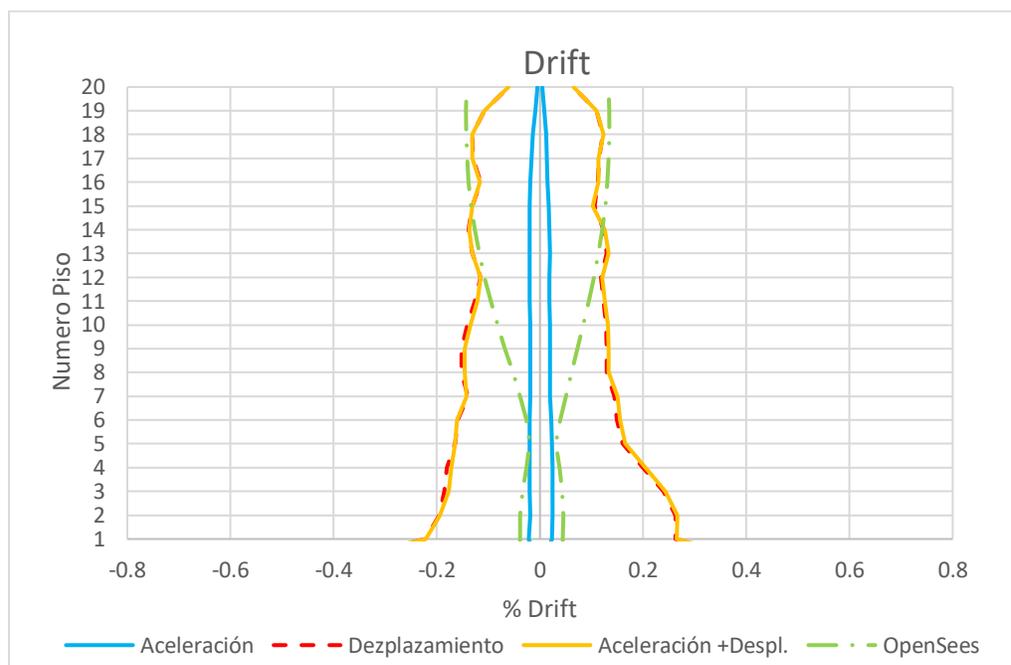


Figura V-12. Gráfica de Drift de entresuelo (Cerro El Roble).

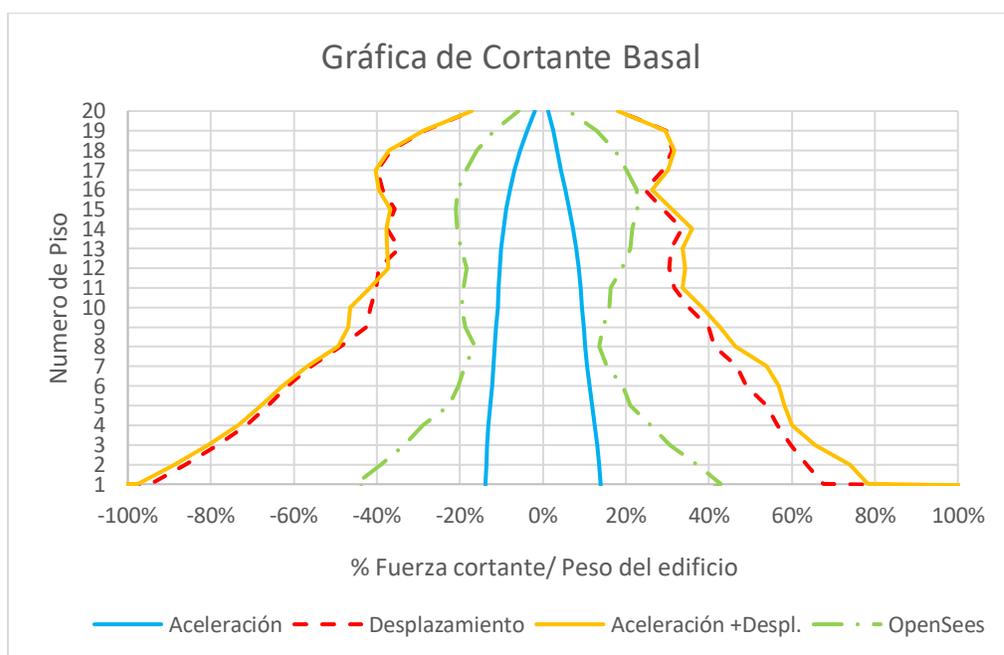


Figura V-13. Gráfica de Cortante Basal (Santa Lucía).

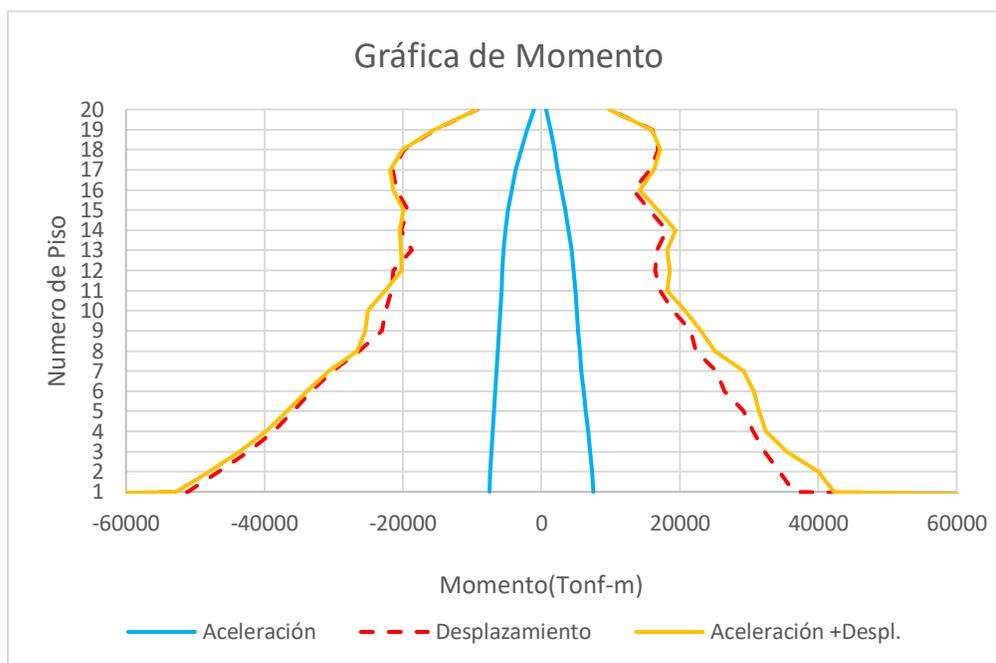


Figura V-14. Gráfica de Momentos Flectores (Santa Lucía).

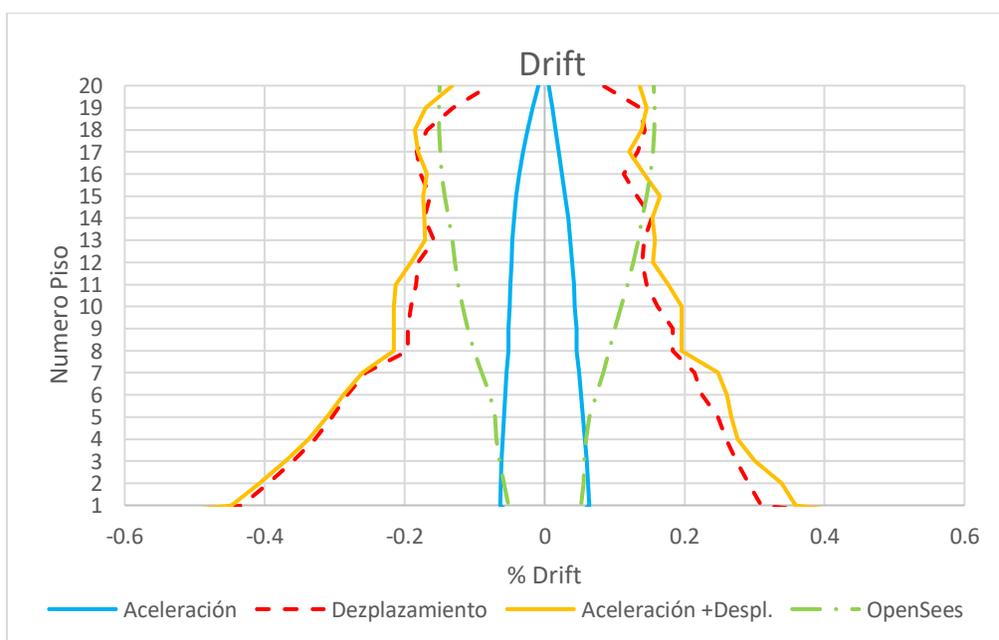


Figura V-15. Gráfica de Drift de entrepiso (Santa Lucía).

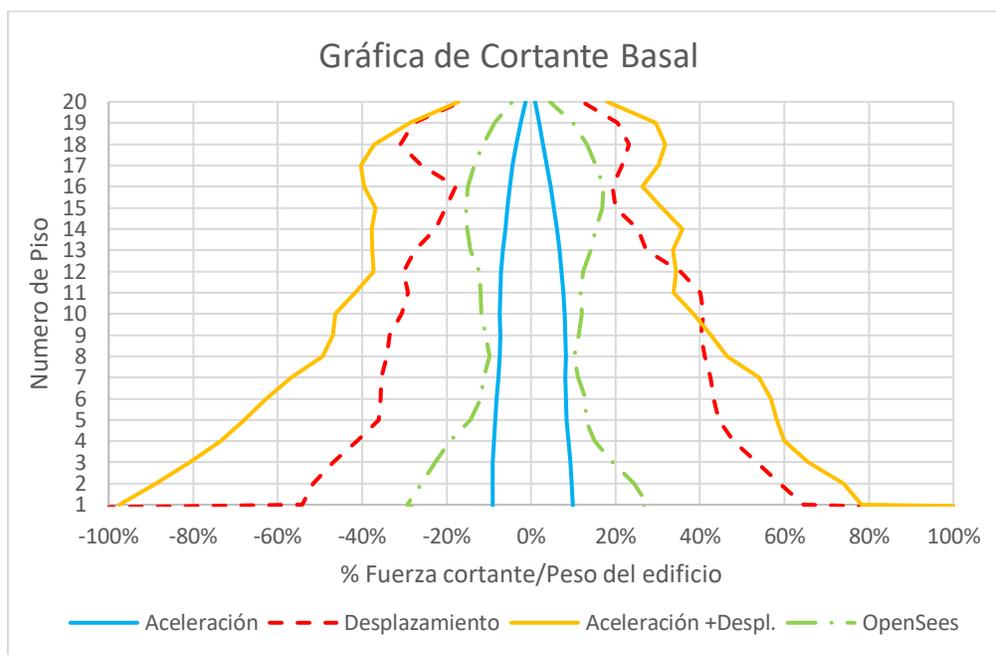


Figura V-16. Gráfica de Cortante Basal (Cerro Viejo).

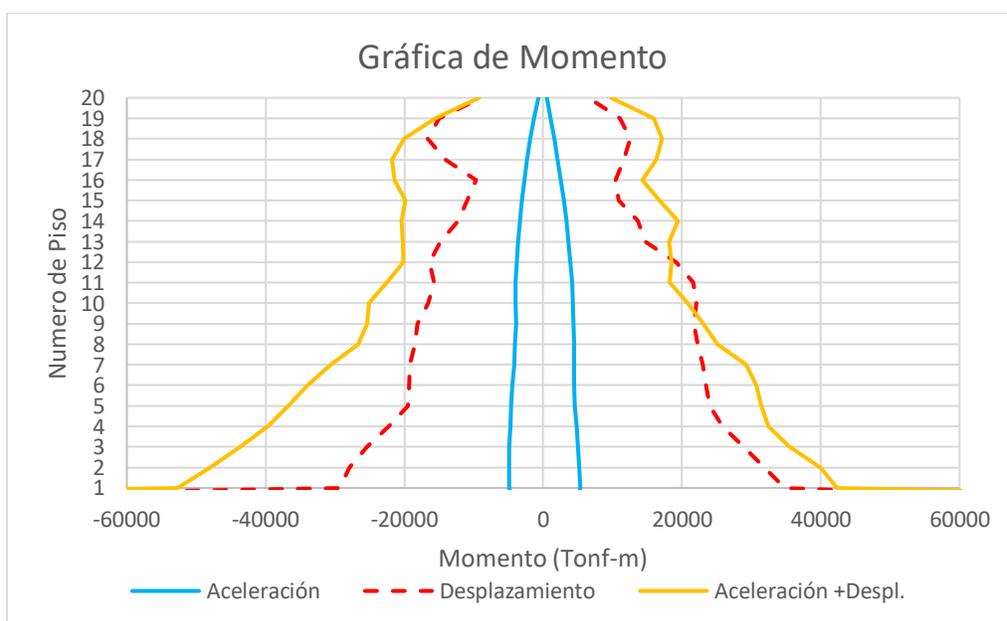


Figura V-17. Gráfica de Momentos Flectores (Cerro Viejo).

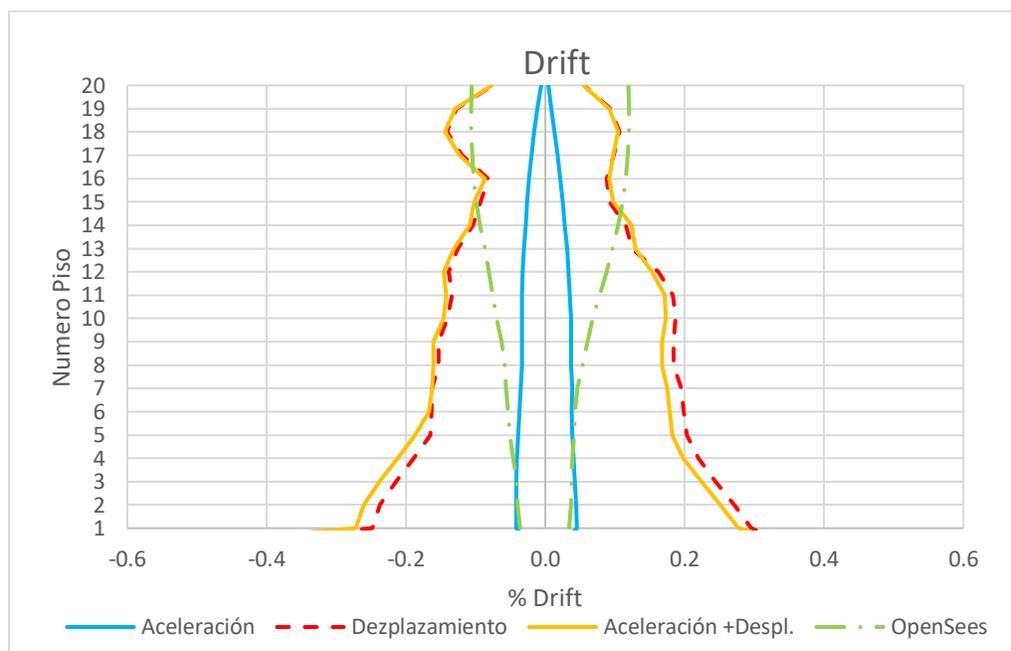


Figura V-18. Gráfica de Drift de entrepiso (Cerro Viejo).

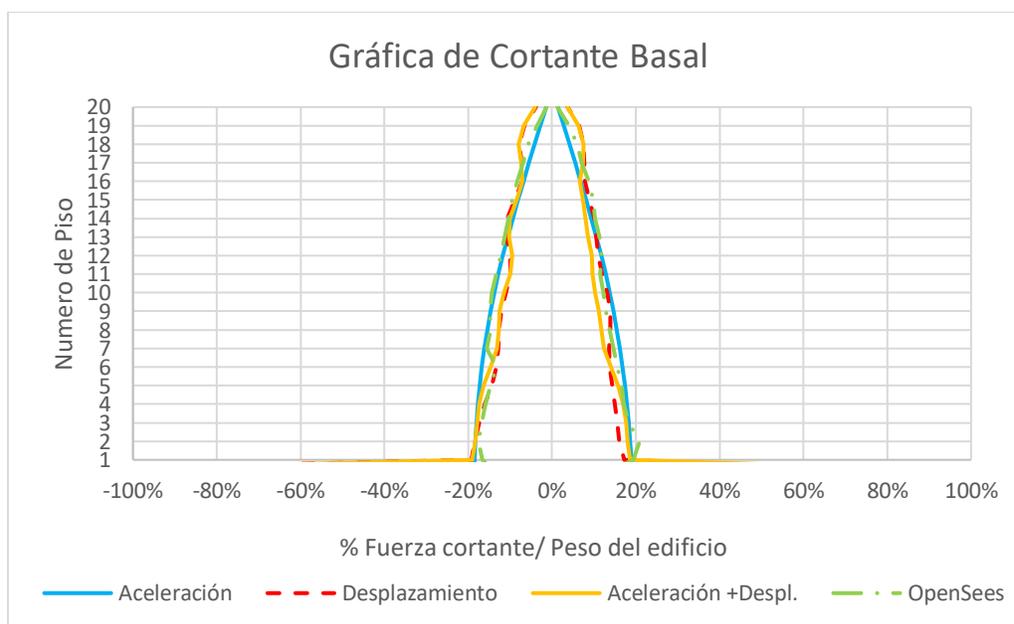


Figura V-19. Gráfica de Cortante Basal (Pangué).

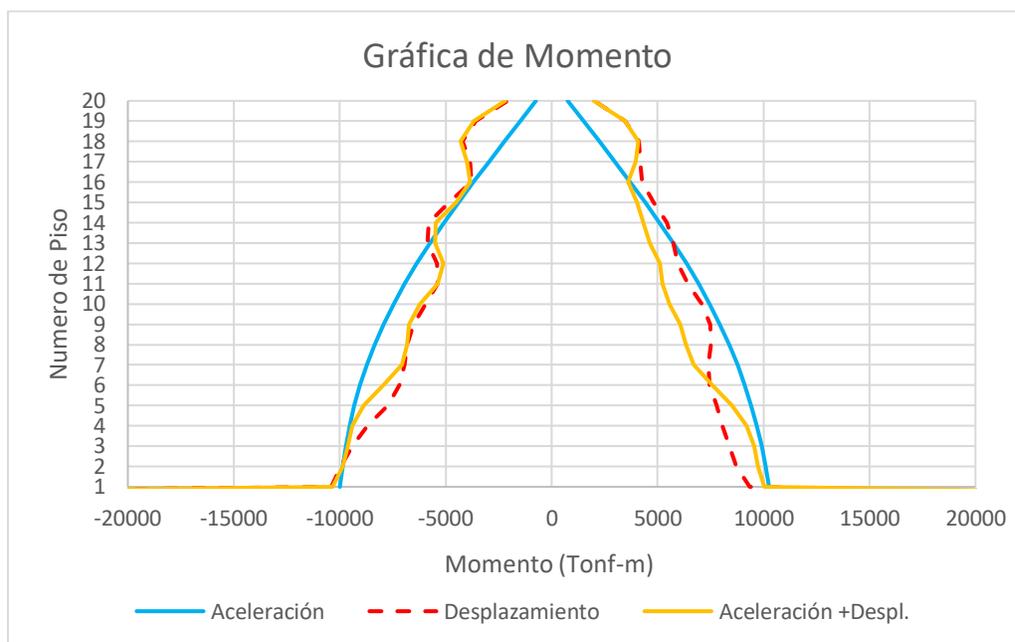


Figura V-20. Gráfica de Momentos Flectores (Pangue).

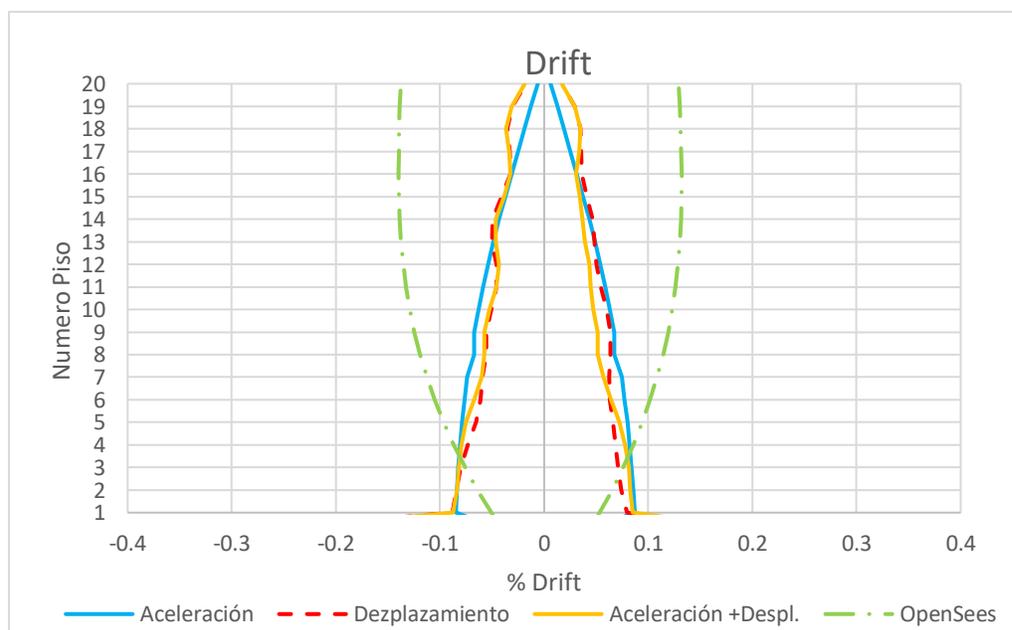


Figura V-21. Gráfica de Drift de entrepiso (Pangue).

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a tomar en cuenta en futuras investigaciones.

VI.1 Conclusiones

- Para el análisis simplificado DSSI los resultados del desplazamiento de techo (Nodo 20) obtenidos para los registros de Cerro el Roble y Santa Lucía son mayores en 10% y 9% respecto a los valores esperados del modelo 3D de OpenSees; esto no ocurre con los valores de los desplazamientos para los registros de Cerro Viejo y Pangué, donde los valores obtenidos son menores y solo alcanzaron un 30 % y 63 % del valor esperado del modelo 3D. Con respecto al registro de Rapel se puede visualizar de la Figura V-2 que los resultados de los desplazamientos de techo para fines prácticos, son iguales tanto para el modelo simplificado DSSI y el modelo de OpenSees.
- Con respecto a los valores de los desplazamiento para el subterráneo S1(seleccionado por ser el mayor desplazamiento de los 4 subterráneos), se obtuvo un valor de 2.57 cm en el modelo simplificado para el registro de Santa Lucía (Registro que genero máximo desplazamiento en S1) por otro lado, para ese mismo registro con la metodología de análisis desarrollada en OpenSees se obtuvo un valor de 0.28 cm, lo que nos indica que el valor de referencia obtenido en OpenSees es menor al obtenido mediante el análisis simplificado DSSI y que, el modelo simplificado DSSI nos da una idea a grandes rasgos de los valores de

desplazamientos esperados; esto se debe de tomar en consideración para el caso de un análisis en edificaciones con subterráneos.

- La variación de los resultados de desplazamientos en el techo (Nodo 20) y subterráneo S1, entre el modelo simplificado DSSI y el modelo desarrollado en OpenSees puede deberse a que el modelo DSSI simplificado no considera un valor de masa en los niveles de los subterráneos, mientras que el modelo 3D de OpenSees si está considerando un valor de masa; la consideración del criterio de masa cero en los subterráneos puede ser un criterio no adecuado, al adoptar esa consideración hacemos que los niveles de los subterráneos transmitan una fuerza menor al suelo que rodea la cimentación de la subestructura cuando son excitados por un sismo y como resultado las fuerzas dinámicas laterales no se estarían transmitiendo adecuadamente modificando la respuesta de la estructura; otro factor incidente en la variación de las respuestas de los desplazamientos entre el modelo simplificado DSSI y el modelo de OpenSees, puede deberse a que existe una porción del suelos que se desplaza con la estructura agregando masa al volumen del subterráneo y una rigidez lateral del suelo que impone restricción lateral ,esto impone nuevas características dinámicas que no consideradas un modelo simplificado (DSSI).
- Otro de los aspectos que puede estar ocasionando una diferencia entre ambos resultados de los modelos, pudiera estar relacionado directamente con curva de histéresis del suelo de cimentación la cual, se considera de forma aproximada en el modelo simplificado (DSSI) y, el amortiguamiento debido a la interacción entre el edificio y el suelo en la cimentación (esto no está considera el modelo

simplificado DSSI); lo anterior en otras palabras está asociado con el cambio de transferencia de energía en el modelo, que son omitidos en el modelo simplificado y pueden ser incorporados con mayor rigurosidad a través de un modelo directo 3D desarrollado en OpenSees.

- Otro motivo que pudiera estar asociado a estar alcanzando mayores desplazamientos laterales en el modelo simplificado (DSSI) en relación a los modelos directo en OpenSees, es la inexistencia en los modelos simplificados de la restricción lateral del suelo en las paredes de los subterráneos del edificio, por lo tanto, existe mayor flexibilidad lateral (al tener mayor altura del edificio no restringida lateralmente) y, como resultado un mayor periodo y desplazamiento de la estructura. Estos resultados estarían indicando que el análisis simplificado DSSI tiende a aumentar los desplazamientos laterales y que estos resultados podrían utilizarse para tener una idea conservadora de los desplazamientos a nivel de la subestructura.
- Los valores de los Cortantes Basales obtenidos por el análisis simplificado DSSI obtuvieron un aumento en Rapel (33%), Cerro El Roble (14%), Santa Lucía (35%), 50% (Cero Viejo) y 1% (Pangue) con respecto los valores esperados para el análisis 3D en OpenSees. Los resultados de los Cortantes Basales en el modelo simplificados DSSI indicarían que, el amortiguamiento del suelo ayuda a disminuir el Cortante Basal a nivel de los subterráneos y además que el modelo simplificado DSSI muestra mayores valores de Drift por no tener una restricción lateral evidente sino más bien, se están imponiendo las condiciones

(desplazamientos laterales de los subterráneos impuestos provenientes del análisis en DEEPSOIL).

- Para los valores de los Drift de entrepiso podemos observar una cercanía en los obtenidos para el análisis simplificado y el análisis en OpenSees para los niveles 14 al 19 para el caso de Rapel, del piso 11 al 19 para Cerro El Roble, 13 al 20 para Santa Lucía, 14 al 20 para Cerro Viejo y del 2 al 4 para Pangué.

Se puede decir de manera general que para el DSSI simplificado los mayores Drift se presentan en el nivel 1(uno) y que los mínimos Drift se dan en el Techo (Nodo 20) del edificio. Para el análisis en OpenSees muestra un comportamiento contrario, es decir, máximos Drift en techo y mínimos en el nivel 1(uno); esto se debe a que para el análisis en OpenSees el suelo en la base del edificio fue considerado y modelado, esto no ocurre con el análisis simplificado DSSI solo se considera su efecto.

- De la evaluación en general se concluye que modelo simplificado DSSI genera valores aproximados al realizado en OpenSees para los niveles superiores, pero que no se podría validar el modelo para los resultados obtenidos en los subterráneos ya que difieren de los valores esperados, esto podría deberse a que el análisis simplificado DSSI no se está modelando el suelo alrededor de la base del edificio sino más bien se está modelando su efecto, cuando se ingresa el registro de desplazamientos del suelo proveniente del DEPPSOIL; por tanto se está omitiendo el efecto de transmisión de las carga lateral, entre el suelo y la base, pérdida de amortiguamiento por radiación, y los cambios de energía

producto de la interacción en la paredes de los subterráneos en contacto con el suelo.

VI.2 Recomendaciones

- Se recomienda evaluar el modelo simplificado de Interacción Dinámica Suelo-Estructura (DSSI) para otros tipos de estratigrafía, ya que sabe que la estratigrafía es incidente en el comportamiento dinámica del suelo en la base de la cimentación.
- Se sugiere modelar diferentes tipologías de edificios variando alturas y niveles de subterráneo a fin de tener resultados de más modelos y poder establecer el nivel de confiabilidad de los resultados de un modelo simplificado.
- Es recomendable realizar el análisis del modelo simplificado (DSSI) con registros que posean similitud en sus características PGA, PGV, PGD, D5-95 y IA con el propósito de observar si alguna de las características del registro puede ser incidente cuando el modelo se simplifica.
- Se sugiere que al analizar edificaciones con subterráneos se consideren los efectos de la DSSI en la evaluación del desempeño sísmico, tanto a nivel de la subestructura como de la superestructura.

BIBLIOGRAFIA

Bustamante, J.F. (2021). *Comparación de los Métodos de Cálculo de Interacción Suelo Estructura con la NTP E- 0.30. 2018, al Determinar la Respuesta Estructural de la Torre II de la clínica Limatambo S.A.C Cajamarca* (tesis pregrado). Universidad Nacional De Cajamarca, Cajamarca, Perú.

Chopra, A.K. (2014). *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Fourth Edition. University of California at Berkeley.

Christie, M.J. (2017). *Estudio Del Fenómeno De Interacción Dinámica Suelo – Estructura Y Su Influencia En La Demanda Sísmica Estructural* (tesis pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2020). *A Practical Guide to Soil-Structure Interaction*. Washington, D.C, United States.

Hashash, Y.M., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2016). *DEEPSOIL 6.1, User Manual*. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Instituto Nacional de Normalización (INN) (2011). NORMA NCh433.Of1996, mod.2009, mob. Decreto Supremo 61. Diseño sísmico de edificios. Santiago, Chile.

Lorca O.A. (2018). Calidad Y Procesos Hidrogeoquímicos En El Agua De La Región Metropolitana: Estudio Del Área Concesión Mapa (tesis pregrado). Santiago, Chile.

Marín, P.A (2016). *Interacción dinámica suelo-estructura aplicada a distintas geometrías de cimentación (vibración transmitida del suelo a la estructura)* (tesis pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.

Pérez, C.R (2020). *Comparación De La Respuesta Sísmica De Edificios De Mediana Altura Con Interacción Suelo-Estructura* (tesis posgrado). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Pinto, F. J., Ledezma, C., Astroza, R., Abell, J. A. (2021). *Modeling the loss of vibration energy in buildings to elastic-waves using high-fidelity FE modeling and absorbent exterior boundaries*, Santiago, Chile.

Pinto, F. J., Ledezma, C. (2019). *Interacción Suelo-Estructura en Edificios de Gran Altura con Subterráneos en Santiago, Chile*, Santiago, Chile.

Pinto, F. J. (2021). *Dynamic Response of Tall Buildings with Basement Considering Soil-Structure Interaction* (tesis doctoral). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Stewart, J.P., Seed R.B., Fenves, G.L Members, ASCE (1999). *Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings*. University of California at Berkeley.

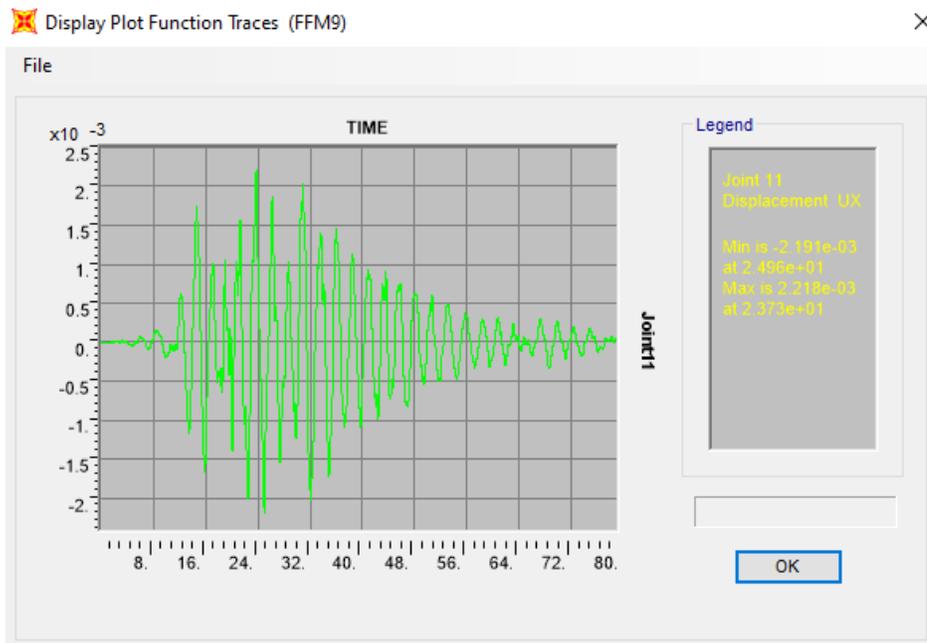
ANEXOS

ANEXO A: GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTOS

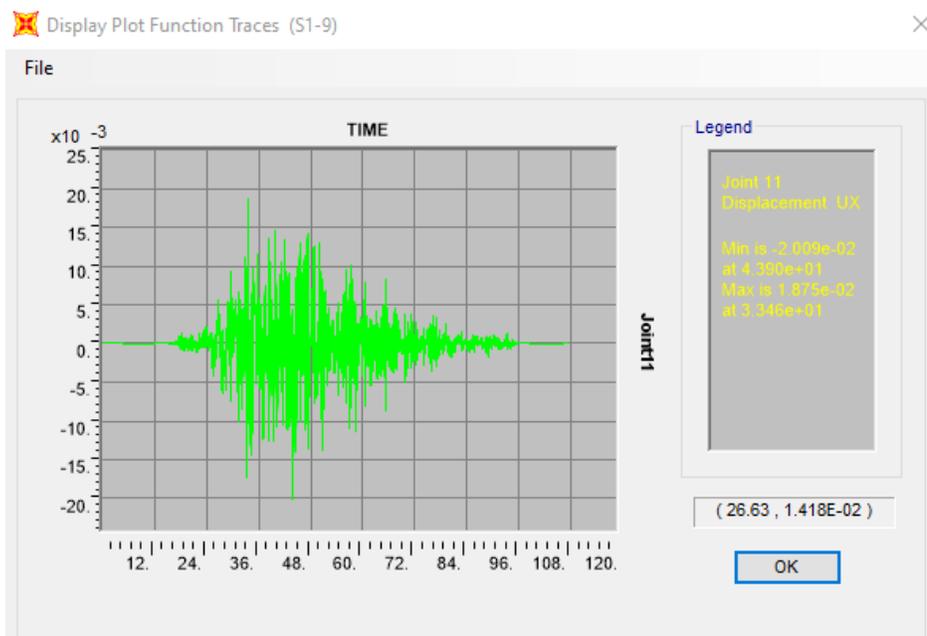
Rapel

Nota: Los valores de los desplazamientos están dados en metros

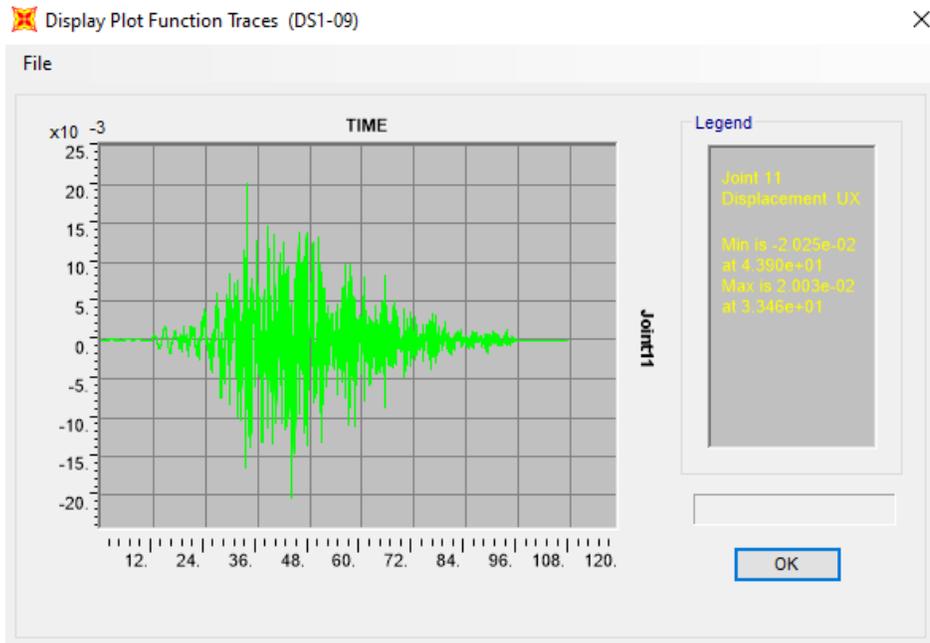
S1 (Aceleraciones)



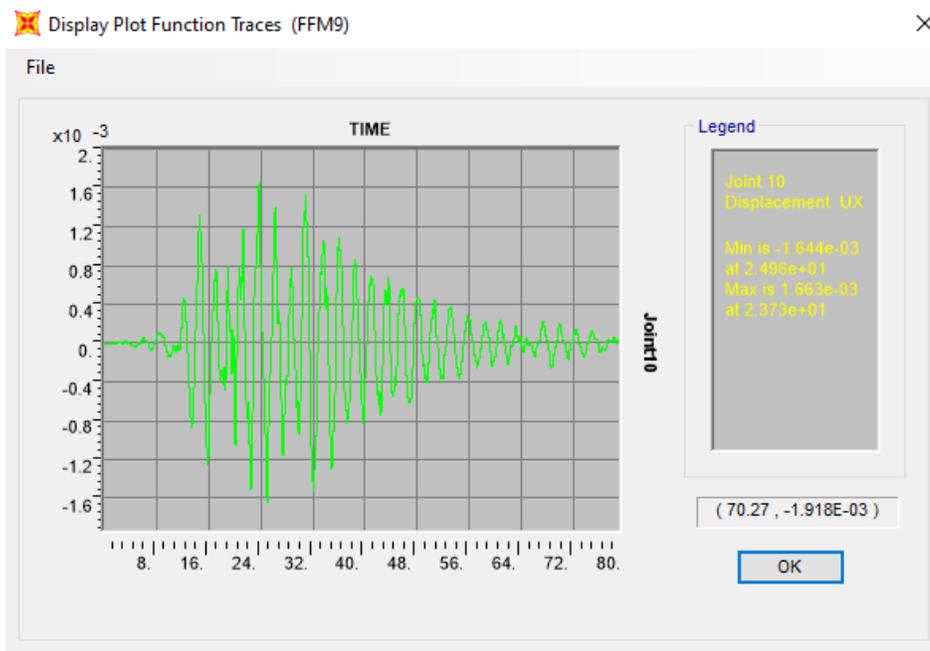
S1 (Desplazamientos)



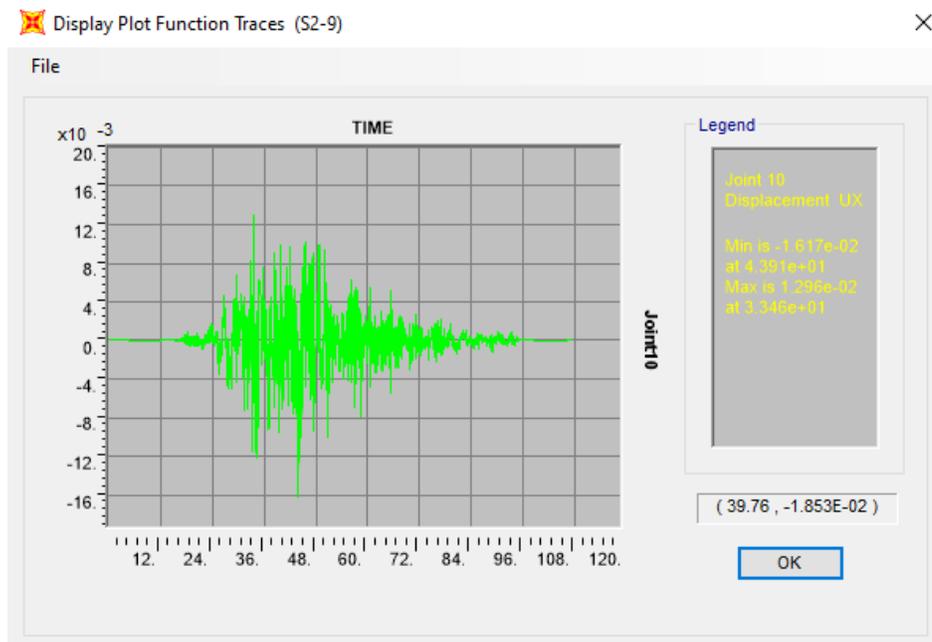
S1 (Aceleraciones y Desplazamientos)



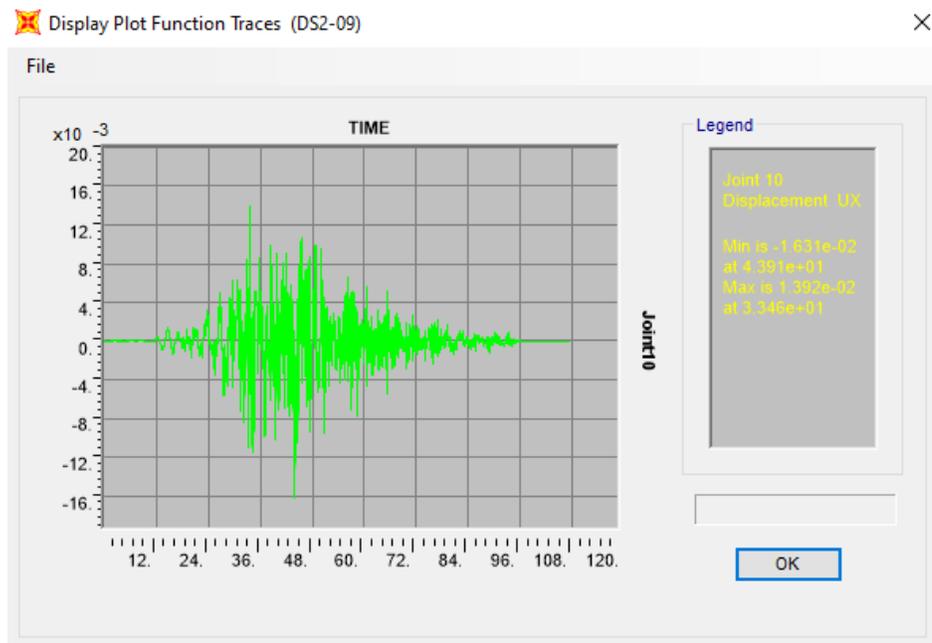
S2 (Aceleraciones)



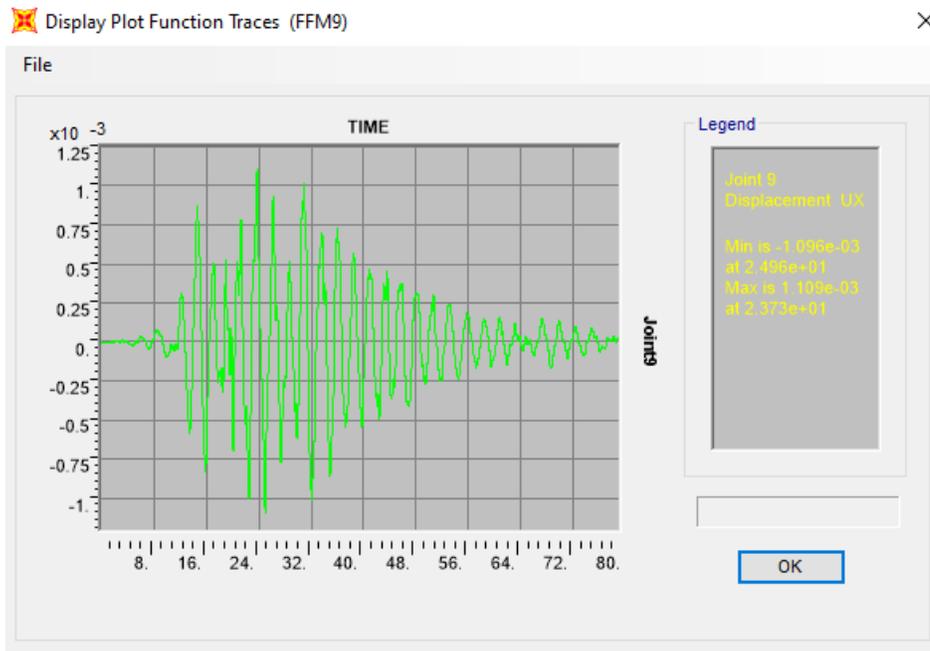
S2 (Desplazamientos)



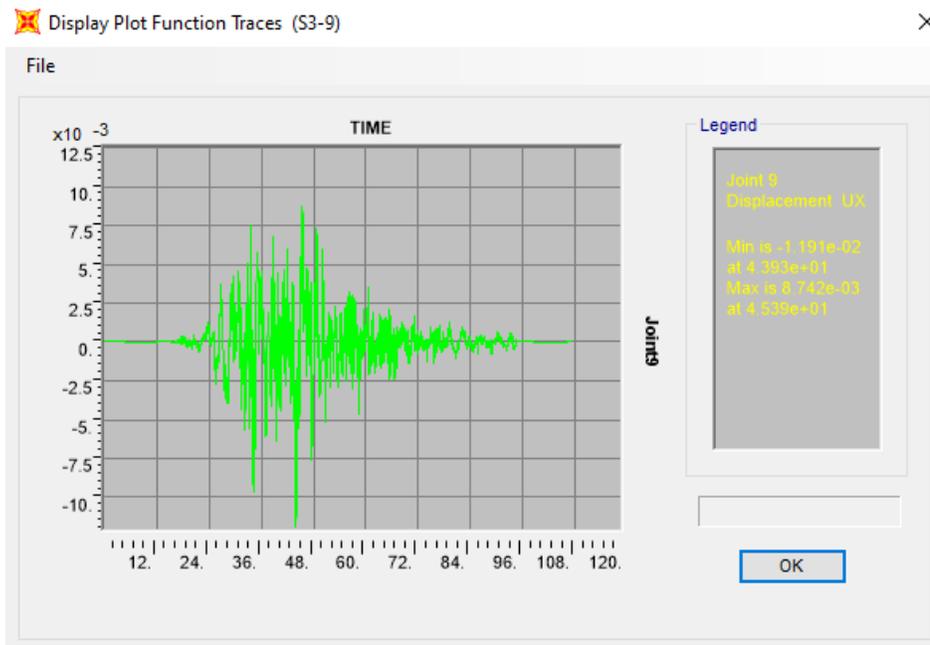
S2 (Aceleraciones y Desplazamientos)



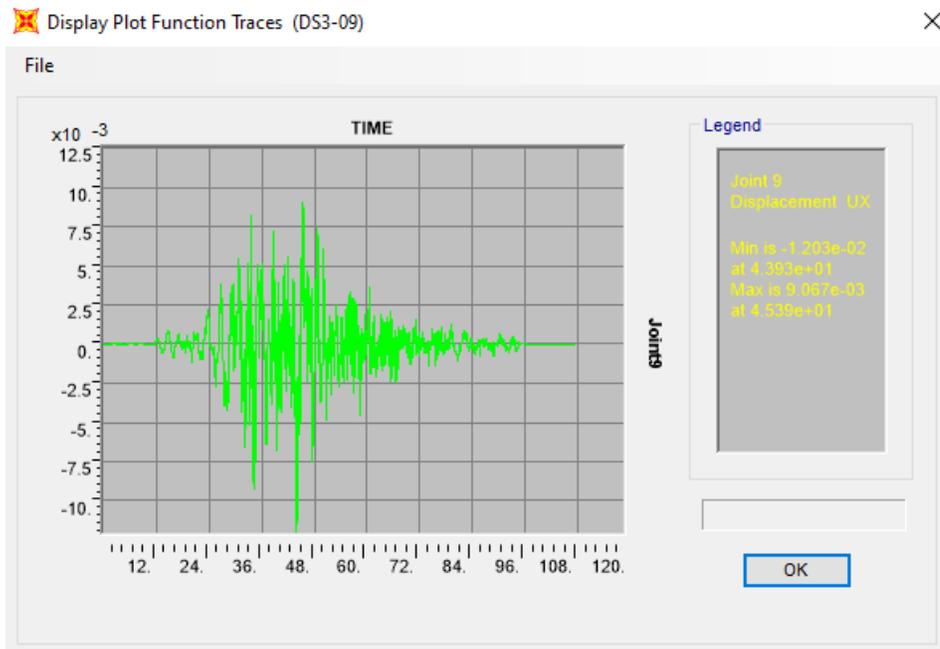
S3 (Aceleraciones)



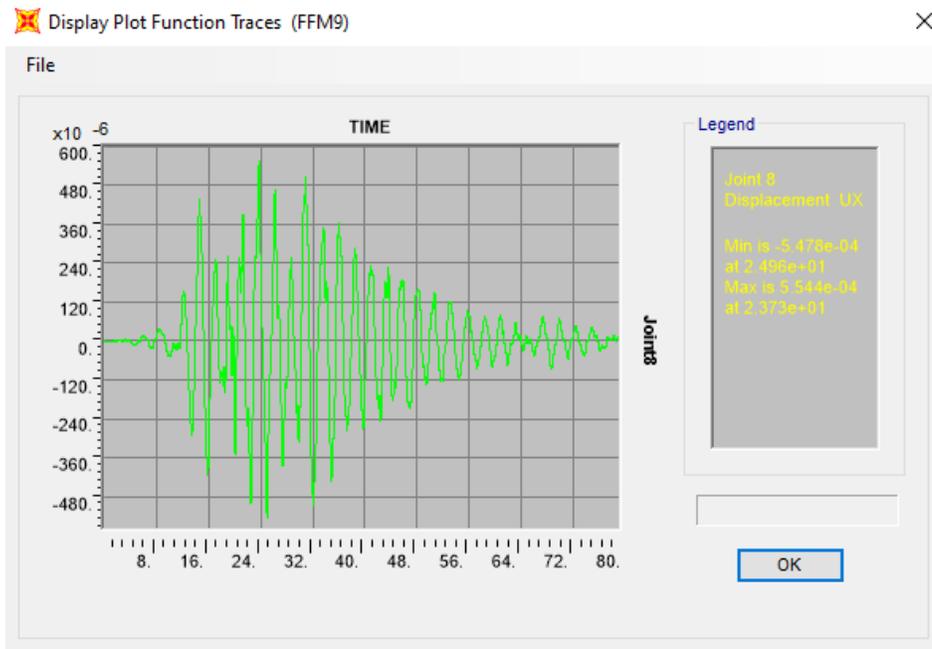
S3 (Desplazamiento)



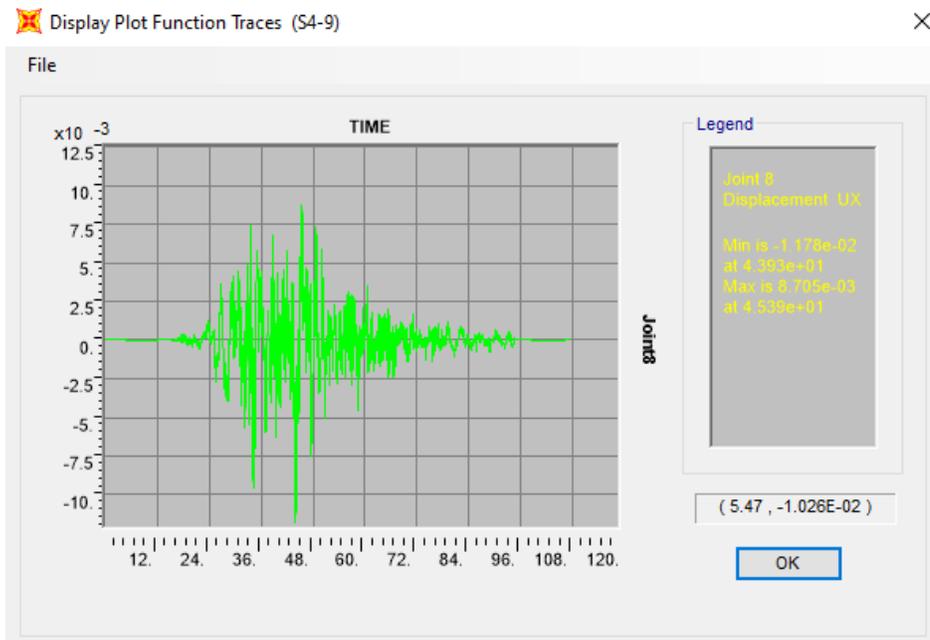
S3 (Aceleraciones y Desplazamiento)



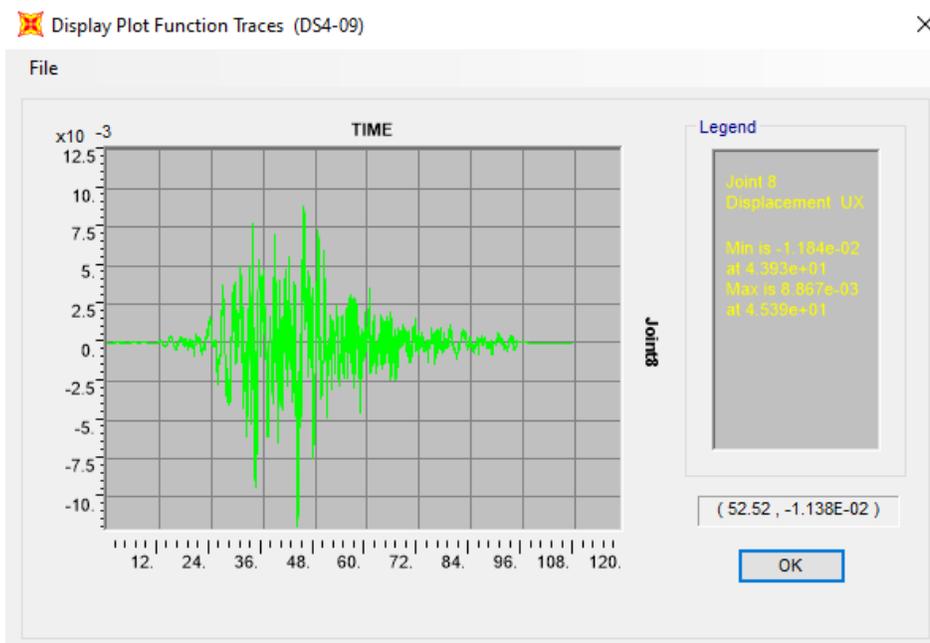
S4 (Aceleraciones)



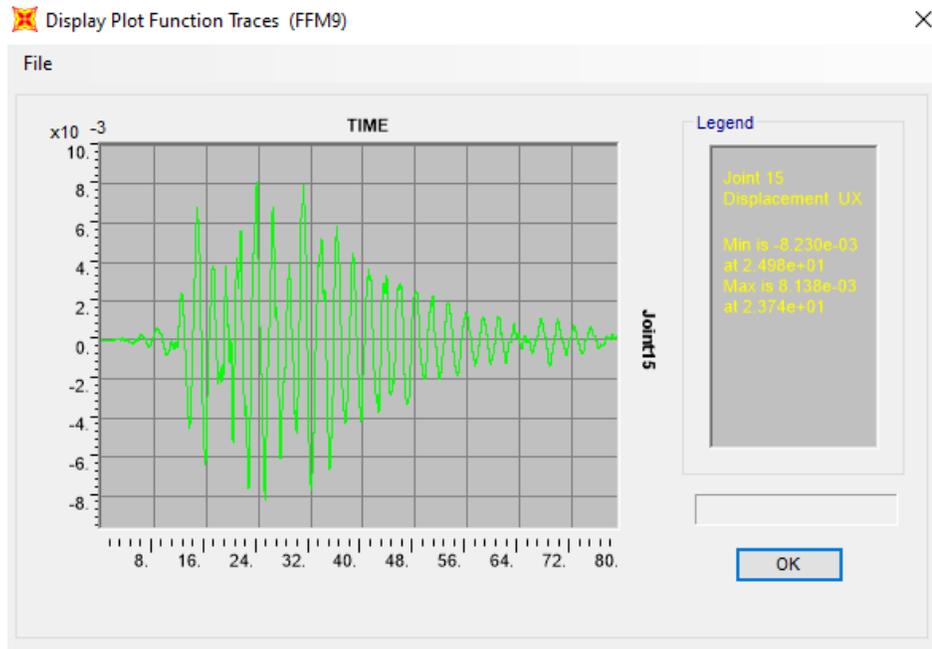
S4 (Desplazamiento)



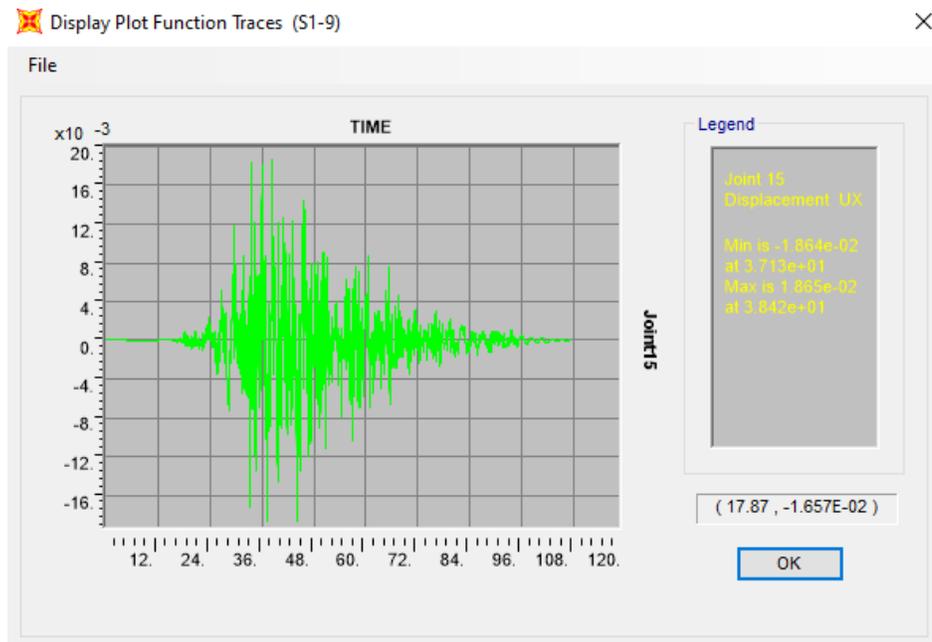
S4 (Aceleraciones y Desplazamiento)



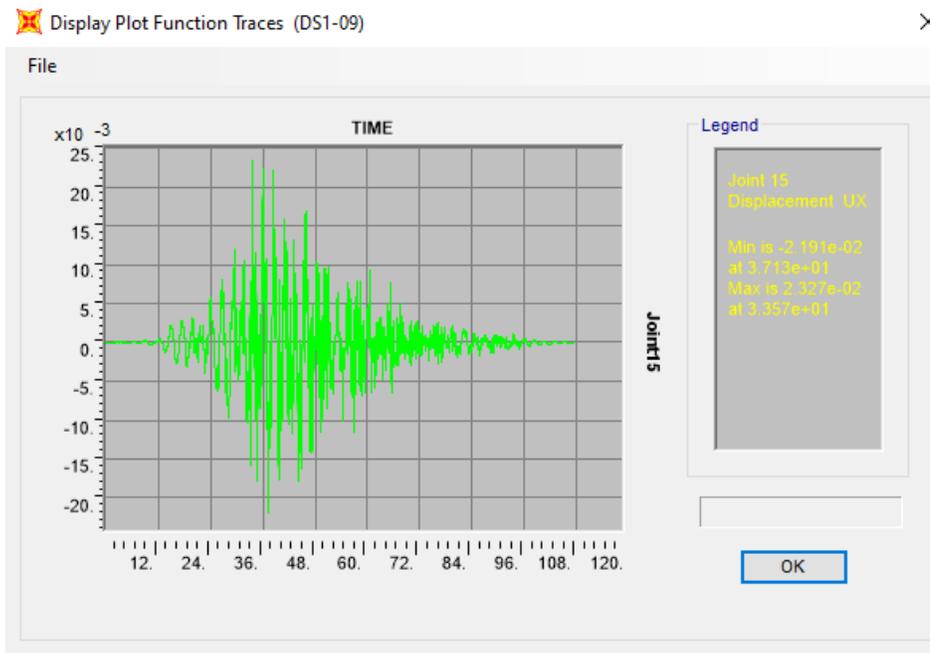
Nodo 15(Aceleraciones)



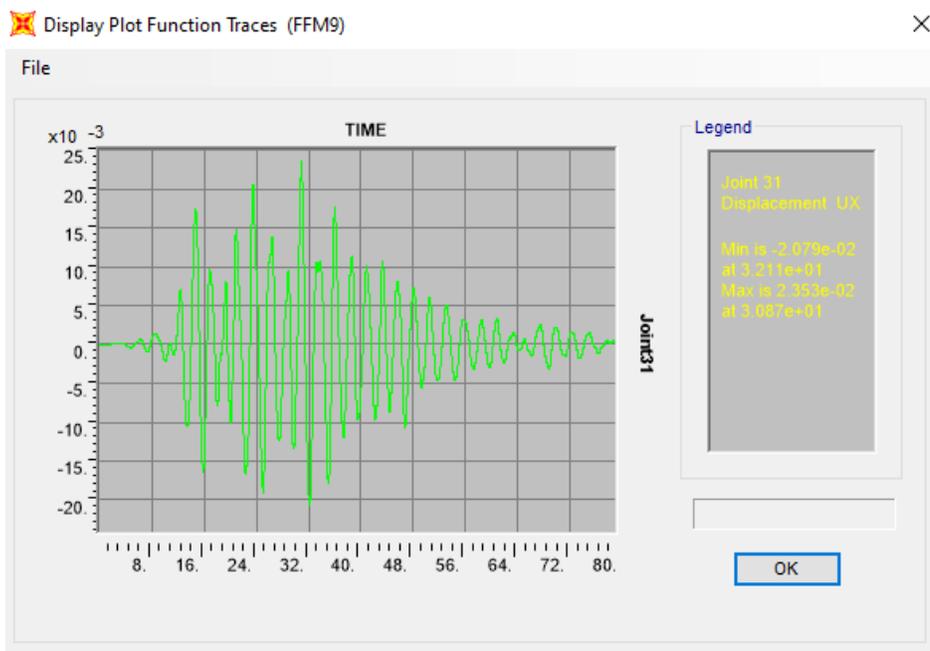
Nodo 15(Desplazamientos)



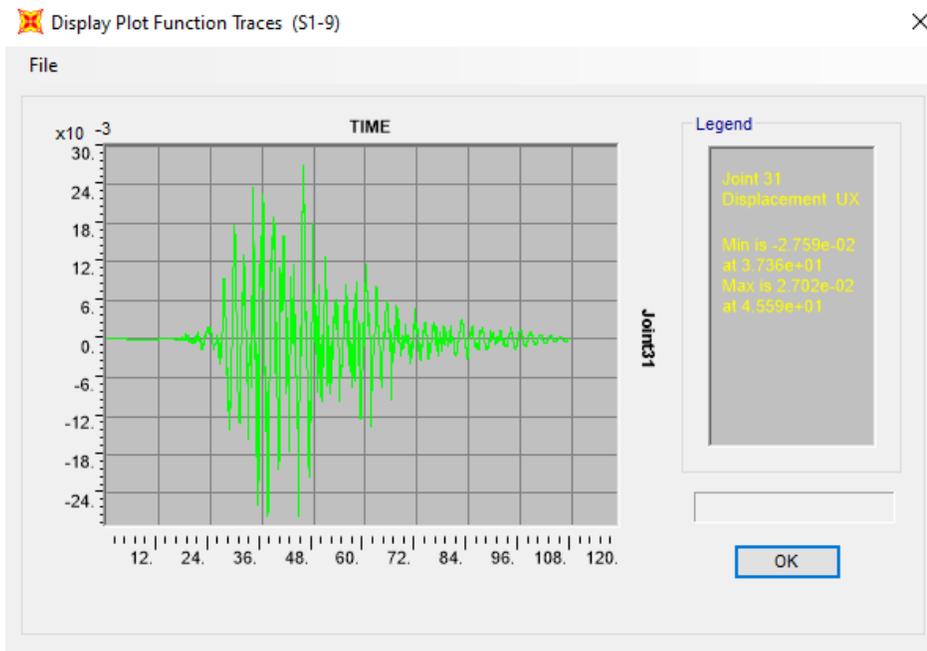
Nodo 15(Aceleraciones y Desplazamientos)



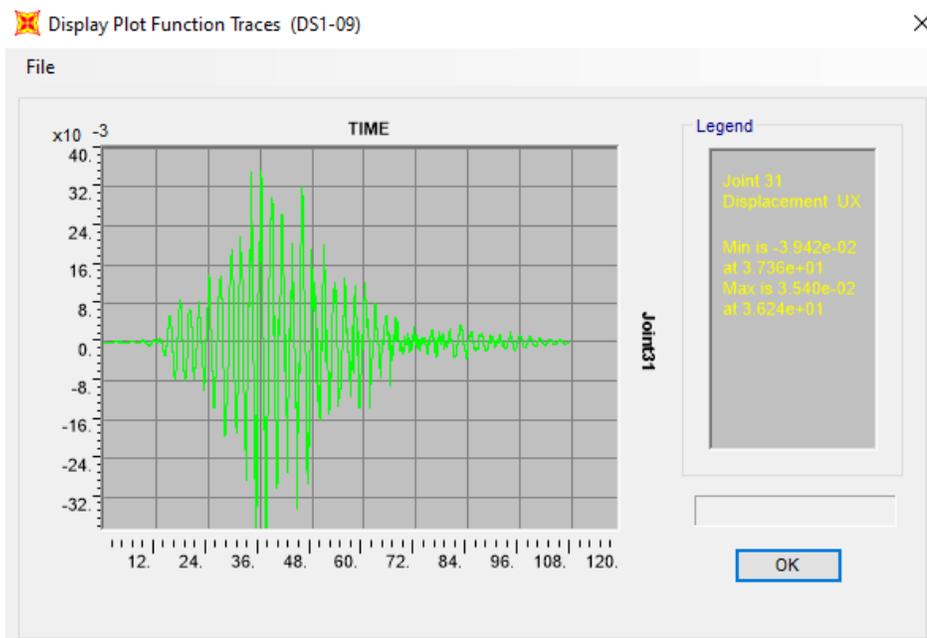
Nodo 31(Aceleraciones)



Nodo 31(Desplazamientos)



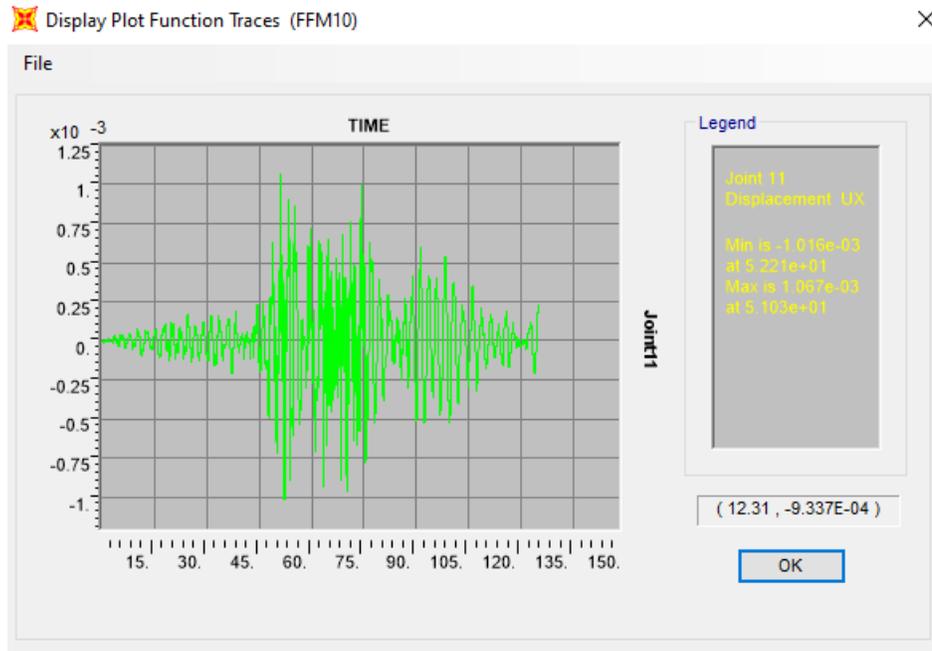
Nodo 31(Aceleraciones y Desplazamientos)



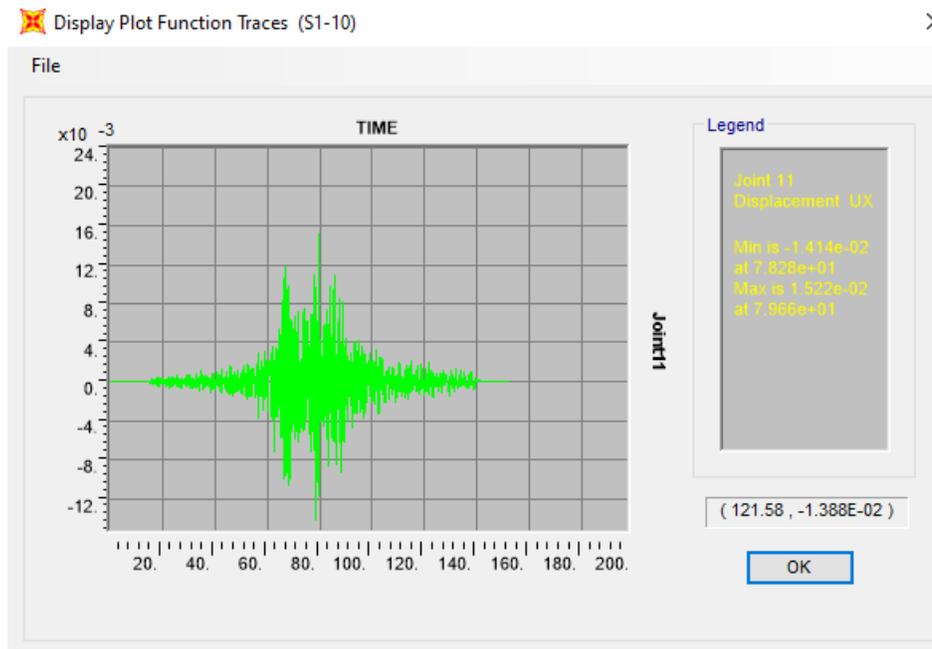
Cerro El Roble

Nota: Los valores de los desplazamientos están dados en metros

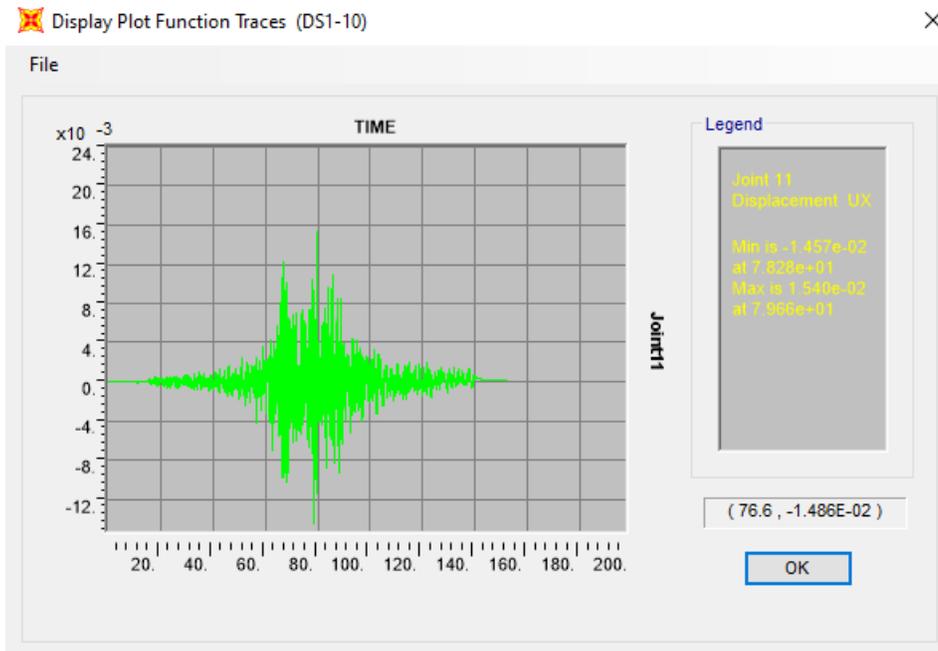
S1 (Aceleraciones)



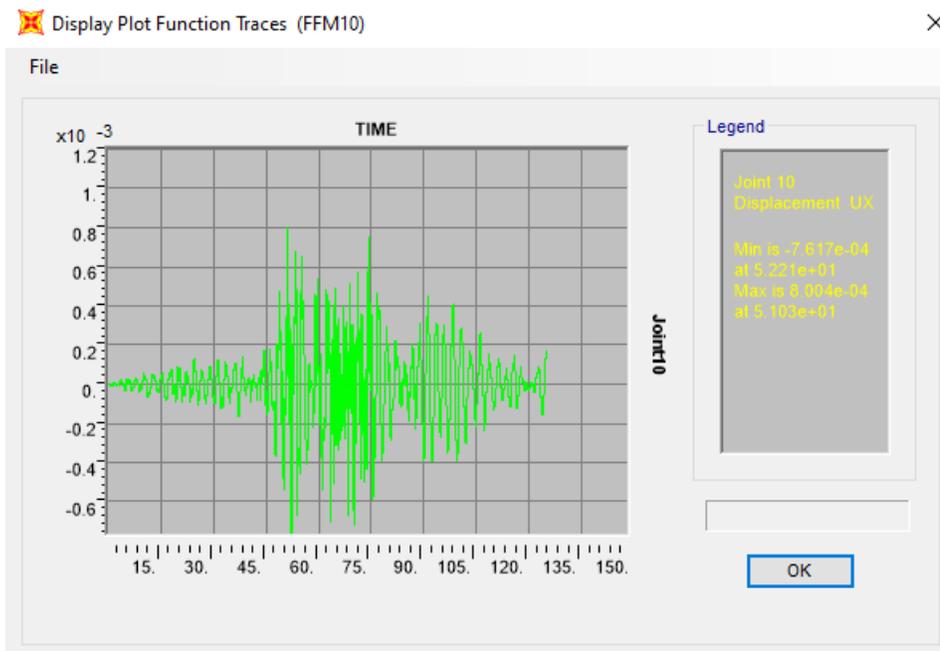
S1 (Desplazamientos)



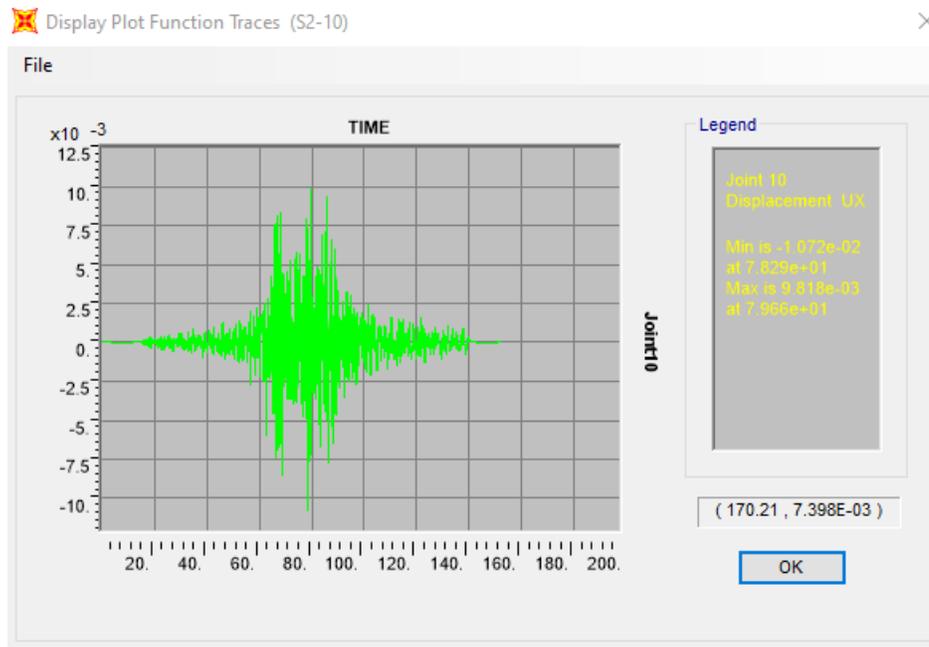
S1 (Aceleraciones y Desplazamientos)



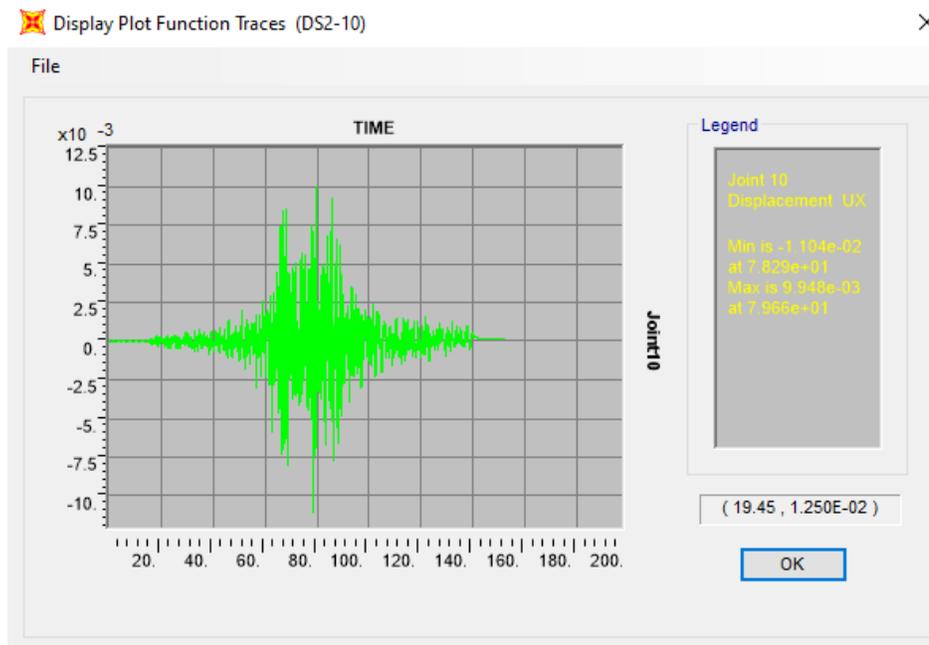
S2 (Aceleraciones)



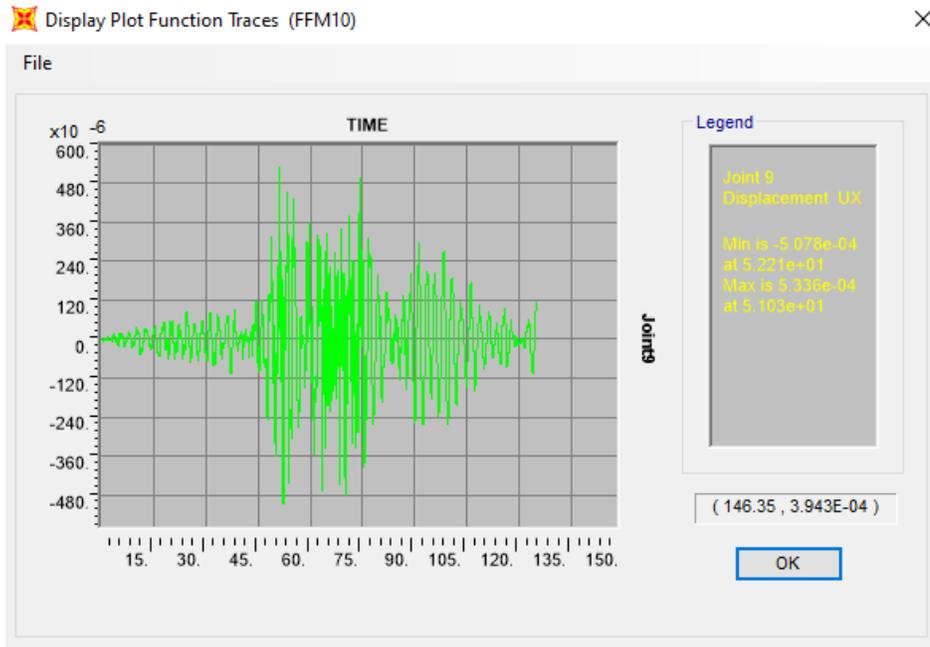
S2 (Desplazamientos)



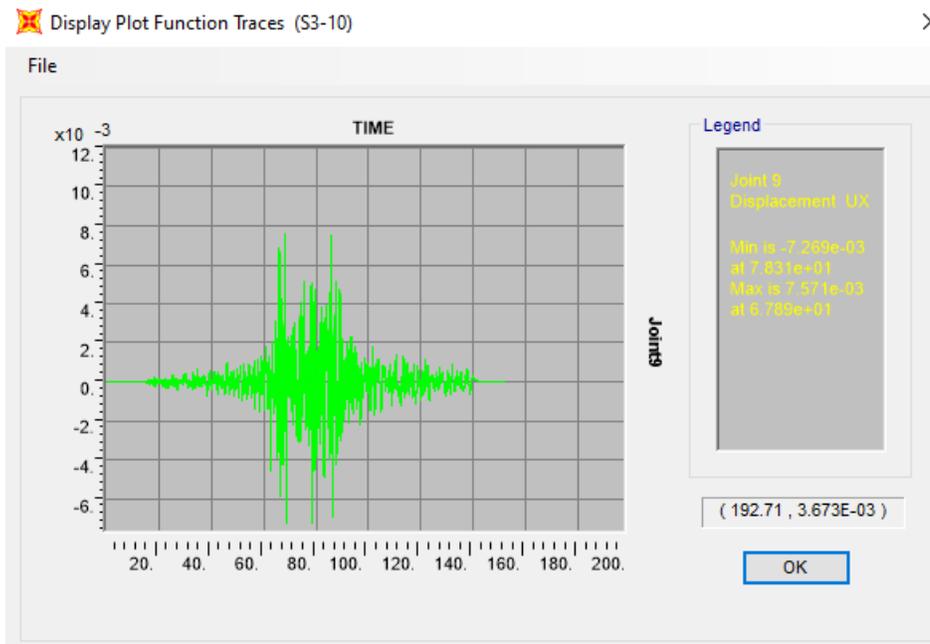
S2 (Aceleraciones y Desplazamientos)



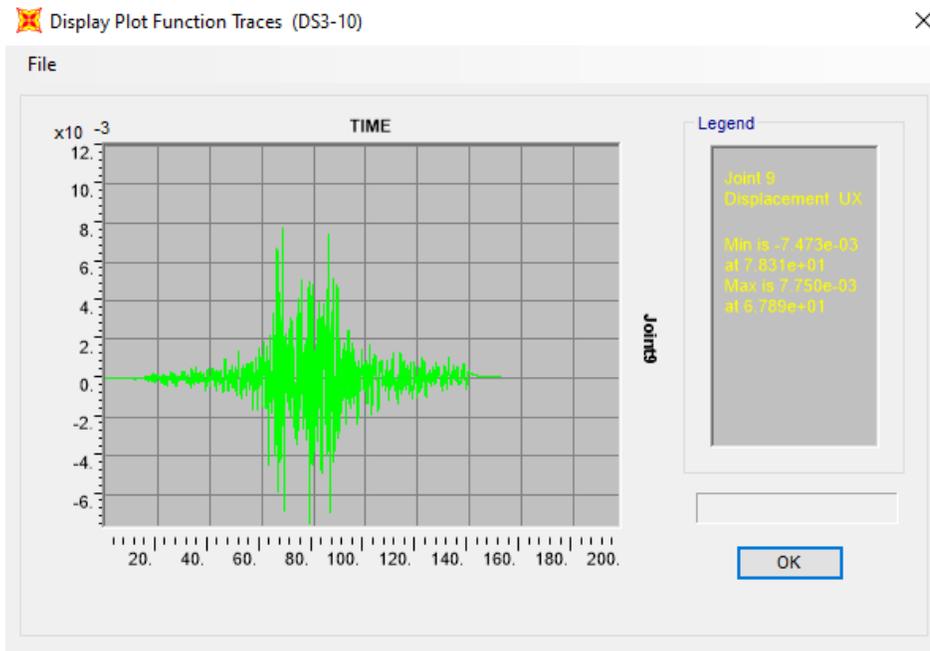
S3 (Aceleraciones)



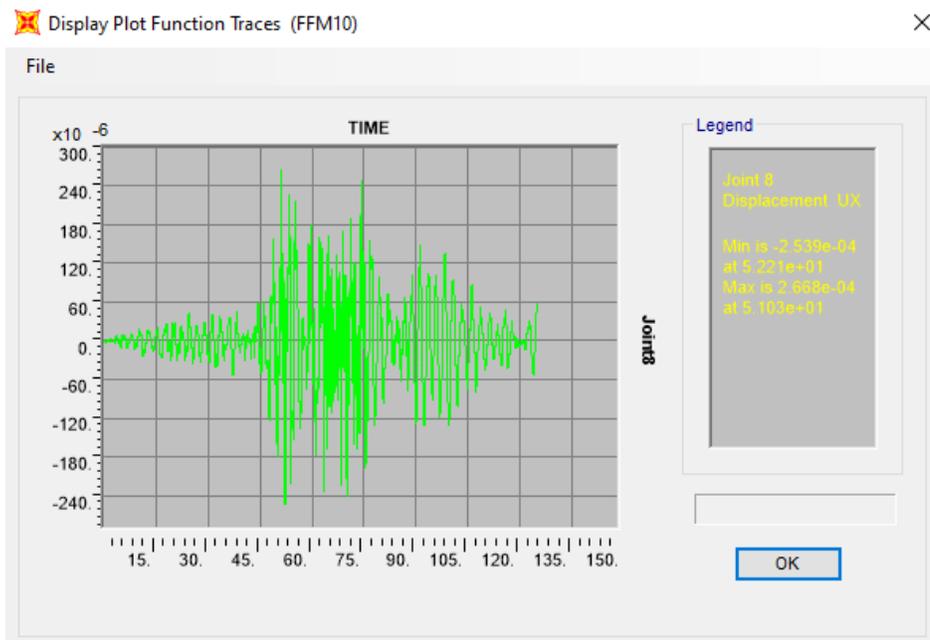
S3 (Desplazamientos)



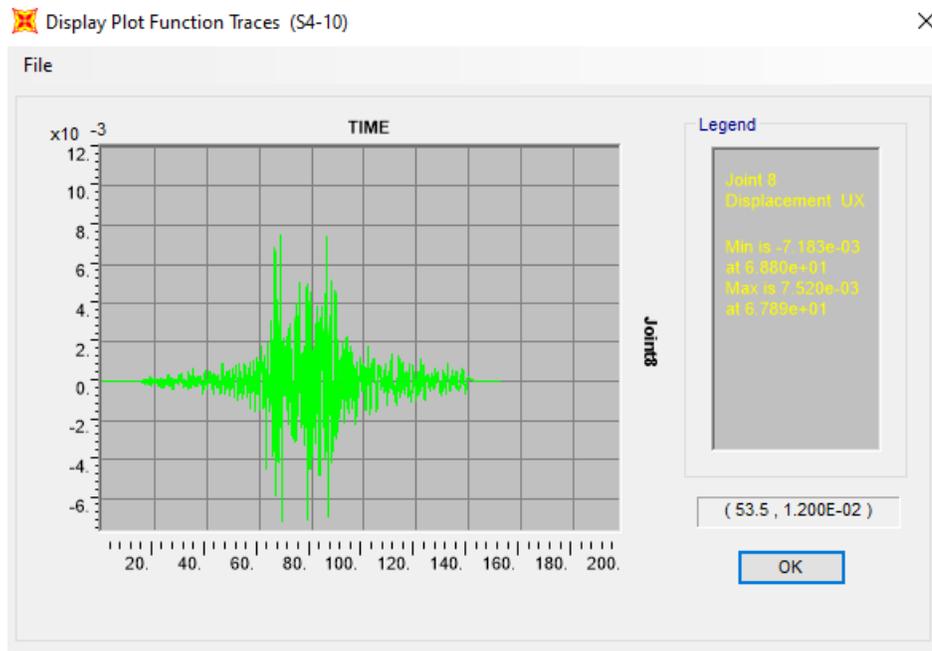
S3 (Aceleraciones y Desplazamientos)



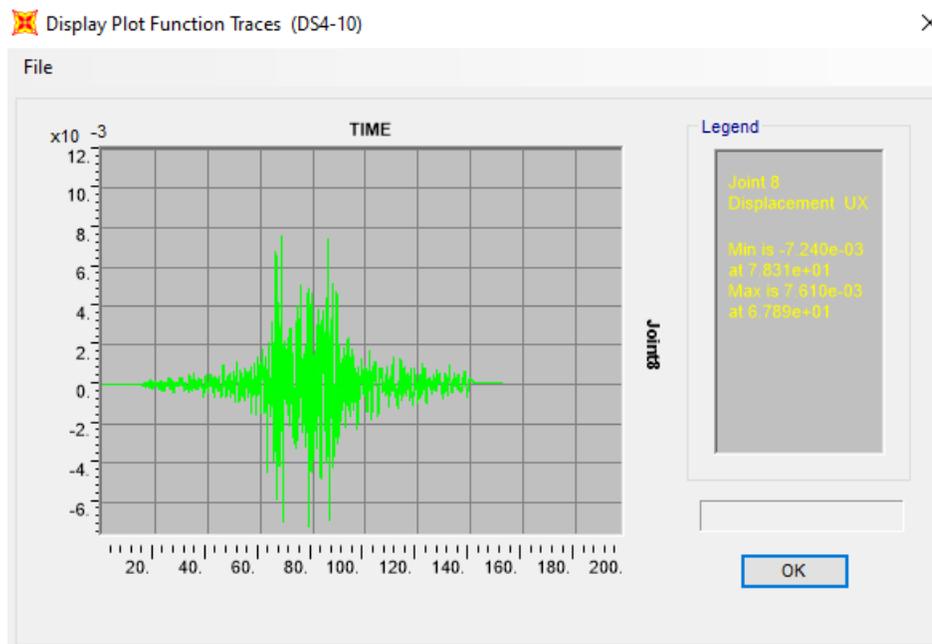
S4 (Aceleraciones)



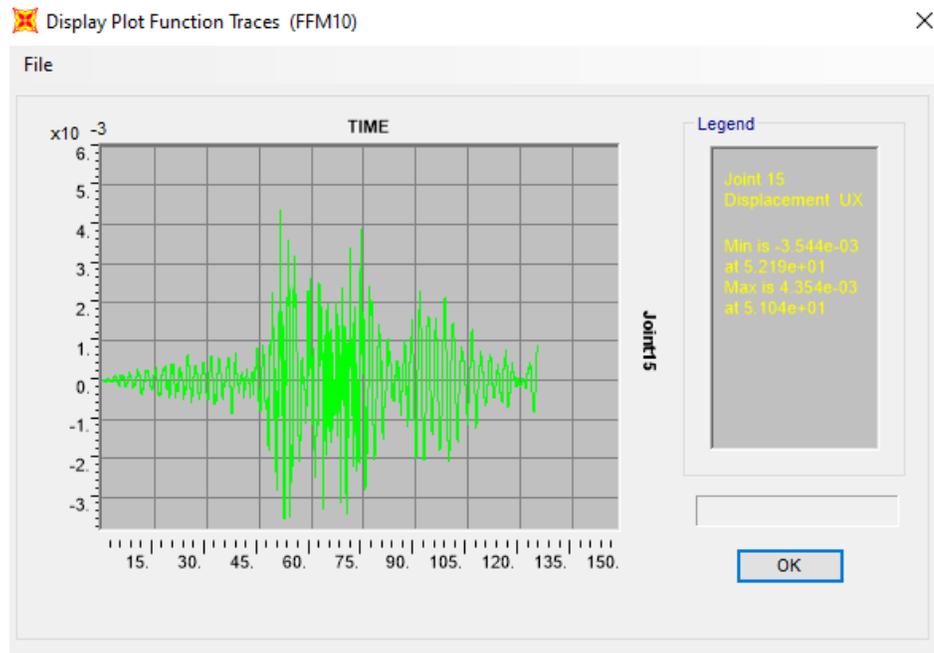
S4 (Desplazamientos)



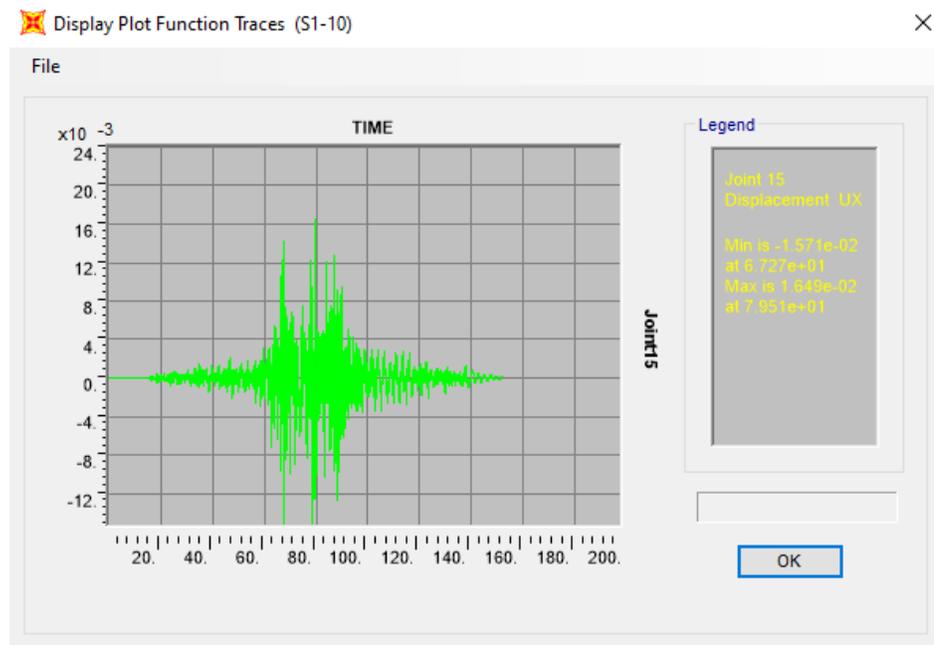
S4 (Aceleraciones y Desplazamientos)



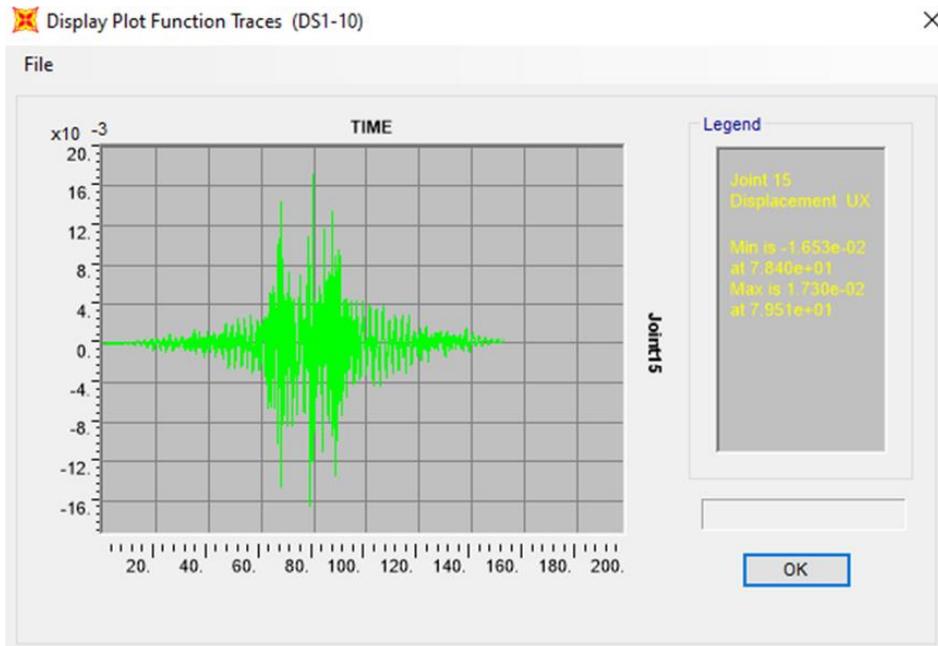
Nodo 15 (Aceleraciones)



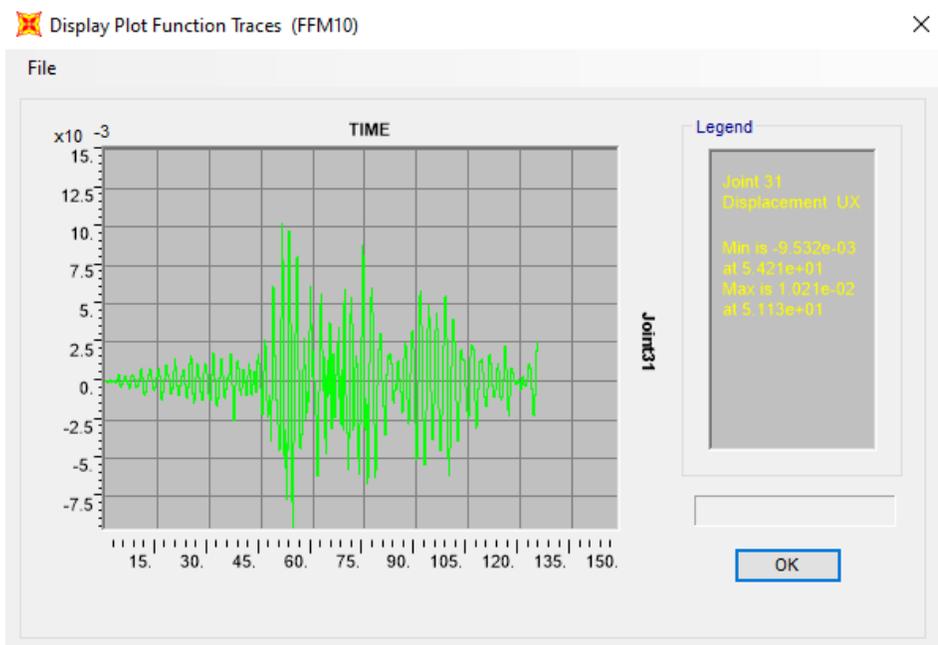
Nodo 15 (Desplazamientos)



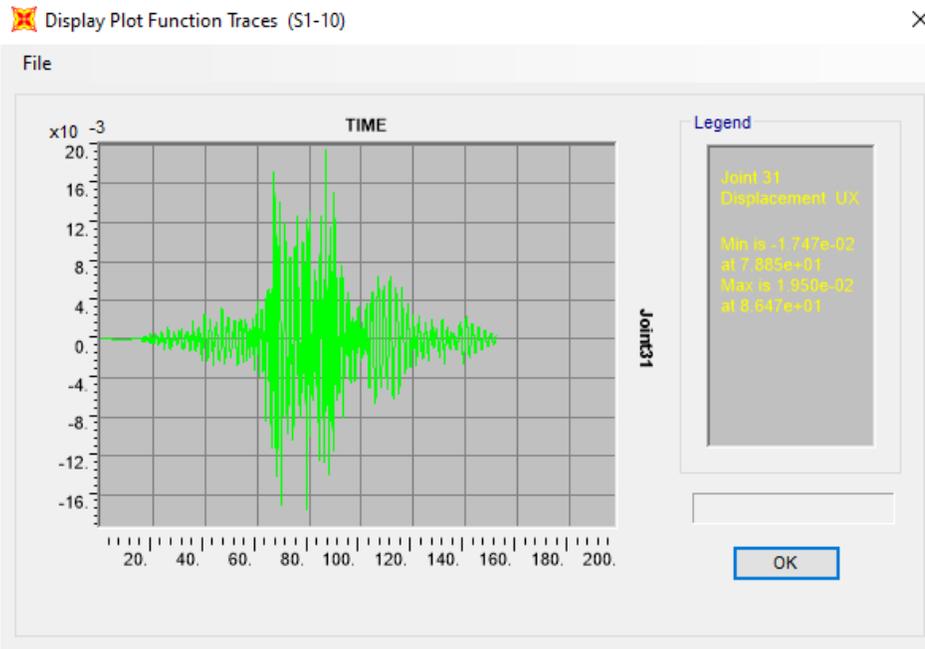
Nodo 15 (Aceleraciones y Desplazamientos)



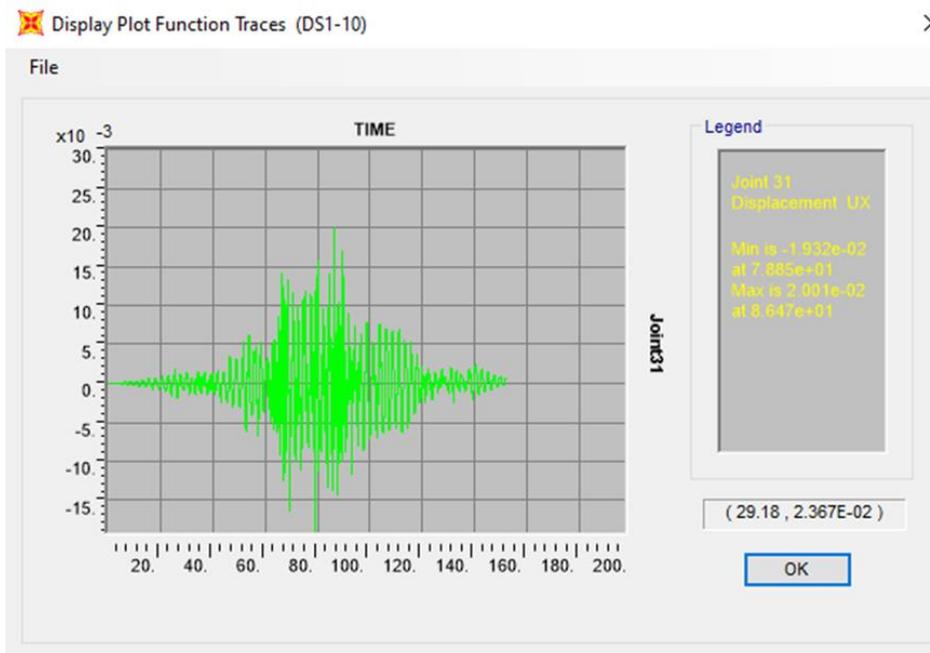
Nodo 31 (Aceleraciones)



Nodo 31 (Desplazamientos)



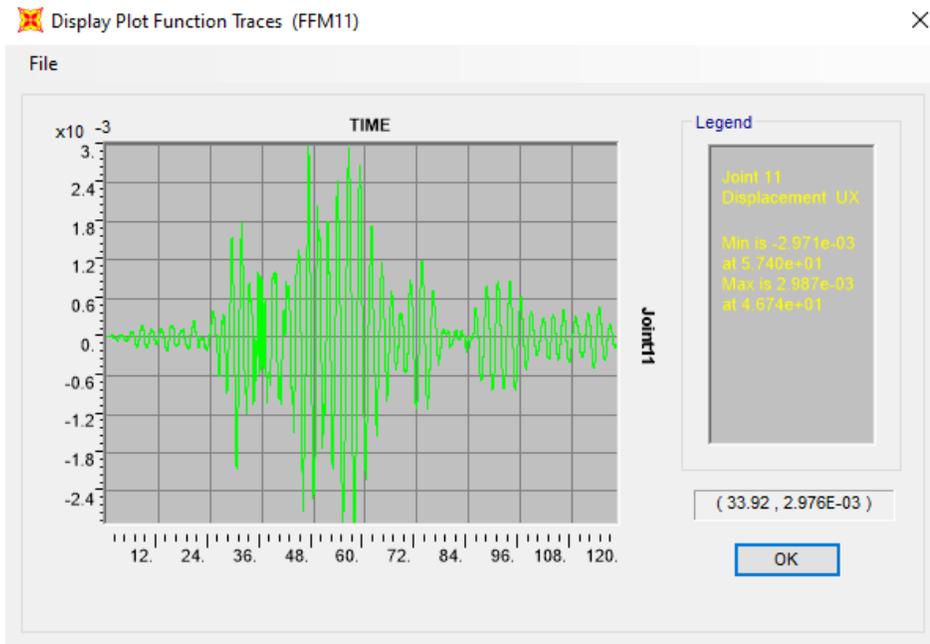
Nodo 31 (Aceleraciones y Desplazamientos)



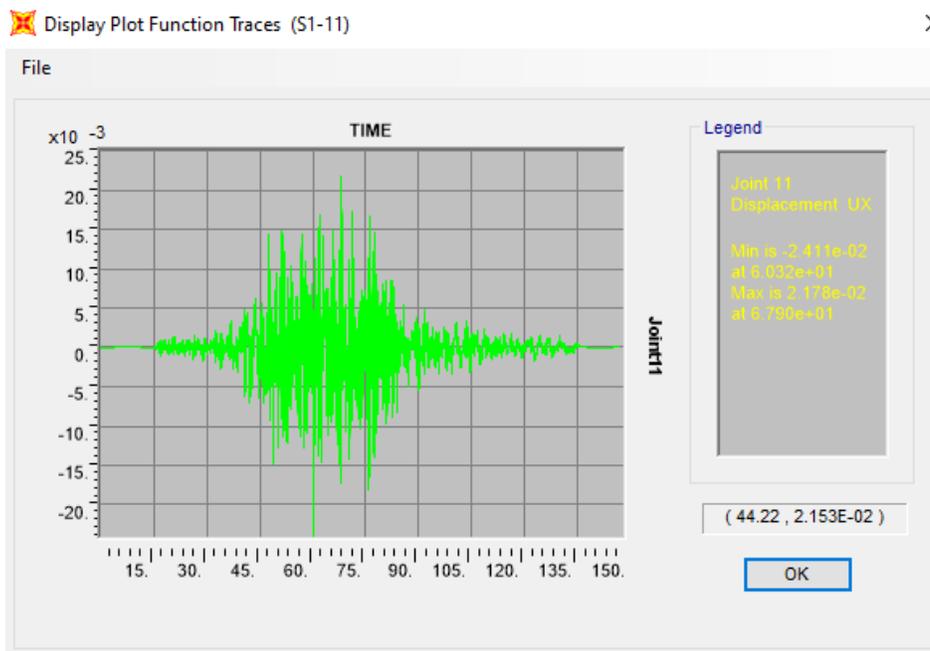
Santa Lucía

Nota: Los valores de los desplazamientos están dados en metros

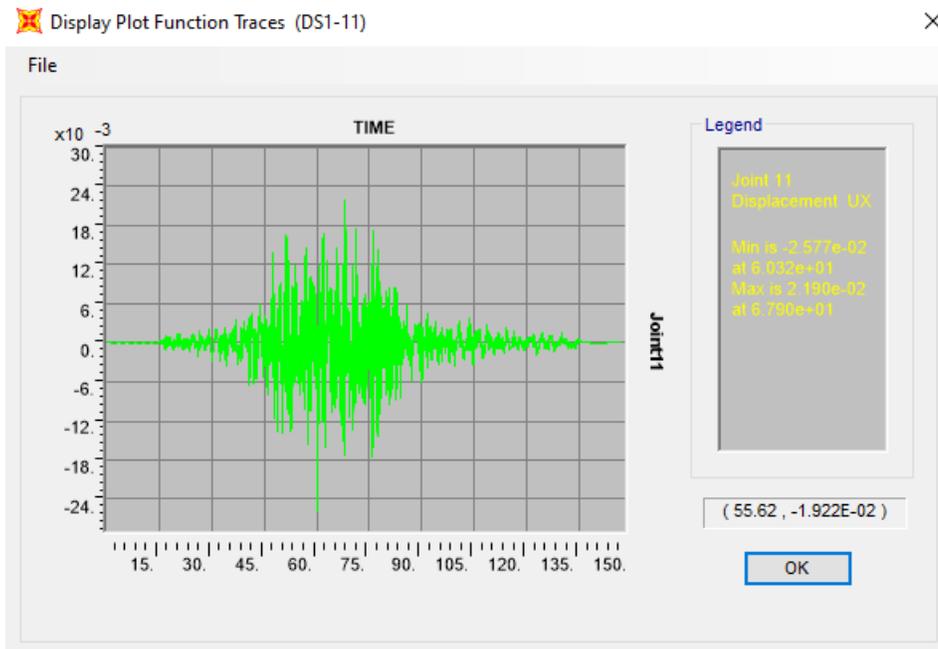
S1 (Aceleraciones)



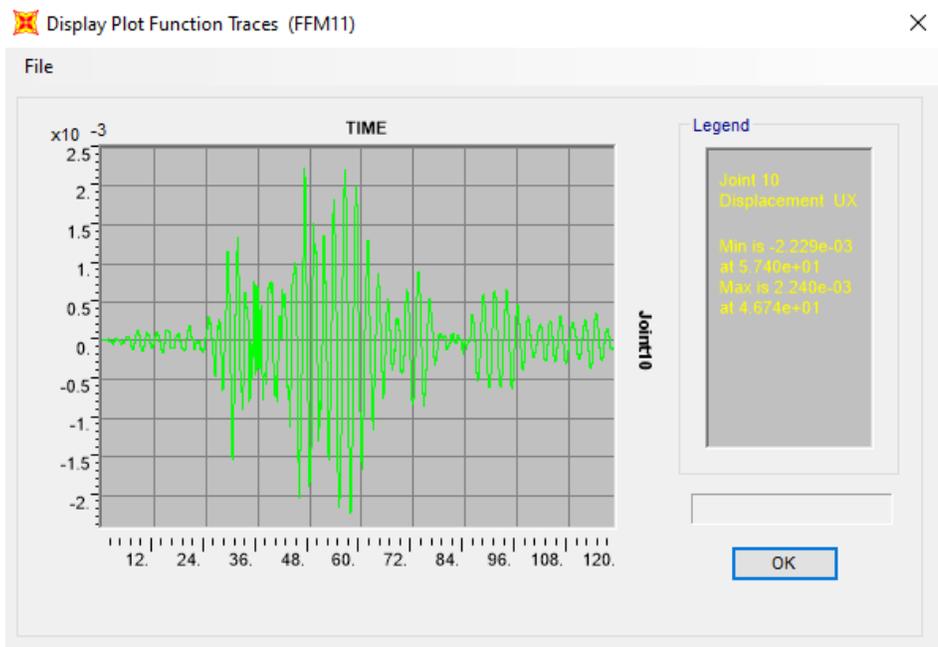
S1 (Desplazamientos)



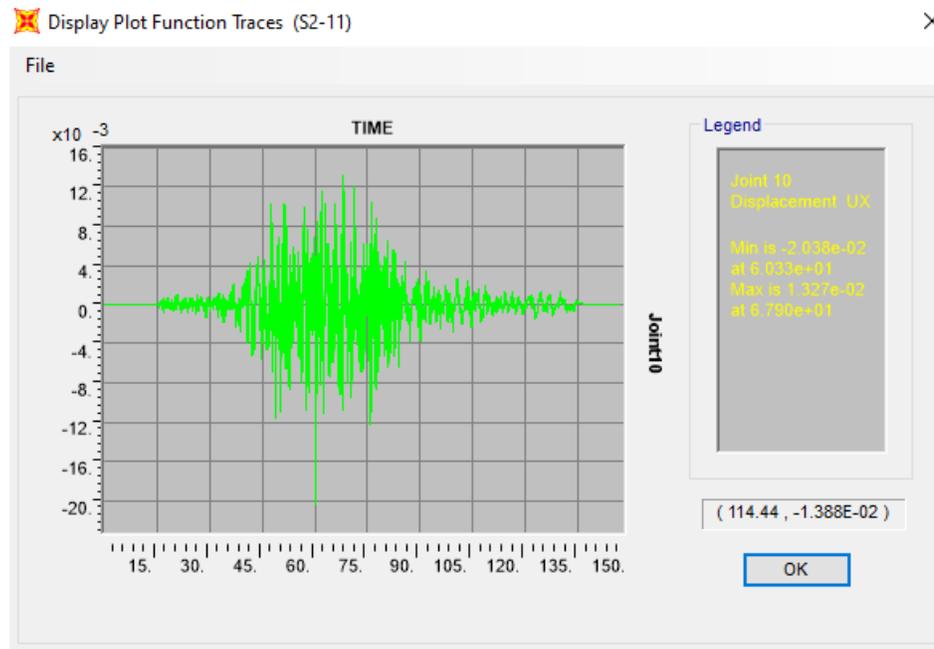
S1 (Aceleraciones y Desplazamientos)



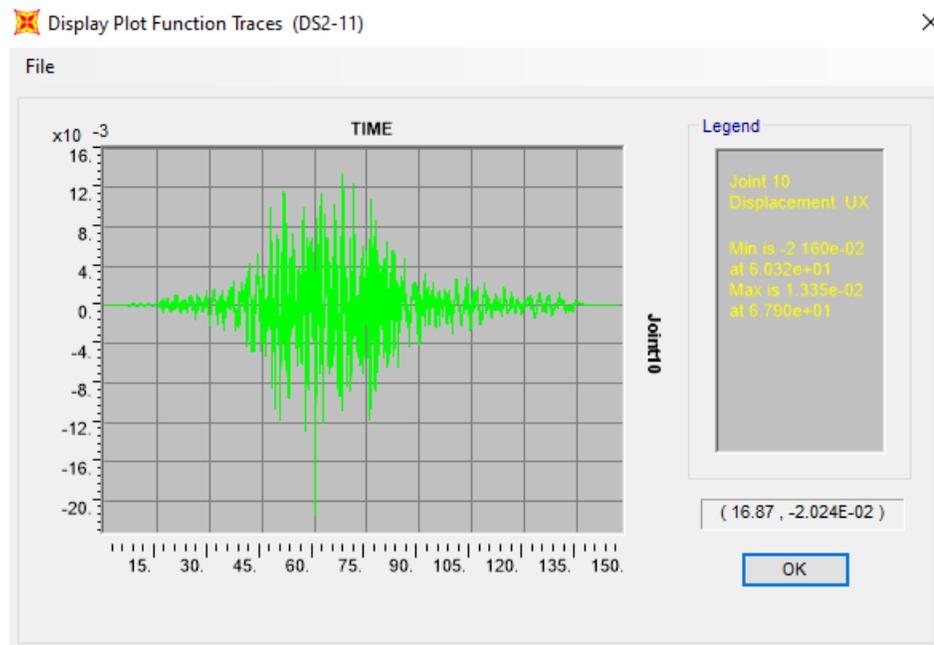
S2 (Aceleraciones)



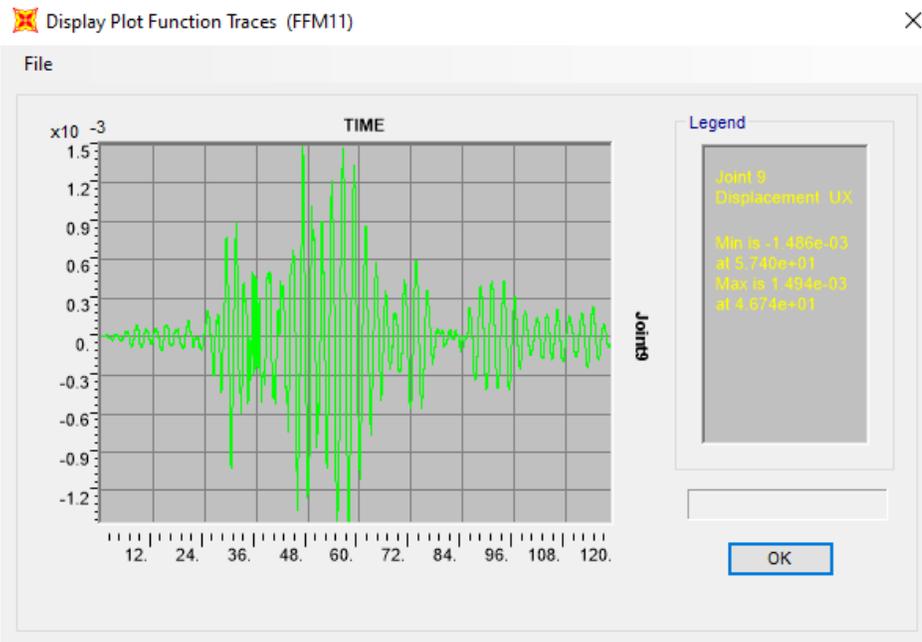
S2 (Desplazamientos)



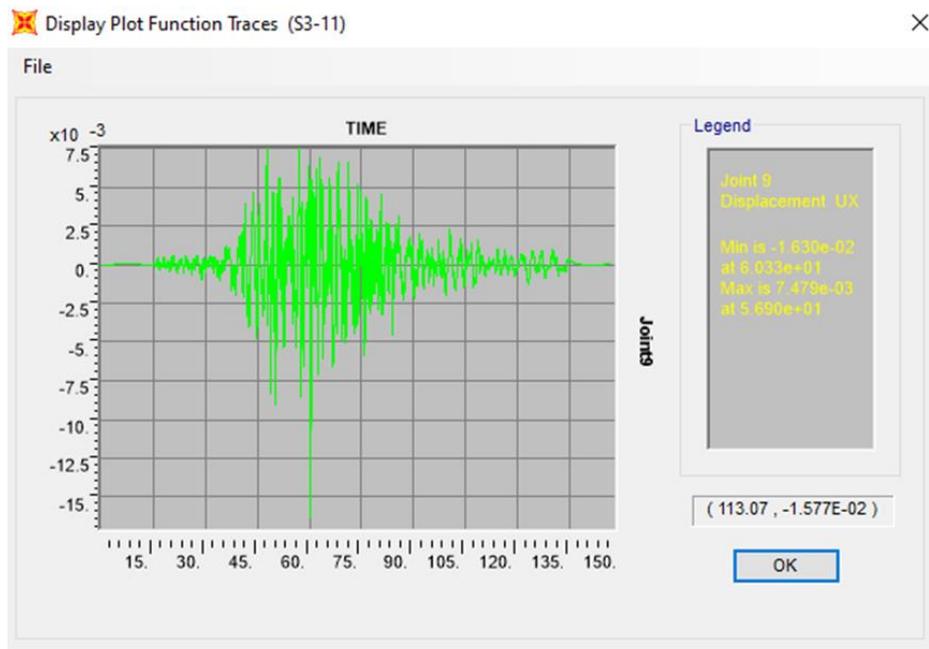
S2 (Aceleraciones y Desplazamientos)



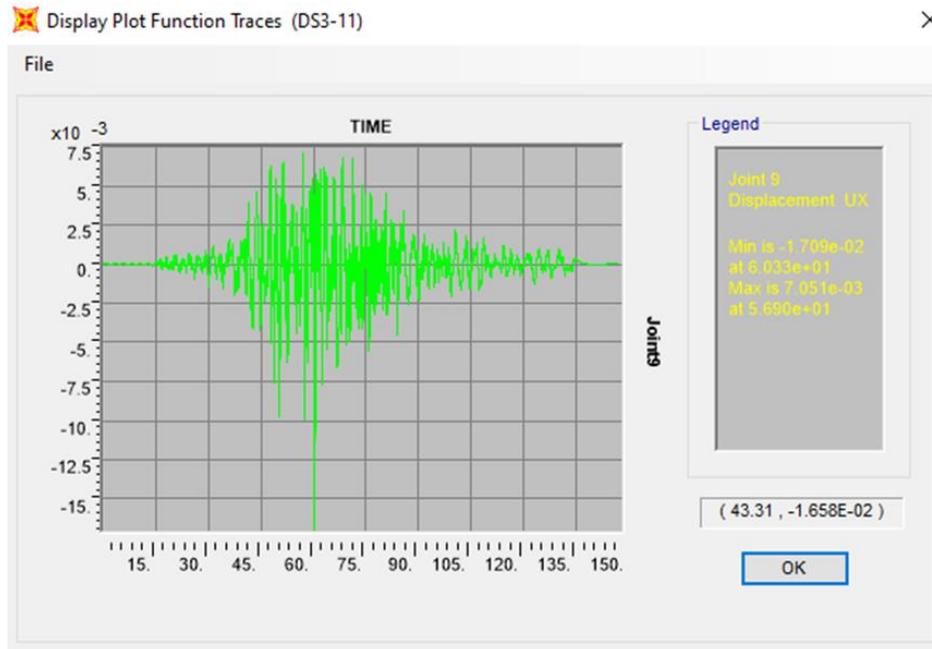
S3 (Aceleraciones)



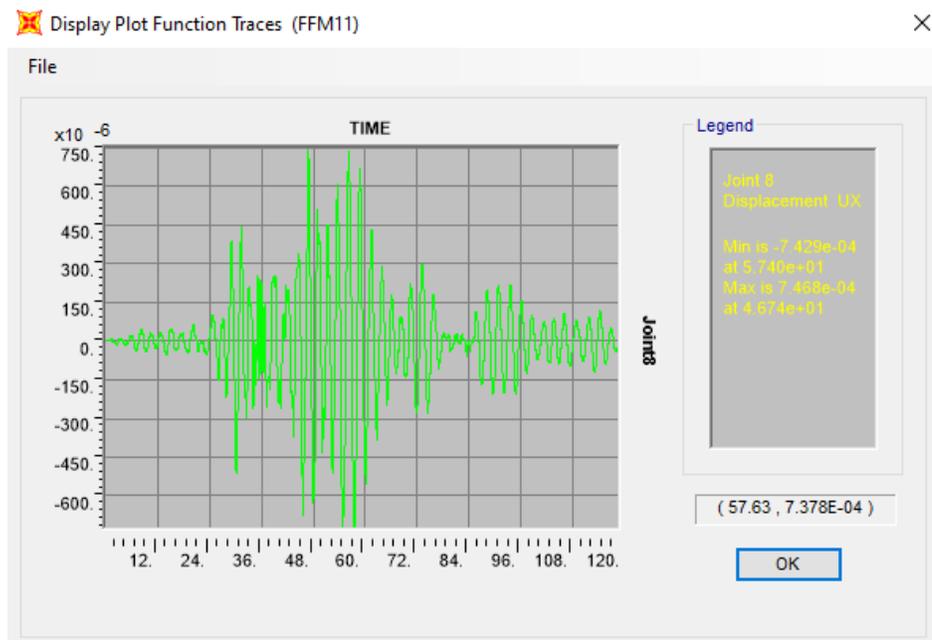
S3 (Desplazamientos)



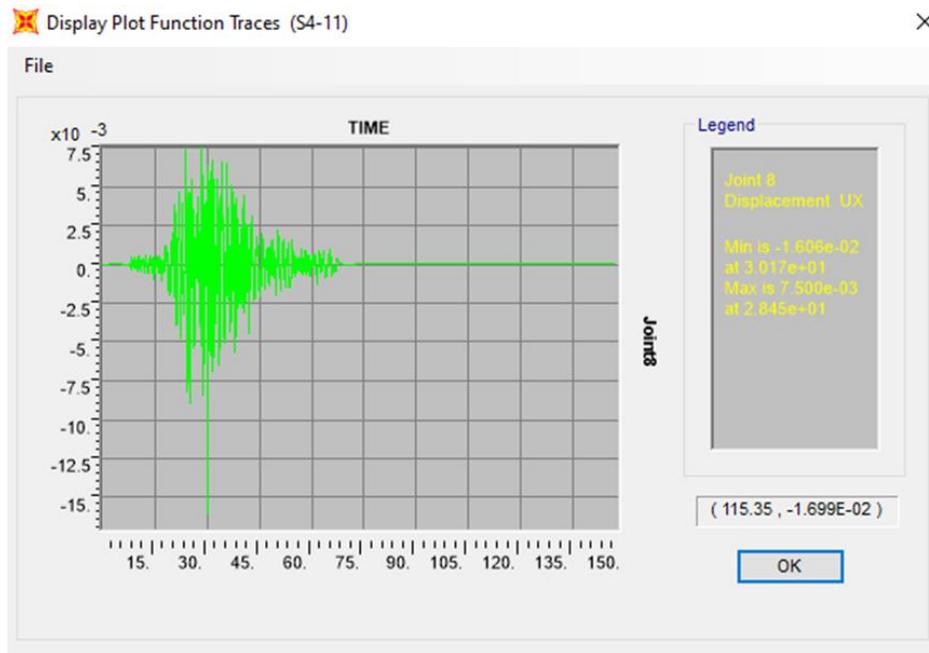
S3 (Aceleraciones y Desplazamientos)



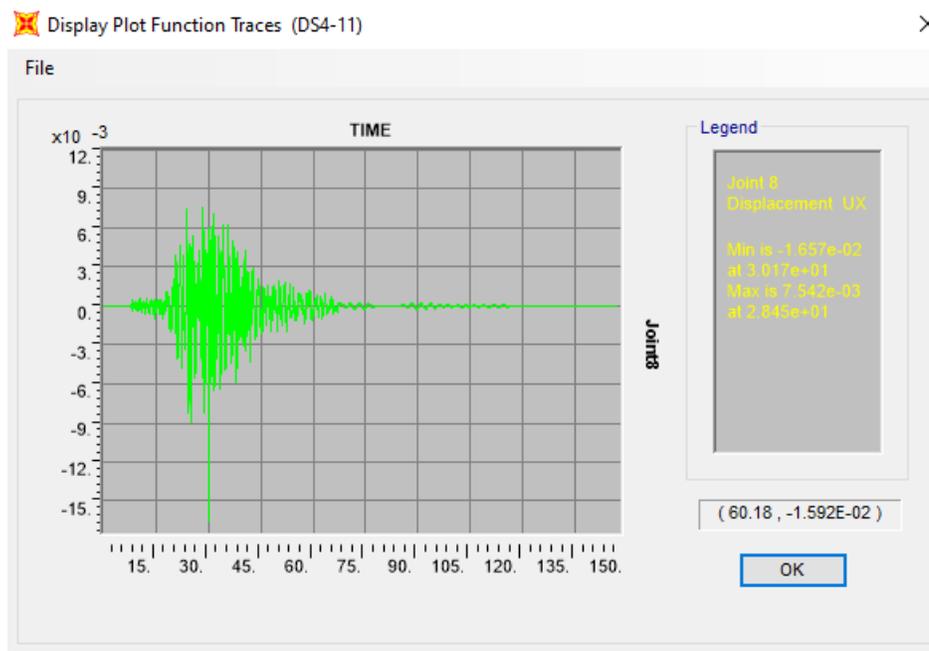
S4 (Aceleraciones)



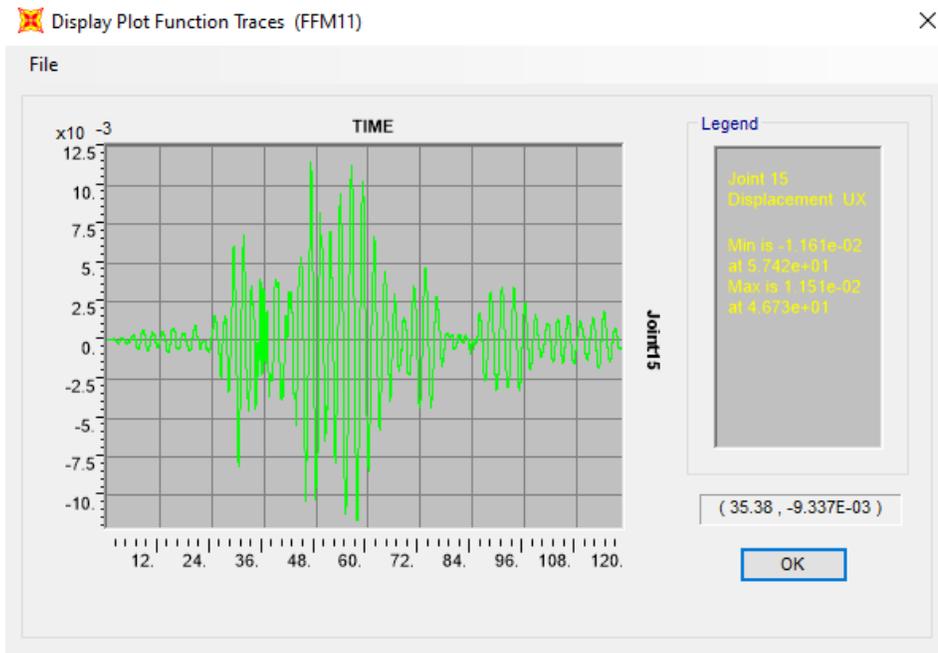
S4 (Desplazamientos)



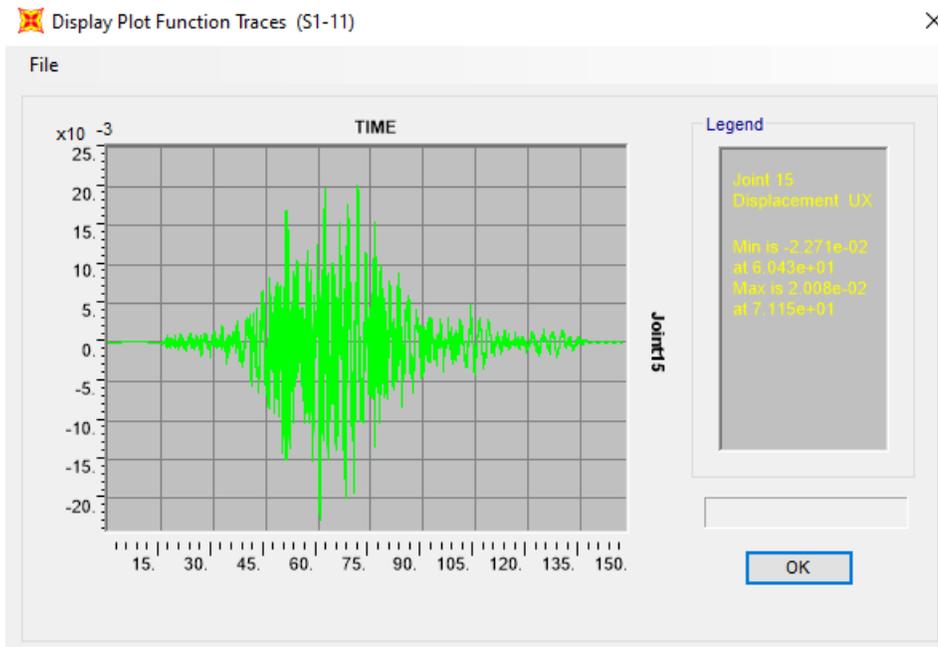
S4 (Aceleraciones y Desplazamientos)



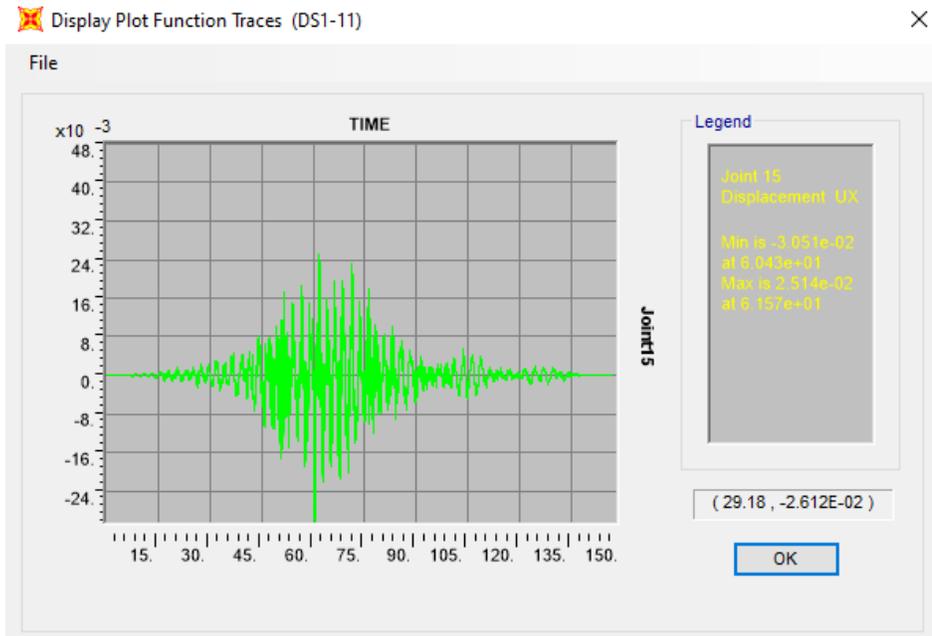
Nodo 15 (Aceleraciones)



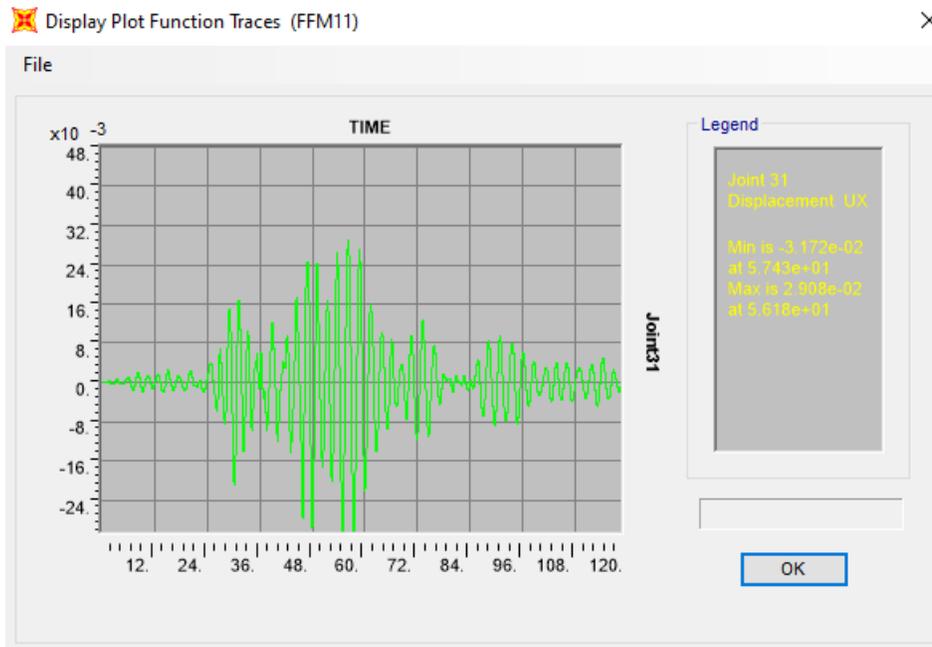
Nodo 15 (Desplazamientos)



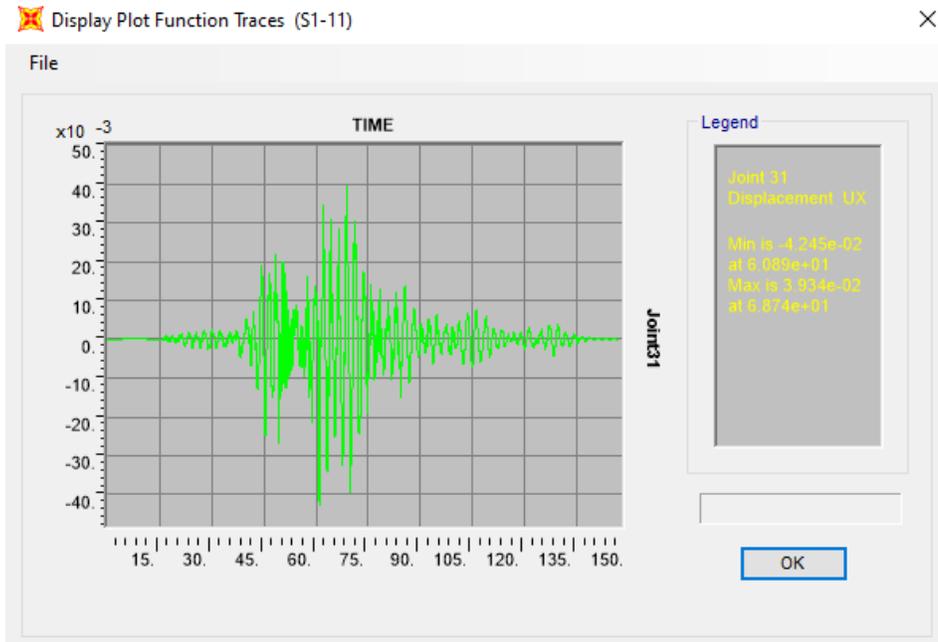
Nodo 15 (Aceleraciones y Desplazamientos)



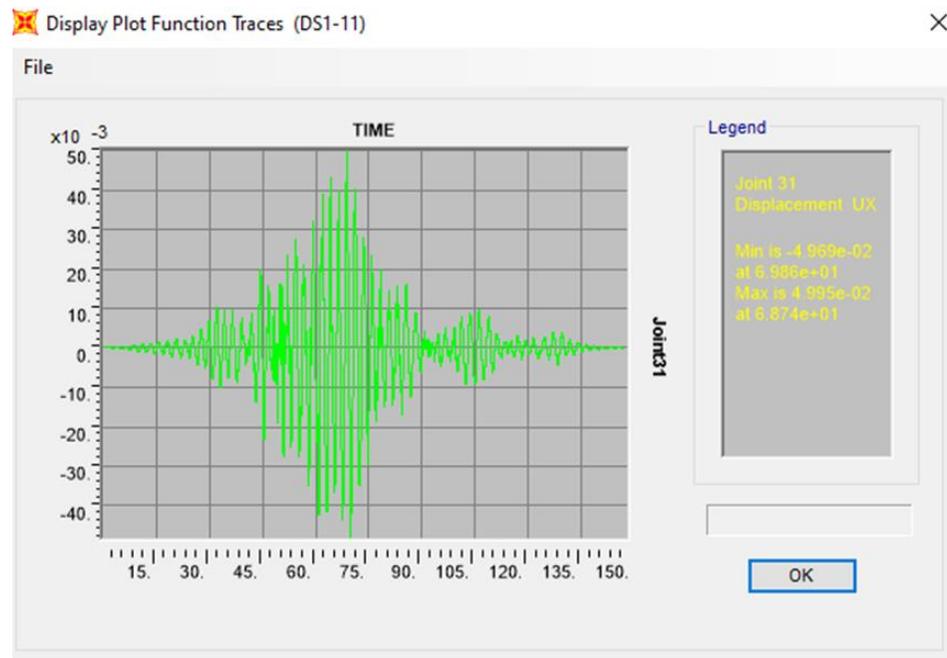
Nodo 31 (Aceleraciones)



Nodo 31 (Desplazamientos)



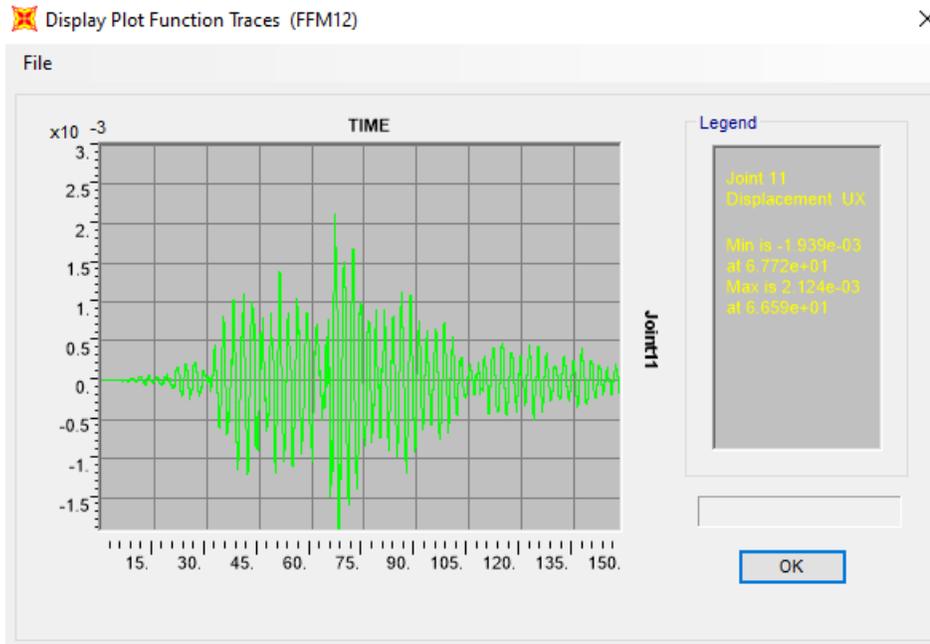
Nodo 31 (Aceleraciones y Desplazamientos)



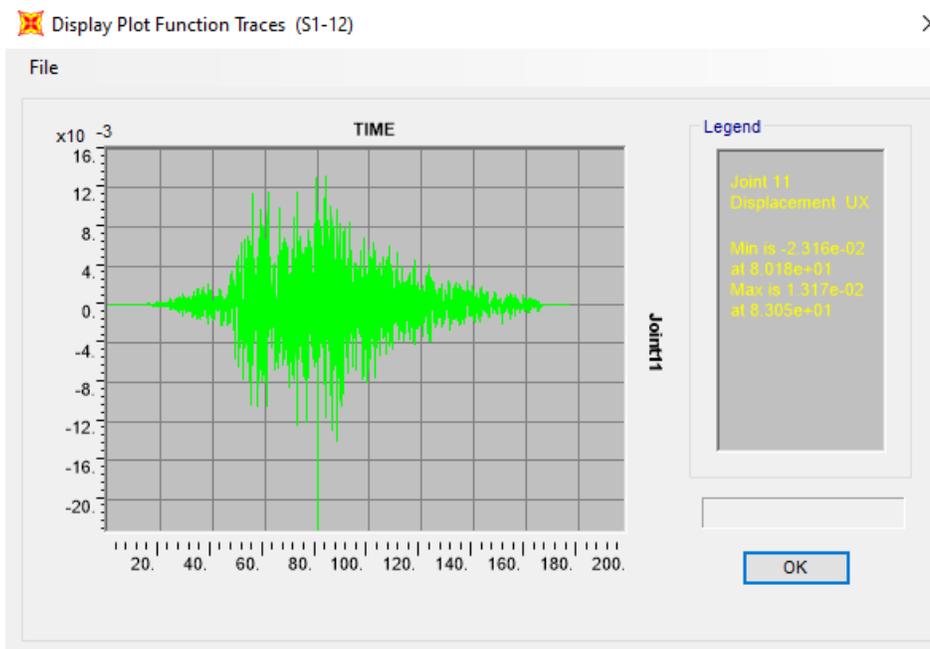
Cerro Viejo

Nota: Los valores de los desplazamientos están dados en metros

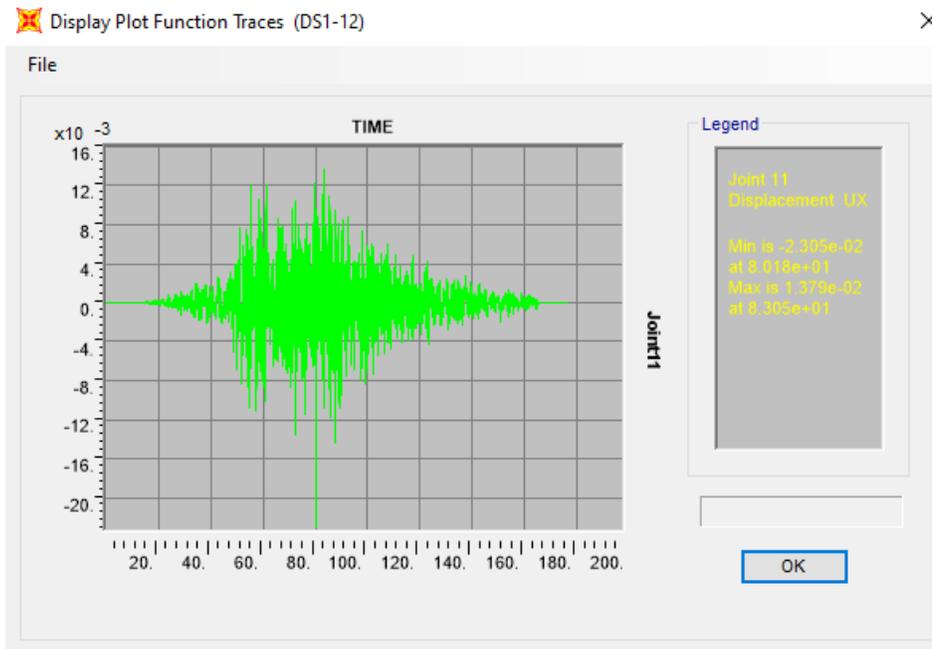
S1 (Aceleraciones)



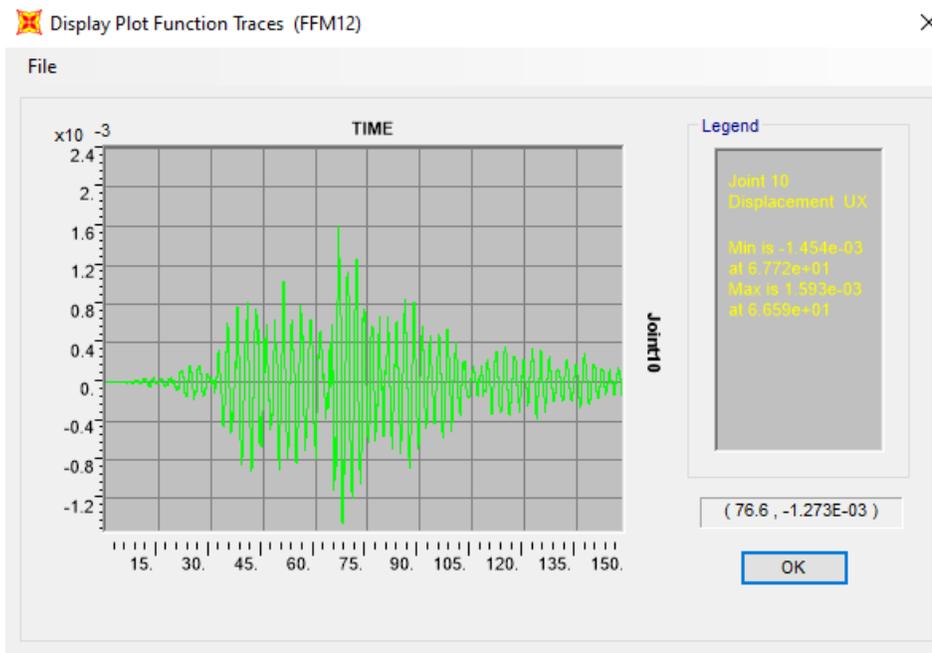
S1 (Desplazamientos)



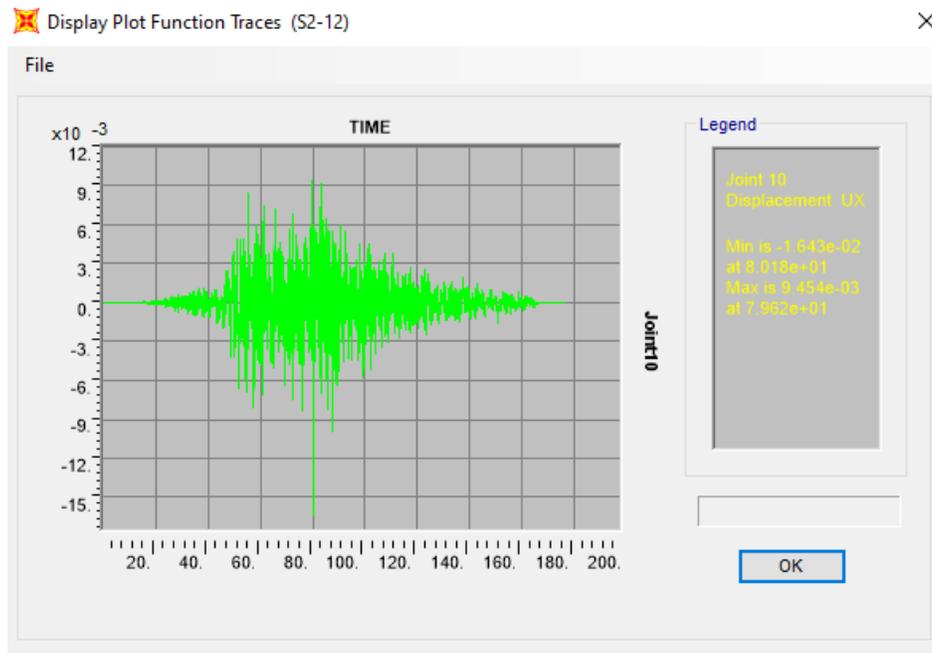
S1 (Aceleraciones y Desplazamientos)



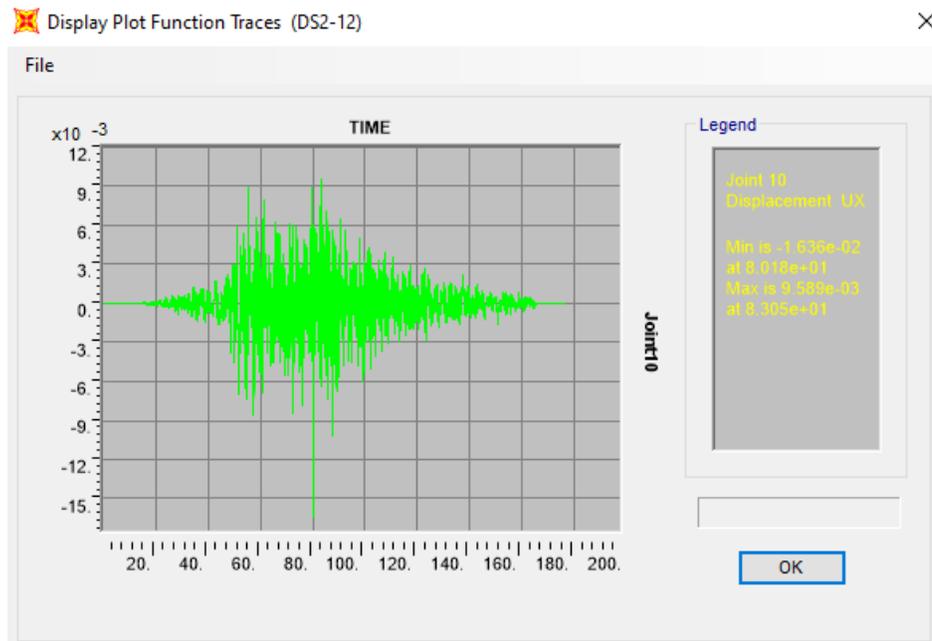
S2 (Aceleraciones)



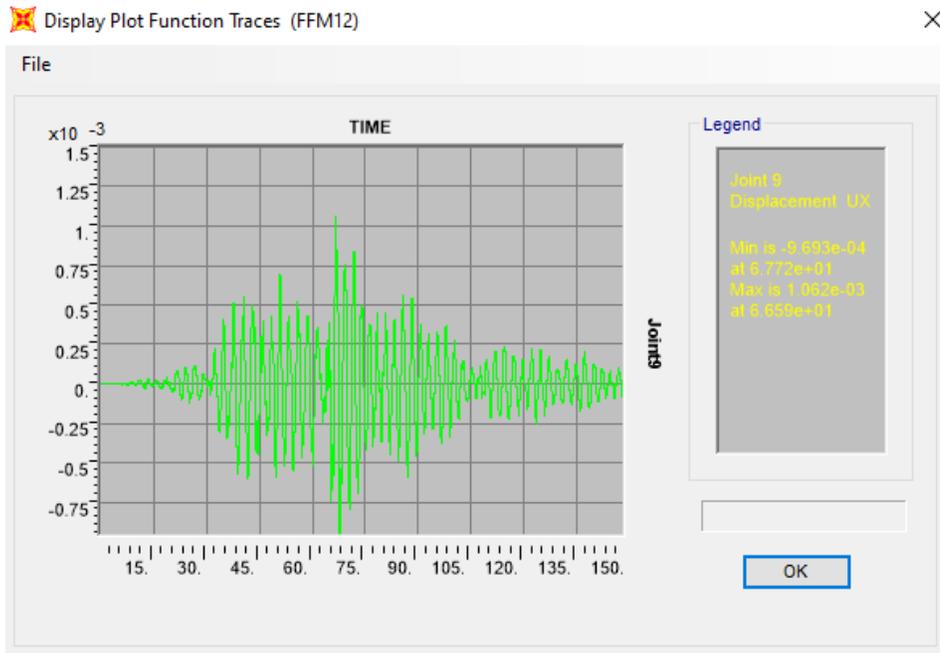
S2 (Desplazamientos)



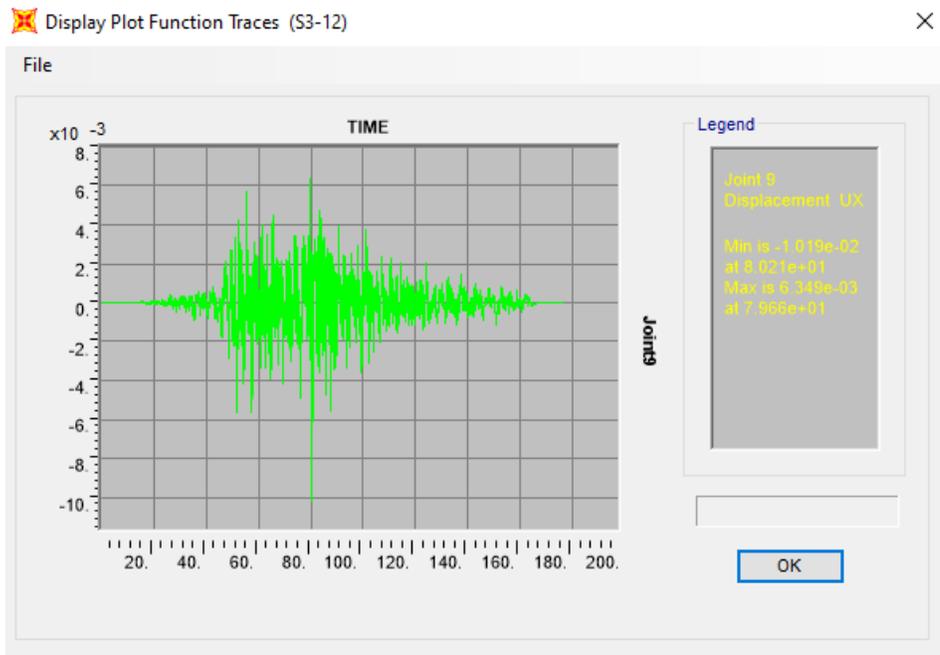
S2 (Aceleraciones y Desplazamientos)



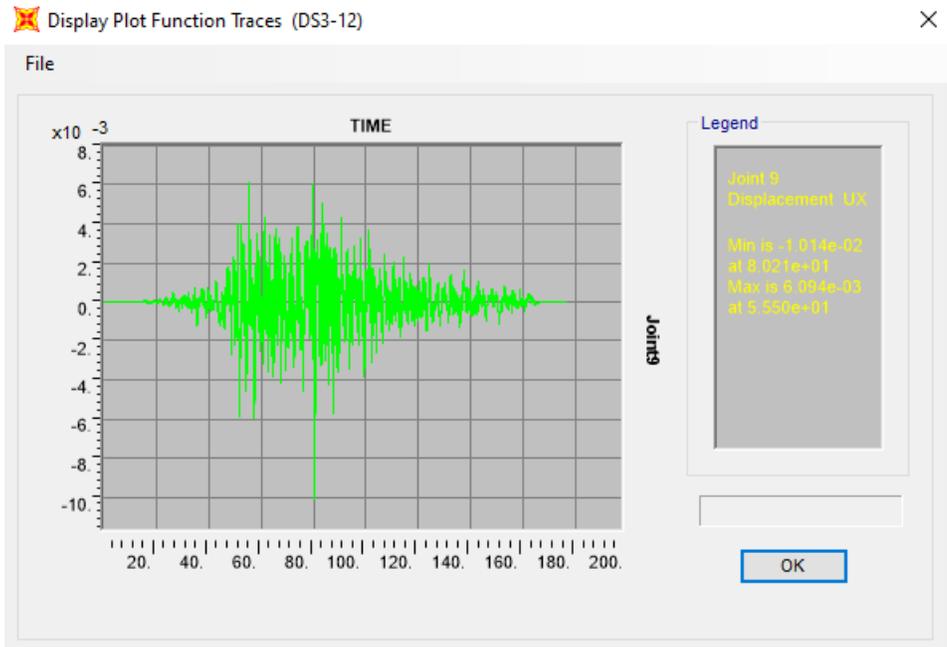
S3 (Aceleraciones)



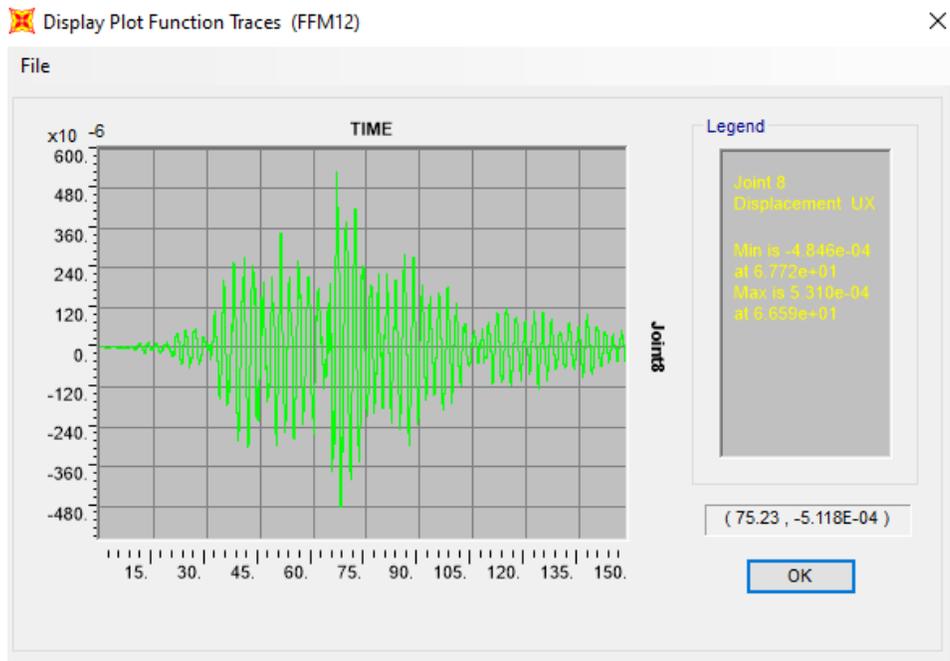
S3 (Desplazamientos)



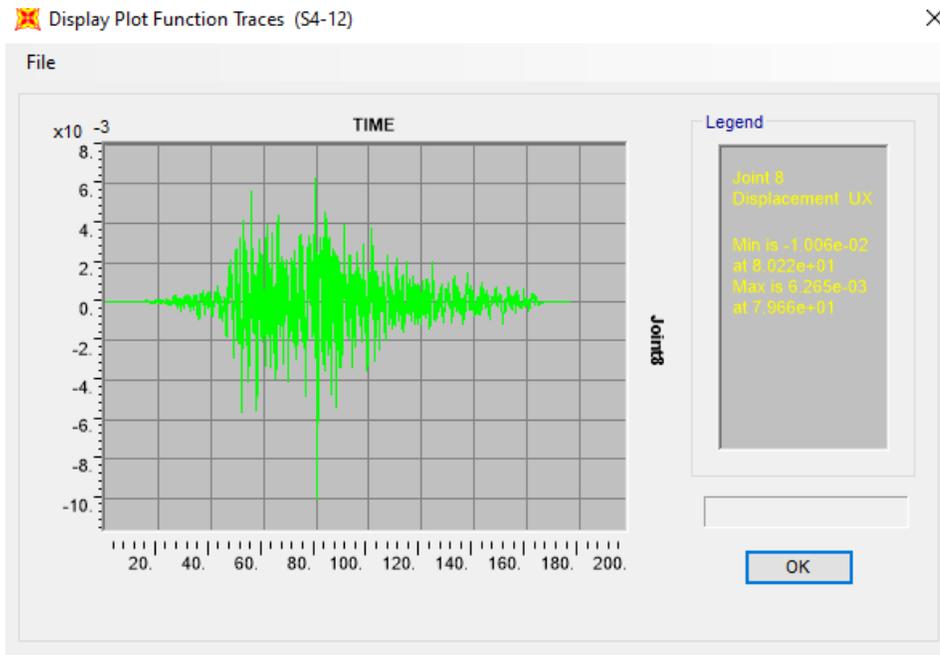
S3 (Aceleraciones y Desplazamientos)



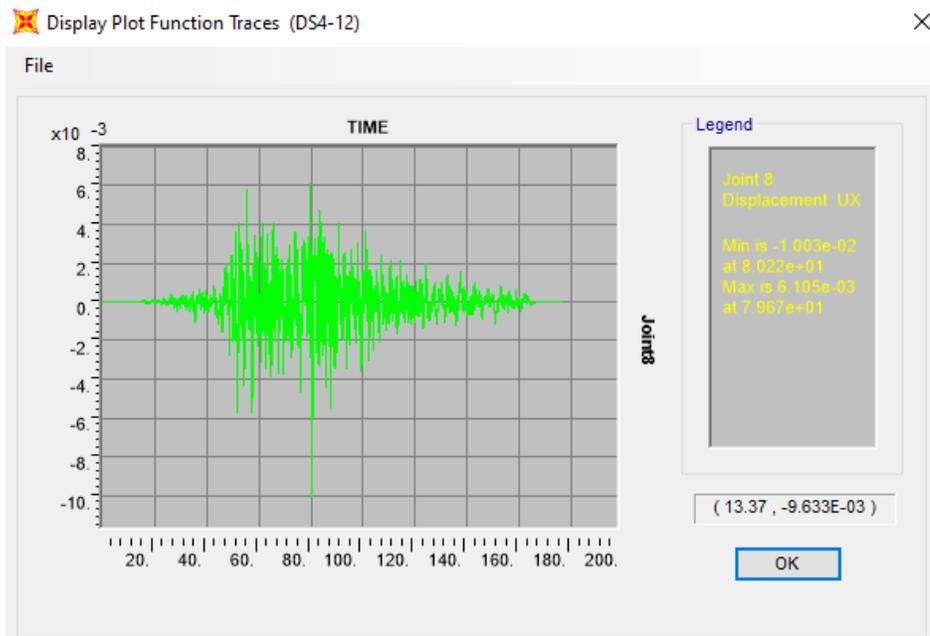
S4 (Aceleraciones)



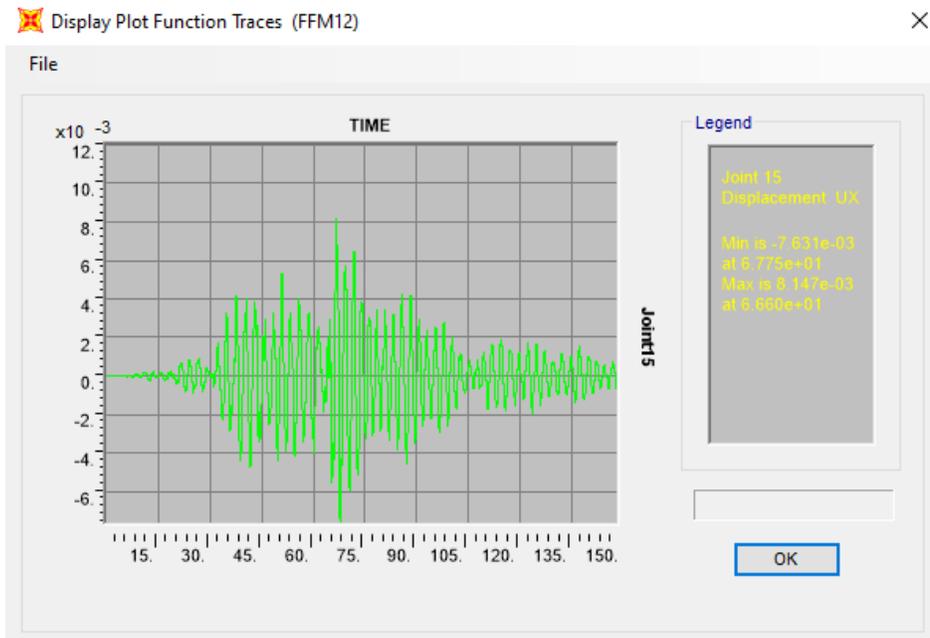
S4 (Desplazamientos)



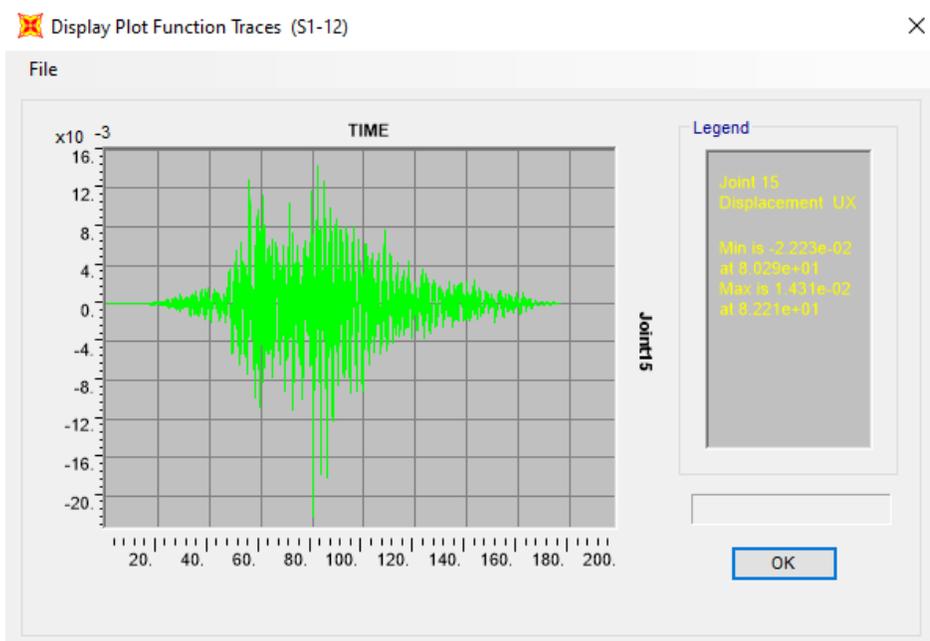
S4 (Aceleraciones y Desplazamientos)



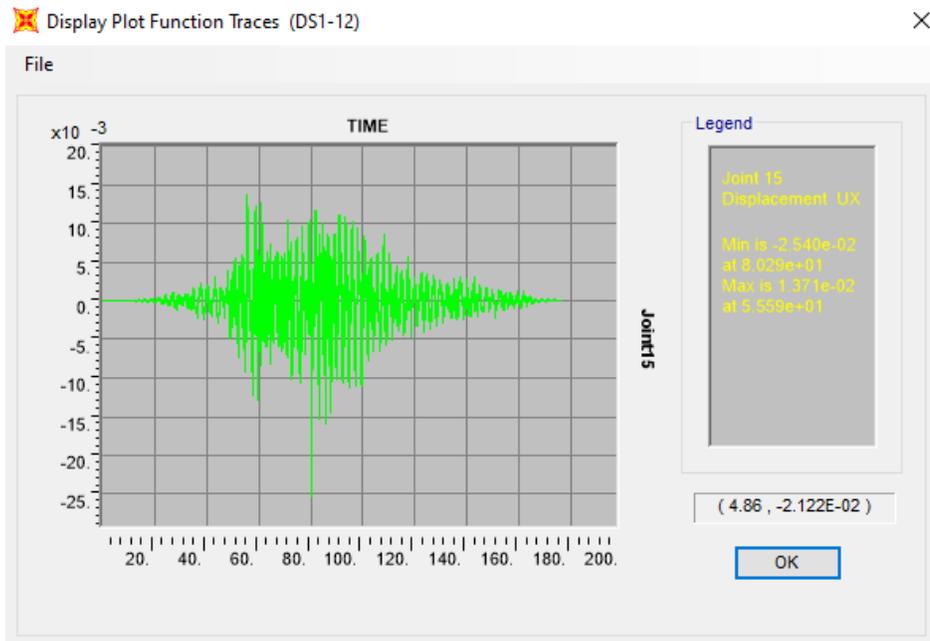
Nodo 15 (Aceleraciones)



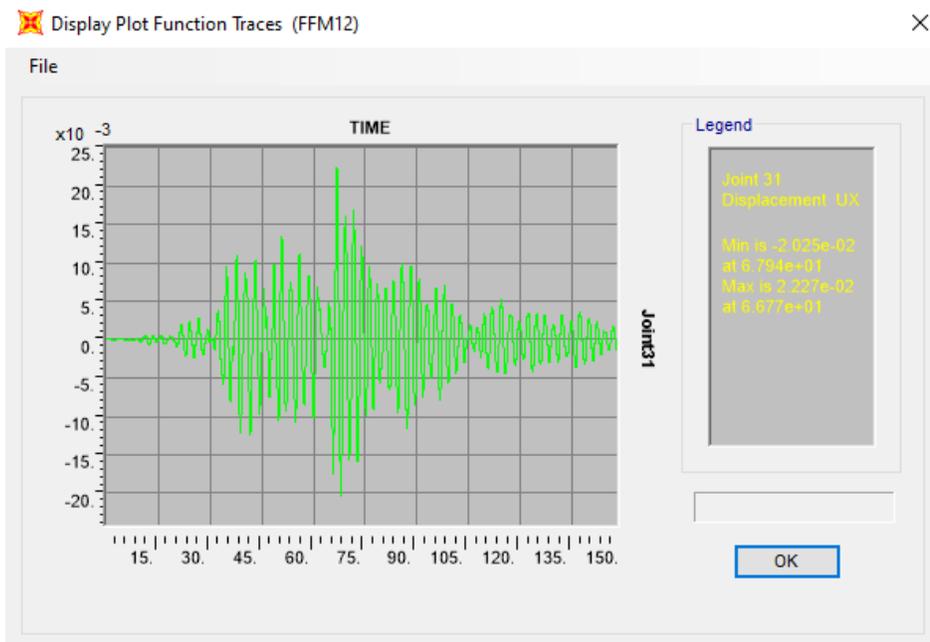
Nodo 15 (Desplazamientos)



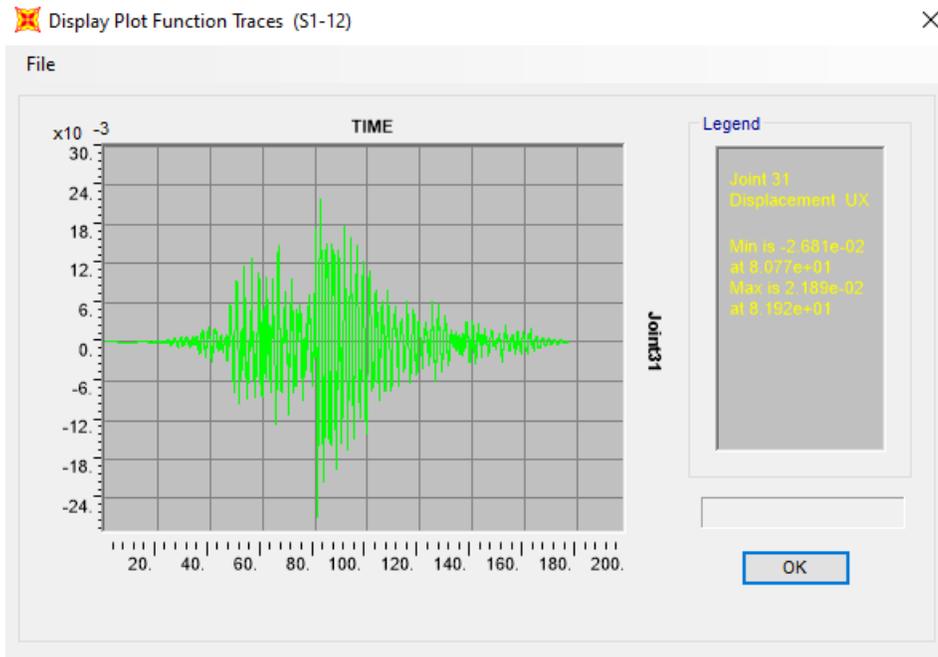
Nodo 15 (Aceleraciones y Desplazamientos)



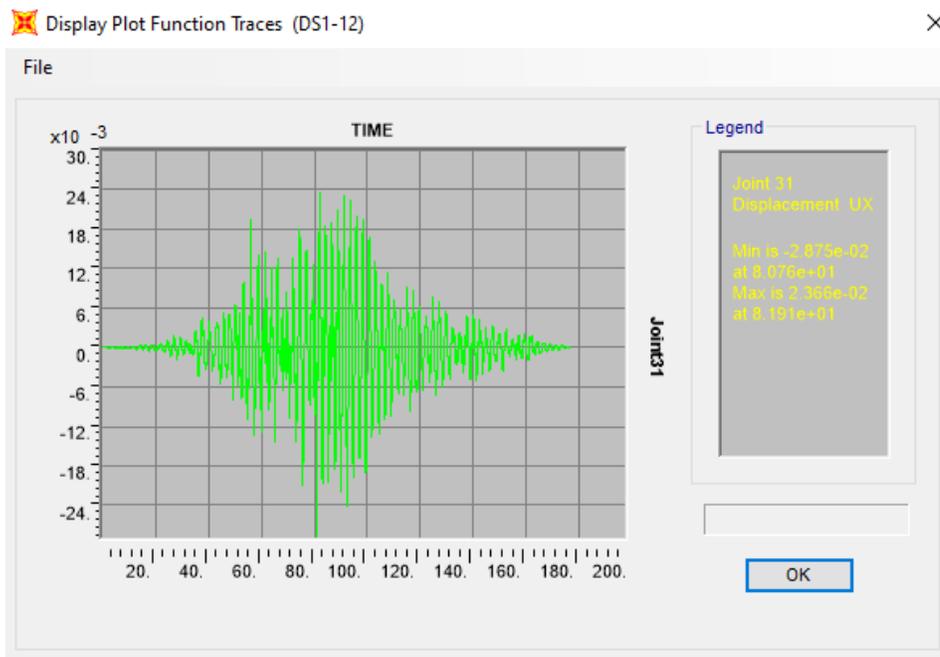
Nodo 31 (Aceleraciones)



Nodo 31(Desplazamiento)



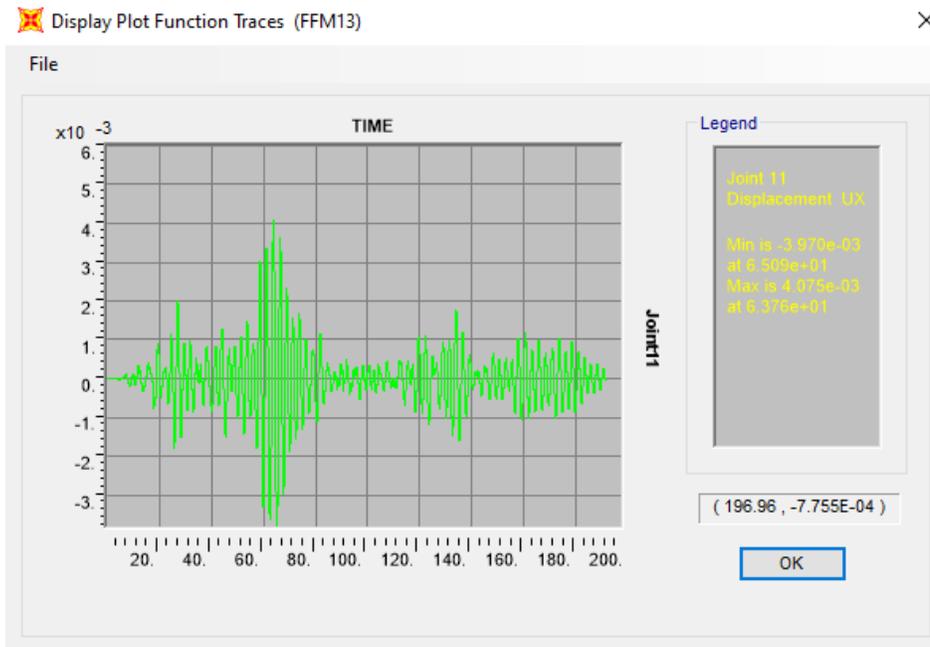
Nodo 31 (Aceleraciones y Desplazamiento)



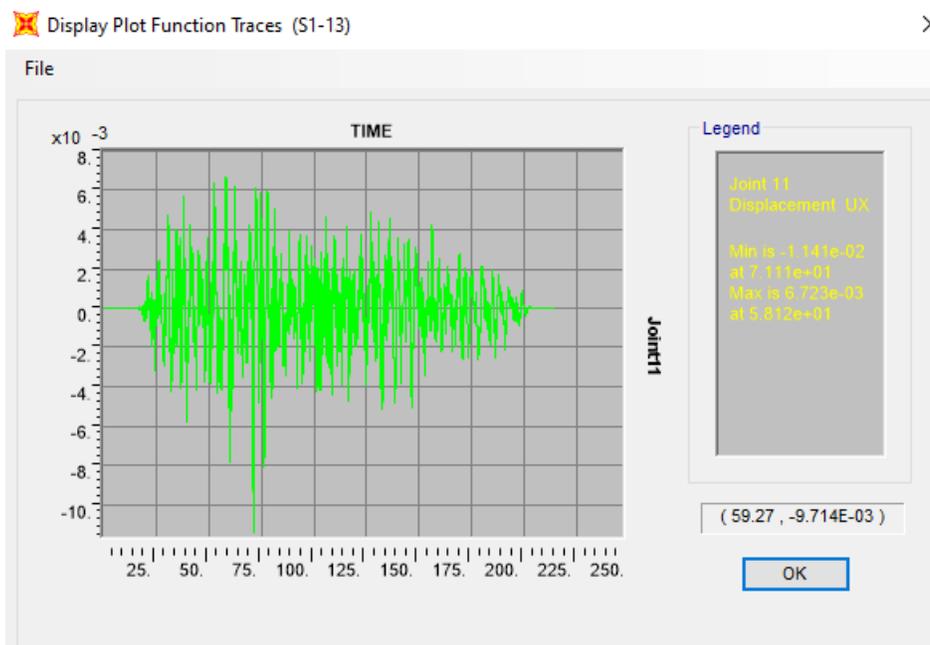
Pangue

Nota: Los valores de los desplazamientos están dados en metros

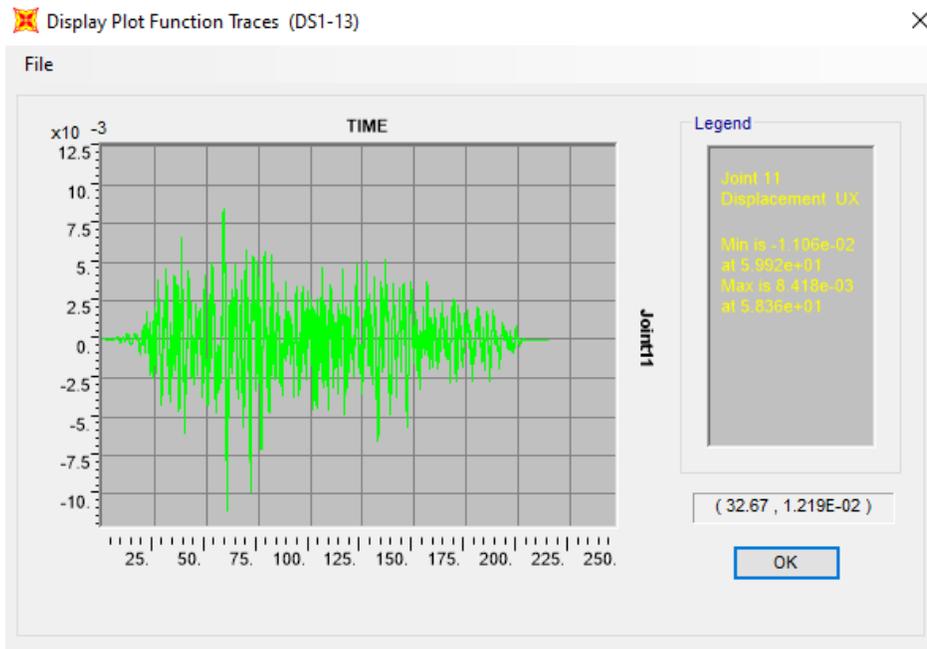
S1 (Aceleraciones)



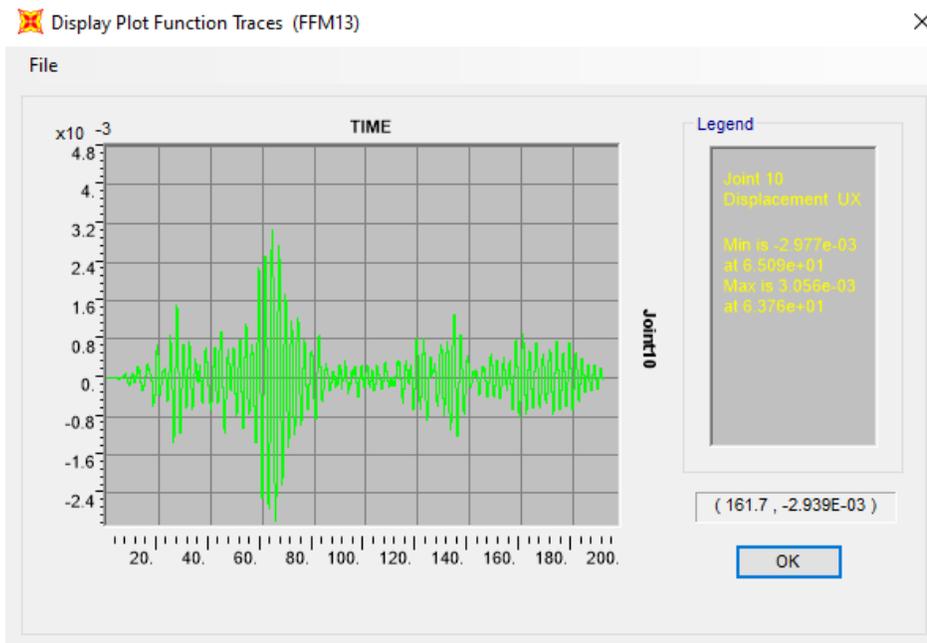
S1 (Desplazamientos)



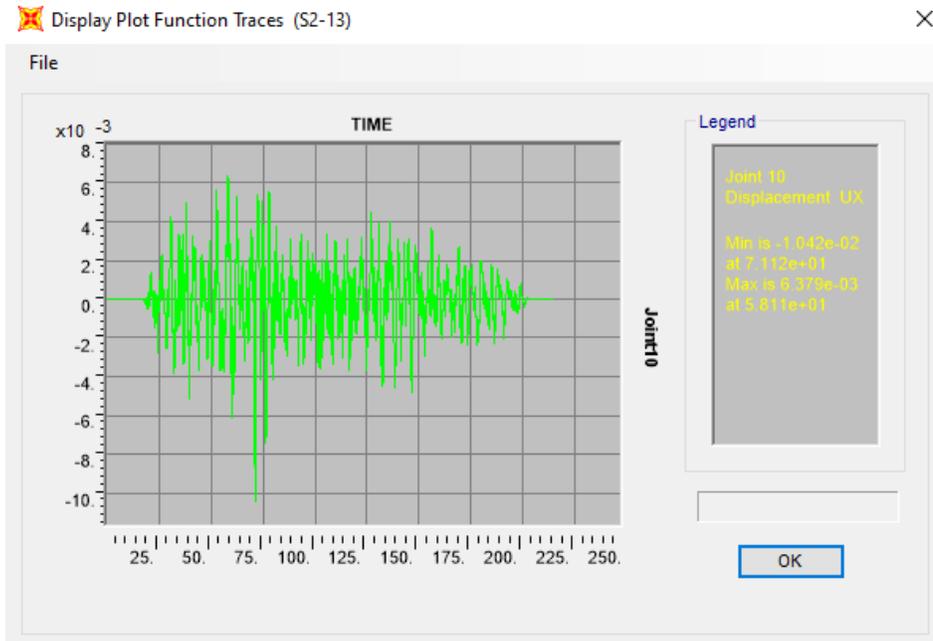
S1 (Aceleraciones y Desplazamientos)



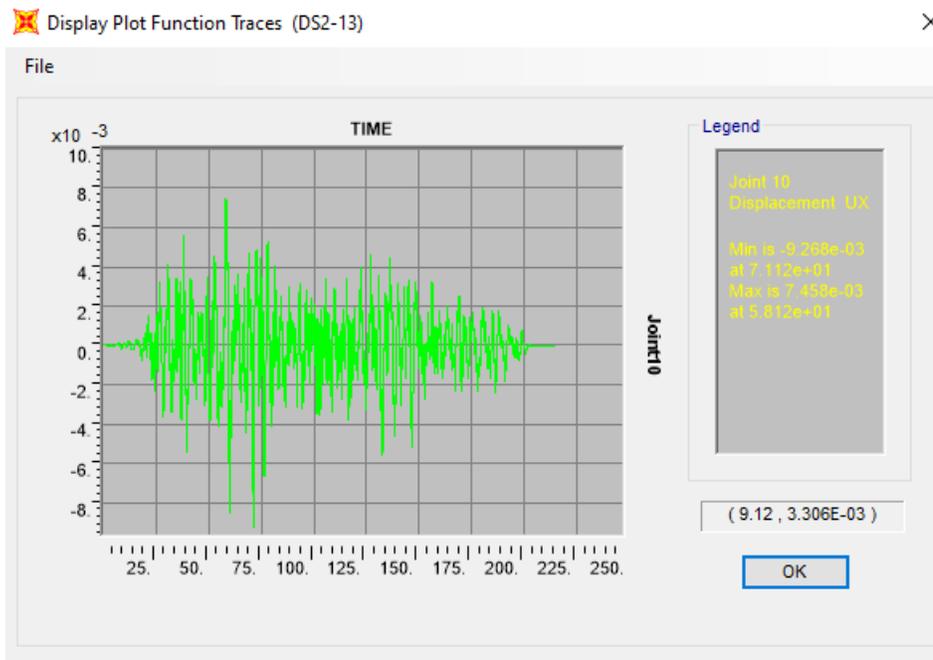
S2 (Aceleraciones)



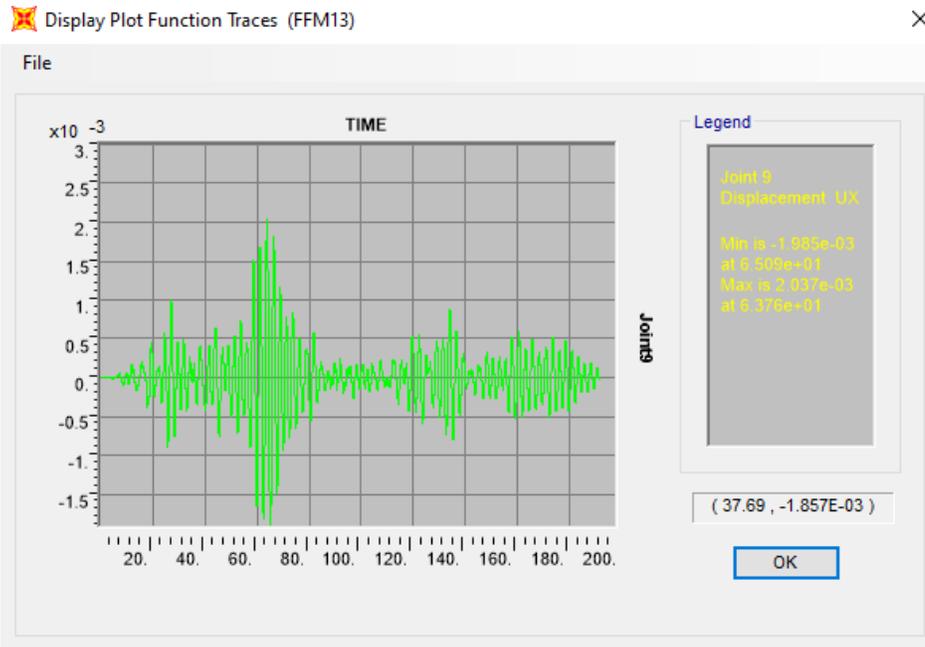
S2 (Desplazamientos)



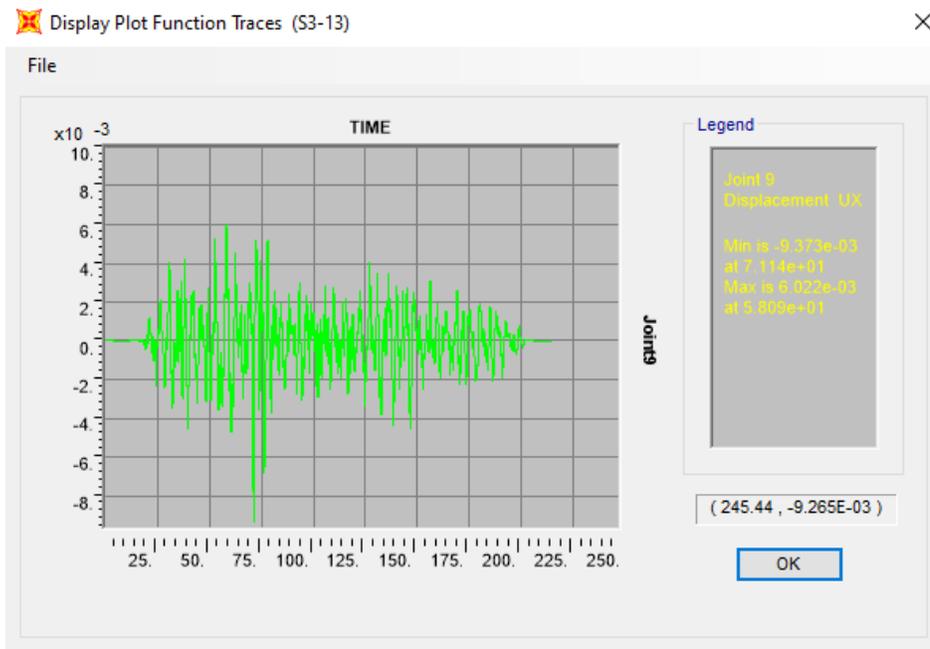
S2 (Aceleraciones y Desplazamientos)



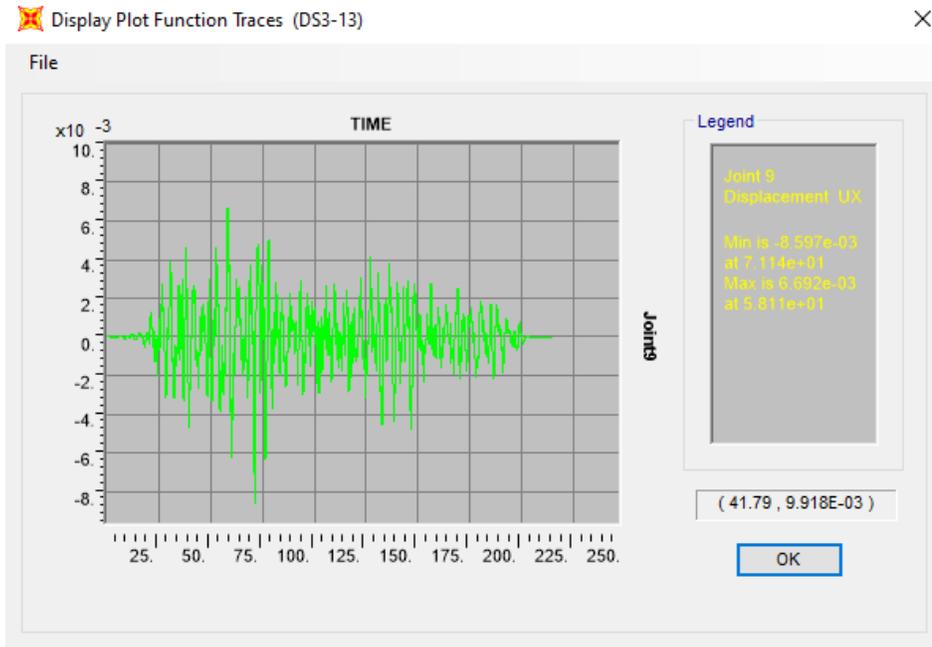
S3 (Aceleraciones)



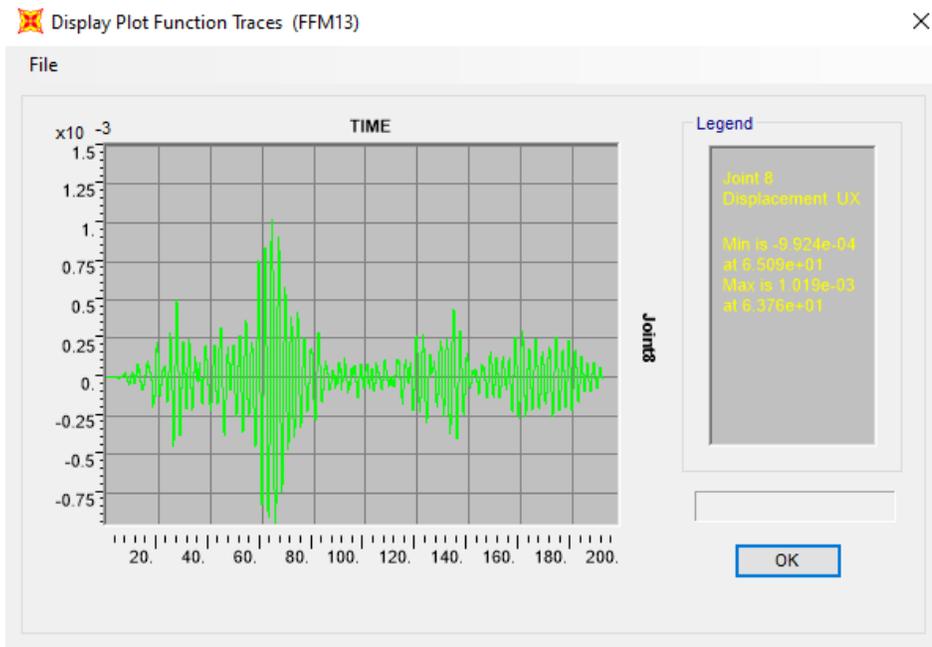
S3 (Desplazamientos)



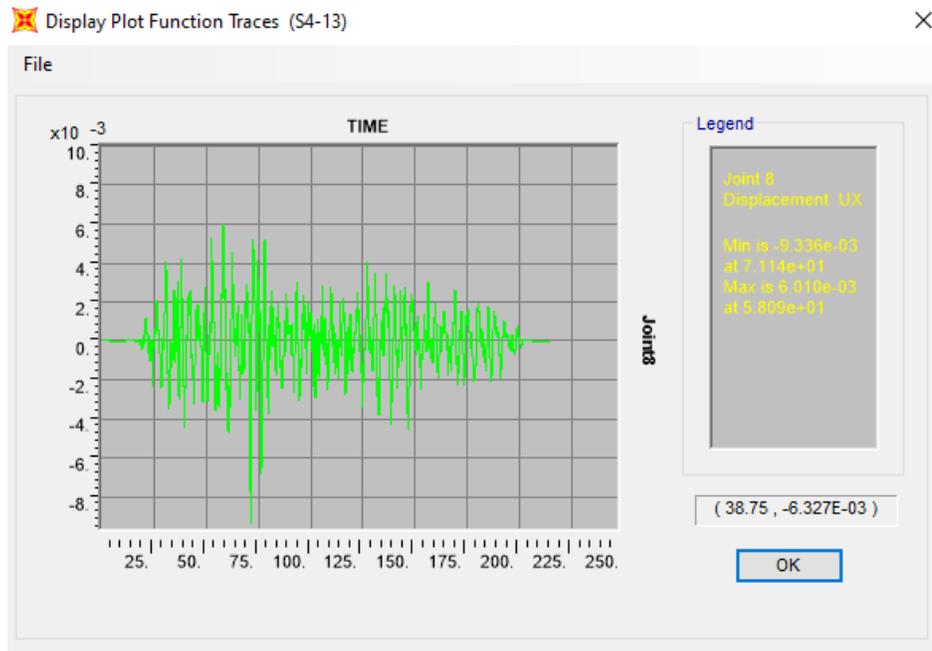
S3 (Aceleraciones y Desplazamientos)



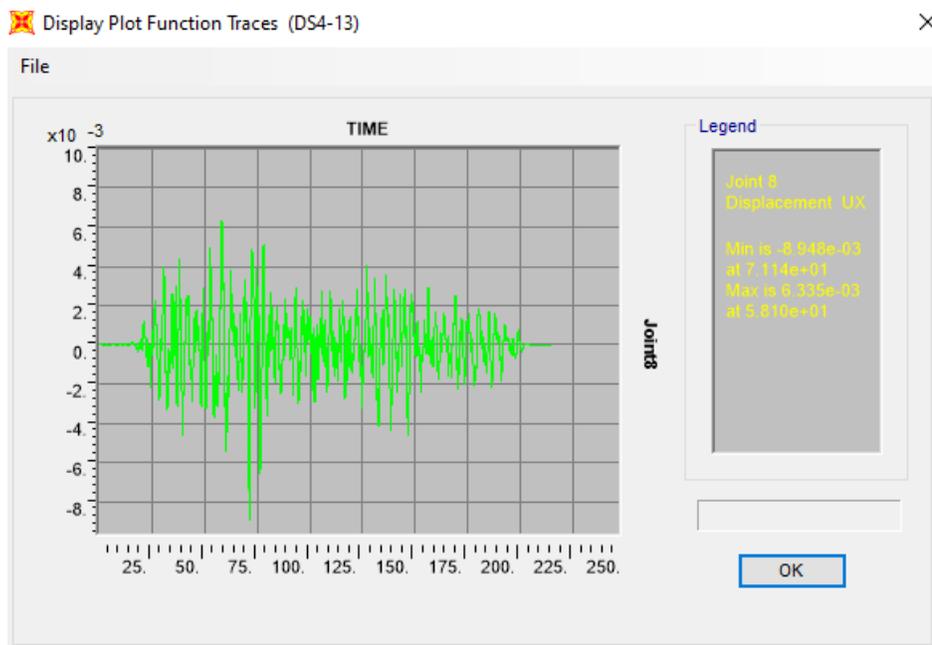
S4 (Aceleraciones)



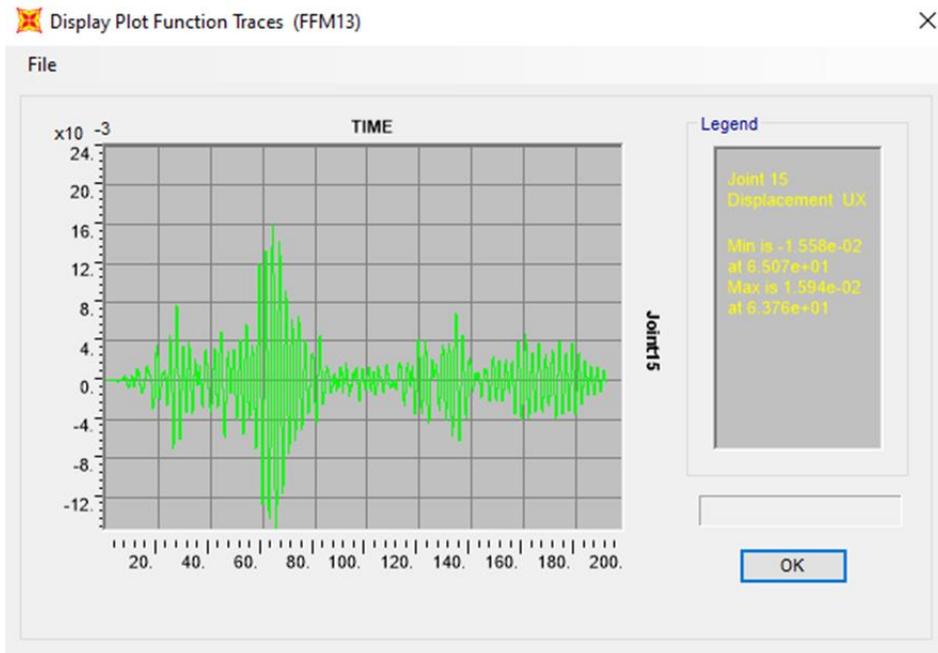
S4 (Desplazamientos)



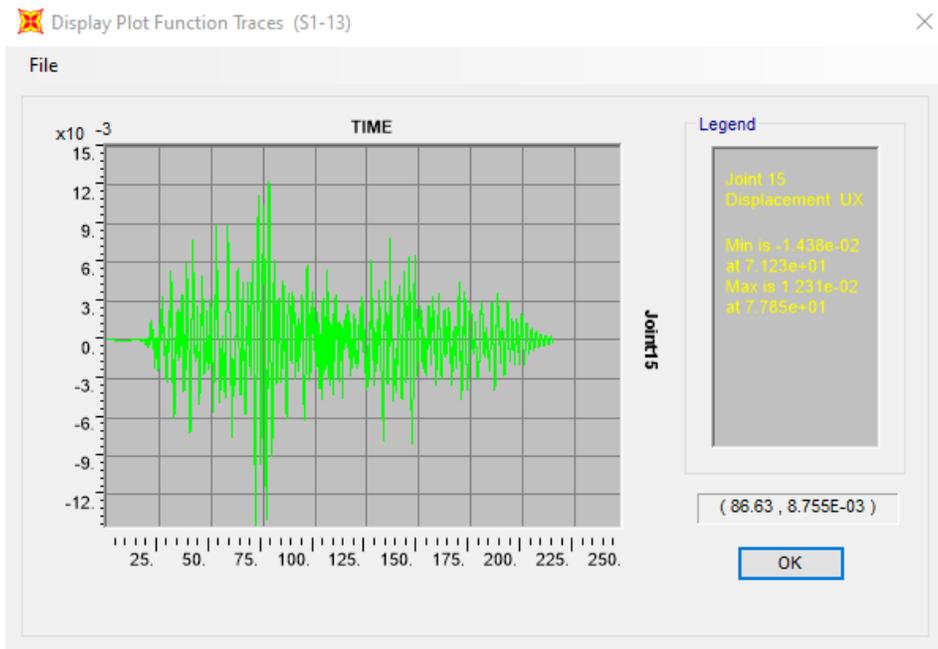
S4 (Aceleraciones y Desplazamientos)



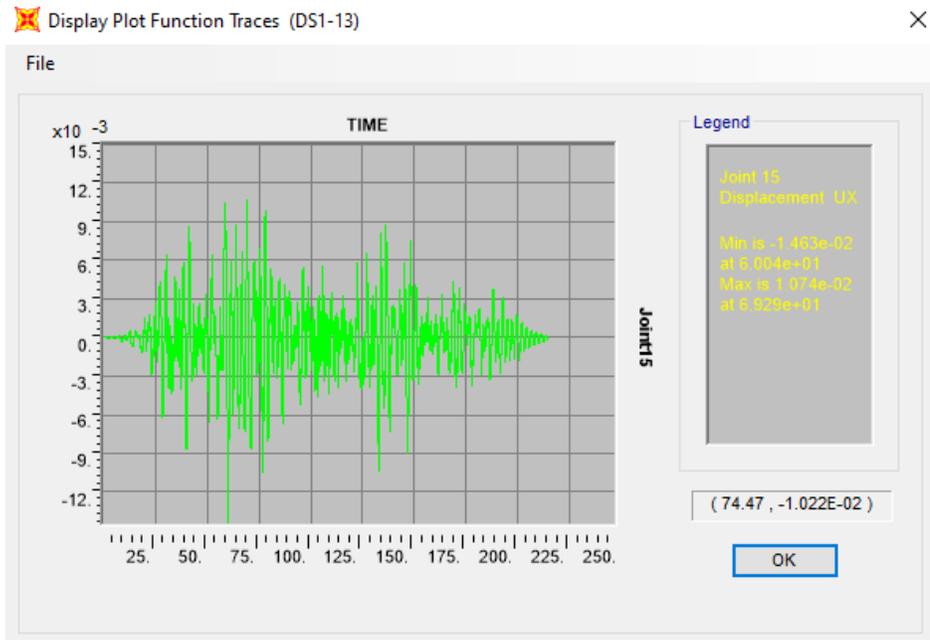
Nodo 15 (Aceleraciones)



Nodo 15 (Desplazamientos S1)



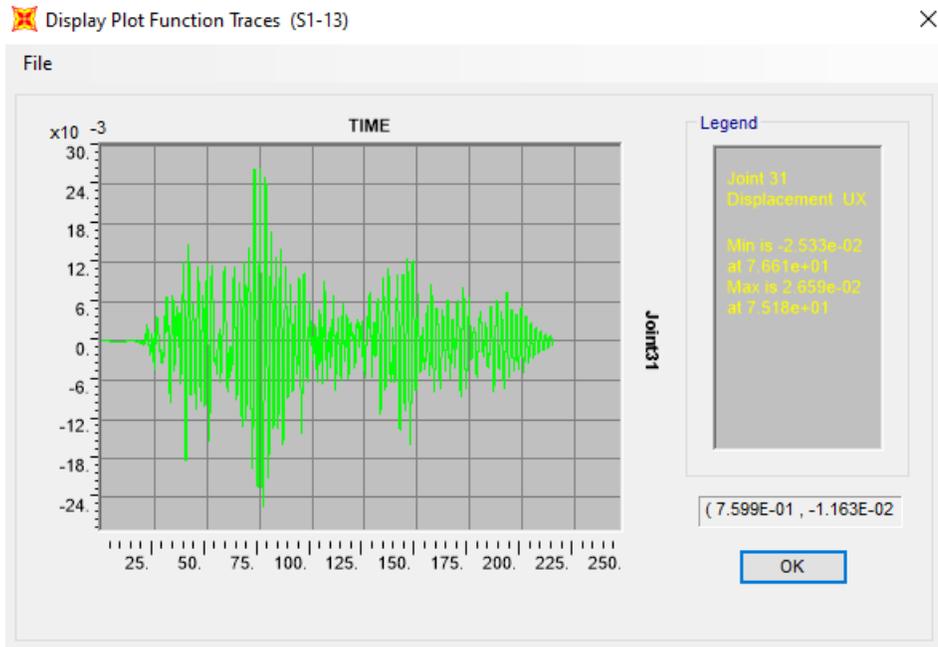
Nodo 15 (Aceleraciones y Desplazamientos)



Nodo 31 (Aceleraciones)



Nodo 31 (Desplazamientos)



Nodo 31 (Aceleraciones y Desplazamientos)

