

## MODELACIÓN DE UN AISLADOR SÍSMICO BASAL DE RODADURA AUTO CENTRADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN ANSYS

*C. Cifuentes Cerda <sup>1</sup>, F. Sanhueza Espinoza <sup>2</sup>, N. Maureira Carsalade <sup>3</sup>.*

### RESUMEN

En este documento se presenta la modelación de un aislador sísmico basal de tipo rodadura mediante ANSYS 2021 R1. A partir de distintas perturbaciones geométricas se generaron simulaciones, de las cuales se obtuvo la curva carga-desplazamiento y la energía que disipa el sistema. El principal objetivo de este estudio es la modelación del dispositivo mediante elementos finitos en 3D para construir la curva de histéresis de un aislador sísmico basal de rodadura auto centrado.

Para desarrollar el modelo numérico, se define el material del cual está constituido el aislador, este corresponde a un acero ASTM A-36. Las dimensiones del dispositivo son: 437 mm de alto, un cascarón semiesférico cuyo radio es 437 mm, un espesor de 7 mm, el cual se encuentra montado sobre una columna central compuesta por dos elementos cilíndricos, soportado contra la base por una rótula de bola. El cuerpo cilíndrico inferior porta en su interior un resorte que provee al sistema la capacidad autocentrante. El detalle de dichos elementos cilíndricos presenta las siguientes características, uno en la parte inferior del dispositivo, cuyas medidas son 252mm de alto y un diámetro externo de 100mm. El cilindro superior se encuentra montado sobre el primero, este presenta un alto de 149mm y un diámetro de 115mm. Para evitar deformaciones excesivas del cascarón, se encuentra implementado un conjunto de atiesadores radiales y tangenciales. Los atiesadores radiales presentan una altura de 143 mm y un largo de 243mm, separados por atiesadores tangenciales cuyo alto es 46 mm y un arco exterior de largo correspondiente a 140mm, los espesores de ambos atiesadores es de 6mm. En la parte inferior del aislador se encuentra una base, que consta de una rotula esférica cuyo radio es de 30 mm, la cual esta confinada en una placa base cilíndrica hueca en el centro, cuyas dimensiones son 55mm de alto y 100 mm de diámetro, con sus debidas perforaciones para ser anclada mediante pernos. El modelo final a partir de una serie de ajustes, permite reproducir el efecto deseado, obtenido a partir de la validación experimental de una investigación realizada previamente, para finalmente confeccionar la curva de histéresis del dispositivo simulado.

**PALABRAS CLAVES:** *Aislador sísmico de rodadura, Disipación por roce, ANSYS, Elementos finitos.*

**ABSTRACT**

This document presents the modeling of a rolling seismic isolator, using ANSYS 2021 R1. From different geometric disturbances, simulations were carried out, from which the load-displacement curve and the amount of energy that the system dissipates was obtained. The main objective of this study is modeling the device, using 3D finite elements and getting the hysteresis curve of a self-centering rolling basal seismic isolator.

To develop the numerical model, the material of which the isolator is made is defined, this corresponds to an ASTM A-36 steel. The dimensions of the device are; 437 mm high, a hemispherical shell whose radius is 437 mm, a thickness of 7 mm, mounted on a central column, which is made of two cylindrical elements, all supported for a ball joint hinge. The lower cylindrical body carries a spring inside that provides the system with self-centering capacity. The detail of these cylindrical elements presents the following characteristics, one in the lower part of the device, whose measurements are 252 mm high and an external diameter of 100mm. The upper cylinder is mounted on the first one, it has a height of 149mm and a diameter of 115mm. To avoid excessive deformation of the shell, a set of radial and tangential stiffeners is implemented. The radial stiffeners have a height of 143 mm and a length of 243 mm, separated by tangential stiffeners whose height turns out to be 46 mm and an external arc of length corresponding to 140 mm, the thickness of both stiffeners is 6 mm. In the lower part of the insulator there is a base, which consists of an almost spherical ball joint whose radial arc is 162mm, which is confined in a hollow cylindrical base plate in the center, whose dimensions are 55mm high and 100mm in diameter. with its proper perforations to be anchored by means of bolts. The final model from a series of adjustments, allows to reproduce the desired effect, obtained from the experimental validation of a previously carried out investigation, to finally make the hysteresis curve of the simulated device.

**KEYWORDS:** *Seismic rolling isolator, Friction dissipation, ANSYS, Finite element method.*

1 Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ccfuentes@ing.ucsc.cl

2 Profesor Guía, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

3 Prof. Informante, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Según el comportamiento de terremotos ocurridos en el pasado y recientemente, en países como; Chile, Japón, Turquía, Nueva Zelanda y el resto del mundo, se ha dejado entre ver la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y sus pares. Es por ello que distintas construcciones alrededor del mundo, se ha requerido emplear el uso de sistemas de protección sísmica.

Un sistema de protección sísmica es uno o varios dispositivos, los cuales son utilizados en las estructuras para disminuir los daños estructurales ante un evento sísmico. Un sismo es un movimiento brusco de la tierra, en el cual se libera energía por un tiempo determinado, dicha energía suele propagarse a través del suelo mediante ondas. Estas son transmitidas a las estructuras en forma de movimiento, aceleración y deformaciones en sistemas estructurales y no estructurales (<https://www.onemi.gov.cl/terremoto>).

En Chile existen normativas que regulan el diseño sismo resistente de las estructuras, la NCh2745, que regula edificios con aislamiento basal y la NCh. 433.Of96, mod-2009 y el DS61 de 2011. Existen tres puntos importantes que deben cumplir las estructuras según la norma; i) Deben resistir daños de movimientos sísmicos de intensidad moderada; ii) Limitar los daños de elementos no estructurales en un sismo de mediana intensidad; iii) De haber daños, la estructura debe evitar el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa. El objetivo principal de esta norma es prevenir el colapso estructural a modo de que la estructura pueda seguir operando una vez ocurrido un sismo severo. El uso de sistemas de protección sísmica no está estipulado en la norma, puesto que es una decisión netamente del inversionista o de los dueños del proyecto que sea realiza.

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo. El 46,5% de toda la energía sísmica mundial del siglo XX, se liberó en Chile. De los 15 terremotos más destructivos que han ocurrido desde 1900, 3 han ocurrido en Chile (Tabla 1).

**Tabla 1.** Ranking de terremotos más destructivos a nivel mundial desde 1900, fuente: USGS.

	UBICACIÓN	FECHA	MAGNITUD (RICHTER)	LATITUD	LONGITUD
1	Valdivia, Chile	1960/05/22	9.5	-38.29	-73.05
2	Prince William Sound, Alaska	1964/03/28	9.2	61.02	-147.65
3	Costa Oeste de Sumatra Norte	2004/12/26	9.1	3.30	95.78
4	Costa Este de Honshu, Japón	2011/03/11	9.0	38.322	142.369
5	Kamchatka, Rusia	1952/11/04	9.0	52.76	160.06
6	Maule, Chile	2010/02/27	8.8	-35.846	-72.719
7	Costa de Ecuador	1906/01/31	8.8	1.0	-81.5
8	Islas Rata, Alaska	1965/02/04	8.7	51.21	178.50
9	Sumatra Norte, Indonesia	2005/03/28	8.6	2.08	97.01
10	Assam, Tibet	1950/08/15	8.6	28.5	96.5
11	Islas Andreanof, Alaska	1957/03/09	8.6	51.56	-175.39
12	Sumatra Sur, Indonesia	2007/09/12	8.5	-4.438	101.367
13	Mar de Banda, Indonesia	1938/02/01	8.5	-5.05	131.62
14	Kamchatka, Rusia	1923/02/03	8.5	54.0	161.0
15	Frontera Chile-Argentina	1922/11/11	8.5	-28.55	-70.50
16	Islas Kuril	1963/10/13	8.5	44.9	149.6

Existen diversos tipos de protección sísmica de edificios y estructuras, estos se pueden apreciar en la Figura 1.



**Figura 1:** Esquema de sistemas de protección sísmica (Fuente: [https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia\\_cip-ancash\\_2017](https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia_cip-ancash_2017))

Como se puede apreciar en la Figura 1, el esquema clasifica los tipos de sistemas de protección sísmica que existen en el mundo, en nuestro caso nos centraremos en un sistema pasivo. El sistema que se presenta en este documento corresponde a un sistema de protección sísmica pasivo, particularmente un aislador sísmico de rodadura. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados que para algunos casos se contempla disipar energía por medio de calor. La aislación sísmica se fundamenta en el principio de separar la superestructura de los movimientos del suelo o de la subestructura, a través de elementos flexibles en la dirección horizontal, generalmente ubicados entre la estructura y su fundación o a nivel del cielo del subterráneo.

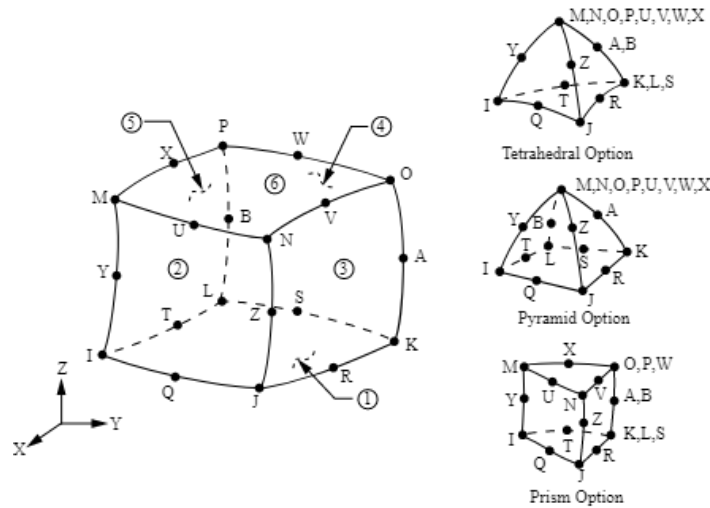
Dependiendo de los grados de detalles de la modelación, se puede dar ciertos enfoques, según el detalle que se quiera representar, macro, meso y micro modelado todas (Gisbert, et al, 2018). La más detallada de todas corresponde a micro modelado, cada una de las piezas de acero se modelan utilizando el método de elementos finitos (FEM por su sigla en inglés). Modelar aisladores como el dispositivo de este estudio no requiere de un gasto computacional tan alto, puesto que es un dispositivo que no es de gran tamaño. No obstante, se debe tener en cuenta el tipo de geometría compleja, la cual puede generar problemas al momento de generar una malla. Al día de hoy existen diversos softwares que nos permiten modelar el comportamiento de este dispositivo y muchos otros, ejemplos de ellos son el utilizado en esta investigación ANSYS, ETABS, entre otros.

Como el comportamiento mecánico del aislador sísmico basal de rodadura autocentrante, posee una composición axial simétrica y homogénea en materialidad (siendo el acero A-36 su único material), el tipo de modelación de elementos finitos utilizado es de tipo micro. Para evitar el comportamiento estructural no lineal del dispositivo, se le realizaron simplificaciones geométricas al modelo, en particular a elementos como, uniones soldadas, perforaciones, resorte y cable de autocentrado.

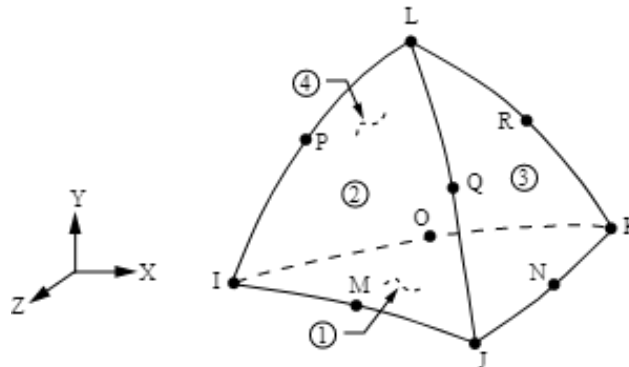
En este estudio se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en ANSYS, utilizando elementos tipo *solid186* y *solid187*, para representar cada uno de los elementos del aislador hecho a partir de acero A-36 (figura 2 y 3). El primer tipo de elemento (*solid186*) queda definido por 20 nodos y tres grados de libertad, el elemento admite capacidades de plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, rigidez por tensión, grandes deflexiones y deformaciones. El segundo tipo de elemento (*solid187*), es un elemento similar a su antecesor (*solid186*), es un tipo de elemento tridimensional de 10 nodos de orden superior, tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y también sirve para modelar mallas complejas.

El elemento está definido por 10 nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodales X, Y y Z (Bo-Wun Huang, Jao-Hwa Kuang, Jung-Ge Tseng, Jyun-Cin Wang, Yu-Xian Qiu, et al, 2015).

El elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, rigidez por tensión, gran deflexión y deformación. También tiene capacidad de formulación mixta para simular deformaciones de materiales elasto-plásticos casi incompresibles y materiales hiperelásticos totalmente incompresibles.



**Figura 2:** Elementos finitos tipo solid 186 (Fuente: ANSYS)



**Figura 3:** Elementos finitos tipo solid 187 (Fuente: ANSYS)

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

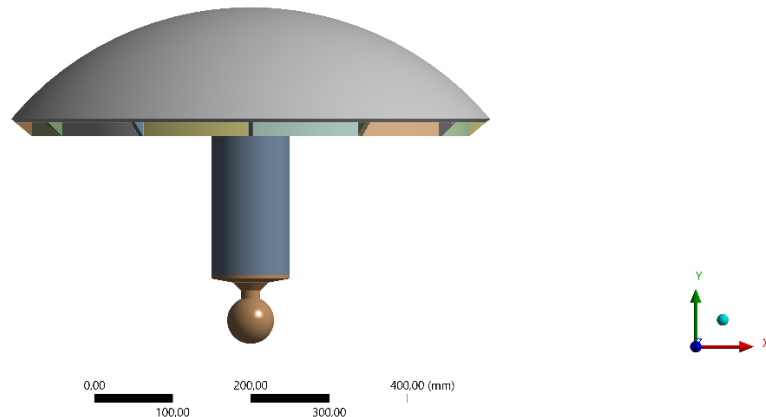
Evaluar numéricamente el comportamiento de un Aislador basal de rodadura autocentrante, mediante el uso de elementos finitos en ANSYS, para confección de la curva histérica.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Modelar numéricamente el aislador, contemplando para ello, geometría, mallado y condiciones de borde.
- Analizar las perturbaciones de posiciones geométricas de pequeños desplazamientos con el propósito de definir la curva histérica.
- Consolidar los modelos geométricos para elaborar la curva histérica completa.
- Generar curva la histérica de la disipación de energía del aislador sísmico de rodadura basal autocentrante.

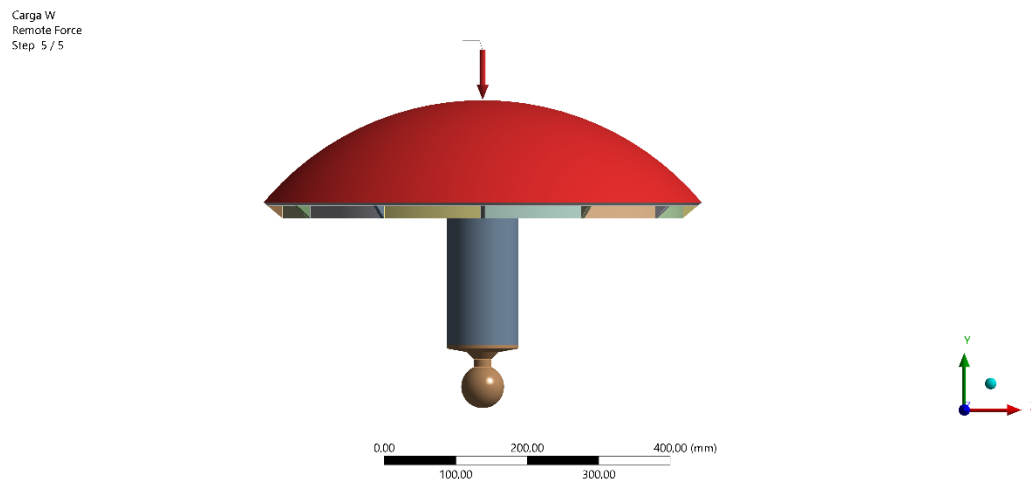
### 3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

Las dimensiones del dispositivo son; 437 mm de alto, un cascarón semiesférico cuyo radio es 437 mm, un espesor de 7 mm, este elemento encuentra montado sobre una columna central, que se compone por dos elementos cilíndricos. El cuerpo cilíndrico inferior porta en su interior un resorte que provee al sistema la capacidad autocentrante. El detalle de dichos elementos cilíndricos presenta las siguientes características, uno en la parte inferior del dispositivo, cuyas medidas son 252mm de alto y un diámetro externo de 100mm. El cilindro superior se encuentra montado sobre el primero, este presenta un alto de 149mm y un diámetro de 115mm. Para evitar deformaciones excesivas del cascaron, se encuentra implementado un conjunto de atiesadores radiales y tangenciales. Los atiesadores radiales presentan una altura de 143 mm y un largo de 243mm, separados por atiesadores tangenciales cuyo alto es de 46 mm y un arco exterior de largo correspondiente a 140mm, los espesores de ambos atiesadores es de 6mm. En la parte inferior del aislador se encuentra una base, que consta de una rótula casi esférica cuyo radio es de 30 mm, la cual esta confinada en una placa base cilíndrica hueca en el centro, cuyas dimensiones son 55mm de alto y 100 mm de diámetro, con sus debidas perforaciones para ser anclada mediante pernos (Figura 4).



**Figura 4:** Modelo del aislador sin perturbación geométrica en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

Sobre el cascaron semiesférico de este aislador se aplicó una carga vertical correspondiente a 1000 kg (9.806 N) en dirección transversal al dispositivo en sentido negativo del eje de coordenadas Y. El objetivo de aplicar dicha carga es representar el peso de la superestructura sobre el dispositivo y poder analizar su efecto ante una serie de variaciones angulares del dispositivo respecto de su rótula basal (Figura 5).



**Figura 5:** Modelo del aislador cargado con una fuerza de 1000 kg sin perturbación geométrica en ANSYS (Fuente: Elaboración propia)

## 4. MATERIALES

El diseño del aislador sísmico de rodadura basal autocentrante, contempla utilizar un acero tipo A-36 o similar. Para efectos de la simulación, los parámetros establecidos en el software son los correspondientes a un acero A-36, considerando cada uno de los elementos del dispositivo, constituidos por dicho material.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades del acero A-36, dichos parámetros fueron cargados específicamente en una etapa de la modelación, donde se definen los materiales, específicamente en Engineering Data (*Workbench*).

**Tabla 2:** Propiedades del acero A-36 (fuente: Elaboración propia)

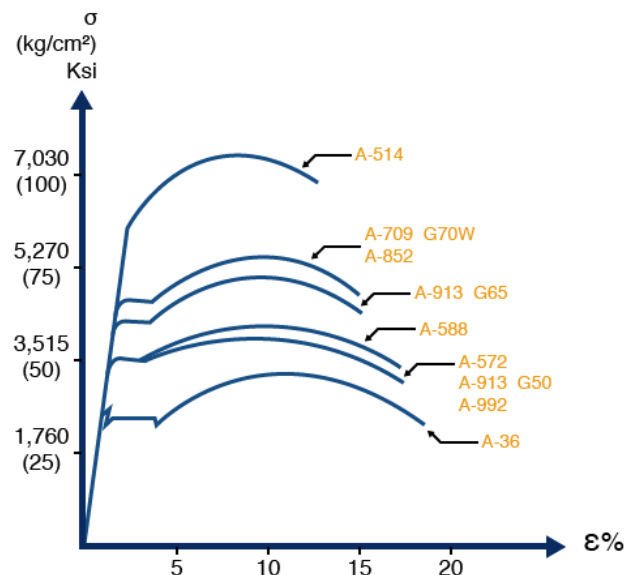
Tipo Material	Módulo de Young [MPa]	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Poisson	f <sub>y</sub> [MPa]	F <sub>u</sub> [MPa]
Acero 36	200000	7850	0,3	250	460

### 4.1 Composición del aislador

Está compuesto de acero estructural A36, el que se produce bajo la especificación ASTM A36. ASTM A36 es una aleación de hierro (mínimo 98%), con contenidos de carbono de máximo 0.29 % y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso y silicio, para mejorar su resistencia a la tracción y buena

influencia en la soldadura. Entre sus ventajas está la buena resistencia a la tracción y compresión además de su bajo costo.

El acero A36 (Figura 6) es el material estructural más usado para construcción de estructuras en el mundo. Es conocido como un acero de fácil soldabilidad, por lo que se utiliza en la construcción de estructuras como construcciones de puentes, edificios y estructuras atornilladas y/o soldadas.



**Figura 6:** Grafica de esfuerzo vs deformación (Fuente: Aceros crea)

## 5. MODELACIÓN

La modelación del dispositivo se llevó a cabo en el software multifísico ANSYS, para ello cabe precisar que este software posee diferentes módulos. Para el dibujo se utilizó el módulo llamado SPACECLAIM y para el análisis cuasi estático se utilizó MECHANICAL. La modelación se fue desglosando en distintas etapas, puesto que se obtuvieron diversos modelos, con distintos comportamientos, ante los cuales, realizando una serie de ajustes, se logró dar con un modelo final. Sin embargo, para poder pasar por el proceso anterior se definieron una serie de etapas relevantes en un momento inicial.

En micro-modelación es posible caracterizar en las siguientes etapas relevantes:

- (i) Importación de los elementos en 3D, mediante *SpaceClaim*.
- (ii) La definición de los materiales en Engineering Data (*Workbench*).
- (iii) Definición de los contactos en *Mechanical*.
- (iv) El mallado diferenciado para cada tipo de elemento en *Mechanical*.
- (v) Agregar las condiciones de borde, tales como las cargas y tipo de apoyo.
- (vi) Obtención y ajuste de modelos ya simulados.
- (vii) La solución y el post procesado de la información del modelo.

A partir de una sucesión de modelos, se obtiene el modelo final. El empleo de modelos sucesivos con rotaciones distintas se lleva a cabo particularmente para poder construir la curva de histéresis y segundo para poder representar el efecto de roce.

Para representar el modelo final, se emplean elementos tridimensionales tipo solid 186 y 187, elementos que se encuentran en ANSYS 2021 R1. A modo de representar el aislador, por medio del micro modelado, se generó una malla con elementos hexaédricos para elementos como; Atiesadores tangenciales, cuerpo superior e inferior, sus tamaños son definidos automáticamente por el software. Para elementos como atiesadores radiales, tapa superior, detalle de rotula y cascarón semiesférico, se utiliza elementos tipo body sizing, cuyas medidas correspondientes son; 12 mm, 10 mm, 5 mm, 25 mm. Con lo que respecta a la rótula y a sus elementos acompañantes, se utilizan elementos tetraédricos (Figura 7 y Figura 8).

Para los modelos se utiliza la opción Static Structural, pues la rapidez de la aplicación de la carga permite considerarlo como cuasiestático debido a que la carga se aplica lentamente y por lo tanto no se ve la influencia de las aceleraciones. Luego se consideraron condiciones de contorno apropiados para representar la física del problema las que se describen a continuación:

En las primeras simulaciones, cabe mencionar que las perturbaciones geométricas y/o angulares, resultaron ser correspondientes a solo 1 grado de variación angular (Figura 9), posteriormente en simulaciones posteriores se incluyeron variaciones con un máximo de 5 grados de variación angular (Figura 10).

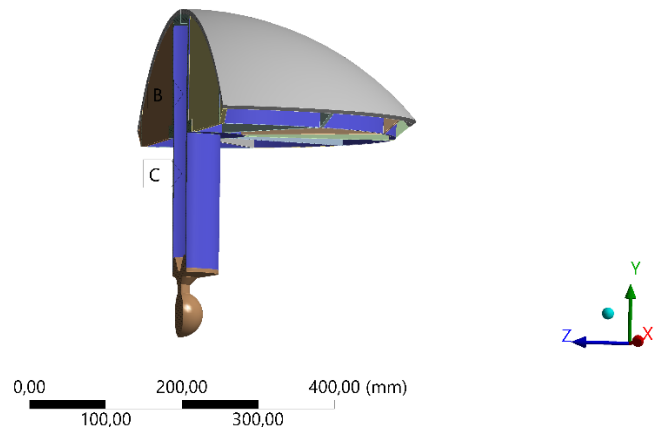
En la base se estableció un *frictionless support* para evitar deformaciones en direcciones normales (figura 10). El apoyo tipo *frictionless support* es un tipo de apoyo utilizado para grados de libertad restringidos en direcciones normales. Esta condición de soporte o límite se utiliza para evitar que una o más caras planas o curvas se muevan o se deformen en la dirección normal. Si esta condición de contorno se aplica a la cara del cuerpo, entonces ninguna parte de la superficie del cuerpo puede moverse, rotar o deformarse normal a la cara, pero para direcciones tangenciales, la superficie del cuerpo es libre de moverse, rotar y deformarse tangencialmente para la cara (GRASP ENGINEERING). En el centro del sistema se situaron 3 *Remote Forces*, correspondientes a; 3 tensiones, 2 internas que tienen las mismas magnitudes, pero con signos opuestos y una que sale del dispositivo (Figura 10), un peso aplicado sobre el cascarón semiesférico y en sentido negativo al eje Y, correspondiente a 1000 kg (9.806 N). Una *Remote Force* es equivalente a una carga de fuerza regular en una cara o una carga de fuerza en un borde (ANSYS FORUM). Por último, se añade mediante *Remote Displacement*, el o los desplazamientos en sentido positivo del eje X, asociados a



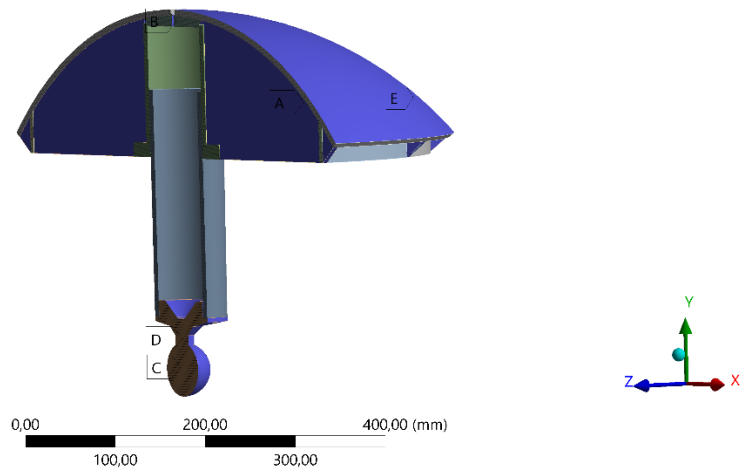
**UCSC**

Simposio de Habilitación Profesional  
Departamento de Ingeniería Civil  
Diciembre de 2022

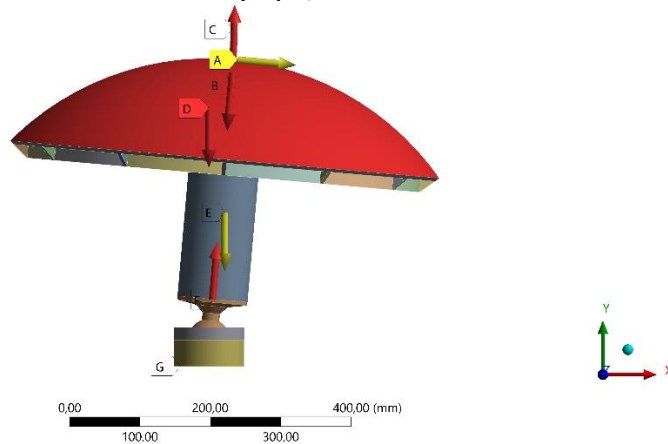
cierta variación angular. El Remote Displacement permite transmitir los efectos de un desplazamiento conocido de cualquier miembro estructural remoto al sistema, estando este miembro conectado a la estructura por conexión rígida (ANSYS FORUM).



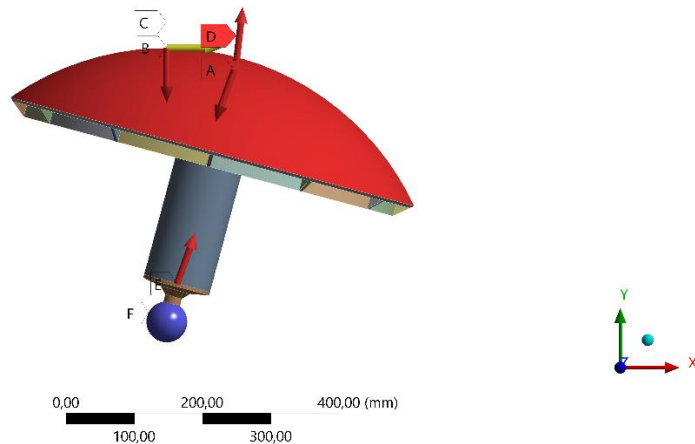
**Figura 7:** Atiesadores tangenciales, cuerpos superior e inferior (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 8:** Atiesadores radiales, tapa superior, cascaron semiesférico, detalle y elementos de la rótula (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 9:** Modelo correspondiente a solo una variación angular de 16 grados (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 10:** Modelo correspondiente a 5 grados de variación angular (15 a 20 grados) (Fuente: Elaboración propia)

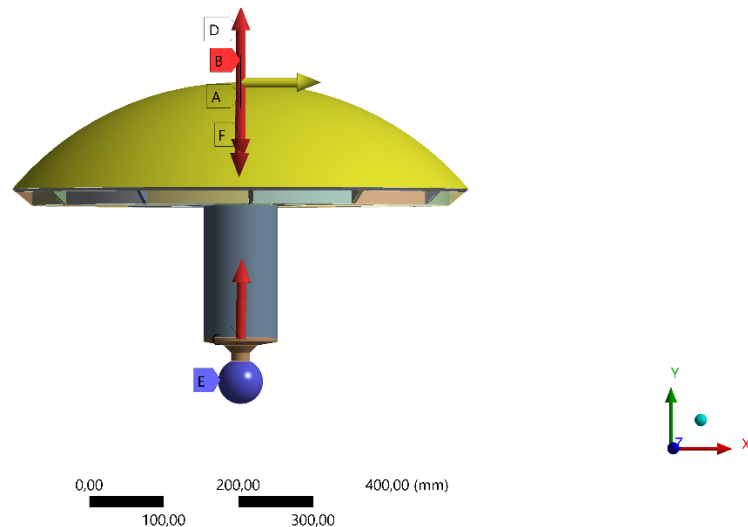
## 6 Definición de modelos y parámetros

El modelo final contempla 4 modelos, estos modelos contemplan un coeficiente igual a cero, ese paso se define en los contactos correspondientes a *frictional*, estos 4 modelos están caracterizados por intervalos de variaciones geométricas correspondientes a 5 grados, el objetivo de estos modelos es poder obtener la reacción de fuerza que se origina a partir de los desplazamientos, para posteriormente realizar la confección de la curva elástica y en consecuencia la de histéresis.

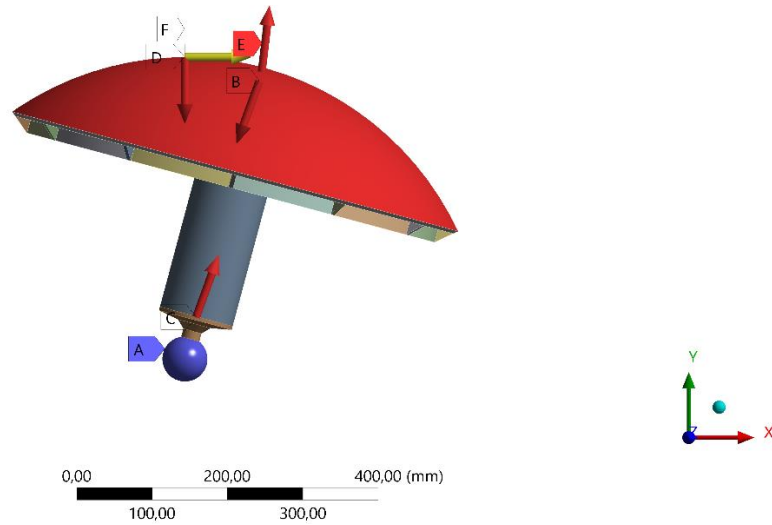
Los parámetros empleados en los modelos son obtenidos a partir del artículo “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” (N. Maureira-Carsalade, E. Pardo, C. Oyarzo-Vera, A. Roco), estos representan el input o condiciones de borde que se implementan en el módulo de ANSYS static structural. Las tensiones se obtienen a partir de los alargamientos del cable autocentrante, dichos cálculos en Excel representan las ecuaciones (5, 6, 7 y 13) del artículo citado. Los modelos a utilizar con sus respectivas condiciones de borde (figuras 11,12,13 y 14) y parámetros (Tabla 3):

**Tabla 3:** Parámetros de los modelos simulados (fuente: Elaboración propia)

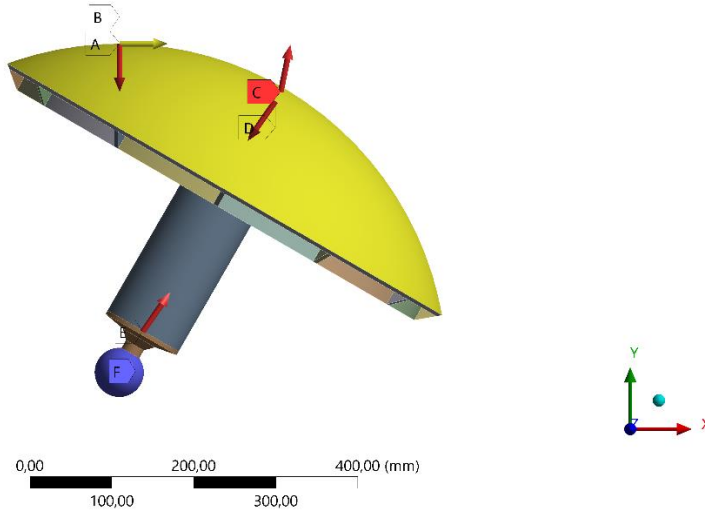
PARAMETROS DE LOS MODELOS							
GIRO [°]	DESPLAZAMIENTO [mm]	TENSIONES SALIENTES [N]	TENSIONES INTERNAS [N]				
0	0,000	1480,441	0,000	-1480,441	0,000	1480,441	
1	6,981	1481,497	-25,856	-1481,296	25,856	1481,296	
2	13,960	1484,666	-51,818	-1483,862	51,818	1483,862	
3	20,934	1489,946	-77,990	-1488,130	77,990	1488,130	
4	27,903	1497,335	-104,477	-1494,092	104,477	1494,092	
5	34,862	1506,832	-131,385	-1501,734	131,385	1501,734	
15	0,000	1716,741	-446,022	-1664,575	446,022	1664,575	
16	6,727	1749,082	-484,207	-1688,632	484,207	1688,632	
17	13,421	1783,452	-523,990	-1713,894	523,990	1713,894	
18	20,079	1819,841	-565,457	-1740,298	565,457	1740,298	
19	26,700	1858,237	-608,695	-1767,778	608,695	1767,778	
20	33,280	1898,629	-653,786	-1796,263	653,786	1796,263	
30	0,000	2409,231	-1223,160	-2118,576	1223,160	2118,576	
31	6,015	2470,611	-1293,391	-2152,564	1293,391	2152,564	
32	11,968	2533,796	-1366,261	-2186,474	1366,261	2186,474	
33	17,856	2598,766	-1441,815	-2220,200	1441,815	2220,200	
34	23,677	2665,502	-1520,094	-2253,631	1520,094	2253,631	
35	29,431	2733,983	-1601,135	-2286,658	1601,135	2286,658	
40	0,000	3101,792	-2048,820	-2441,689	2048,820	2441,689	
41	5,309	3180,275	-2147,006	-2469,848	2147,006	2469,848	
42	10,537	3260,343	-2248,108	-2496,777	2248,108	2496,777	
43	15,684	3341,971	-2352,130	-2522,351	2352,130	2522,351	
44	20,748	3425,133	-2459,075	-2546,447	2459,075	2546,447	
45	25,728	3509,804	-2568,940	-2568,940	2568,940	2568,940	



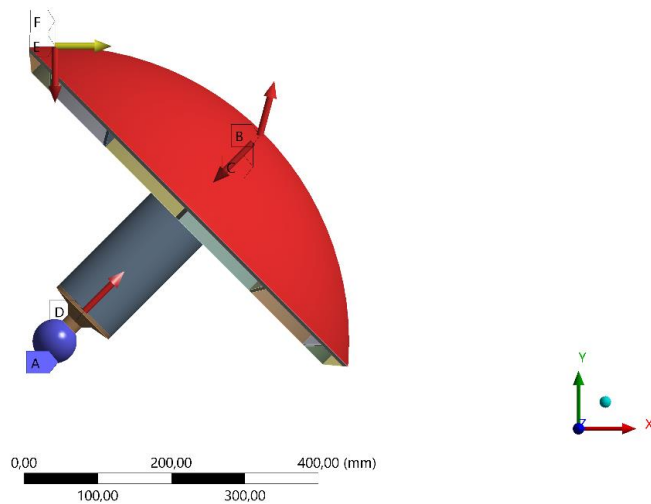
**Figura 11:** Modelo correspondiente a variación angular 0 a 5 grados (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 12:** Modelo correspondiente a variación angular 15 a 20 grados (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 13:** Modelo correspondiente a variación angular 30 a 35 grados (Fuente: Elaboración propia)

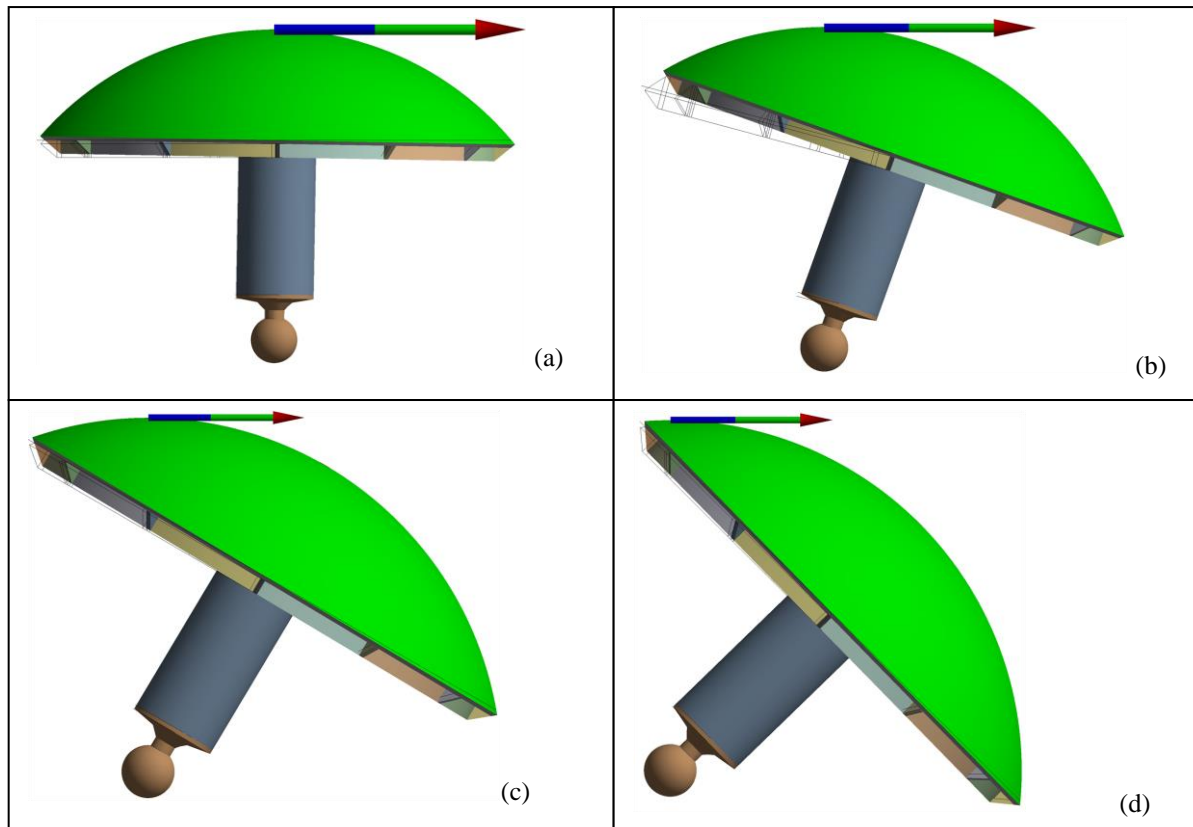


**Figura 14:** Modelo correspondiente a variación angular 40 a 45 grados (Fuente: Elaboración propia)

Como vemos en las Figura 11, 12, 13 y 14, estas representan variaciones angulares con sus respectivas condiciones de bordes aplicadas al aislador, estas corresponden a; vector amarillo a desplazamientos, vectores rojos a fuerzas y en la base de color azul a el tipo de apoyo.

## 7. RESULTADOS

Como vemos en la Figura 15, el aislador presenta 4 intervalos de variaciones angulares, en las cuales se puede apreciar la reacción de fuerza que se produce en respuesta a los desplazamientos impuestos, los cuales son correspondientes a sus perturbaciones angulares.



**Figura 15:** Modelos con sus respectivas reacciones de fuerza; (a) 0-5 grados, (b) 15-20 grados, (c) 30-35 grados, (d) 40-45 grados (Fuente: Elaboración propia)

### 7.1 Reacción debido al desplazamiento impuesto

Como se puede apreciar en la figura 15, estos modelos nos entregan fuerzas (N), asociadas a los desplazamientos (mm) impuestos a sus respectivos modelos como condiciones de borde, a continuación, en la tabla 4 se presentan los valores que nos entrega ANSYS:

**Tabla 4:** Fuerzas restauradoras en respuesta a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

GIRO [°]	DESPLAZAMIENTO [mm]	FUERZA RESTAURADORA [N]
0	0,000	0,000
1	6,981	69,540
2	13,960	144,530
3	20,934	219,820
4	27,903	295,400
5	34,862	371,480
16	110,255	380,580
17	116,949	462,950
18	123,607	546,230
19	130,227	630,340
20	136,808	715,480
31	206,015	915,580
32	211,968	1015,700
33	217,856	1117,400
34	223,677	1220,300
35	229,431	1324,800
41	262,424	1532,300
42	267,652	1651,300
43	272,799	1772,200
44	277,863	1894,900
45	282,843	2019,500

### 7.2 Confección de curva elástica

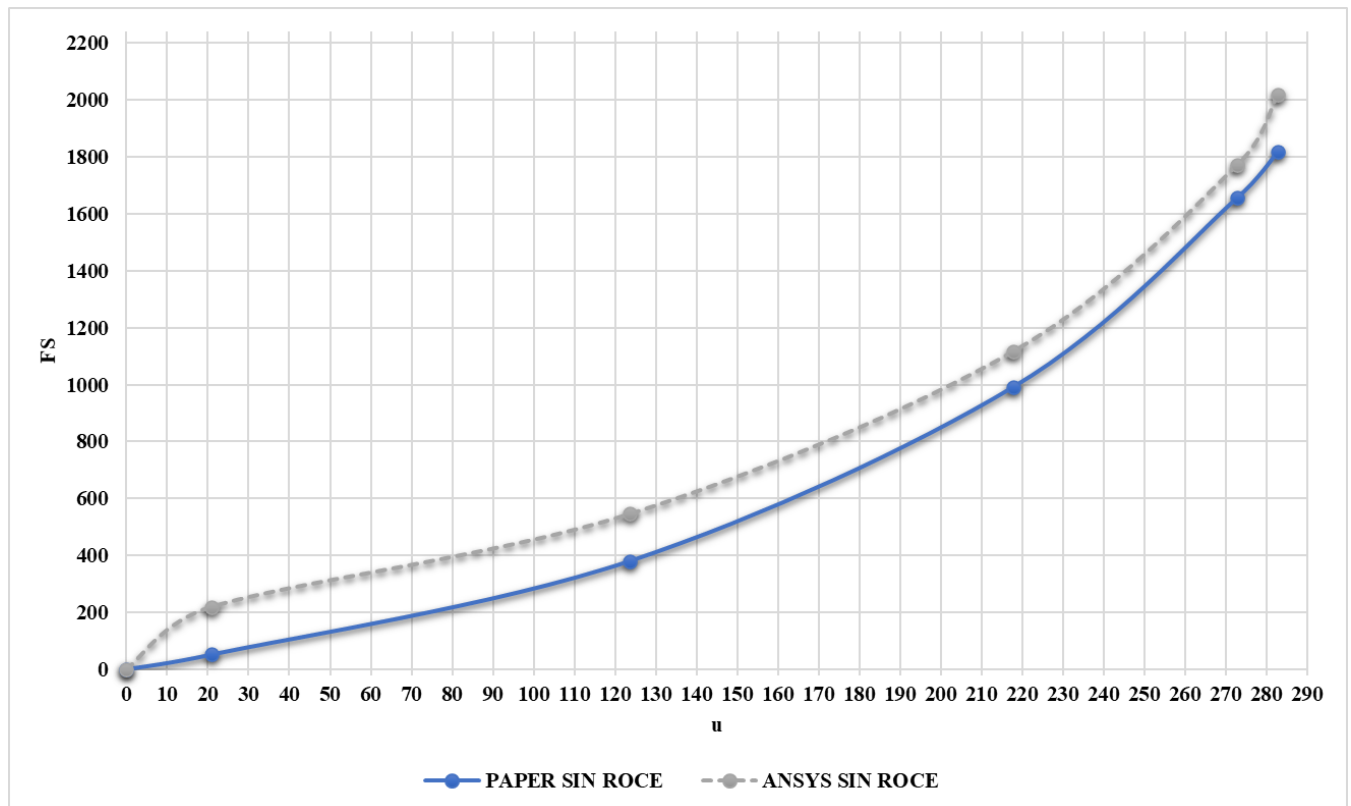
Como se puede apreciar en la figura 16 y en la tabla 5, con los valores que nos entrega ANSYS, se grafica la curva elástica del dispositivo. Cuando nos referimos a la curva elástica, nos situamos en la mitad de la curva histerética, dicho de otra forma, cuando no se está en presencia de roce o bien cuando  $\mu=0$ .

Cabe destacar que en la figura 16 se presentan 2 curvas, una correspondiente a lo que nos proporciona ANSYS como tal y la segunda se construye con los datos proporcionados por el artículo de comparación, específicamente mediante la ecuación 20 (tabla 5); *A roller type base isolation device with tensile strength* (N. Maureira-Carsalade, E. Pardo, C. Oyarzo-Vera, A. Roco, 2020).

**Tabla 5:** Fuerzas restauradoras (Fs) del PAPER y ANSYS (Fuente: Elaboración propia)



GIRO [°]	DESPLAZAMIENTO [mm]	Fs paper [N]	Fs ansys [N]
0	0	0,000	0
1	7	17,238	70
2	14	34,549	145
3	21	52,007	220
4	28	69,683	295
5	35	87,653	371
16	110	325,199	381
17	117	352,255	463
18	124	380,517	546
19	130	410,054	630
20	137	440,930	715
31	206	886,759	916
32	212	938,466	1016
33	218	992,271	1117
34	224	1048,226	1220
35	229	1106,379	1325
41	262	1503,982	1532
42	268	1578,756	1651
43	273	1656,063	1772
44	278	1735,936	1895
45	283	1818,411	2020



**Figura 16:** Curvas elásticas del PAPER” A roller type base isolation device with tensile strength” y ANSYS  
 (Fuente: Elaboración propia)

### 7.3 Procesamiento de resultados

Con los resultados obtenidos mediante las simulaciones en ANSYS, que se pueden apreciar en la Figura 15 y tabla 5, solo se puede confeccionar la curva correspondiente a roce igual cero ( $\mu=0$ ), sin embargo, para poder construir el ciclo completo de histéresis, es necesario llevar a cabo un post proceso, que implica añadir la presencia de roce entre aceros de un mismo tipo ( $\mu=0,3$ ).

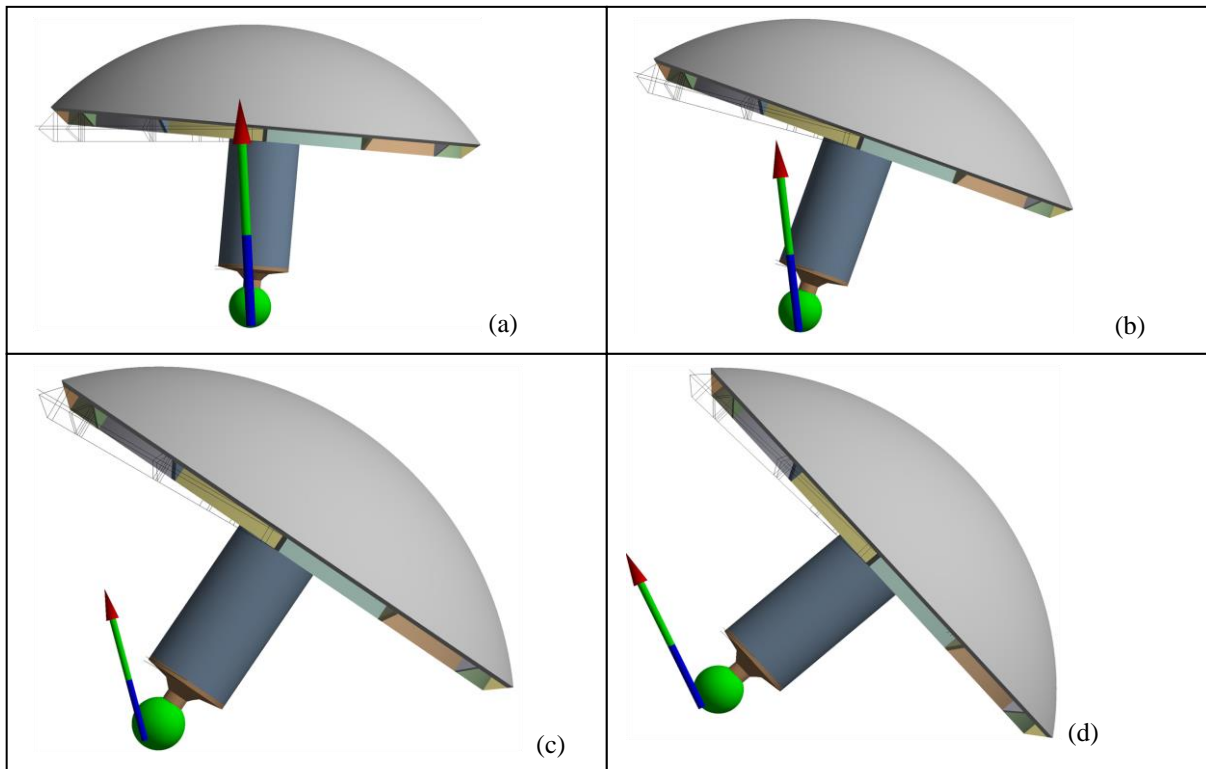
Con los datos presentes en la tabla 6, se utiliza la ecuación número 1, para calcular la fuerza de roce, la cual resulta ser el producto entre las reacciones normales obtenidas de ANSYS y el coeficiente de roce, el cual es un dato conocido a partir del tipo de acero que se está utilizando (A-36):

$$F_r = R_p \cdot \mu \quad (1)$$

Con los cálculos realizados (Tabla 7), se utiliza la ecuación número 2, para calcular el momento de roce, esta resulta ser el producto entre la fuerza de roce, obtenida mediante calculo analítico y el radio de la bola u/o rotula que es un dato conocido:

$$M_r = F_r \cdot r_b \quad (2)$$

Dicho lo anterior, mediante un proceso iterativo, en base a información conocida tal como lo son; las reacciones normales (tabla 6), el coeficiente de roce y el radio de la bola y/o rotula. Podemos efectuar el cálculo de la fuerza y del momento de roce a partir de las ecuaciones que nos brinda el PAPER, para así poder ingresar una nueva condición de borde a nuestros modelos (Ec.1 y Ec.2). Esta nueva condición de borde se implementa en ANSYS como un momento con sentido positivo (figura 18), con el objetivo de contrarrestar las fuerzas que quieren desestabilizar nuestro sistema.



**Figura 17.** Modelos con sus vectores de reacciones en los apoyos; (a) 0-5 grados, (b) 15-20 grados, (c) 30-35 grados, (d) 40-45 grados (Fuente: Elaboración propia)

Cabe resaltar la importancia de realizar este proceso iterativo, esto debido a que nos permite incorporar el roce a nuestro modelo final, sin embargo, para que los resultados puedan converger fue necesario realizar 3 iteraciones (tabla 8). Mediante este post proceso se obtiene como resultado una nueva reacción normal y una fuerza restauradora, una vez convergido los resultados correspondientes a la fuerza restauradora (tabla 9), con presencia de roce, esto nos permite poder construir nuestra curva histéretica del sistema.

**Tabla 6:** Reacciones normales obtenidas de ANSYS, coeficiente de roce y radio de la rótula (Fuente: Elaboración propia)

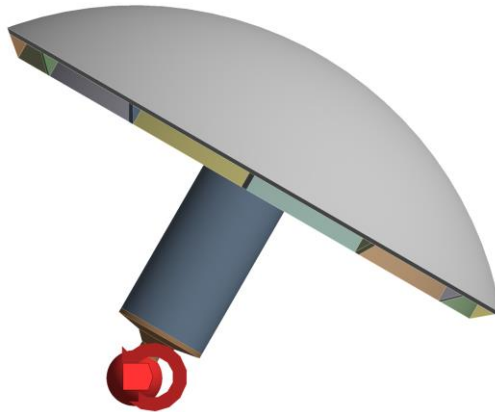
GIRO [°]	Reaccion normal [N]	$\mu$	Radio rotula [mm]
1	8324,9	0,3	30
2	8322,9	0,3	30
3	8319,7	0,3	30
4	8315,2	0,3	30
5	8309,6	0,3	30
16	8075,2	0,3	30
17	8048	0,3	30
18	8020,1	0,3	30
19	7991,7	0,3	30
20	7962,7	0,3	30
31	7461,3	0,3	30
32	7423,8	0,3	30
33	7387,5	0,3	30
34	7352,7	0,3	30
35	7319,8	0,3	30
41	7014,7	0,3	30
42	6993,5	0,3	30
43	6976,4	0,3	30
44	6963,9	0,3	30
45	6956,3	0,3	30

**Tabla 7:** Fuerza y momento de roce, calculo analítico (Fuente: Elaboración propia)

GIRO [°]	Reaccion normal [N]	$\mu$	Radio rotula [mm]	Fuerza de roce [N]	Momento de roce [N*mm]
1	8324,9	0,3	30	2497,47	74924,1
2	8322,9	0,3	30	2496,87	74906,1
3	8319,7	0,3	30	2495,91	74877,3
4	8315,2	0,3	30	2494,56	74836,8
5	8309,6	0,3	30	2492,88	74786,4
16	8075,2	0,3	30	2422,56	72676,8
17	8048	0,3	30	2414,4	72432
18	8020,1	0,3	30	2406,03	72180,9
19	7991,7	0,3	30	2397,51	71925,3
20	7962,7	0,3	30	2388,81	71664,3
31	7461,3	0,3	30	2238,39	67151,7
32	7423,8	0,3	30	2227,14	66814,2
33	7387,5	0,3	30	2216,25	66487,5
34	7352,7	0,3	30	2205,81	66174,3
35	7319,8	0,3	30	2195,94	65878,2
41	7014,7	0,3	30	2104,41	63132,3
42	6993,5	0,3	30	2098,05	62941,5
43	6976,4	0,3	30	2092,92	62787,6
44	6963,9	0,3	30	2089,17	62675,1
45	6956,3	0,3	30	2086,89	62606,7

**Tabla 8:** Iteraciones para obtener fuerza y momento de roce, calculo analítico (Fuente: Elaboración propia)

GIRO [°]	Iteracion 0			Iteracion 1			Iteracion 2			Iteracion 3		
	Rp0 [N]	Fr0 [N]	Mr0 [N*mm]	Rp1 [N]	Fr1 [N]	Mr1 [N*mm]	Rp2 [N]	Fr2 [N]	Mr2 [N*mm]	Rp3 [N]	Fr3 [N]	Mr3 [N*mm]
1	8324,9	2497,47	74924,1	8328,7	2498,61	74958,3	8328,7	2498,61	74958,3	8328,7	2498,61	74958,3
2	8322,9	2496,87	74906,1	8328,7	2498,61	74958,3	8328,7	2498,61	74958,3	8328,7	2498,61	74958,3
3	8319,7	2495,91	74877,3	8327,3	2498,19	74945,7	8327,3	2498,19	74945,7	8327,3	2498,19	74945,7
4	8315,2	2494,56	74836,8	8324,8	2497,44	74923,2	8324,8	2497,44	74923,2	8324,8	2497,44	74923,2
5	8309,6	2492,88	74786,4	8321	2496,3	74889	8321	2496,3	74889	8321	2496,3	74889
16	8075,2	2422,56	72676,8	8089,4	2426,82	72804,6	8089,5	2426,85	72805,5	8089,5	2426,85	72805,5
17	8048	2414,4	72432	8064,5	2419,35	72580,5	8064,5	2419,35	72580,5	8064,5	2419,35	72580,5
18	8020,1	2406,03	72180,9	8038,8	2411,64	72349,2	8038,8	2411,64	72349,2	8038,8	2411,64	72349,2
19	7991,7	2397,51	71925,3	8012,5	2403,75	72112,5	8012,6	2403,78	72113,4	8012,6	2403,78	72113,4
20	7962,7	2388,81	71664,3	7985,8	2395,74	71872,2	7985,9	2395,77	71873,1	7985,9	2395,77	71873,1
31	7461,3	2238,39	67151,7	7493,8	2248,14	67444,2	7494	2248,2	67446	7494	2248,2	67446
32	7423,8	2227,14	66814,2	7459,2	2237,76	67132,8	7459,3	2237,79	67133,7	7459,3	2237,79	67133,7
33	7387,5	2216,25	66487,5	7425,8	2227,74	66832,2	7426	2227,8	66834	7426	2227,8	66834
34	7352,7	2205,81	66174,3	7394	2218,2	66546	7394,2	2218,26	66547,8	7394,2	2218,26	66547,8
35	7319,8	2195,94	65878,2	7364,1	2209,23	66276,9	7364,4	2209,32	66279,6	7364,4	2209,32	66279,6
41	7014,7	2104,41	63132,3	7068,2	2120,46	63613,8	7068,6	2120,58	63617,4	7068,6	2120,58	63617,4
42	6993,5	2098,05	62941,5	7050,5	2115,15	63454,5	7051	2115,3	63459	7051	2115,3	63459
43	6976,4	2092,92	62787,6	7037	2111,1	63333	7037,5	2111,25	63337,5	7037,6	2111,28	63338,4
44	6963,9	2089,17	62675,1	7028,2	2108,46	63253,8	7028,8	2108,64	63259,2	7028,8	2108,64	63259,2
45	6956,3	2086,89	62606,7	7024,3	2107,29	63218,7	7025	2107,5	63225	7025	2107,5	63225


**Figura 18:** Modelo con incorporación del momento de roce correspondiente a intervalo 40-45 grados (Fuente: Elaboración propia)

**Tabla 9:** Resumen final de fuerzas restauradora con presencia de roce y sin roce (Fuente: Elaboración propia)

GIRO [°]	DESPLAZAMIENTO [mm]	Fs ansys [N] $\mu=0$	Fs ansys [N] $\mu=0,3$	Fs paper [N] $\mu=0$	Fs paper [N] $\mu=0,3$
0	0	0	0	0,000	179,488
1	7	69,54	257,1	17,238	196,710
2	14	144,53	332,08	34,549	213,961
3	21	219,82	407,35	52,007	231,313
4	28	295,4	482,87	69,683	248,839
5	35	371,48	558,86	87,653	266,614
16	110	380,58	562,73	325,199	499,116
17	117	462,95	644,55	352,255	525,457
18	124	546,23	727,24	380,517	552,963
19	130	630,34	810,76	410,054	581,703
20	137	715,48	895,3	440,930	611,741
31	206	915,58	1084,3	886,759	1045,856
32	212	1015,7	1183,7	938,466	1096,288
33	218	1117,4	1284,6	992,271	1148,785
34	224	1220,3	1386,8	1048,226	1203,401
35	229	1324,8	1490,6	1106,379	1260,184
41	262	1532,3	1691,4	1503,982	1648,972
42	268	1651,3	1810	1578,756	1836,393
43	273	1772,2	1930,6	1656,063	1988,202
44	278	1894,9	2053,2	1735,936	2113,757
45	283	2019,5	2177,7	1818,411	2223,449

#### 7.4 Confección de la curva histerética

En cuanto a los datos que se tienen al presentarse por tramos, se utiliza la ecuación 3, de interpolación lineal, para poder completar los intervalos en los cuales no tenemos información, una vez realizado tal proceso se construye una tabla para resumir la información.

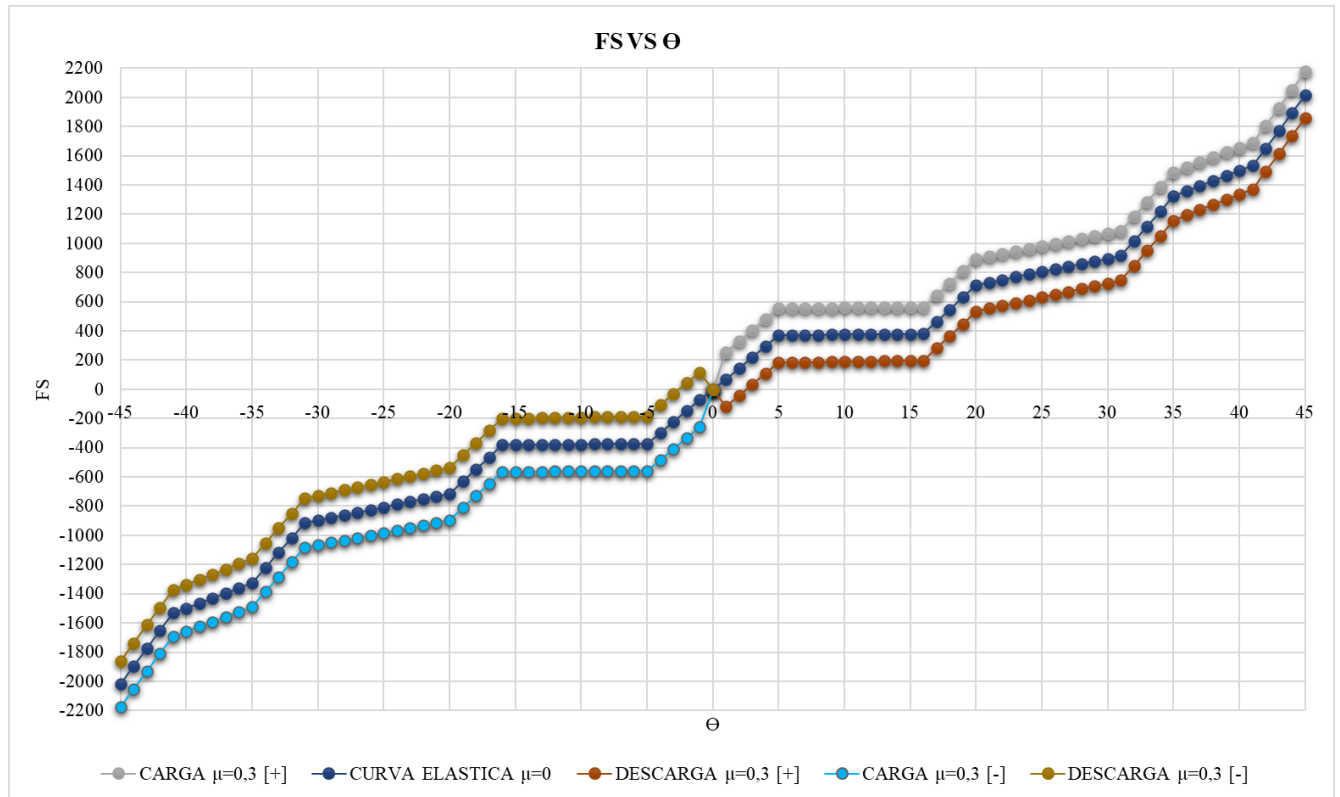
$$Y = Y_0 + \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} (X - X_0) \quad (3)$$

Como se puede ver en la tabla 10, las celdas que se encuentran rellenas de color corresponden a los datos obtenidos por interpolación.

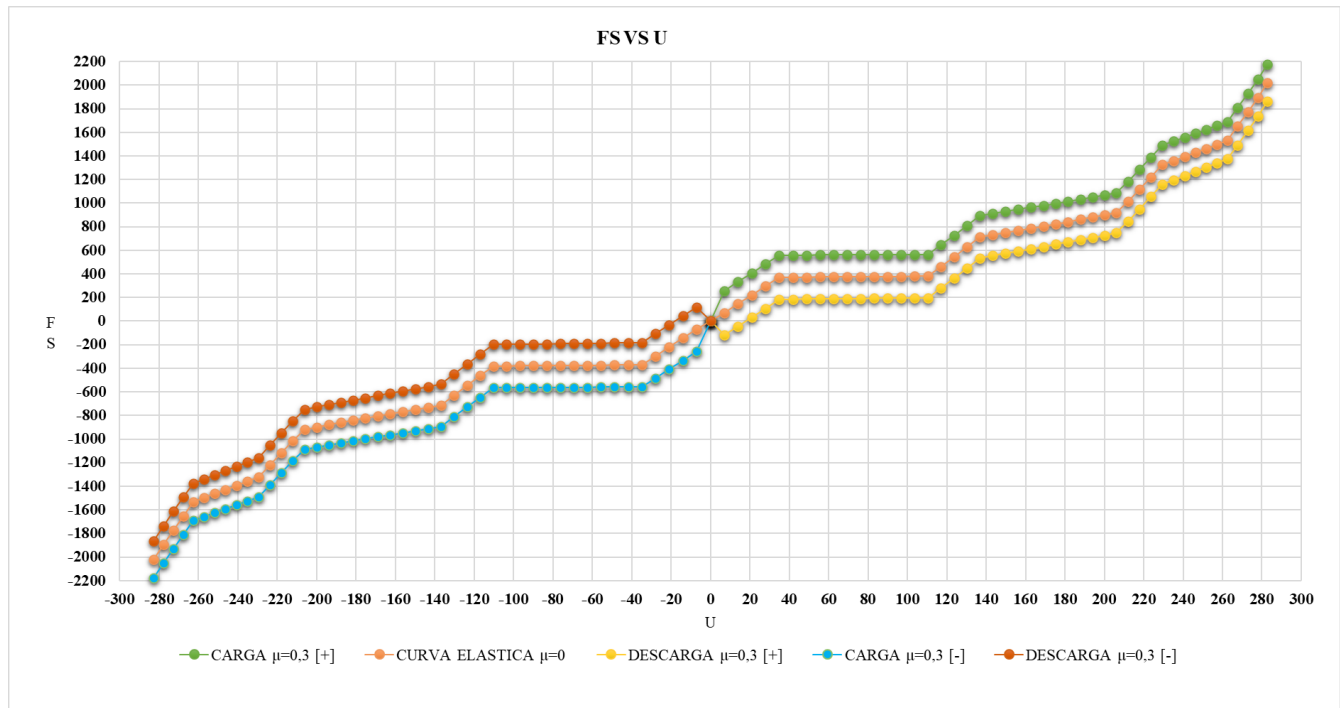
**Tabla 10.** Ciclo completo de las fuerzas restauradoras del aislador (Fuente: Elaboración propia)

GIRO [°]	DESPLAZAMIENTO [mm]	Fs paper [N] $\mu=0$	Fs paper [N] $\mu=0,3$	Fs ansys [N] $\mu=0$	Fs ansys [N] $\mu=0,3$
0	0	0	179,488128	0	0
1	6,980962575	17,2379127	196,7103475	69,54	257,1
2	13,95979868	34,54903682	213,9608276	144,53	332,08
3	20,9343825	52,00653805	231,3127917	219,82	407,35
4	27,9025895	69,68349058	248,8393942	295,4	482,87
5	34,8622971	87,65283148	266,6136752	371,48	558,86
6	41,81138531	105,987315	284,7085149	372,3072727	559,2118182
7	48,74773736	124,7594671	303,1965877	373,1345455	559,5636364
8	55,66924038	144,04154	322,1503178	373,9618182	559,9154545
9	62,57378602	163,9054668	341,6418331	374,7890909	560,2672727
10	69,45927107	184,4228165	361,7429212	375,6163636	560,6190909
11	76,32359815	205,6647488	382,524984	376,4436364	560,9709091
12	83,16467633	227,7019694	404,0589935	377,2709091	561,3227273
13	89,98042174	250,6046853	426,4154474	378,0981818	561,6745455
14	96,76875824	274,4425608	449,664325	378,9254545	562,0263636
15	103,527618	299,2846728	473,8750433	379,7527273	562,3781818
16	110,2549423	325,1994675	499,1164135	380,58	562,73
17	116,9486819	352,2547163	525,4565976	462,95	644,55
18	123,6067977	380,5174731	552,9630652	546,23	727,24
19	130,2272618	410,0540311	581,702551	630,34	810,76
20	136,8080573	440,9298802	611,741012	715,48	895,3
21	143,3471798	473,2096648	643,1435854	733,6709091	912,4818182
22	149,8426374	506,9571422	675,9745465	751,8618182	929,6636364
23	156,2924514	542,235141	710,2972675	770,0527273	946,8454545
24	162,6946572	579,1055201	746,1741757	788,2436364	964,0272727
25	169,0473047	617,6291284	783,6667126	806,4345455	981,2090909
26	175,3484587	657,8657645	822,8352936	824,6254545	998,3909091
27	181,5961999	699,8741372	863,7392673	842,8163636	1015,572727
28	187,7886251	743,7118265	906,4368756	861,0072727	1032,754545
29	193,9238481	789,435245	950,9852142	879,1981818	1049,936364
30	200	837,0995999	997,440193	897,3890909	1067,118182
31	206,01523	886,7588555	1045,856498	915,58	1084,3
32	211,9677057	938,4656964	1096,28755	1015,7	1183,7
33	217,855614	992,271491	1148,785473	1117,4	1284,6
34	223,6771614	1048,226256	1203,401047	1220,3	1386,8
35	229,4305745	1106,378622	1260,183678	1324,8	1490,6
36	235,1141009	1166,775797	1319,18136	1359,383333	1524,066667
37	240,7260093	1229,463535	1380,440636	1393,966667	1557,533333
38	246,2645901	1294,486103	1444,006562	1428,55	1591
39	251,7281564	1361,886245	1509,922674	1463,133333	1624,466667
40	257,1150439	1431,705156	1578,230953	1497,716667	1657,933333
41	262,4236116	1503,982445	1648,971785	1532,3	1691,4
42	267,6522425	1578,75611	1836,392639	1651,3	1810
43	272,799344	1656,062506	1988,201893	1772,2	1930,6
44	277,8633482	1735,936314	2113,756704	1894,9	2053,2
45	282,8427125	1818,41052	2223,448733	2019,5	2177,7

Una vez obtenidos los datos presentes en la tabla 10, se puede confeccionar la curva histerética, la cual contempla los rangos elásticos e inelásticos del aislador (con y sin roce). La figura 19 y 20 corresponden a gráficos análogos que representan el ciclo de histéresis del aislador, uno referido a la variación angular y el otro correlativo a los desplazamientos producto de dichas variaciones. Estas figuras contemplan ciclo de carga y descarga en ambos sentidos, dicho de otro modo, desplazamientos en sentido positivo y negativos del eje X.



**Figura 19:** Curva histerética de ciclo completo referida a variación angular (Fuente: Elaboración propia)

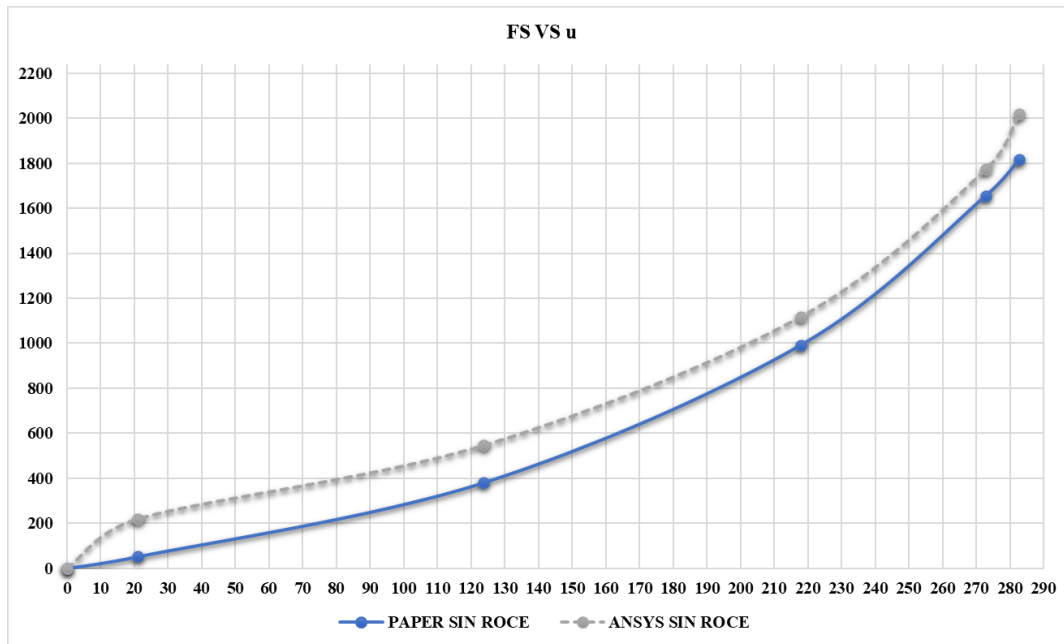


**Figura 20:** Curva histerética de ciclo completo referida a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

Una vez realizada la confección de las curvas anteriores, se realiza la comparación con los datos proporcionados por el PAPER, para posteriormente, ser graficados y comparados con los resultados de la modelación en ANSYS. Las figuras que se presentan a continuación se construyen a partir de la tabla 10.

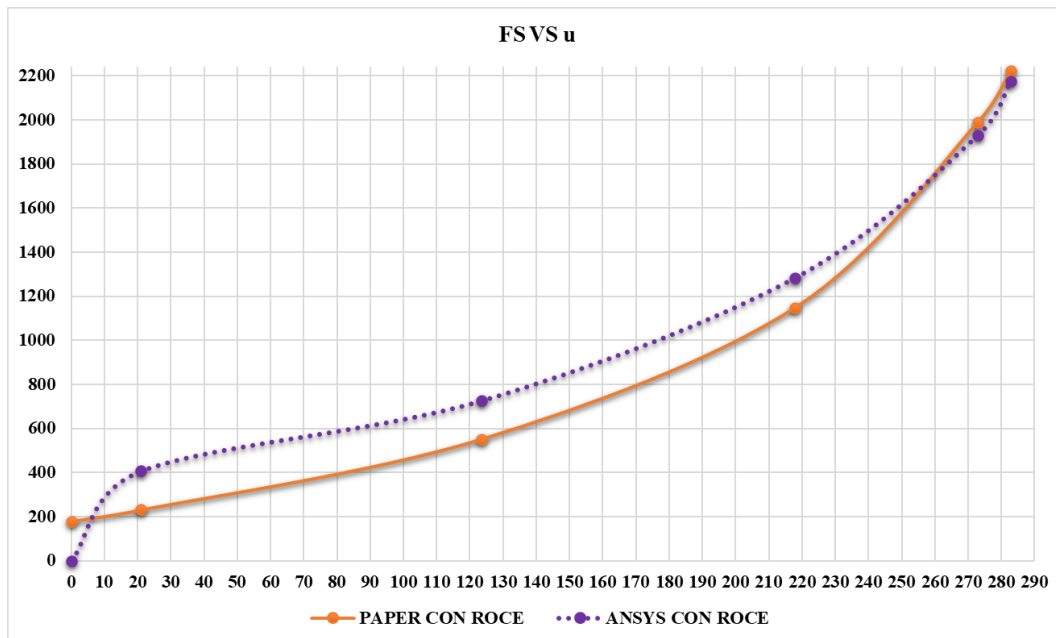
Cabe destacar que las figuras 21 y 22 son representadas por puntos iniciales, medios y finales, para que se vean curvas más limpias presentándose una interpolación de dichos valores para obtener curvas más suavizadas.

Como se puede ver en la figura 21, ambas curvas están en ausencia de roce ( $\mu=0$ ). Cabe destacar que ambas curvas están replicando un ciclo de carga, dicho de otra forma, cuando los desplazamientos van en sentido positivo del eje X, llegando así a su máximo desplazamiento. La línea segmentada corresponde a la curva sin roce obtenida y construida con los valores proporcionados por ANSYS. La línea continua corresponde a la curva sin roce que nos proporcionan los valores del PAPER.



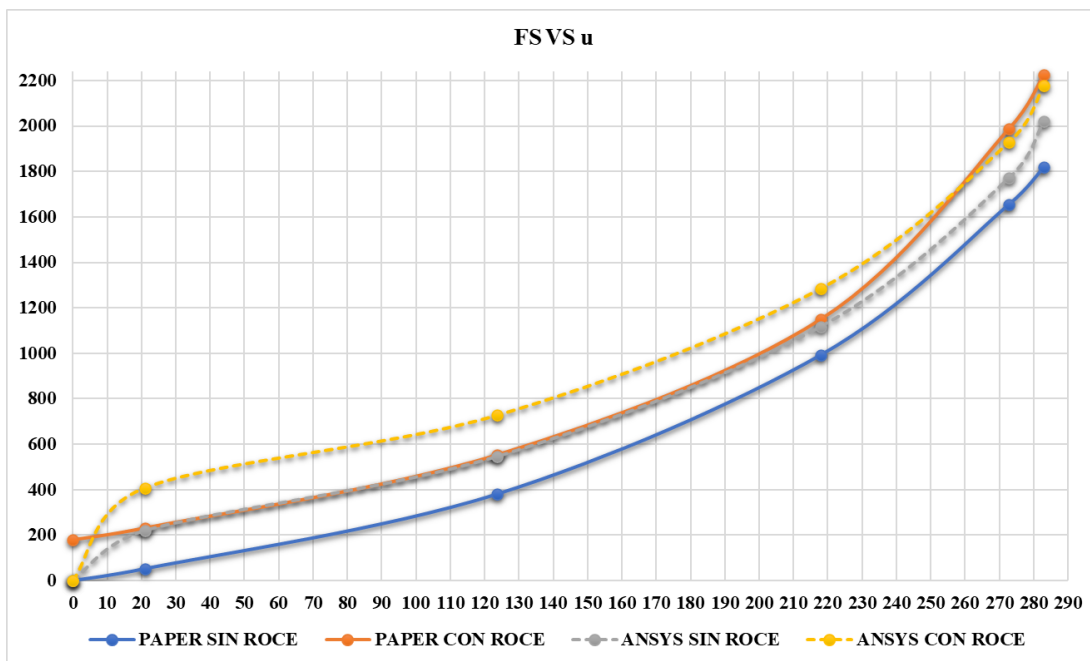
**Figura 21:** Curvas sin roce PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” y ANSYS referidas a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede ver en la figura 22, ambas curvas se sitúan en el caso donde incorporamos la presencia de roce ( $\mu=0,3$ ). Cabe destacar que ambas curvas están replicando un ciclo de carga, por otra parte, cuando el roce presente en el dispositivo resulta ser igual a 0,3 (coeficiente de roce entre metales de acero tipo A-36). La línea segmentada corresponde a la curva con roce con los valores proporcionados por ANSYS. La línea continua corresponde a la curva con roce que nos proporcionan los valores del PAPER.



**Figura 22:** Curvas con roce PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” y ANSYS referidas a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, como se puede apreciar en la figura 23, se presentan las curvas que contemplan con y sin roce, cuando los coeficientes de roce presentes en el dispositivo son 0 y 0,3. La línea segmentada corresponde a las curvas sin roce y con roce obtenidas y construida con los valores proporcionados por ANSYS. La línea continua corresponde las curvas sin roce y con roce que nos proporcionan los valores y resultados del PAPER.



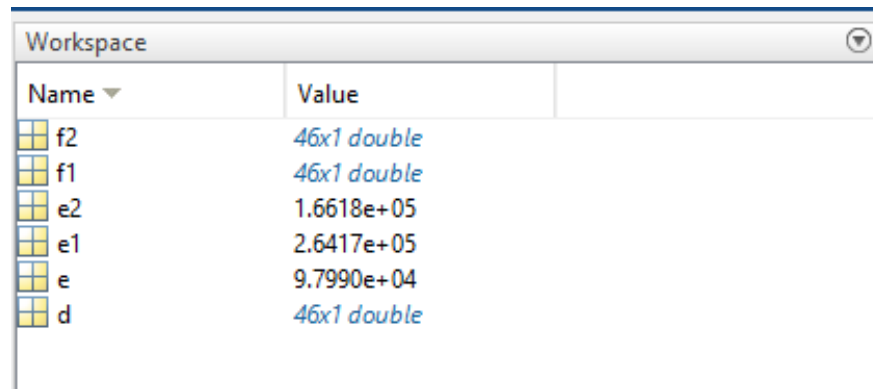
**Figura 23:** Curvas con/sin roce PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” y ANSYS referidas a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la figura 20, es posible representar la curva de histéresis, mediante simulaciones, sin embargo, es posible ahondar en dicha gráfica, para poder establecer cuanta energía está disipando el aislador sísmico. Para ello es necesario realizar otro post proceso con la información que se tiene mediante los apartados anteriores, en la tabla 11 se presentan los parámetros correspondientes a un ciclo de carga y descarga correspondiente a la figura 20. No obstante, matemáticamente el concepto de energía, corresponde a el área bajo las curvas inelásticas de carga y descarga.

Para poder calcular cuanta energía disipa el aislador, se utiliza MATLAB, ingresando una serie de vectores (tabla 11) correspondientes a; desplazamientos y fuerzas restauradoras, en ciclos de carga y descarga. Para calcular el área bajo las curvas se utilizó el comando TRAPZ. Mediante dicho comando obtenemos como resultado 2 áreas bajo curvas, las que corresponden a ciclo de carga y descarga, estas se deben restar para poder obtener la energía total en un tramo, finalmente la diferencia entre esas 2 energías se debe multiplicar por 2 puesto que el aislador tiene un rango de desplazamiento en 2 sentidos (positivo y negativo), explicado lo anterior, las figuras 24 y 25, muestra el proceso realizado.

**Tabla 11:** Parámetros de ANSYS ingresados en MATLAB como vectores (Fuente: Elaboración propia)

DESPLAZAMIENTO [mm]	FS Carga [N]	FS Descarga [N]	DESPLAZAMIENTO [mm]	FS Carga [N]	FS Descarga [N]
0,000	0,000	-118,020	156,292	946,845	593,260
6,981	257,100	-43,020	162,695	964,027	612,460
13,960	332,080	0,000	169,047	981,209	631,660
20,934	407,350	32,290	175,348	998,391	650,860
27,903	482,870	107,930	181,596	1015,573	670,060
34,862	558,860	184,100	187,789	1032,755	689,260
41,811	559,212	185,403	193,924	1049,936	708,460
48,748	559,564	186,705	200,000	1067,118	727,660
55,669	559,915	188,008	206,015	1084,300	746,860
62,574	560,267	189,311	211,968	1183,700	847,700
69,459	560,619	190,614	217,856	1284,600	950,200
76,324	560,971	191,916	223,677	1386,800	1053,800
83,165	561,323	193,219	229,431	1490,600	1159,000
89,980	561,675	194,522	235,114	1524,067	1194,700
96,769	562,026	195,825	240,726	1557,533	1230,400
103,528	562,378	197,127	246,265	1591,000	1266,100
110,255	562,730	198,430	251,728	1624,467	1301,800
116,949	644,550	281,350	257,115	1657,933	1337,500
123,607	727,240	365,220	262,424	1691,400	1373,200
130,227	810,760	449,920	267,652	1810,000	1492,600
136,808	895,300	535,660	272,799	1930,600	1613,800
143,347	912,482	554,860	277,863	2053,200	1736,600
149,843	929,664	574,060	282,843	2177,700	1861,300



Name	Value
f2	46x1 double
f1	46x1 double
e2	1.6618e+05
e1	2.6417e+05
e	9.7990e+04
d	46x1 double

**Figura 24.** Parámetros definidos como vectores en MATLAB (Fuente: Elaboración propia)

```

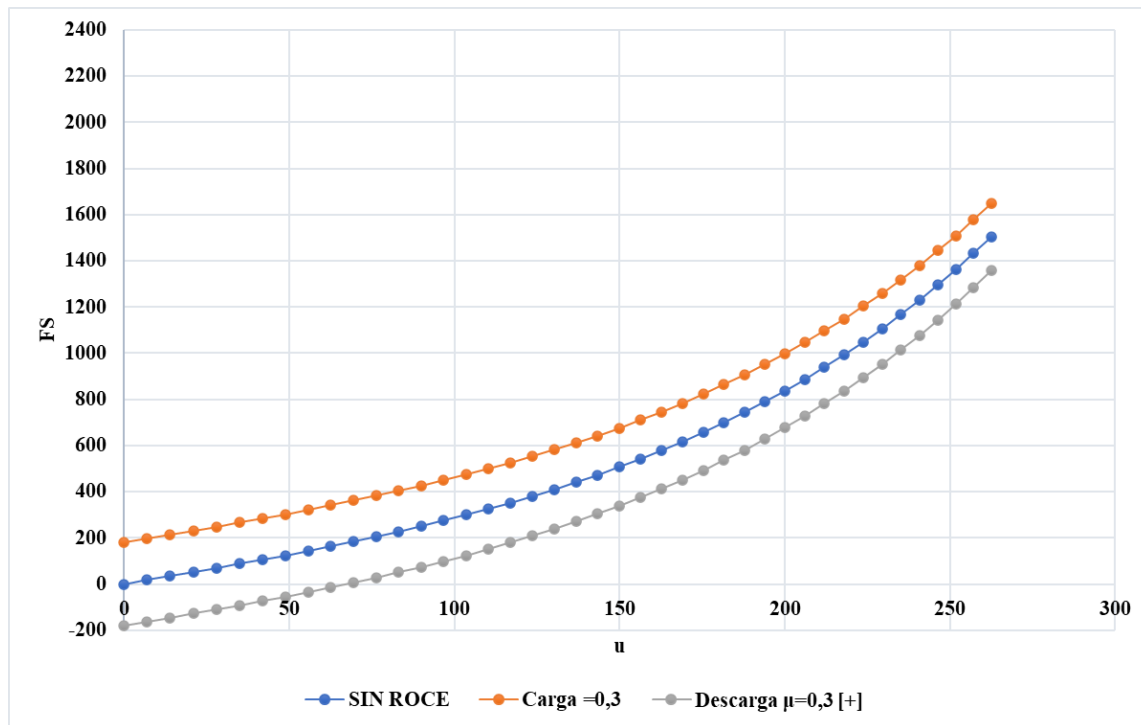
***** grafica curvas inelasticas ciclos de carga y descarga*****
plot(d,f1,'r+',d,f2,'b-')

***** area bajo las curvas, calculo de energia disipada*****

e1=trapz(d,f1);
e2=trapz(d,f2);
e=e1-e2;
    
```

**Figura 25.** Aplicación del comando TRAPZ en MATLAB (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en las Figuras 24 y 26, la energía obtenida en el ciclo de carga resulta ser 264670 N\*mm. La energía obtenida en el ciclo de descarga resulta ser 166180 N/mm, ahora bien, la diferencia entre el ciclo de carga y descarga corresponde a la energía disipada en un solo sentido (0 a 45 grados), esta resulta ser 97990 N\*mm. Se considera que el sistema es simétrico, así obtendremos el rango completo del aislador (-45 a 45 grados). Para obtener la energía total disipada por el aislador basta con multiplicar por 2 lo obtenido un solo sentido (0 a 45 grados), la cual resulta ser 195.980 N\*mm.

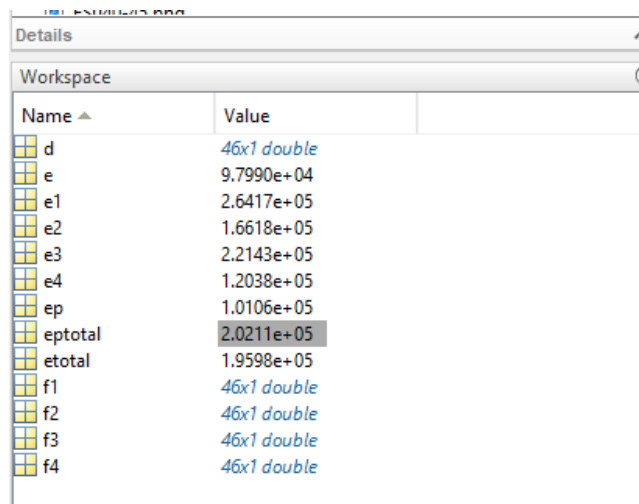


**Figura 26:** Curvas con/sin roce del PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” referidas a desplazamientos (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la figura 26, es posible construir la curva de histéresis con los parámetros obtenidos a partir del PAPER. Repitiendo el post proceso ya realizado con la información de las simulaciones mediante ANSYS, pero esta vez utilizando los parámetros del PAPER, se pueden ingresar como vectores en Matlab para obtener la energía que disipa el dispositivo, con la información presente en la tabla 12.

**Tabla 12:** Parámetros del PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” ingresados en MATLAB como vectores (Fuente: Elaboración propia)

DESPLAZAMIENTO [mm]	FS Carga [N]	FS Descarga [N]	DESPLAZAMIENTO [mm]	FS Carga [N]	FS Descarga [N]
0,000	179,488128	-179,488128	156,292	710,297268	374,1730144
6,981	196,710348	-162,2345221	162,695	746,174176	412,0368645
13,960	213,960828	-144,862754	169,047	783,666713	451,5915442
20,934	231,312792	-127,2997156	175,348	822,835294	492,8962353
27,903	248,839394	-109,472413	181,596	863,739267	536,009007
34,862	266,613675	-91,30801227	187,789	906,436876	580,9867774
41,811	284,708515	-72,73388486	193,924	950,985214	627,8852759
48,748	303,196588	-53,67765351	200,000	997,440193	676,7590069
55,669	322,150318	-34,06723776	206,015	1045,8565	727,6612135
62,574	341,641833	-13,83089946	211,968	1096,28755	780,6438424
69,459	361,742921	7,10271183	217,856	1148,78547	835,7575093
76,324	382,524984	28,80451357	223,677	1203,40105	893,0514656
83,165	404,058994	51,3449452	229,431	1260,18368	952,5735652
89,980	426,415447	74,79392323	235,114	1319,18136	1014,370233
96,769	449,664325	99,22079661	240,726	1380,44064	1078,486435
103,528	473,875043	124,6943024	246,265	1444,00656	1144,965644
110,255	499,116414	151,2825214	251,728	1509,92267	1213,849816
116,949	525,456598	179,052835	257,115	1578,23095	1285,179359
123,607	552,963065	208,0718811	262,424	1648,97179	1358,993105
130,227	581,702551	238,4055112	267,652	1836,39264	1321,119582
136,808	611,741012	270,1187484	272,799	1988,20189	1323,923118
143,347	643,143585	303,2757442	277,863	2113,7567	1358,115925
149,843	675,974547	337,9397379	282,843	2223,44873	1413,372307


**Figura 27:** Parámetros del PAPER “A roller type base isolation device with tensile strength. Engineering Structures” ingresados como vectores (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Figura 27, las fuerzas restauradoras correspondientes al PAPER están ingresadas en MATLAB como f3 y f4, reutilizando el mismo desplazamiento, planteado como d, se puede calcular la energía que disipa el aislador para este escenario, utilizando nuevamente el comando TRAPZ.

```
##### area bajo las curvas, calculo de energia disipada#####  
  
- e3=trapz(d,f3);  
- e4=trapz(d,f4);  
- ep=e3-e4;  
  
- eptotal=2*ep
```

**Figura 28.** Aplicación del comando TRAPZ en MATLAB (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 28, representa el cálculo que efectúa el software MATLAB para obtener la energía que se disipa,  $e3$  y  $e4$ , corresponden a las curvas naranja y gris presentes en la figura 26. En consiguiente se asume, la diferencia entre el ciclo de carga y descarga, lo que corresponde a la energía disipada en un solo sentido (0 a 45 grados), para considerar el desplazamiento completo se multiplica por 2, así obtendremos la energía total, correspondientes a  $e_{total}$ .

La energía total que disipa el aislador contemplando los parámetros del PAPER corresponde a 202110 N\*mm. Asumiendo como valor real la energía obtenida del PAPER y los valores de la simulación de ANSYS como valor de energía estimada.

$$\varepsilon = |X - xi| \quad (3)$$

$$\varepsilon\% = \frac{|X-xi|}{X} \quad (4)$$

La diferencia entre la energía disipada mediante PAPER y ANSYS resulta ser de 6130 N\*mm. Por otra parte, utilizando la (ec.4) se puede calcular el error absoluto resultando ser 6130 y en consiguiente aplicando la (ec.5) se puede obtener el error relativo o porcentual el cual corresponde a un 3,03%. Dicha cifra se ver afectada según la cantidad de decimales exactos que se quieran ingresar en ANSYS, específicamente en cada parámetro y/o condición de borde.

## 8. PROBLEMAS DE MODELACIÓN

El modelo bajo consideraciones geométricas reales, al ser simulado, dicho modelo presenta una complejidad numérica, específicamente en los grados de libertad que se definen al ser simulado, es por ello que los modelos realizados en esta investigación contemplan simplificaciones, para poder disminuir los grados de libertad de aquellos elementos que no aporten en gran detalle al cálculo numérico. Prueba de ello, es que se suprimieron perforaciones, no se consideraron las uniones soldadas, no se consideró el resorte interno del dispositivo ni el cable que funciona como sistema autocentrante.

Durante el proceso de investigación, para efectuar el modelo final fue necesario, indagar en guías de ANSYS, para poder evitar problemas de estabilidad del sistema. Fue necesario además estudiar acerca de los métodos matemáticos que utiliza el software, ante la complejidad de poder generar un buen mallado.

Para futuras modelaciones, sería interesante considerar realizar simulaciones, que contemplen el sistema de collarín, si bien en un momento en esta investigación se realizaron modelos que consideran dicho aparato, se nos generó un bloqueo numérico puesto que no se podía leer el efecto de roce que se deseaba. Sería un caso de gran interés, ahondar en lo que respecta a los contactos de tipo *FRictionAL*, específicamente en la opción de *DEFINITION*, en el apartado *BEHAVIOR*, en dicho apartado se puede definir el comportamiento de los contactos y la cantidad de penetración que puede haber entre mallas.

## 9. CONCLUSIONES

La modelación del aislador sísmico nos permite realizar la comparación entre una simulación en ANSYS y un modelo semi analítico (PAPER), para poder analizar el comportamiento de un aislador sísmico, en consecuencia y gracias a las curvas de histéresis construida en esta investigación se puede deducir que el sistema efectivamente disipa energía, cuando se le imponen desplazamientos laterales. Se confirma ante ello, que los valores obtenidos en ANSYS son muy similares a los obtenidos por el modelo semi analítico.

Con las condiciones de borde aplicadas al modelo, se pueden obtener resultados particulares, como las tensiones, deformaciones máximas y mínimas, entre otras opciones correspondientes a las físicas de un problema. Las ventajas que nos proporciona el campo de la simulación, particularmente en ANSYS es que nos permite analizar a nivel macro y micro todos sus elementos, según sea necesario.

Este es un campo, correspondiente a la simulación en ANSYS presenta una ventaja con respecto a su homólogo el modelo semi analítico, ya que el modelo semi analítico solo trabaja con fuerzas y ANSYS con; fuerzas, desplazamientos, etc.

Cabe destacar que, considerar configuraciones y condiciones de borde más exactas o detalladas en nuestro modelo del aislador sísmico, nos permitirán en un futuro obtener escenarios más óptimos al momento de llevar a cabo simulaciones en ANSYS. No obstante, se debe tener en cuenta que, en las modelaciones numéricas, a mayor grado de detalle, mayor será el gasto computacional.

Por último, si bien, el campo de simulaciones en ANSYS conlleva un grado de exactitud en lo que se quiere modelar, no se puede afirmar con certeza que los resultados que se van a obtener sean los reales, debido a que es necesario implementar en forma adecuada los diferentes mecanismos de deformación presentes, los diferentes efectos de fricción en los componentes, las relaciones de compatibilidad geométrica, etc. es por ello que siempre va haber un grado de error entre lo que existe y lo que se está modelando.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- ACEROS CREA. (2013). *ACEROS CREA*. Obtenido de <https://vigaipr.com/blog/norma-astm/#:~:text=La%20reglamentación%20ASTM%20es%20la,perfiles%20comerciales%2C%20placas%20y%20láminas>
- ANSYS. (11 de Marzo de 2022). *ansys*. Recuperado el 11 de Marzo de 2022, de <http://www.ansyshelp.com>
- ANSYS FORUM. (s.f.). Obtenido de <https://forum.ansys.com/forums/topic/is-there-a-difference-between-displacement-and-remote-displacement-for-workbench-2021-r1/>
- ANSYS USER MEETING. (2013). Contact Analysis.
- ANSYS, Inc. (2009). Contact Technology Guide.
- ANSYS, Inc. (2010). ANSYS Meshing user's guide.
- Bo-Wun Huang, Jao-Hwa Kuang, Jung-Ge Tseng, Jyun-Cin Wang, Yu-Xian Qiu. (2015). Seismic Analysis of a Viscoelastic Damping Isolator.
- Cámara chilena de la construcción. (2011). Protección Sísmica de Estructuras, Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía.
- Compañía general de aceros. (2020). *Acero grado estructural A36*. Obtenido de [https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha\\_Técnica\\_Aceros\\_Grado\\_Estructural\\_A36.pdf](https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha_Técnica_Aceros_Grado_Estructural_A36.pdf)
- DS61 REGLAMENTO QUE FIJA EL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS. (2011).
- Gisbert, J., Bru, D., González, A., . . . S. (2018). "*Masonry micromodels using high order 3D elements*". Universidad de Alicante, España.
- Gobierno de Chile. (s.f.). *Definición de sismo*. Obtenido de <https://www.onemi.gov.cl/terremoto/>
- Gokhan Ozdemir and Ugurhan Akyuz. (2012). Dynamic analyses of isolated structures under.
- Grasp Engineering. (s.f.). *FRINCTIONLESS SUPPORT*. Obtenido de [https://www-graspengineering-com.translate.google.com/what-is-frictionless-support/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-graspengineering-com.translate.google.com/what-is-frictionless-support/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc)
- N. Maureira-Carsalade, E. Pardo, C. Oyarzo-Vera, A. Roco. (2020). A roller type base isolation device with tensile strength. *Engineering Structures* volume 221.
- NCh 433 of 96 Mod. (2009).
- Sanjeev Kumar K.S. (2014). Comparison of Two Similar Buildings with and without Base Isolation.
- Sistemas modernos de protección sísmica: Aisladores sísmicos. (2017). Obtenido de [https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia\\_cip-ancash\\_2017](https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia_cip-ancash_2017)
- V.A. Bazhenov, Yu.D. Heraimovych. (2020). GENERAL CLASSIFICATION OF SEISMIC PROTECTION SYSTEMS OF BUILDINGS AND STRUCTURES.