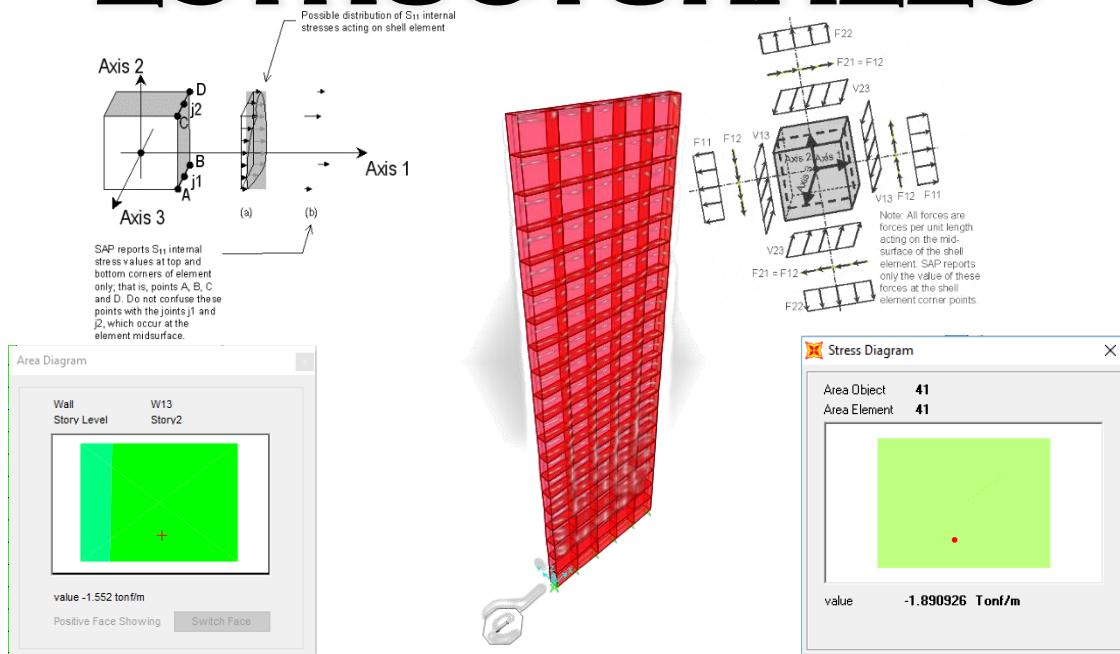


CÁLCULO DE FUERZAS

[SHELL ELEMENTS]

MUROS

ESTRUCTURALES



SAP2000 & ETABS

CEINTPERU®

“Un software es una excelente herramienta cuando se le sabe dar un uso adecuado”

Alex Henry Palomino Encinas

Cajamarca – Perú

DESCRIPCIÓN

Esta publicación tiene por objetivo ilustrar a la comunidad ingenieril una manera de trabajar los resultados obtenidos de ambos programas comerciales de CSI, SAP2000 & ETABS, en muros estructurales modelados mediante la utilización del Elemento Shell; ambos disponibles en los dos softwares con los que se pretende realizar esta demostración, trabajados mediante discretización externa.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se inicia esta investigación del cálculo de fuerzas en muros estructurales con el planteamiento de que cuando se modela un muro en un programa como ETABS o SAP2000, ambos trabajan a través de un elemento tipo superficie, denominado Elemento Shell (Shell Element).

Todos productos de CSI, Computer and Structures, trabajan mediante el Método de Elementos Finitos, MEF, originalmente introducido por Turner en 1956, que es una técnica computacional para soluciones aproximadas de una variedad de problemas de ingeniería del mundo real que tienen complejo dominio sujeto a condiciones generales de borde.

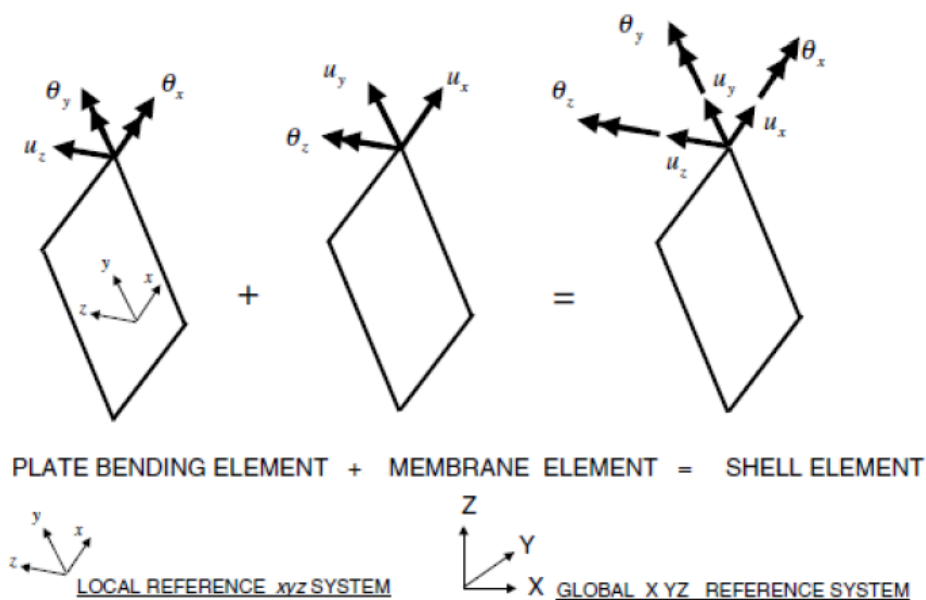


Figura 1. Formulación del Elemento Shell (Tomado de Wilson, 1995)

Acorde con el manual de usuario, el elemento Shell combina los comportamientos de Membrana y Placa que se describen a continuación:

A. ELEMENTO MEMBRANA (MEMBRANE)

- Comportamiento puro de membrana
- Soporta solamente fuerzas en su plano y momentos normales a su plano
- Solamente para material homogéneo

B. ELEMENTO PLACA (PLATE)

- Comportamiento puro de placa
- Soporta solamente momentos flectores y fuerzas transversales
- Permite formulación de Placa Delgada (Thin-Plate) o Gruesa (Thick-Plate)
- Su definición aplica a material homogéneo

En cuanto a la formulación del espesor:

1. PLACA DELGADA:

Tiene en cuenta solamente las deformaciones por flexión despreciando el efecto del esfuerzo cortante. Se consideran las hipótesis de Kirchhoff. Se establece que esta condición se da cuando $t/L \leq 0.05$.

2. PLACA GRUESA:

Tiene en cuenta las deformaciones por flexión y del esfuerzo cortante. Considera las hipótesis de Mindlin – Reissner. Esta condición se da cuando $0.10 \leq t/L \leq 0.25$.

En ambas condiciones, t , representa el espesor del elemento y, L , la longitud del elemento en dirección de la flexión.

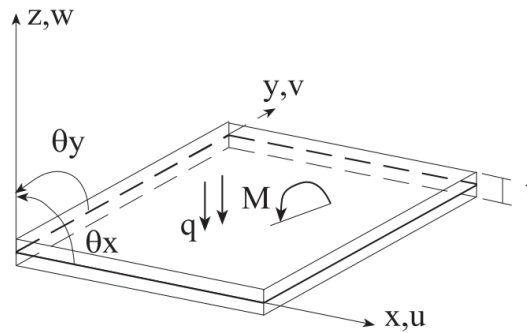


Figura 2. Elemento Placa sometido a Flexión.

De acuerdo con estas definiciones se busca calcular los componentes principales de fuerzas internas en muros desde los resultados obtenidos del análisis realizado en ambos softwares.

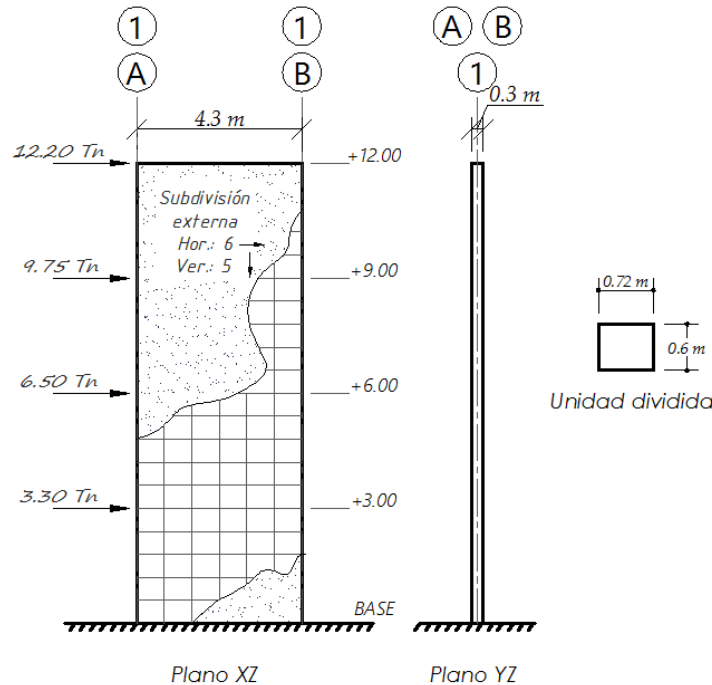


Figura 3. Vistas y discretización del muro en investigación.

2. EL MURO ESTRUCTURAL Y SU DEFINICIÓN EN SOFTWARE

Un muro estructural es un componente primario de la construcción destinado estrictamente a absorber un determinado porcentaje del cortante basal. Constituye una parte principal del sistema resistente a fuerza lateral ya que define el sistema estructural y por ende el nivel de ductilidad que debemos conseguir en concordancia con los distintos códigos de diseño de cada país.

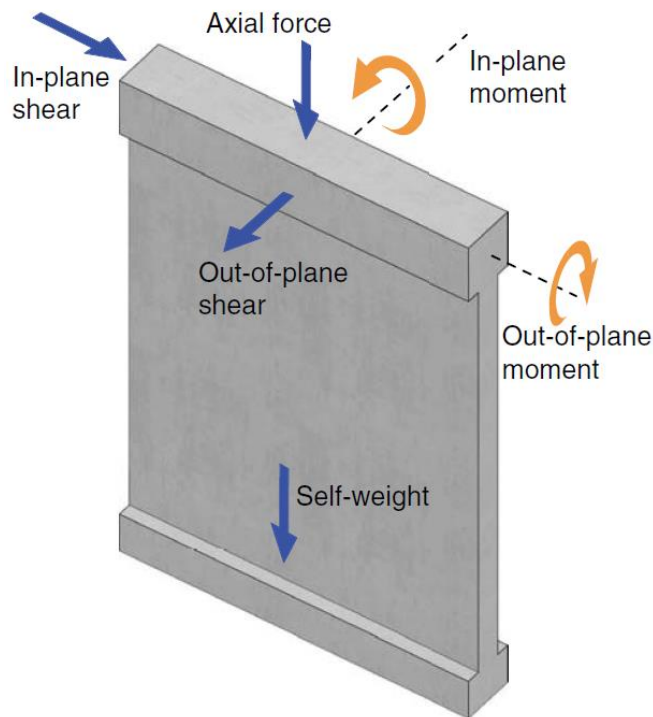


Figura 4. Fuerzas en un Muro Estructural.

Según el **ACI 318 2019**, un muro estructural se define como aquel elemento que resiste la combinación de fuerza axial, cortante y momento en su plano. Se dispone que Muro de Corte y Muro Estructural son sinónimos.

En nuestra **NTE E.060** encontramos las siguientes definiciones:

- **Muro Estructural:** Elemento estructural, generalmente vertical empleado para encerrar o separar ambientes, resistir cargas axiales de gravedad y resistir cargas perpendiculares a su plano proveniente de empujes laterales de suelos o líquidos.
- **Muro de Corte o Placa:** Muro estructural diseñado para resistir combinaciones de fuerzas cortantes, momentos y fuerzas axiales inducidas por cargas laterales.

En la **NTE E.070** de Albañilería encontramos una definición que combina de cierta manera las definiciones de la NTE E.060.

El **ASCE/SEI 7-16** define también un Muros Estructural como aquel que reúne las definiciones de Muro Portante o Muro de Corte que se describen a continuación:

- **Muro Portante (Bearing Wall)**

Cualquier muro que reúne las siguientes características:

1. Cualquier muro metálico o de madera que soporta más de 100 *lb/ft* de carga vertical en adición a su peso propio.
2. Cualquier muro de concreto o mampostería que soporta más de 200 *lb/ft* de carga vertical en adición a su peso propio.

- **Muro de Corte (Shear Wall)**

Muro portante o no portante diseñado para resistir fuerza lateral actuando en el plano del muro.

En **Muros de Concreto Armado**, a menos que se demuestre mediante análisis estructural, el espesor mínimo de un muro de concreto debe ser por lo menos los que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1*. Espesor mínimo de muros, h

Tipo de Muro	Espesor Mínimo, h	
Portante ⁽¹⁾	El mayor de:	10cm
		1/25 de la menor entre la altura y la longitud no apoyadas
No Portante	El mayor de:	10cm
		1/30 de la menor entre la altura y la longitud no apoyadas
Exteriores de Sótanos y Cimentaciones ⁽¹⁾	20cm	

⁽¹⁾ Aplicable a muros diseñados de acuerdo con el método de diseño simplificado de 11.5.3

* Extraído de la Tabla 11.3.1.1 del ACI 318 2019

Para un primer cálculo, podemos dimensionar el espesor, *h*, de un muro aplicando la ecuación 11.5.3.1 del ACI 318 2014.

$$P_n = 0.55f'_c A_g \left[1 - \left(\frac{k\ell_c}{32h} \right)^2 \right]$$

Donde, A_g , es el área de la sección rectangular del muro, ℓ_c , la longitud o altura del muro medido centro a centro entre sus apoyos, k , el factor de longitud efectiva obtenido de acuerdo con la Tabla 11.5.3.2 del ACI 318 2019.

Tabla 2*. Factor de longitud efectiva k para muros

Condiciones de Borde	k
Muros arriostrados en la parte superior e inferior contra desplazamiento lateral, y	
(a) Restringidos contra rotación en uno o ambos extremos (superior, inferior o ambos)	0.8
(b) No restringidos contra la rotación en ambos extremos	1.0
Muros no arriostrados contra desplazamiento lateral	2.0

* Extraído de la Tabla 11.5.3.2 del ACI 318 2019

En este estudio se somete al muro a fuerzas horizontales a su plano, por lo tanto, el cortante horizontal, V_n , que puede soportar un muro de concreto es igual a la sumatoria de la capacidad, V_c , que tiene el concreto del muro más el cortante, V_s , que absorbe el refuerzo horizontal en el muro, esto es:

$$V_n = \phi V_c + \phi V_s$$

Donde, V_c , es calculado dependiendo del nivel de detalle del refuerzo y V_s depende del espaciamiento, s , del refuerzo horizontal.

$$V_s = \frac{A_v}{s} f_{yt} d$$

Tabla 3*. Capacidad a cortante V_c para Muros de Concreto

Criterio	V_c		
$A_v \geq A_{v.min}$	Cualquiera de:	$\left[2\lambda \sqrt{f'_c + \frac{N_u}{6A_g}} \right] b_w d$	(a)
		$\left[8\lambda(\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c + \frac{N_u}{6A_g}} \right] b_w d$	(b)
$A_v < A_{v.min}$		$\left[8\lambda_s \lambda(\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c + \frac{N_u}{6A_g}} \right] b_w d$	(c)

Notas:

La carga axial, N_u , es positiva para compresión y negativa para Tracción

V_c no debe tomarse menor que cero

* Extraído de la Tabla 22.5.5.1 del ACI 318 2019

De la Tabla indicada, la sección 22.5.5.1.1 establece que

$$V_c \leq 5\lambda \sqrt{f'_c} b_w d$$

Además, la sección 22.5.5.1.2 del ACI 318 2019 indica lo siguiente

$$\frac{N_u}{6A_g} \leq 0.05 f'_c$$

Para propósitos de diseño, será una práctica común diseñar el refuerzo horizontal por cortante, igual a

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_{yt}d} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_{yt}d}$$

El factor de modificación de tamaño efectivo, λ_s , indicado en la sección 22.5.5.1.3 se establece como

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{d}{10}}} \leq 1$$

De acuerdo con la sección 22.5.1.2 del ACI 318 2019, el espesor de un muro para cortante fuera del plano debe seleccionarse de tal manera de cumplir con la siguiente ecuación:

$$V_u \leq \phi (V_c + 8\sqrt{f'_c}b_wd)$$

La sección 18.10.4.1 del ACI 318 2019 define la capacidad nominal a cortante en el plano del muro.

$$V_u \leq V_n$$

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_{yt})$$

Donde, α_c , varía de acuerdo con la Figura 5, y el resto de parámetros se indican en el vídeo adjunto a este material.

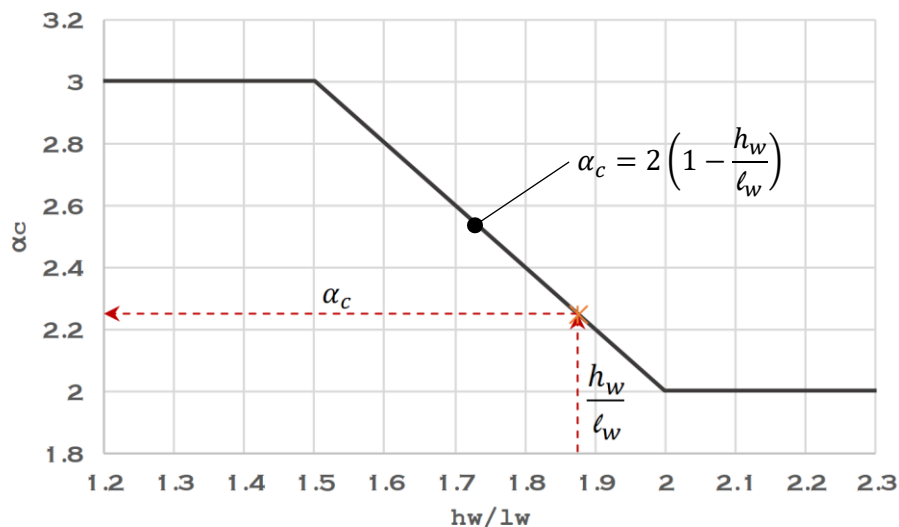


Figura 5. Límites y variación lineal de α_c .

Para muros sometidos a carga axial de tracción neta, el valor de, α_c , deberá calcularse de acuerdo como lo indica la sección 11.5.4.4

$$\alpha_c = 2 \left(1 + \frac{N_u}{500A_g} \right) \geq 0$$

Las fuerzas cortante de diseño, V_e , deberán calcularse de acuerdo con 18.10.3.1, así como se indica a continuación:

$$V_e = \Omega_v \omega_v V_u \leq 3V_u$$

Donde, Ω_v , es el factor de sobre resistencia en la sección crítica y, ω_v , es el factor para tener en cuenta la amplificación dinámica por cortante.

Tabla 4*. Factor de Sobre esfuerzo, Ω_v , en la sección crítica

Condición	Ω_v	
$\frac{h_{wcs}}{l_w} > 1.5$	Mayor que	$\frac{M_{pr} [1]}{M_u}$
		1.5 [2]
$\frac{h_{wcs}}{l_w} \leq 1.5$	1.0	

[1] Para las combinaciones de carga que producen grandes valores de Ω_v

[2] A menos que se demuestre mediante análisis detallado un valor menor, limitado a 1.0

* Extraído de la Tabla 18.10.3.1.2 del ACI 318 2019

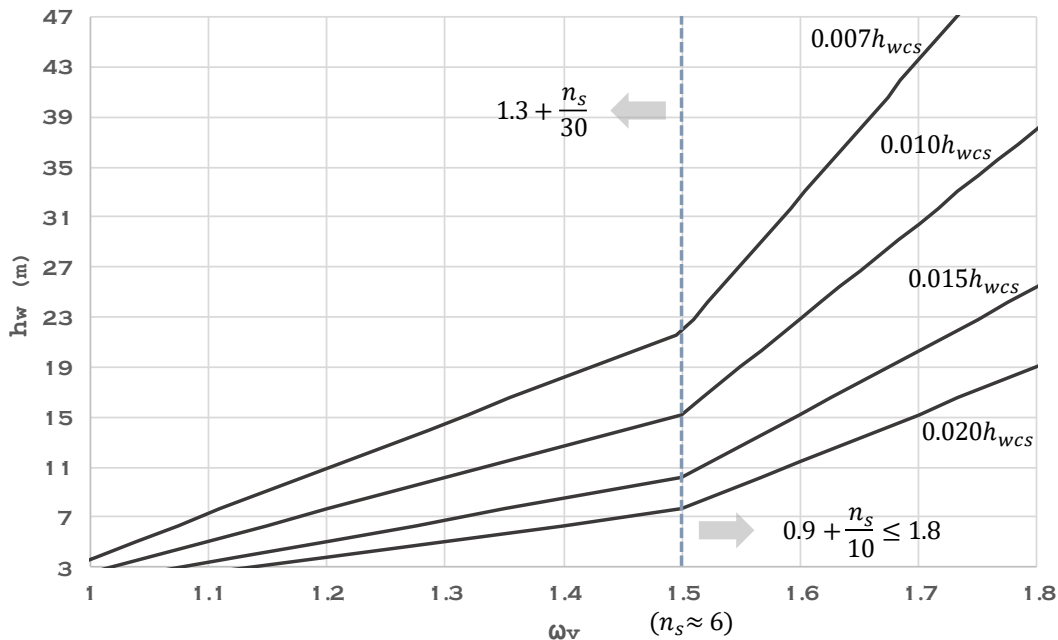


Figura 6. Valores de ω_v para diferentes valores de n_s .

De acuerdo con la sección 18.10.3.1.3 la Figura 6 muestra valores de ω_v para valores de $h_{wcs}/l_w \geq 2.0$. Para, $h_{wcs}/l_w < 2.0$ se debe considerar que, $\omega_v = 1.0$.

En cuanto a **Muros de Albañilería**, nuestra NTE E.070 en su Artículo 19.1 indica que el espesor efectivo, t , estará de acuerdo con el lugar donde se construirá la edificación. Esto es,

$$t \geq \begin{cases} \frac{h}{20}, & Z2 \text{ \& } Z3 \\ \frac{h}{25}, & Z1 \end{cases}$$

Donde, h , es la altura libre entre los elementos de arrioste horizontales o la altura efectiva de pandeo.

Además, se debe verificar que:

$$\sigma_m = \frac{P_m}{Lt} \leq 0.2f'_m \left[1 - \left(\frac{h}{35t} \right)^2 \right]$$

En **Muros o Placas de Acero Estructural**, conformando un sistema de muros de cortante especiales de placas, el espesor, t , se puede estimar mediante la fórmula:

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)}$$

En este estudio se realizará el análisis de un muro cualquiera, sin importar el material, ya que el objetivo es llegar a calcular las fuerzas internas de un muro sometido a las cargas indicadas en la Figura 3, por lo que no es necesario establecer el material.

Trabajando con SAP2000 y ETABS, la definición de muros se realiza siguiendo las rutas indicadas en las Figuras 6 y 7.

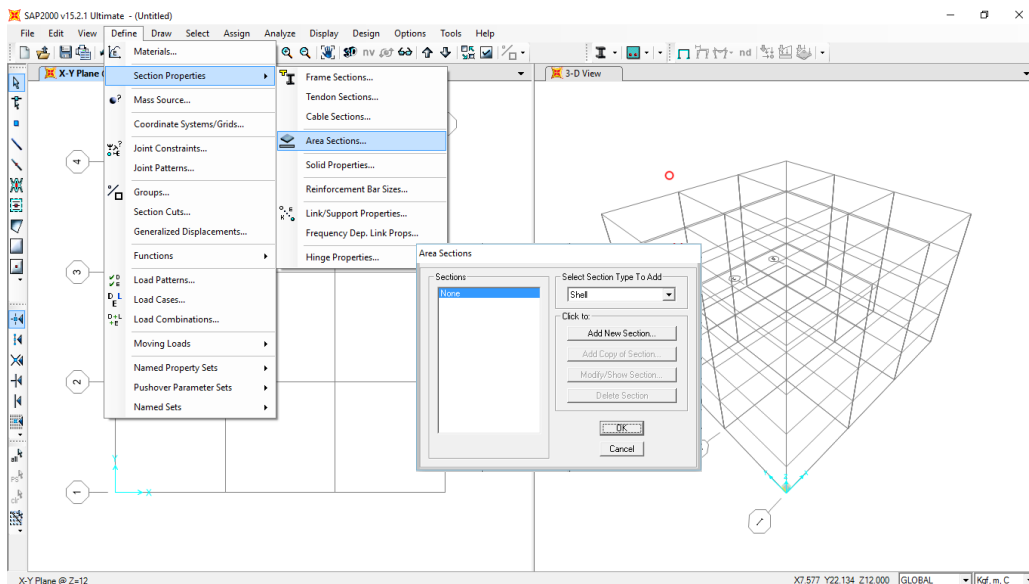


Figura 6. Ruta de acceso al comando de definición de secciones tipo área.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

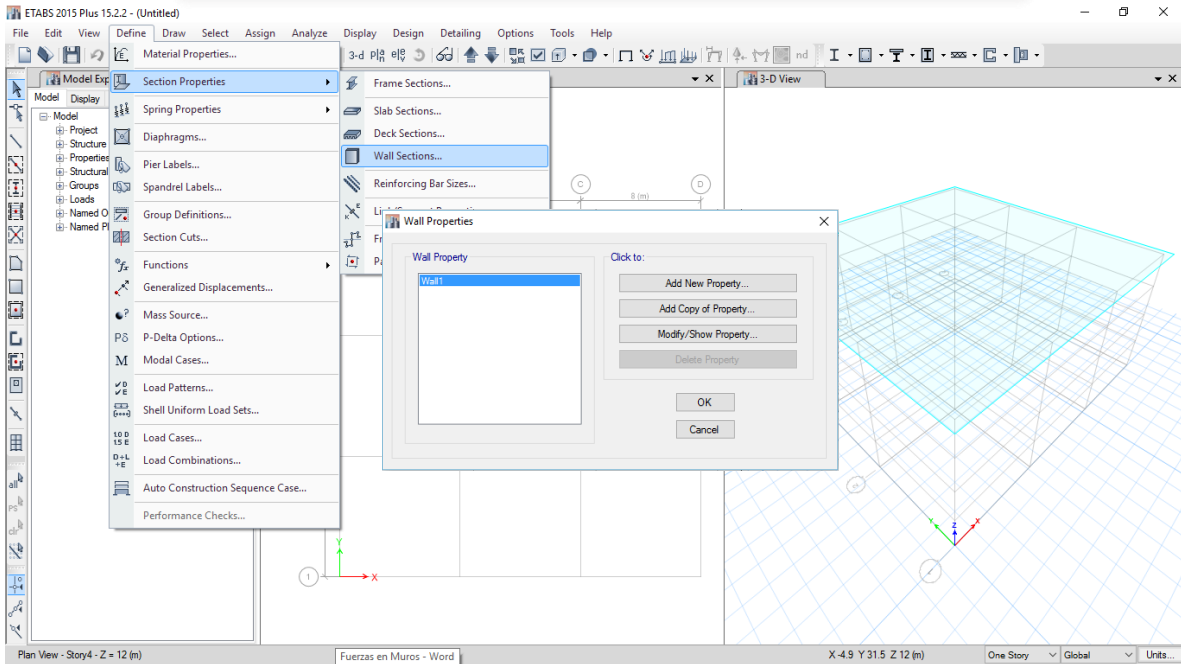


Figura 7. Ruta de acceso al comando de definición de Muros.

En SAP2000, mediante el botón  procedemos con agregar una nueva sección de Elemento Shell cuya configuración quedará de la manera como se muestra en la Figura 8.

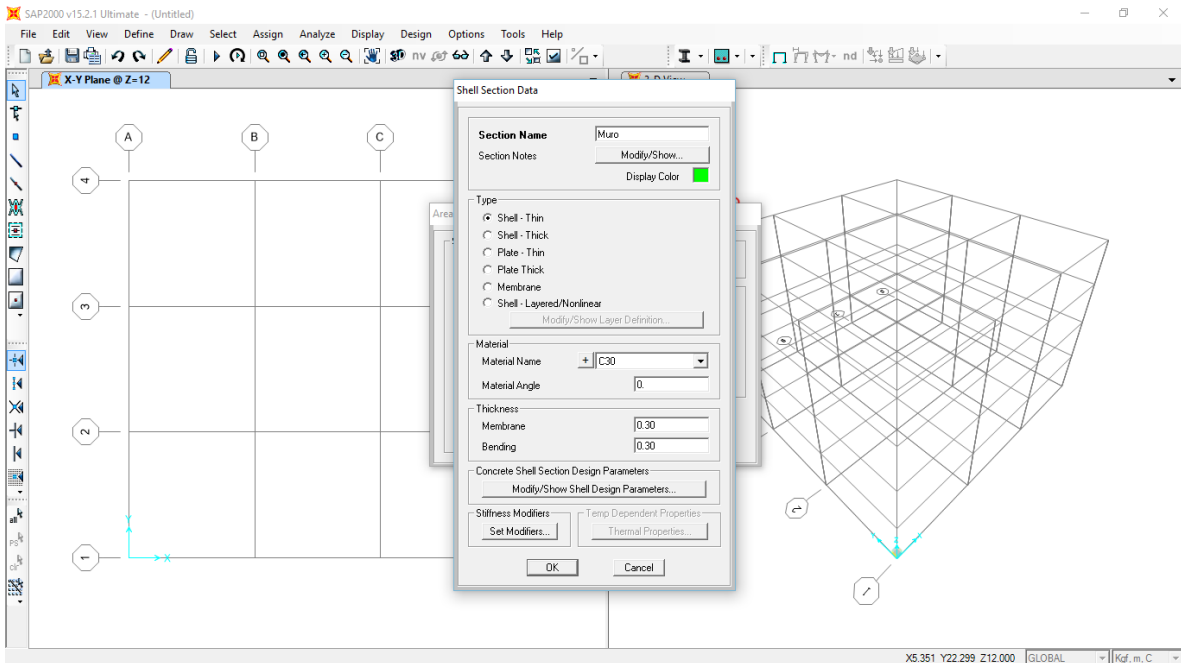


Figura 8. Definición de Objeto Muro en SAP2000.

La propiedad Thickness contiene dos formulaciones, cada una para un propósito específico de cálculo de acuerdo con el comportamiento indicado.

a) Espesor de Membrana (Membrane), th:

Permite el cálculo de la rigidez del elemento para comportamiento de Membrana, esto es, que con este espesor SAP2000 calculará las rigideces a fuerzas axiales y a través de su plano: f11, f22 y f12. Además, se calculará el volumen del elemento, su peso propio y masa.

b) Espesor para Flexión (Bending), thb:

Permite calcular la rigidez a flexión fuera o a lo largo de su plano y cortante fuera de su plano: m11, m22, m12, v13 y v23.

En ETABS, mediante el botón **Add New Property...** se agrega una nueva sección de muro mediante la indicación de un espesor específico de la manera como se observa en la Figura 9.

A diferencia de SAP2000, ETABS considera por defecto el mismo espesor de membrane y bending, ya que en un inicio no necesitan ser diferentes debido a que es posible modificar las rigideces de nuestro muro mediante los modificadores.

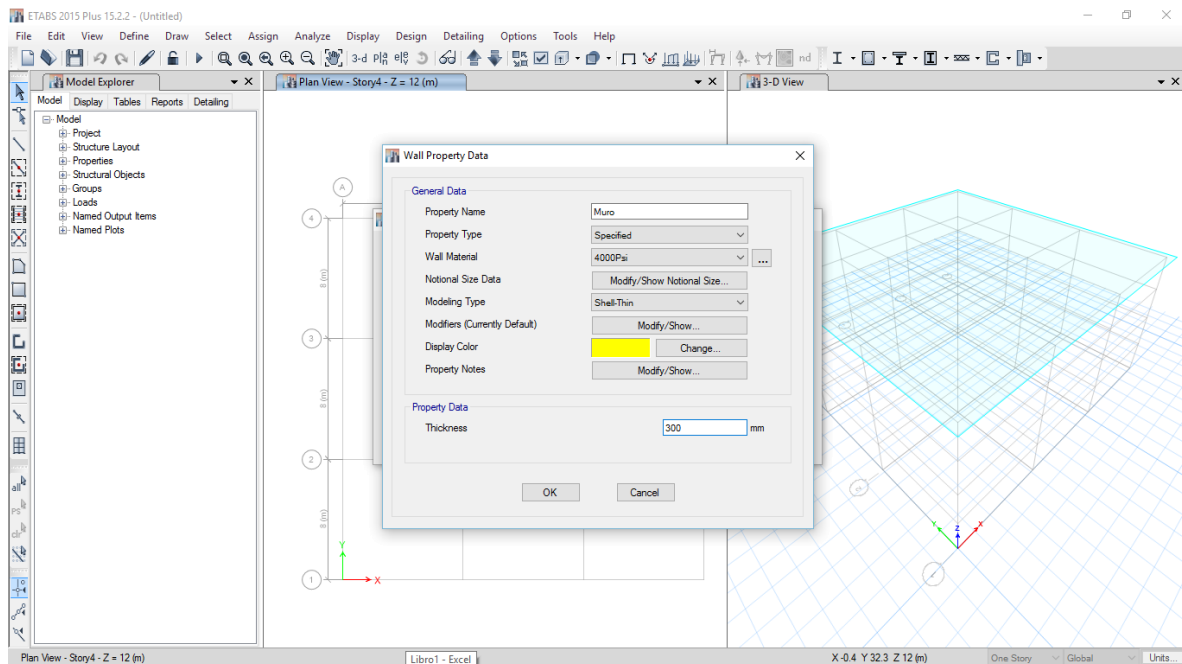


Figura 9. Definición de Objeto Muro en ETABS.

Para SAP2000, ingresamos mediante el botón **Set Modifiers...** mientras que para ETABS el botón indicado es **Modify/Show...** en las ventanas de definición de muros mostradas en las Figuras 8 y 9.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

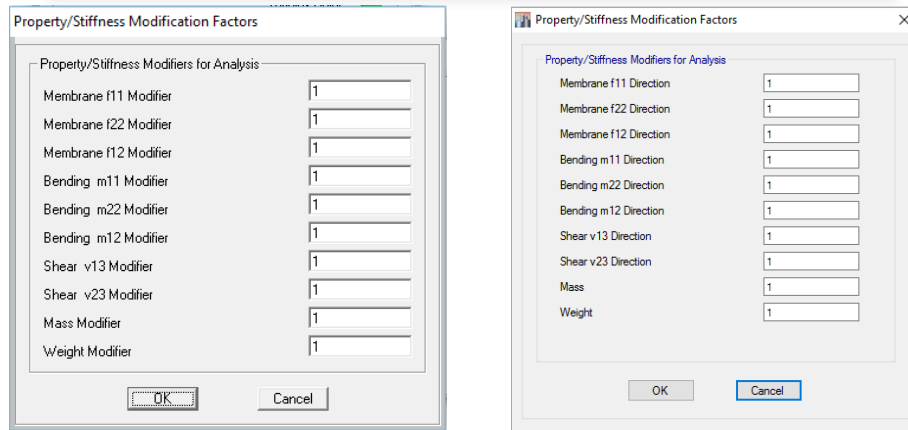


Figura 10. Modificadores de Rigidez de Muros en SAP2000 & ETABS.

A continuación, se inicia un taller de SAP2000 y ETABS donde se dibuja el muro de la Figura 3 aplicándole las cargas indicadas para luego proceder con la lectura de resultados y posteriormente con el cálculo de las fuerzas mediante elemento finito.

3. LECTURA DE RESULTADOS EN EL ELEMENTO SHELL

Las Figuras 11 y 12 muestran los modelos del muro de la Figura 3 con sus respectivas cargas horizontales y discretización indicados en ambos programas.

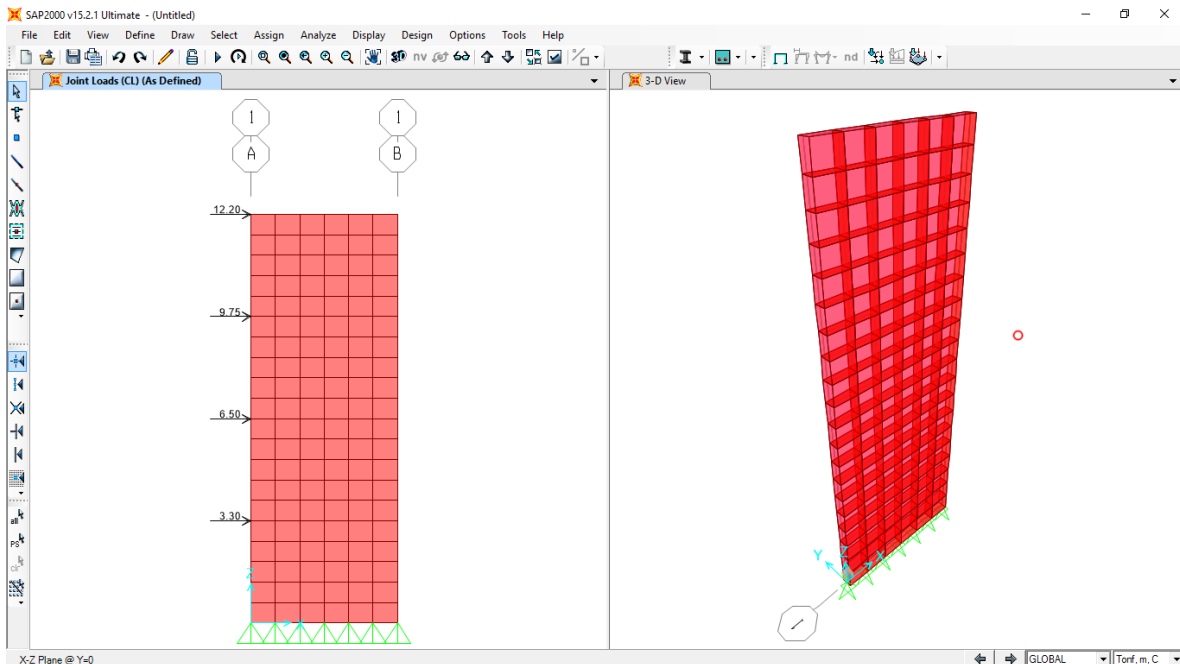


Figura 11. Modelo del Muro en SAP2000.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

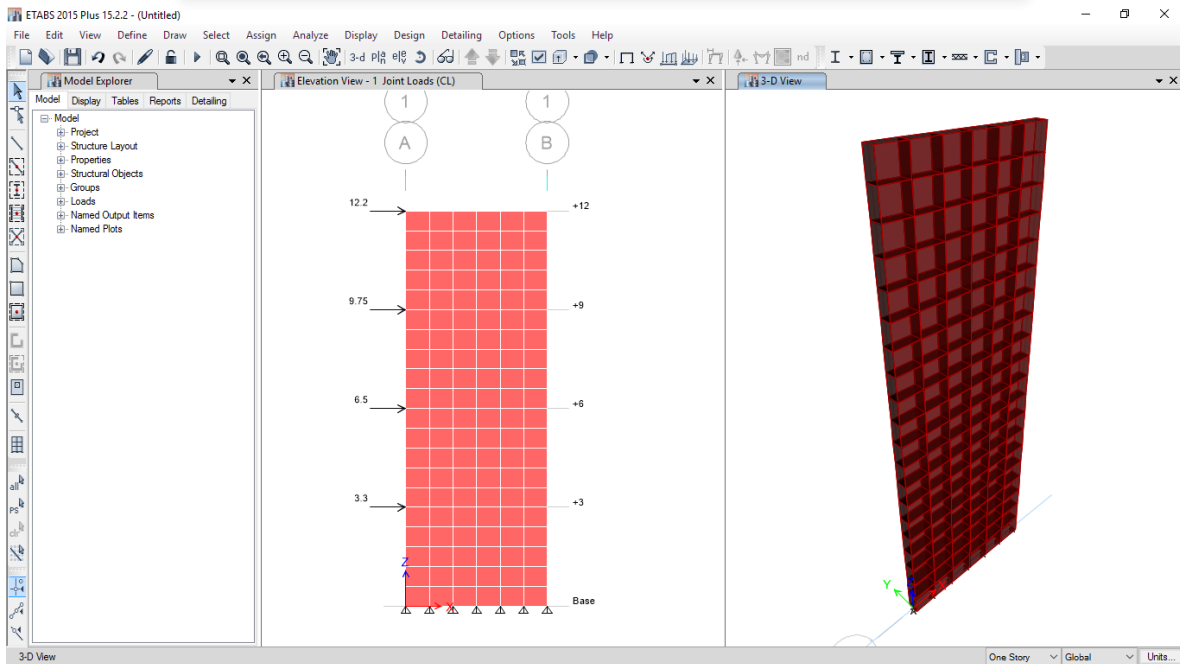


Figura 12. Modelo del Muro en ETABS.

Se procedió con la ejecución del análisis indicándole a cada programa que se desarrollen en el plano XZ.

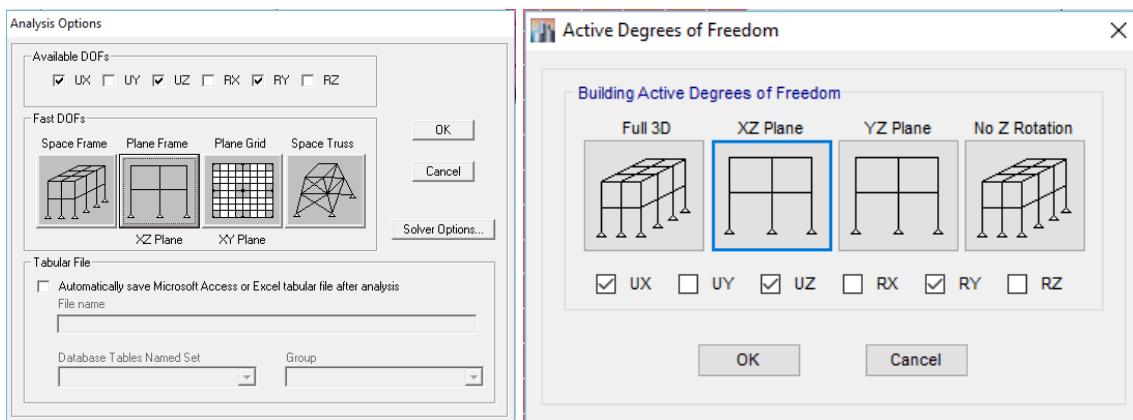


Figura 13. Ventana de configuración de GDL del análisis.

Para visualizar los resultados del análisis en el muro, en SAP2000 seguiremos la ruta que se muestra en la Figura 14, mientras que en ETABS la ruta se muestra en la Figura 15.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

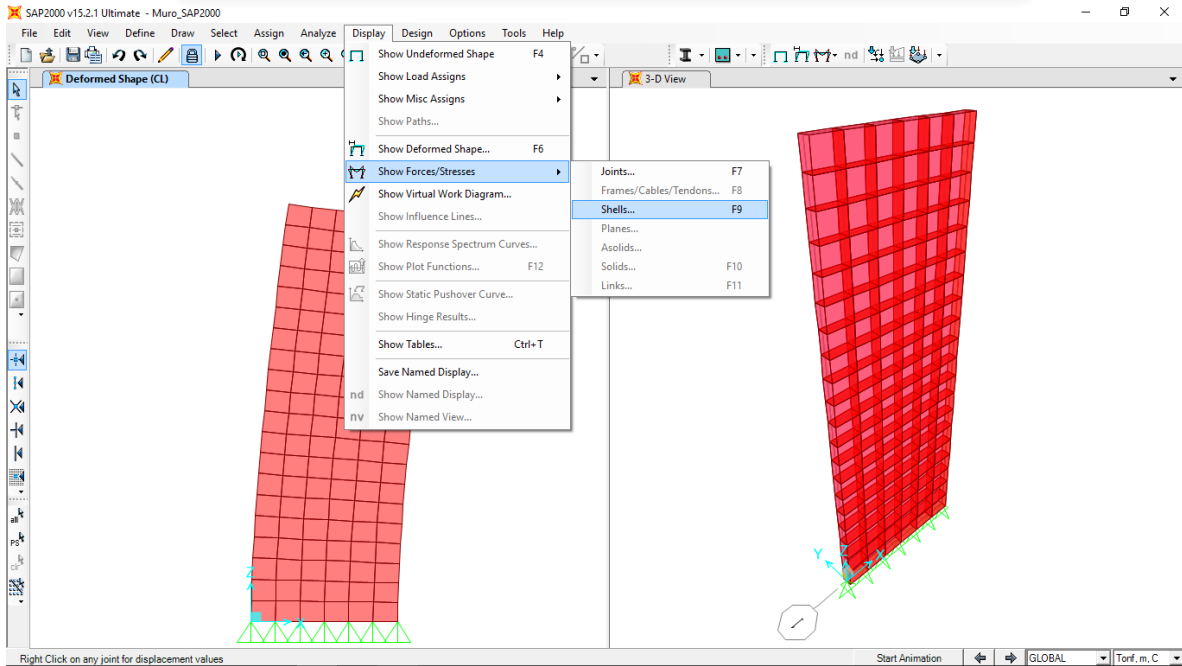


Figura 14. Comando de visualización de resultados en elementos Shell, en SAP2000.

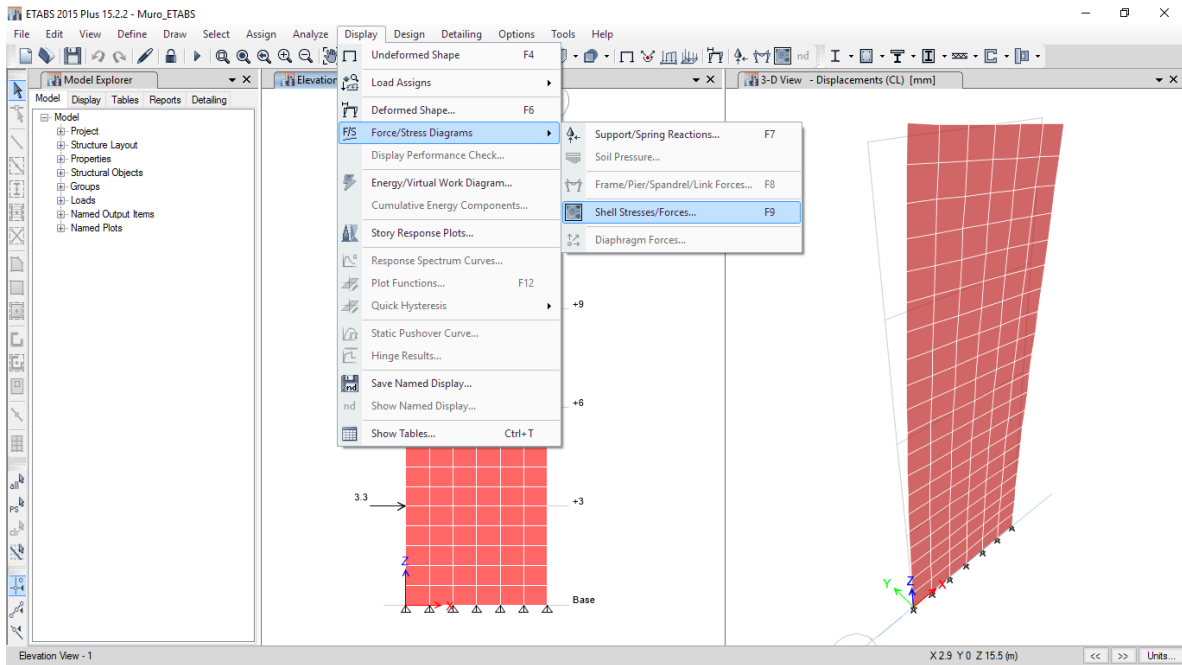


Figura 15. Comando de visualización de resultados en elementos Shell, en ETABS.

La Figura 16 nos muestra la forma en cómo se disponen los puntos de un elemento Shell para generar el objeto área utilizado para modelar nuestro muro.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

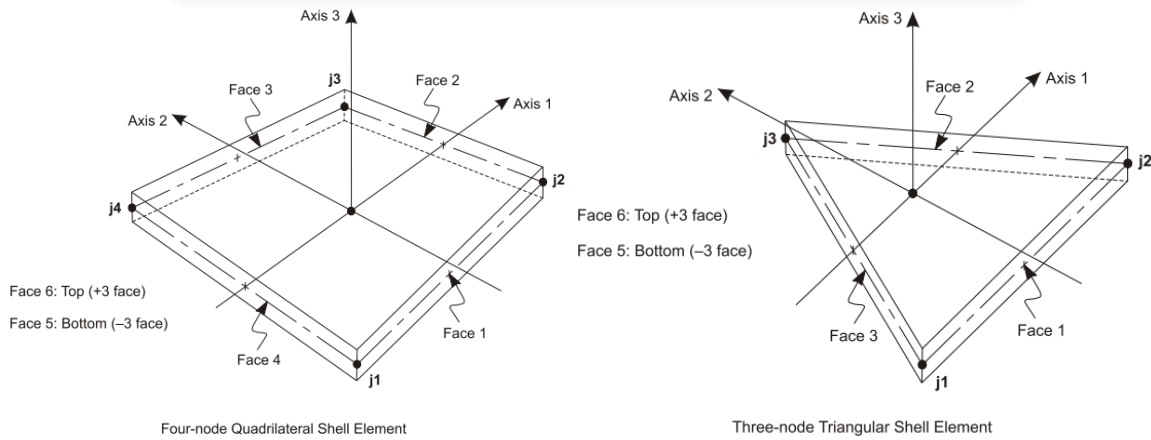


Figura 16. Definición de caras y conectividades de puntos en Elementos Área.

Tanto SAP2000 como ETABS nos mostrarán los resultados de las fuerzas internas en unidades de fuerza por unidad de longitud del elemento finito; la disposición de resultados y manera de leer los resultados se muestra en las Figuras 17 y 18.

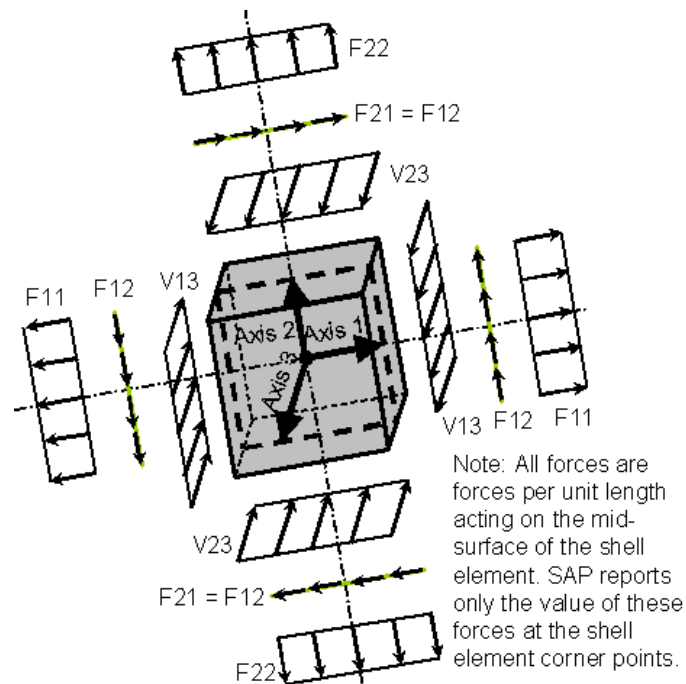


Figura 17. Fuerzas resultantes en Elemento Finito reportados por SAP2000 y ETABS.

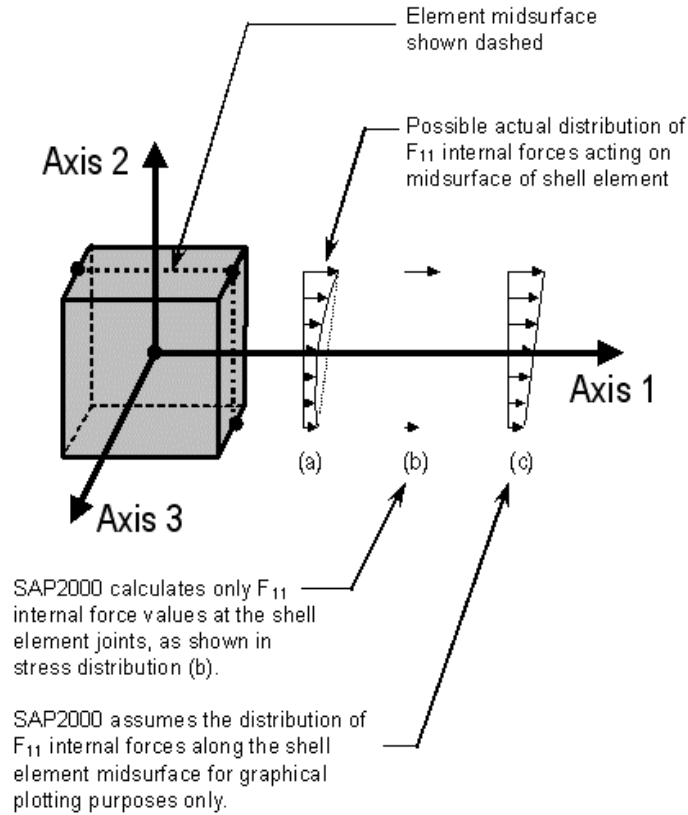


Figura 18. Lectura de resultados en Elemento Finito.

La Figura 19 muestra la manera más sencilla de visualizar los resultados por Elemento Finito en SAP2000 y ETABS. Para poder ver los resultados de forma más precisa es necesario recurrir a las Tablas en ambos programas.

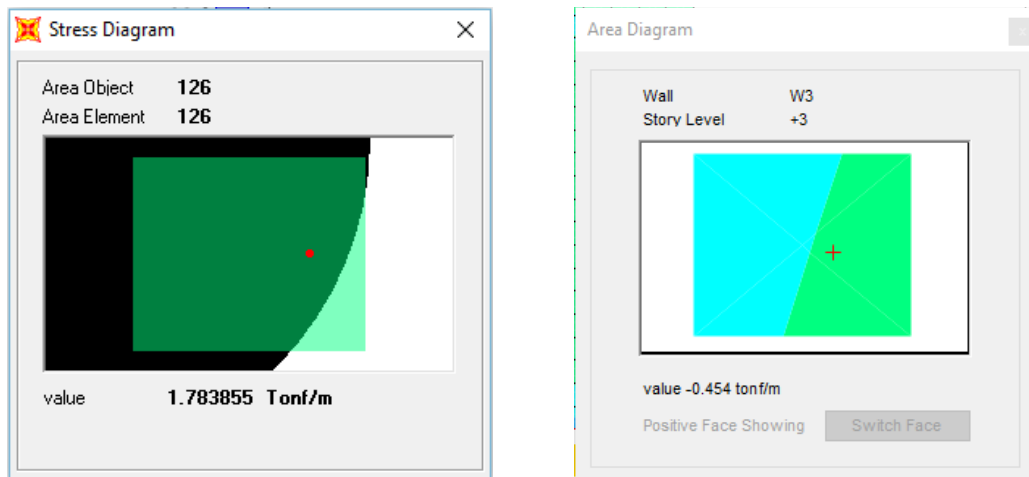


Figura 19. Resultados por Elemento Finito en SAP2000 & ETABS.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

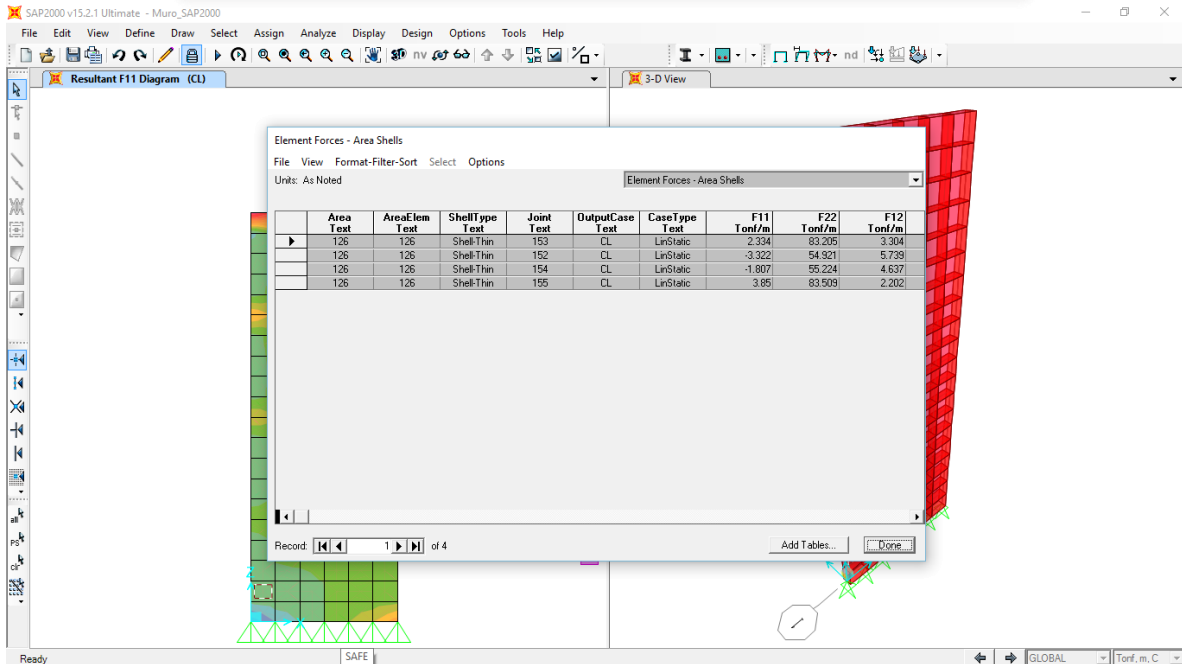


Figura 20. Visualización por Tablas, en SAP2000, de las Fuerzas Resultantes, F11.

Ambos programas permiten exportar los resultados a una hoja Excel para poder ser procesados posteriormente. Esto es lo que precisamente se muestra en la Figura 22 en donde podemos ver que los resultados obtenidos mediante ambos programas son exactamente los mismos. Luego, es a partir de estos resultados obtenidos desde donde se empieza a calcular las fuerzas Axiales, Cortantes y Momentos Flectores.

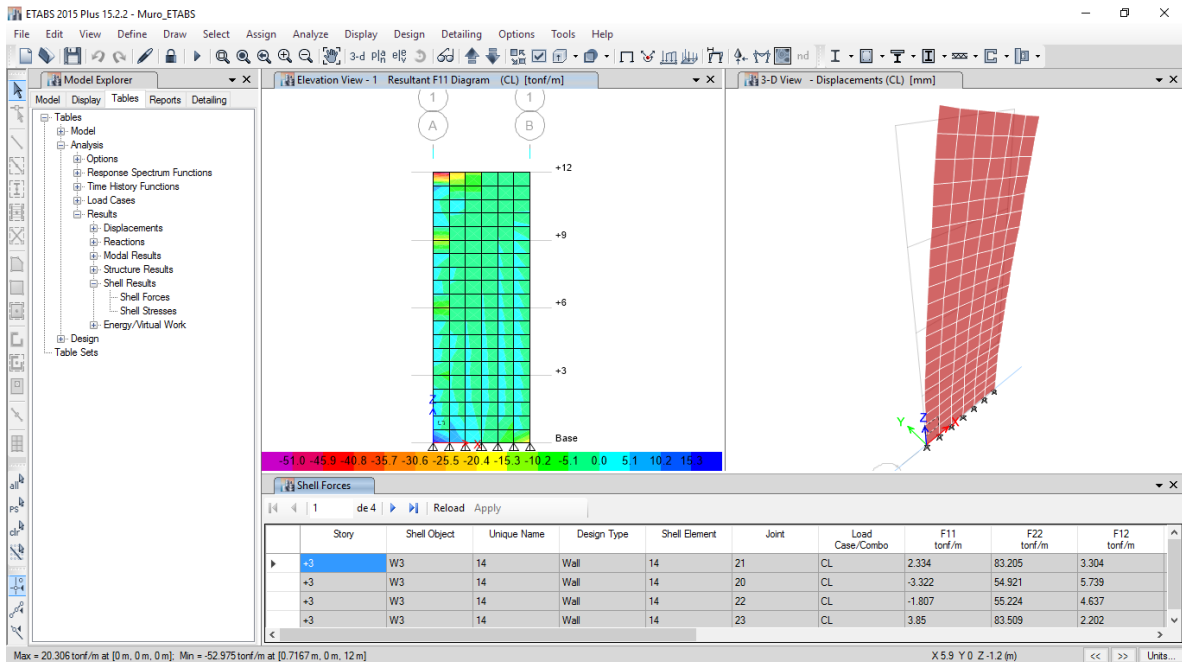
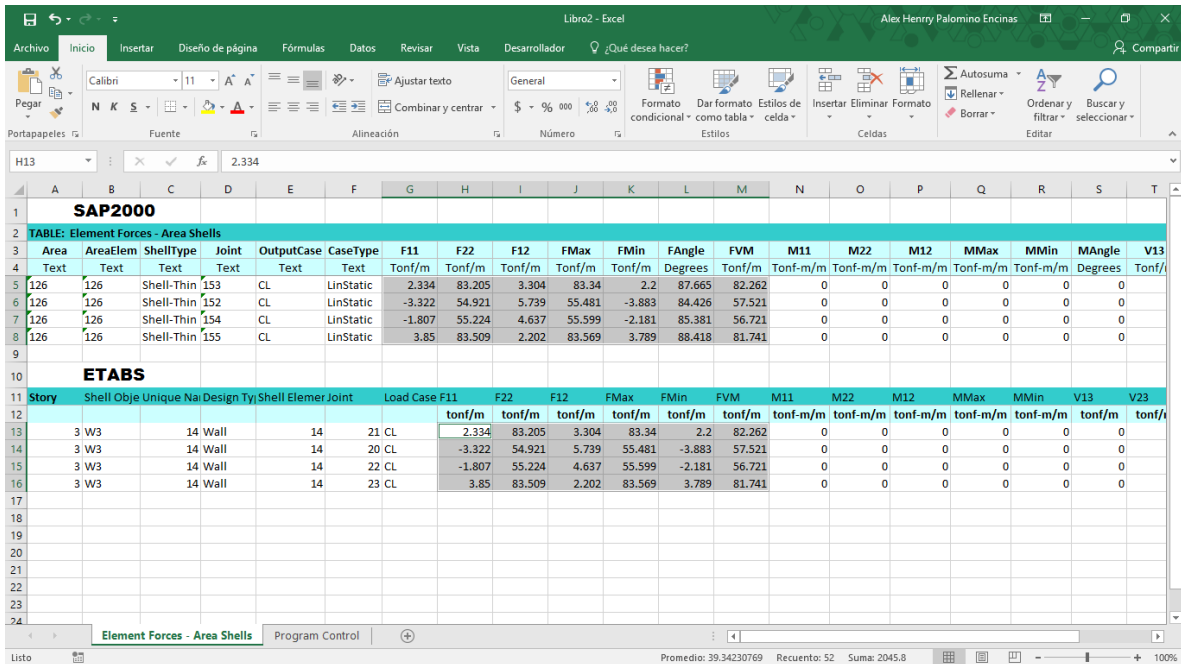


Figura 21. Visualización por Tablas, en ETABS, de las Fuerzas Resultantes, F11.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]



SAP2000																			
TABLE: Element Forces - Area Shells																			
Area	AreaElem	ShellType	Joint	OutputCase	CaseType	F11	F22	F12	FMax	FMin	FAngle	FVM	M11	M22	M12	MMax	MMin	MAngle	V13
Text	Text	Text	Text	Text	Text	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Degrees	Tonf-m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Tonf-m/m	Degrees	Tonf/
126	126	Shell-Thin	153	CL	LinStatic	2.334	83.205	3.304	83.34	2.2	87.665	82.262	0	0	0	0	0	0	0
126	126	Shell-Thin	152	CL	LinStatic	-3.322	54.921	5.739	55.481	-3.883	84.426	57.521	0	0	0	0	0	0	0
126	126	Shell-Thin	154	CL	LinStatic	-1.807	55.224	4.637	55.599	-2.181	85.381	56.721	0	0	0	0	0	0	0
126	126	Shell-Thin	155	CL	LinStatic	3.85	83.509	2.202	83.569	3.789	88.418	81.741	0	0	0	0	0	0	0

ETABS																							
Story	Shell	Objc	Unique	Na	Design	Ty	Shell	Elemr	Joint	Load Case	F11	F22	F12	FMax	FMin	FVM	M11	M22	M12	MMax	MMin	V13	V23
											tonf/m	tonf/m	tonf/m	tonf/m	tonf/m	tonf-m	tonf-m/m	tonf-m/m	tonf-m/m	tonf-m/m	tonf-m/m	tonf/m	tonf/
12											2.334	83.205	3.304	83.34	2.2	82.262	0	0	0	0	0	0	0
13	3	W3		14	Wall		14		21	CL	-3.322	54.921	5.739	55.481	-3.883	57.521	0	0	0	0	0	0	0
14	3	W3		14	Wall		14		20	CL	-1.807	55.224	4.637	55.599	-2.181	56.721	0	0	0	0	0	0	0
15	3	W3		14	Wall		14		22	CL	3.85	83.509	2.202	83.569	3.789	81.741	0	0	0	0	0	0	0
16	3	W3		14	Wall		14		23	CL													

Figura 22. Comparación de Resultados de Elemento Shell.

4. CÁLCULO DE FUERZAS EN EL MURO

Este apartado se desarrolla con el vídeo adjunto a este material. Nuestro objetivo es llegar a los resultados que se muestran en la Figura 23.

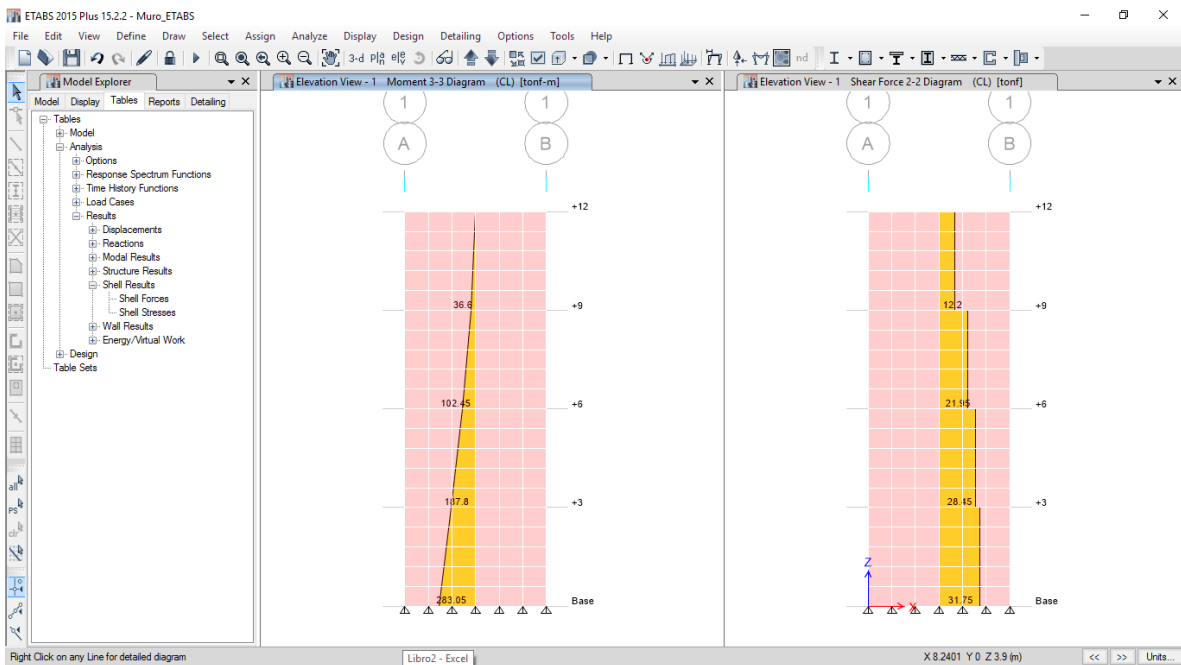


Figura 23. Diagramas Automáticos de Momento y Cortante desde ETABS.

MUROS ESTRUCTURALES [Shell Elements]

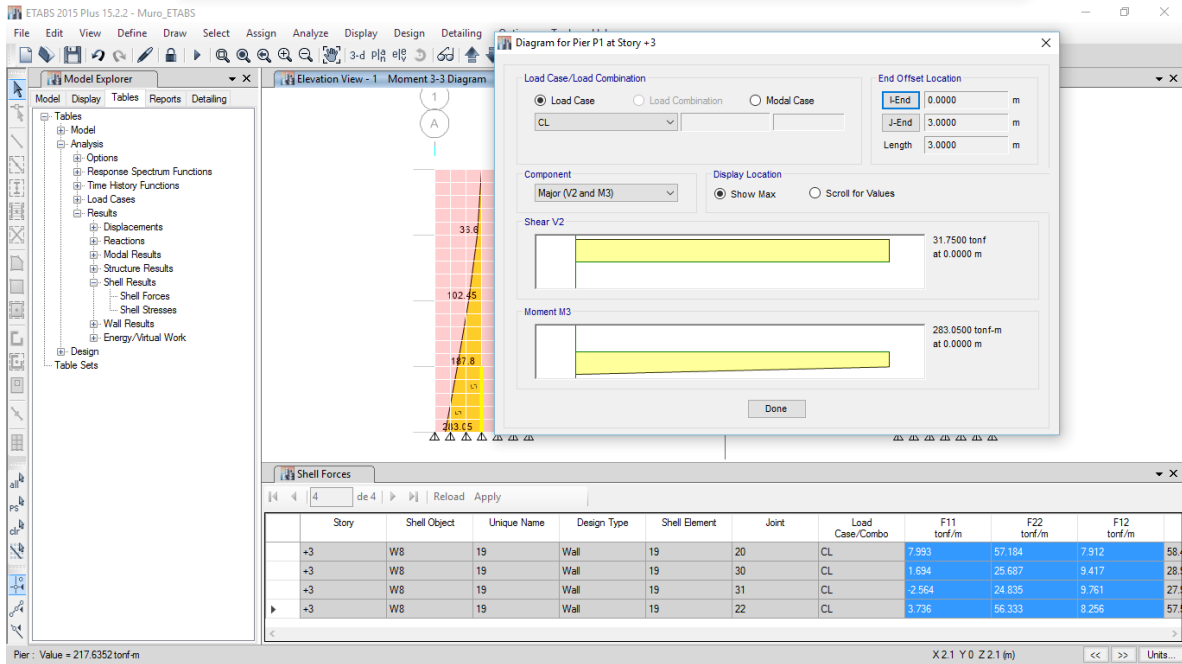


Figura 24. Diagrama de Cortantes y Momento Flector en el muro desde Objeto Pier.