

# MODELO VISCOELASTICO PARA EL ANALISIS DE INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA

M. en Ing. Jorge Eudave Muñoz<sup>1</sup>  
Programa de Investigación en Ingeniería

60

## INTRODUCCION

Tradicionalmente el diseño de estructuras dentro de la Ingeniería Civil se hace considerando que el suelo sobre el cual se desplantan tiene la rigidez suficiente como para considerar que los apoyos de la estructura son fijos. Sin embargo, de acuerdo a estudios que se han desarrollado desde hace algunos años, se sabe que el suelo presenta características de deformabilidad que pueden afectar de manera significativa el comportamiento de la estructura. *Tal relación entre el comportamiento de la estructura en combinación con las características del suelo, se ha denominado con el nombre de Interacción Suelo-Estructura.*

Por otra parte, dentro de las idealizaciones que se tienen para modelar el comportamiento de materiales estructurales, la más común es la que se considera comportamiento elástico lineal, aunque también se sabe que esta idealización no es la más adecuada en todos los casos. Por tal motivo *se propone que en la investigación se haga uso de un modelo viscoelástico, que es un modelo que puede proporcionar más exactitud al análisis de estructuras.*

Así, de acuerdo a los párrafos anteriores, *el objeto de la investigación es integrar tanto el fenómeno de Interacción Suelo-Estructura como el del modelo viscoelástico para los materiales de la estructura y el suelo.*

## METODOLOGIA

Como parte inicial de este proyecto se realizó una investigación bibliográfica sobre el tema a tratar, lo cual sirvió de antecedente para el planteamiento del modelo objeto de la investigación.

El planteamiento propio del modelo se hizo tomando en cuenta, adicionalmente a lo anterior, lo que se tiene dentro de los campos de análisis estructural y de mecánica de suelos, así como lo que aporta la mecánica de los medios continuos.

Para ilustrar la aplicación del modelo propuesto, se realizaron análisis de estructuras que involucraban el empleo de los parámetros propios del modelo. El tipo de estructura que se consideró en esta etapa fue la del marco plano, la cual es un tipo de estructura muy socorrida dentro de los procesos convencionales del análisis estructural. Fue necesario el empleo de un programa de computadora para realizar estos análisis, el cual es un programa que analiza marcos planos que toma un total de tres grados de libertad por nudo (dos desplazamientos lineales y un desplazamiento angular).

## DESARROLLO

Comúnmente, el análisis de estructuras se efectúa considerando apoyos fijos y comportamiento elástico de los materiales que la conforman. La razón de lo anterior es debido a la relativa simplicidad del modelo de análisis que se obtiene, y además se tiene el precedente de que ambas hipótesis guardan correspondencia con la realidad en un gran número de casos.

Con relación a las propiedades estructurales de los materiales, éstas se definen en forma rigurosa por medio de sus leyes constitutivas, o sea del conjunto de ecuaciones que describen el estado de deformaciones que se presenta en el material ante cada posible estado de esfuerzos. De una manera más simple, las principales propiedades de un material pueden representarse mediante curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos estándar. La curva esfuerzo-deformación de prácticamente todos los materiales estructurales presenta un tramo inicial lineal, o casi, lo que permite definir un módulo de elasticidad,  $E$ , como la pendiente de dicho tramo. Es este tramo o intervalo el que se está considerando al realizar análisis elásticos, y para tomar en cuenta todo el conjunto de intervalos de las curvas esfuerzo-deformación (tramo lineal y no lineal) se puede recurrir a los modelos de cuerpos viscoelásticos, que es parte de lo que se realizó en esta investigación. En la Tabla 1 se pueden observar las ecuaciones constitutivas de tres diferentes modelos viscoelásticos.

<sup>1</sup> Profesor-Investigador del Centro Tecnológico

En cuanto al suelo de cimentación, su proceso de modelación matemática resulta más compleja que para el caso de los materiales y elementos estructurales. En el caso de esta investigación, el suelo se modeló por medio de elementos tipo barra a los cuales se les aplicó las propiedades viscoelásticas correspondientes.

En base a las consideraciones anteriores se procedió a realizar el análisis de varias estructuras, a fin de determinar las variaciones con respecto al análisis tradicional. De estos análisis se presenta un conjunto de resultados obtenidos en una de esas estructuras.

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados obtenidos son básicamente el modelo objeto de la investigación y los análisis efectuados a fin de verificar el funcionamiento del mismo. Estos resultados se presentan en forma de figuras y tablas para una estructura tipo, los cuales se describen a continuación:

Figura 1.- Aquí se encuentran los datos de un marco tipo para llevar a cabo su análisis de la manera convencional (apoyos empotrados).

Figura 2.- Se muestran los datos de un marco tipo para su análisis empleando el modelo viscoelástico.

Tabla 1.- Se muestran las ecuaciones constitutivas de tres diferentes modelos viscoelásticos, o sea, son las relaciones que se plantean entre esfuerzo y deformación, afectadas en este caso por la variable tiempo.

Tabla 2.- Se muestran como ejemplo algunos valores propuestos de las constantes viscoelásticas para ser usadas dentro de las ecuaciones constitutivas. Estas constantes varían de acuerdo al material que se considere, siendo común a cualquier material el empleo de las relaciones constitutivas mostradas en la tabla 1.

Tabla 3.- En esta tabla se muestran los parámetros viscoelásticos obtenidos a partir de las ecuaciones de la tabla 1, haciendo la sustitución correspondiente de los valores de la tabla 2 y de diferentes valores de la variable tiempo.

Tabla 4.- Aquí se muestran algunos de los resultados obtenidos al analizar los marcos de las figuras 1 y 2. El marco de la figura 1 es un marco convencional, analizado de la manera tradicional, y el marco de la figura 2 lleva implícito el análisis en base al modelo encontrado. A este último marco se le aplicaron los parámetros viscoelásticos correspondientes al modelo de Burgers (tabla 3).

Cabe aclarar que se está presentando una muestra muy pequeña de los resultados obtenidos en los análisis que se efectuaron, los cuales sin embargo resultan significativos

para los fines perseguidos en este informe.

De los resultados obtenidos es posible recalcar lo siguiente:

\* Los valores que más resultan de interés observar al aplicar al análisis de estructuras el modelo viscoelástico, son los referentes a los desplazamientos generados ante carga lateral. Sí puede existir diferencia importante en estos valores si se comparan con los valores obtenidos de análisis convencionales.

\* Los valores de desplazamiento vertical (asentamientos), también resultan significativos, aunque hay que resaltar que en el ejemplo mostrado resultan demasiado grandes, lo cual indica la incongruencia entre la cimentación que se propuso, las cargas aplicadas y el tipo de suelo considerado.

\* En cuanto a los elementos mecánicos se observa que únicamente resultan cambios significativos para el caso de considerar cargas laterales.

**CONCLUSIONES**

— El análisis y diseño de estructuras realizadas por medio de idealizaciones que involucren el trabajo en conjunto de la estructura y el suelo, junto con la consideración de comportamiento no elástico, es algo deseable de realizar, lo cual ha tenido hasta el momento inconvenientes de carácter práctico, que poco a poco es posible que se vayan superando tomando en cuenta las herramientas actuales de cálculo.

— El presente estudio pretende dar un aportación pequeña al tema del análisis de la interacción suelo-estructura, tomando datos existentes y aplicándolos en casos sencillos.

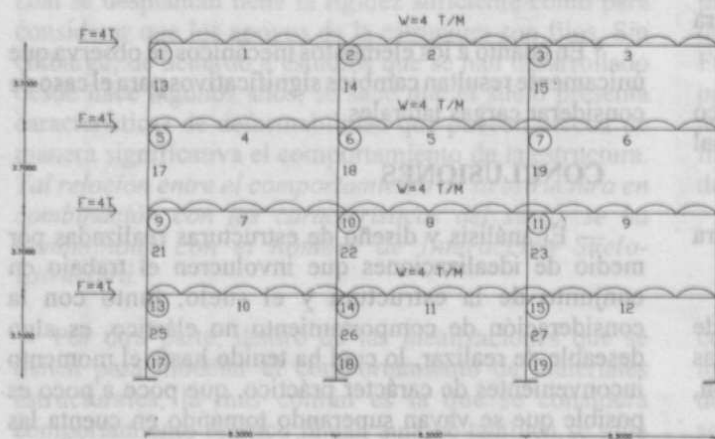
— Es importante recalcar la importancia que tiene dentro del análisis y diseño de estructuras el tipo de idealización a considerar y los parámetros constantes empleados dentro del cálculo. Aunque el modelo propuesto en este estudio pretende involucrar más elementos de los considerados en los modelos convencionales, resulta de importancia la elección correcta que se haga de los parámetros que definen el comportamiento del material de la estructura y del suelo.

— Por último, cabe resaltar la importancia que tiene en todo proceso de cálculo la correcta comprensión del modelo empleado y la correspondencia entre éste y la realidad, para lo cual se hace necesario de tiempo de práctica y de ejercicio consciente.

**BIBLIOGRAFIA**

- Bazán Zurita, E., y Meli Piralla, R., 1985, "Manual de Diseño Sísmico de Edificios", Limusa, México.
- Bowles, J.E., 1982, "Foundation: Analysis and Design", McGraw-Hill, Tokio, Japan.
- Dowrick, D.J., 1984, "Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos para Ingenieros y Arquitectos", Limusa, México.
- Gere, J.M., y Weaver, W., 1967, "Análisis de Estructuras Reticulares", CECSA, México.
- Levi, E., 1971, "Elementos de Mecánica del Medio Continuo", Limusa, México.

- Meli Piralla, R., 1985, "Diseño Estructural", Limusa, México.
- Nawy, E.G., 1988, "Concreto Reforzado: un enfoque básico", Prentice Hall, México.
- Park, R., y Paulay, T., 1978, "Estructuras de Concreto Reforzado", Limusa, México.
- Zeevaert, L., 1980, "Interacción Suelo-Estructura de Cimentación", Limusa, México.



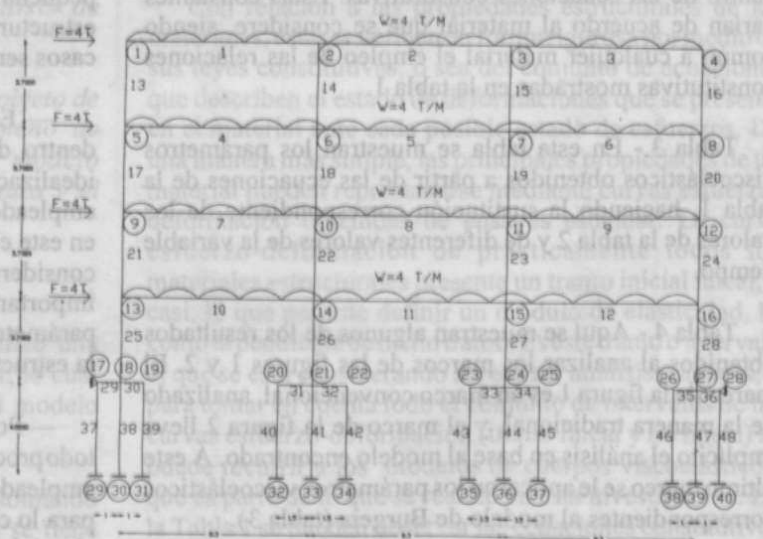
**SECCIONES TRANSVERSALES**

- TRABES**
  - 35 cm
  - 80 cm
- COLUMNAS**
  - 50 cm
  - 50 cm
- CIMENTACION**
- MIEMBROS 29, 30, 35, 36**
  - 35 cm
  - 1.0 mt.
- MIEMBROS 31 a 34**
  - 35 cm
  - 1.5 mt.
- SUELO**
- MIEMBROS 37-39, 46-48**
  - 1.0 mt.
  - 1.0 mt.
- MIEMBROS 40-45**
  - 1.5 mt.
  - 1.5 mt.

**FIG. 1.- Datos para Análisis Tradicional (Apoyos Empotrados)**

**SECCIONES TRANSVERSALES**

- TRABES**
  - 35 cm
  - 80 cm
- COLUMNAS**
  - 50 cm
  - 50 cm
- E = 2 X 10<sup>6</sup> TON/M<sup>2</sup>**



**FIG. 2.- Datos para Análisis Viscoelásticos**

**TABLA 1.- Ecuaciones constitutivas de modelos viscoelásticos.**

MODELO	ECUACION CONSTITUTIVA
KELVIN	$(Ta/E) = ((2Gk)/(1 - e^{-(Lk t)}))$ <span style="float: right;"><math>Lk = (Gk / Nk)</math></span>
MAXWELL	$(Ta/E) = (2 / ((t/Nm) + (1/Gm)))$
BURGERS	$(Ta/E) = (2 / [(1/Gk)(1 - e^{-(Lk t)}) + (t/Nm) + (1/Gm)])$

Ta = Esfuerzo  
E = Deformación.  
Gk, Nk = Constantes viscoelásticas Kelvinianas.  
Gm, Nm = Constantes viscoelásticas Maxwellianas.  
t = Tiempo.

**TABLA 2.- Constantes viscoelásticas (promedio)**

MATERIAL	Gk , Kg/cm2	Nk, Kg seg/ cm2.	Gm , Kg /cm 2.	Nm ,Kg seg/ cm2
SUELO ARCILLOSO	7.67	$0.256 \times 10^{-5}$	4.84	$2.59 \times 10^{-7}$
CONCRETO REFORZADO	$1.00 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-12}$	$0.59 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-13}$

**TABLA 3.- Parámetros viscoelásticos para análisis estructural.**

TIEMPO	MATERIAL	(Ta/E) KELVIN , (Kg/cm2)	(Ta/E) MAXWELL. ,(Kg / cm2)	(Ta/E) BURGERS. , (Kg/cm2)
0	SUELO	$\infty$	9.68	9.68
	CONCRETO	$\infty$	$1.18 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-6}$
7 DIAS	SUELO	15.34	8.7	5.55
	CONCRETO	$7.76 \times 10^{-6}$	$1.17 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-6}$
28 DIAS	SUELO	15.34	6.67	4.65
	CONCRETO	$2.87 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-6}$	$0.81 \times 10^{-6}$
360 DIAS	SUELO	15.34	1.42	1.3
	CONCRETO	$2.00 \times 10^{-6}$	$0.76 \times 10^{-6}$	$0.55 \times 10^{-6}$

**TABLA 4.- Muestra de resultados obtenidos.**

VARIABLE	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
NIVEL 4.	1.9	8.4	14	17	57
Dh NIVEL 3.	1.6	6.5	11	13	43
NIVEL 2.	1.1	4.5	7.4	8	29
NIVEL 1.	0.4	2.4	3.9	4.7	15
Dv.	-	85	150	176	622
FUERZAS MIEMBRO 2 CARGA VERTICAL	P=8.3 V=16.6 M=23.1	P=6.1 V=16.6 M=23.3	P=6.2 V=16.6 M=23.3	P=4.9 V=16.6 M=23.4	P=5.5 V=16.6 M=23.3
FUERZAS MIEMBRO 2 CARGA LATERAL	P=2 V=0.45 M=1.88	P=2 V=1.27 M=5.25	P=2 V=1.27 M=5.29	P=2 V=1.29 M=5.35	P=2 V=1.28 M=5.34
FUERZAS MIEMBRO 26 CARGA VERTICAL	P=134 V=0.07 M=0.21	P=136 V=0.005 M=0.03	P=136 V=0.003 M=0.008	P=138 V=0.008 M=0.08	P=137 V=0.02 M=0.19
FUERZAS MIEMBRO 26 CARGA LATERAL	P=0.25 V=4.46 M=12	P=3.3 V=0.13 M=2.2	P=3.3 V=0.17 M=2.3	P=3.4 V=0.16 M=2.4	P=3.4 V=0.21 M=2.6

Dh = Desplazamiento horizontal (carga lateral), cm.  
 Dv = Desplazamiento vertical (carga vertical), cm.  
 P = Fuerza axial, ton.  
 V = Fuerza cortante, ton.  
 M = Momento, ton-m.

CASO 1.- Análisis tradicional (apoyos empotrados).  
 CASO 2.- Análisis viscoelástico (t = 0).  
 CASO 3.- Análisis viscoelástico (t = 7 días).  
 CASO 4.- Análisis viscoelástico (t = 28 días).  
 CASO 5.- Análisis viscoelástico (t = 360 días).

TIEMPO	MATERIAL	(T) E (KELVIN) (kg/cm <sup>2</sup> )	(T) E (MAXWELL) (kg/cm <sup>2</sup> )	(T) E (BURGER) (kg/cm <sup>2</sup> )
0	CONCRETO	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>
7 DIAS	CONCRETO	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>
28 DIAS	CONCRETO	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>
360 DIAS	CONCRETO	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>	1.18 X 10 <sup>8</sup>



FIG. 3.- Datos para Análisis Viscoelástico