

CÁLCULO DINÁMICO DE ESTRUCTURA 2D.

Vamos a ver a continuación todos los conceptos que hemos aprendido en el bloque 1 aplicado a una estructura en 2 dimensiones.

Vamos a simular una carga puntual de un equipo que vibra a una frecuencia próxima a una frecuencia natural de la estructura y también a una frecuencia alejada, para comprobar la amplificación que se produce en cada caso.

Esto lo vamos a comparar con los resultados del caso estático.

Haremos este cálculo también para carga distribuida sobre vigas simulando el viento.

Con este problema vamos a aprender a hacer un cálculo dinámico en 2D fijándonos en:

- La discretización de la estructura, hemos de elegir aquella en la que converjan los resultados.
- Los modos de vibración que afectan a cada carga periódica, la frecuencia natural afectada no va a ser la misma para el viento que para el equipo
- Interpretaremos los resultados, veremos que si la frecuencia de la carga es mucho mayor que la frecuencia de la estructura, en lugar de amplificar esfuerzos respecto del caso estático, se disminuyen:





La interpretación de esto último es que la frecuencia de la carga es tan rápida que no da tiempo a que cargue sobre la estructura cuando ya está cambiando de signo, por lo que produce menos esfuerzo que la misma carga estática.

Vamos a plantear la sgte estructura en acero S275:





Vamos a considerar una carga muerta de:

- 0,4 T/m en las plantas
- 0,1 T/m en la cubierta y fachadas:





 Una carga puntual correspondiente al peso de un equipo vibrante de 5 Tns situado en el centro del vano de la última planta. La masa oscilatoria de este equipo va a ser de 1 Tn:



Con estos datos (rigideces y masas) ya vamos a poder calcular las frecuencias naturales de la estructura.



Vamos a suponer además, de forma simplificada un viento de 0,5 Tn/m en fachadas:



Vamos a empezar calculando las frecuencias naturales, posteriormente iremos definiendo las frecuencias de las cargas para ver e interpretar resultados.



Abrimos un nuevo modelo:

X SAP2000 v19.0.0 Ultimate 64-bit - (Untitled)	the second	
File Edit View Define Draw Select Assign Analyze Display Design Opt	ens Tools Help	۸.
□ ◆ 田島 - 2	36/총육 법교(평· 이가언·배)·[I·[월·]·	
R 3-D View		- ×
N N		
X	X New Model	
	New Kodel Intelaction Project Information	
	Initializes Model from Defaults with Units (KII, m, C Model, "Struct Information	
	Initiatize Model from an Existing File	
	(V) Save Options as Default	
C XX		
-4		
4	Bank Grid Only Beam 20 Trusses 30 Trusses 20 Frames	
2		
d, ^k	3D Frames Wal Pat Slab Shells Starcases Storage	
2		
	Underground Sold Models Pipes and Plates	
	Cardee	
		K91, m, C -

Elegimos un modelo 2D Frames con los sgtes datos:

2D Frame Type	Portal Frame Dimensions		
Portal 🔻	Number of Stories 4	Story Height	3.
	Number of Bays 1	Bay Width	6.
	Use Custom Grid Spacing and Section Properties	Locate Edit Grid	
	Beams Default	• +	
	Columns Default	• +	





Asignamos perfiles IPE240 a dinteles y HEB200 a pilares en acero S275:

Region	Europe	-
Material Type	Steel	-
Standard	EN 1993-1-1 per EN 10025-2	
Grade	S275	
de Flange Section		
Section Name	IPE240	Display Color
Section Name Section Notes dract Data from Section Pro	IPE240 Modify/Show Notes	Display Color
Section Name Section Notes dract Data from Section Pro Open File c:\progra	IPE240 Modify/Show Notes perty File am files (x86))computers and structures\sap2	Display Color
Section Name Section Notes dract Data from Section Pro Open File c\progra mensions	[PE240 Modify/Show Notes operty File am files (x86)/computers and structures\sap2	Display Color
Section Name Section Notes dract Data from Section Pro Open File c\progra mensions Dutside height (13)	PE240 Modify/Show Notes operty File am files (x86))computers and structures)sap2 0.24	Display Color Di
ection Name Section Notes tract Data from Section Pro Open File		Display Color
ection Name Bection Notes tract Data from Section Pro- Open File	PE240 Modify/Show Notes operty File am files (x86)/computers and structures\sap2 0.24 0.12 9.800E-03 6.200E-03	Display Color
ection Name Ection Notes tract Data from Section Proc Open File C:\progri mensions Dutside height (13) Op flange width (12) Op flange thickness (1f) Veb thickness (1tw) Iveb thickness (1tw)	IPE240 Modify/Show Notes am files (x86)/computers and structures\sap2 0.24 0.12 9.800E-03 6.200E-03 0.12	Display Color
Section Name Section Notes tract Data from Section Proc Open File	IPE240 Modify/Show Notes operty File am files (x86))computers and structures)sap2 0.24 0.12 9.800E-03 0.12 9.800E-03 0.12 9.800E-03	Display Color
Section Name Section Notes tract Data from Section Proc Open File C.\progra mensions Dutside height (13) Top flange width (12) Top flange thickness (14) Web thickness (14) Sottom flange width (12b) Sottom flange thickness (14)	IPE240 Modify/Show Notes operty File am files (x86)/computers and structures/sap2 0.24 0.12 9.800E-03 6.200E-03 0.12 9.800E-03 0.12 9.800E-03 0.12 9.800E-03 0.12 9.800E-03	Display Color





Para hacer el tejado, dividimos por 2 la viga superior y movemos el punto central 0.5 m en z:







Vamos a establecer que nuestro cálculo es 2D, de esta forma no nos va a calcular modos de vibración fuera del plano del pórtico.

Vamos a Analyze – Set Analysis Options:



Seleccionamos XZ Plane:

Analysis Options	
Available DOFs	
VUX UY VUZ RX VRY RZ	
Fast DOFs	
Space Frame Plane Frame Plane Grid Space Truss	ОК
	Cancel
XZ Plane XY Plane	Solver Options
Tabular File	
Automatically save XML, Excel or Microsoft Access tabular file a	fter analysis
File name	
Database Tables Named Set Group	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Vamos ahora a crear los casos de carga.



Creamos casos de carga para:

- CARGA_MUERTA: para meter las cargas muertas de dinteles, cubierta y fachada y el peso del equipo vibrante. Esta carga la definimos con SelfWeight=0 para no considerar posteriormente el peso de la estructura 2 veces en el Mass Source.
- VIENTO_ESTATICO: es el viento sin variación en el tiempo, para comparar los resultados con el caso dinámico y ver las amplificaciones.
- VIENTO_DINAMICO: es el viento con variación en el tiempo.
- VIBRACION_ESTATICO: es la carga asociada a las partes vibratorias del equipo sin variación en el tiempo, para comparar.
- VIBRACION_DINAMICO: es la carga asociada a las partes vibratorias del equipo con variación en el tiempo.

oad Patterns Load Pattern Name	Туре	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern		Click To: Add New Load Pattern
VIBRACION_DINAMICO	Live	• 0		-	Modify Load Pattern
DEAD CARGA_MUERTA VIENTO_ESTATICO VIENTO_DINAMICO VIBRACION_ESTATICO VIBRACION_DINAMICO	Dead Dead Wind Live Live	1 0 0 0 0 0	None None		Modify Lateral Load Pattern Delete Load Pattern Show Load Pattern Notes
					ОК

Vamos a Define – Load Patterns y las definimos:

Vamos a discretizar las vigas por ejemplo en 4 tramos. Seleccionamos todo y vamos a Assign-Frame-Automatic Frame Mesh:

N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	* Joint	• 3 60 🚔 🐺 🗹 🖾 •
📜 3-D View	Y Frame	 I[*] Frame Sections
	Cable	 Modifiers
	Tendon	Material Property Overwrites
	🏥 Area	Releases/Partial Fixity
	Solid	Local Axes
	X Link/Support	Reverse Connectivity
	Joint Loads	End (Length) Offsets
	Frame Loads	Insertion Point
	Cable Loads	· · ·
	Tendon Loads	Output stations
	Area Loads	P-Delta Force
	HT Solid Loads	Path
	Link/Support Loads	• 🎸 Tension/Compression Limits
	Joint Patterns	τ.Γ. Hinges
	Assign to Group Ctrl+Shift+G	Hinge Overwrites
	Update All Generated Hinge Properties	Line Springs
	Clear Display of Assigns	Line Mass
	Come Assistant	Material Temperatures
	Copy Assigns	2



Case/Combo				1
Case/Combo Name VIENTO_DINAMICO				- I
Multivalued Options				I
Envelope (Max or Min)				T.
© Time	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	•	
Scaling				•
Automatic				
◎ User Defined				1
Contour Options				
Draw Contours on Objects				
Contour Component			•	
Show Continuous Contours				
◎ Automatic ○ User Defined				•
Minimum Value for User Contour Range				1
Maximum Value for User Contour Range				
Options				
Wire Shadow				
V Cubic Curve		•	• •	
Reset Form to Default Values				
Reset Form to Current Window Settings				
OK Close Apply			7	
			Ā	

Las reacciones de VIBRACIÓN DINAMICO para t= 0.3 sg:

Display Joint Reactions	23				
Case/Combo		•			
	J	•			
Nultivalued Options		•			
© Envelope (Max or Min)					
Time 0.3	sec 🗧	•	• •		•
Display Types		•			
Arrows					
Tabulated		T			
		•			
Reset Form to Default Values					
Reset Form to Current Window Settings		•	• •		
OK Close Apply		•			
)				
		•			
		T T			
		I			
		•			
		1.94	Z		
			1	•	

La envolvente de reacciones:



Case/Combo Name	VIBRACION_DINAMICO
cuse, combo Hume	
Multivalued Options	
Envelope (Max or Min)	
© Time	
Display Types	
Display Types	
Arrows	
Tabulated	
F	leset Form to Default Values
Reset	Form to Current Window Settings
OK	Close Apply



Esfuerzos flectores de VIENTO DINAMICO para t= 1.65 sg



Esfuerzos flectores de VIENTO DINAMICO envolventes:



Display Frame Forces/Stres	ses	X X	α α	47	R R
Case/Combo		2242084			22
Case/Combo Name	VIENTO_DINAMICO	202765			2020
Multivalued Options		4167768			4165 73
Envelope (Max or Min)			O	8	
© Time			in the second se		
Display Type					T T
Force	Stress	220228			28
Component					V
Axial Force	O Torsion				•
🔘 Shear 2-2	Moment 2-2	oggenes	- SI	N	0000
🔘 Shear 3-3	Moment 3-3				1
Scaling for Diagram		6632476		0	66024
Automatic					\
O User Defined		320533			320
Options for Diagram					V
Fill Diagram	Show Values	152779461	35	N	1527
	Reset Form to Default Values				
Reset	Form to Current Window Settings	18,52,77		- de	15.8
ОК	Close Apply	7772199			77.2
			-	,	
		38654	2	-	386
		W/			\/

Toda esta información la tenemos en forma tabular desde Display – Show Tables:



Veríamos la misma información:



t	
MODEL DEFINITION (0 of 54 tables selected)	Load Patterns (Model Def.)
	Select Load Patterns
Property Definitions	
	6 01 6 Selected
Other Definitions	Load Cases (Results)
E − Coad Case Definitions	Select Load Cases
E Connectivity Data	Sciect Load cases
Joint Assignments	7 of 7 Selected
Frame Assignments	Madifiel/Channe Ontingen
	Modily/Show Options.
	Set Output Selections.
ANALYSIS RESULTS (0 of 20 tables selected)	
Joint Output	Options
Displacements	Selection Only
E Reactions	Show Unformatted
ulter I Velocity and Acceleration	
. Joint Masses	
Element Output	
Frame Output	
Table: Element Forces - Frames	Named Sets
Table: Element Stresses - Frames	
Table: Element Joint Forces - Frames	Save Named Set
🚊 🔲 Objects and Elements	Show Named Set
…□ Table: Objects And Elements - Joints	
Table: Objects And Elements - Frames	Delete Named Set
⊡ ⊡ Structure Output	
🚊 🔲 Base Reactions	
Table: Base Reactions	
🗄 🔲 Modal Information	
🗄 🗖 Named Set Data	
⊞ Other Output Items	

Vamos a ver ahora un vídeo de la actuación de las cargas dinámicas sobre la estructura, en File – Create Video - Create Multi-step Animation Video:





Guardamos el archivo y en Load Case Data elegimos el caso dinámico que queremos visualizar:

Avi File Name		Browse
c:\users\user\deskt	op\dinamica\dinamic	a\videos\b2.avi
Plot Type		
Analysis Result	ts 💿	Multi-step Load
Load Case Data		
Load Case Name		Graph Show Graph
Start Time	VIENTO_DINAM	
End Time	22	Named Set
Time Increment	0.1	DESPLAZAMIEN' 👻
Display Options		
Wire Frame	Magnification Fa	actor 10
Cubic Curve		
Absolute Displa	cements	
Avi Options		
Frames per Second	10	
Frame Size (pixels)	640	by 480
V Delete Temporar	y BMP files	

Empezamos por VIENTO DINÁMICO, ponemos Start Time 0 sg, End Time 22 sg que es la duración completa de la carga y en Time Increment ponemos 0.11sg que es el intervalo de tiempo entre 2 puntos de nuestra función:

Load Case Data	
Load Case Name	VIENTO_DIN -
Start Time	0
End Time	22
Time Increment	0.11

Marcamos ahora Show Graph para ver a la vez el gráfico que queramos entre los 3 que hemos guardado:





Dejamos Desplazamiento y damos OK, en Magnification Factor tenemos la escala, vamos a dejar por ejemplo 3:

Avi File Name		Browse
c:\users\user\desk	top\dinamica\dinamica	a\videos\b2.avi
Plot Type		
Analysis Resu	lts 🔘	Multi-step Load
Load Case Data		
Load Case Name		Graph Show Graph
Start Time	0	
End Time	22	Named Set
Time Increment	0.11	DESPLAZAMIEN' -
Display Options		
Wire Frame	Magnification Fa	ctor 3
Cubic Curve		
Absolute Displa	acements	
Avi Options		
Frames per Second	10	
Frame Size (pixels)	640	by 480
Delete Temporar	ry BMP files	





Por último tenemos el formato:

Compresión de vídeo		×
Compresor:		Aceptar
Fotogramas completos (sin cor 💌		Cancelar
Microsoft RLE Microsoft Video 1 Códec Intel IYUV Códec Intel IYUV Códec Cinepak por Radius Fotogramas completos (sin comprin Velocidad de datos	fotogramas KB/s	Configurar Acerca de

Si elegimos Microsoft Video 1 nos ocupa menos espacio que las otras alternativas.

De esta forma ya tendríamos el análisis dinámico completo.

Hay que recordar que, en este caso es una estructura sencilla y no va a haber problemas con la discretización que hemos elegido de 4 elementos por viga, pero en general deberíamos comprobar que aumentando la discretización convergemos al resultado de esfuerzos, deformaciones, reacciones....

Por ejemplo si establecemos una discretización de 20 elementos por viga, muy superior a la que tenemos:





Vemos, por ejemplo las reacciones envolventes de VIBRACION_DINAMICO:



Coinciden sensiblemente con las que teníamos antes:





Por lo que en este caso no sería necesario aumentar la discretización.

Estos ejemplos que hemos visto se corresponden con la zona próxima a la resonancia con gran amplificación como hemos comprobado:



Vamos a probar una función para el equipo lejos de la resonancia, la llamamos EQUIPO_NO_RESONANTE:

Functi	ion Name	EQUIPO_	NO_RESONANTE
Parameters		Define Function	
Period	0.02	Time	Value
Number of Steps per Cycle	10	0 . 0	Add
Number of Cycles	300	2.000E-03 0.58	378 Modif
Amplitude	1.	6.000E-03 0.95	511 Delet
		8.000E-03 0.58 0.01 0.	378
Convert to User De	afined	0.012 -0.5	i878 i511 T
Function Graph			
Function Graph		•	
Function Graph	Display Graph	(4.4284 , 0.4558)	



El periodo de la carga es mucho menor que el periodo de la estructura, estamos en la zona derecha de la gráfica:



Vamos a comprobarlo, vamos al caso de carga dinámico y para que se mantenga la duración aumentamos el número de steps e igualamos la duración de los mismos al paso entre puntos de la función 11000 steps*0.002sg/step= 22 sg de duración total:

ad Case Name	Notes	Load Case Type	
/IBRACION_DINAMICO Set Def N	lame Modify/Show	Time History	▼ Design
tial Conditions		Analysis Type	Solution Type
Zero Initial Conditions - Start from Unstressed St	ate	Linear	Modal
) Continue from State at End of Modal History		Nonlinear	O Direct Integration
Important Note: Loads from this previous case	are included in the current case	History Type	
		Transient	
odal Load Case	[uopu	Periodic	
Use Modes from Case	MODAL		
ads Applied		Mass Source	
Load Type Load Name Function	Scale Factor	Previous (MSSS	RC1)
Load Pattern 👻 VIBRACION_ 👻 EQUIPO_NO_ 👻	1.		
Load Pattern VIBRACION_DIN EQUIPO_NO_RE	1. Add		
	E Modify		
	Delete		
Show Advanced Load Parameters			
ne Step Data			
Number of Output Time Steps	11000		
Number of output time steps			
Output Time Step Size	0.002		
her Parameters			
Modal Damping Constant at 0.0	02 Modify/Show		ОК



Corremos el programa y comprobamos las reacciones envolventes:

Display Joint Reactions Case/Combo Case/Combo Name VIBRACION_DINAMICO Mutivalued Options Envelope (Max or Min) Time Display Types A rrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply		•				
Display Joint Reactions Case/Combo Case/Combo Name VIBRACION_DINAMICO Mutivalued Options Envelope (Max or Min) Time Display Types a Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Default Values OK Close Apply <th></th> <th>I</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th>		I				
Display Joint Reactions Case/Combo Case/Combo Nutivalued Options		•			•	
Display Joint Reactions Case/Combo Case/Combo Case/Combo Multivalued Options Envelope (Max or Min) Time Display Types Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply						
Case/Combo Case/Combo Name VIBRACION_DINAMICO Multivalued Options Envelope (Max or Min) Time Display Types Arrows Arrows Reset Form to Default Values Reset Form to Default Values OK Close Apply Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z Z	Display Joint Reactions	<u> </u>			1	
Case/Combo Name VIBRACION_DINAMICO	Case/Combo					
Multivalued Options	Case/Combo Name VIBRACION_DINAMICO	T			1	
Multivalued Options © Envelope (Max or Min) Time Display Types © Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply			•	•		
© Envelope (Max or Min) Time Display Types © Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply	Multivalued Ontions					
© Time Display Types	Envelope (Max or Min)	•			•	
Display Types Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply OK Close Z PPI	© Time					
Display Types Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply Z 8 Z 8		T			1	
© Arrows Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply 8 7 8 7 8 7 8 7 8 7 8 7 8 7 8 7 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	Display Types					
Tabulated Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply	Arrows					
Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply	© Tabulated	•	•	•	• •	
Reset Form to Default Values Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply						
Reset Form to Current Window Settings OK Close Apply	Reset Form to Default Values				1	
OK Close Apply	Reset Form to Current Window Settings					
OK Close Apply		T				
	OK Close Apply	•				
629 Z 629						
		+	•	•	• •	
S Z S		T I				
↑ ↑		0.26		Z	0.26	
		<u></u>		1	1	N
0.01 -		0.01				~ ~ (

Vemos que han disminuido respecto del caso estático, del orden de la mitad:

Display Joint Reactions	•	•
Case/Combo		
Case/Combo Name VIBRACION_ESTATICO	I	
Multivalued Options		
O Envelope (Max or Min)	T	Ī
© Step 1 ♣	•	•
Display Types	•	•
Arrows		
◎ Tabulated		
Reset Form to Default Values	•	
Reset Form to Current Window Settings	•	•
OK Close Apply		
	• • •	•
		I
	Z Z	0
	T Î	T
	4.664E-03	4,664E-03 <



Vamos a probar ahora una función para el equipo lejos de la resonancia por la zona izquierda de la gráfica de 1 gdl, la llamamos EQUIPO_NO_RESONANTE_IZQDA:

Parameters Period 2 Number of Steps per Cycle 10 Number of Cycles 3 Amplitude 1. Convert to User Defined Function Graph	Define Function Time Value 0. 0. 0.2 0.5878 0.4 0.9511 0.6 0.9511 0.8 0.5878 1. 0. 1.2 -0.5878 1.4 -0.9511
Period 2 Number of Steps per Cycle 10 Number of Cycles 3 Amplitude 1. Convert to User Defined	Time Value 0. 0. 0.2 0.5878 0.4 0.9511 0.6 0.9511 0.8 0.5878 1. 0. 1.2 -0.5878 1.4 -0.9511
Number of Steps per Cycle 10 Number of Cycles 3 Amplitude 1. Convert to User Defined Function Graph	0. 0. 0. 0.2 0.05878 0. 0.4 0.9511 0. 0.6 0.9511 0. 0.8 0.5878 0. 1. 0. -0.5878 1.4 -0.9511 •
Number of Cycles 3 Amplitude 1. Convert to User Defined	0.2 0.2 0.4 0.5878 0.9511 0.5878 1. 1. 1.2 0.5878 0. -0.5878 1. -0.5878 0. -0.5878 -0.5878 0. -0.5878 0. -0.5878 0. -0.5878 0. -0.5878 -
Amplitude 1. Convert to User Defined Function Graph	0.4 0.9511 0.6 0.9511 0.8 0.5878 1. 0.5878 1.4 • -0.9511 •
Convert to User Defined	0.8 1. 0. 1.2 1.4 • 0.5878 0. -0.5878 -0.9511 •
Convert to User Defined	1.2 1.4 • -0.5878 -0.9511 •
Function Graph	
Display Graph	(1.8266 , -0.5095)

El periodo de la carga es mucho menor que el periodo de la estructura, estamos en la zona derecha de la gráfica:





Vamos a comprobarlo, vamos al caso de carga dinámico y para que se mantenga la duración disminuimos el número de steps e igualamos la duración de los mismos al paso entre puntos de la función 110 steps*0. 2sg/step= 22 sg de duración total:

Load Case Name Notes	Load Case Type	
VIBRACION_DINAMICO Set Def Name Modify/Show	Time History	▼ Design
initial Conditions	Analysis Type	Solution Type
Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State	Linear	Modal
Continue from State at End of Modal History	Nonlinear	O Direct Integration
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case	History Type	
	Transient	
Vodal Load Case	Periodic	
Use Modes from Case		
.oads Applied	Mass Source	
Load Type Load Name Function Scale Factor	Previous (MSSSF	RC1)
Load Pattern VIBRACION_ VEQUIPO_NO_ V 1.		
Load Pattern VIBRACION_DIN EQUIPO_NO_RE 1.		
= Modify		
T Delete		
Show Advanced Load Parameters		
Time Step Data		
Number of Output Time Steps 110		
Output Time Step Size 0.2		
Other Parameters		
Modal Damping Constant at 0.02 Modify/Show		ОК

Corremos el programa y comprobamos las reacciones envolventes:





Vemos que han aumentado ligeramente respecto del caso estático, del orden del 10 %:

Case/Combo Case/Combo Name VIBRACION_ESTATICO		
		• •
Aultivalued Options		
○ Envelope (Max or Min) ⓒ Step		
isplay Types Arrows		
C Tabulated		
Reset Form to Default Values		
Reset Form to Current Window Settings OK Close	•	
	•	• •

→^{4.664E-03}

4,664E-03 ←