

Estudio de la respuesta aerodinámica de puentes

Alberto PATRON

Consultora Mexicana de Ingeniería S.A. de C.V.

1

Estudio de la respuesta aerodinámica de puentes

- ✓ Contexto
- ✓ Efectos del viento sobre los puentes flexibles
- ✓ Estudios de sitio
- ✓ Estudios en túnel de viento
- ✓ Cálculo numérico de la respuesta y diseño
- ✓ Vibración de tirantes

2

✓ Contexto

3

Contexto

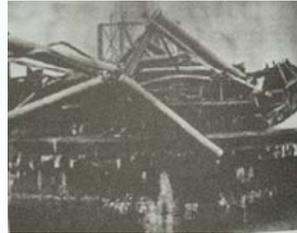
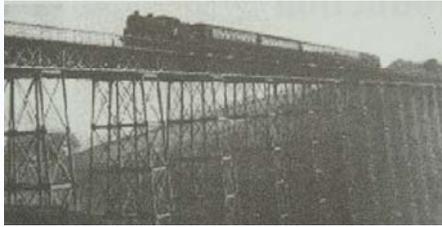
- **Desarrollos tecnológicos** (materiales, métodos de cálculo y construcción, etc.)
 - ☞ Concepción de puentes cada vez mas ligeros, esbeltos y flexibles
 - ☞ Estructuras sensibles a los efectos dinámicos
 - ☞ Puentes sensibles a la excitación del viento

4

Contexto Histórico



➤ Tay Bridge (Escocia, 1879)



- ☞ Record del mundo de su época
- ☞ Colapso debido al viento -> 84 muertos
- ☞ "Presión de diseño" = 0.5 KPa, (subestimada)
- ☞ Diseño torre Eiffel presiones 6 veces mayores

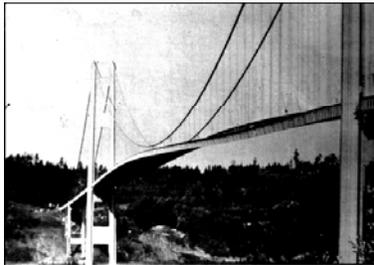
Puente Tacoma

Contexto Histórico



Ejemplo

- Caso del puente de Tacoma (EU, 1940)
 - ☞ Puesto perfectamente diseñado para resistir a los efectos estáticos del viento
 - ☞ Record del mundo por su esbeltez (claro/ancho)
 - ☞ Falla por no tomar en cuenta los efectos dinámicos del viento



7

- ✓ Efectos del viento sobre los puentes flexibles

8

Aerodinámica



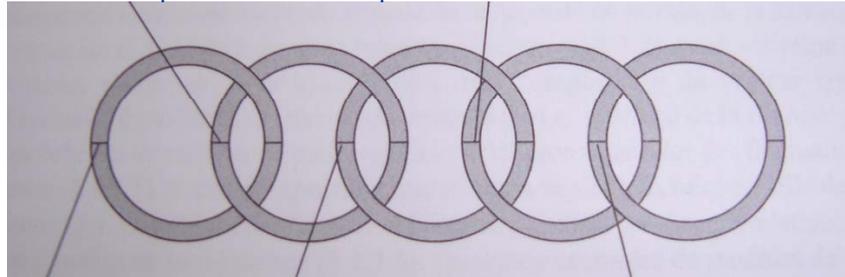
➤ Diversos campos de estudios implicados

- ☞ Mecánica de estructuras
- ☞ Mecánica de fluidos
- ☞ Meteorología
- ☞ Métodos estadísticos y probabilistas

"Cadena del viento" (A.G. Davenport)

Viento en la capa límite

Respuesta de la estructura



Climatología

Acciones aerodinámicas

Reglas de diseño

Efectos del viento sobre los puentes flexibles



Tres tipos de efectos :

- Efectos aeroelásticos
- Efectos debidos a la turbulencia
- Vibración de cables

Efectos del viento sobre los puentes flexibles



➤ Efectos aeroelásticos

- ☞ Producidos por la interacción entre el fluido (aire) y la estructura en movimiento
- ☞ Fenómenos que originaron la catástrofe del puente Tacoma

11

Efectos del viento sobre los puentes flexibles

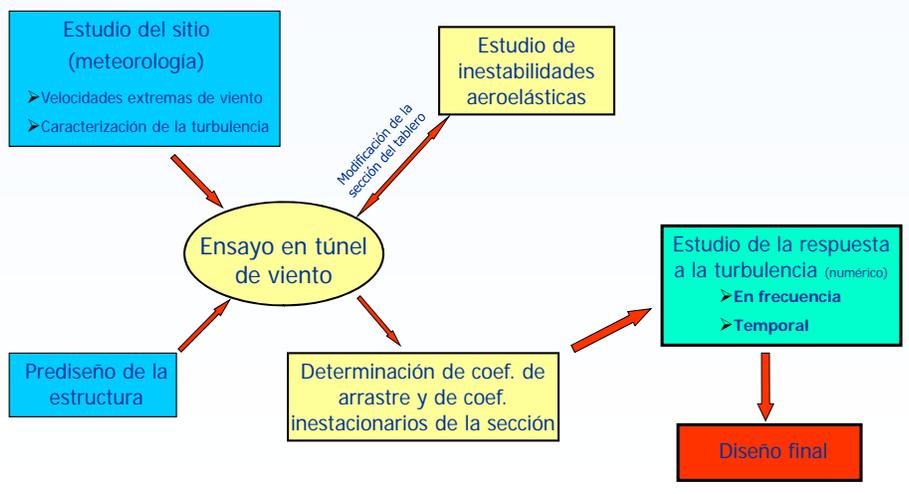


➤ Efectos debidos a la turbulencia

- ☞ Turbulencia = fluctuaciones en la velocidad del viento
- ☞ Fluctuación de las fuerzas inducidas por el viento sobre la estructura
- ☞ Excitación de la estructura por un fenómeno de resonancia

12

Metodología para el estudio de los efectos dinámicos del viento



✓ Estudios de sitio



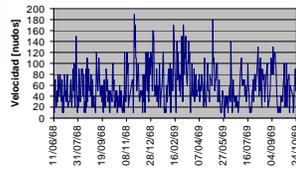
Estudio del sitio



➤ Mediciones en el sitio (y estaciones cercanas) :

- ☞ Velocidades del viento
- ☞ Direcciones principales de viento
- ☞ Caracterización de la turbulencia

➤ Basados en registros históricos :



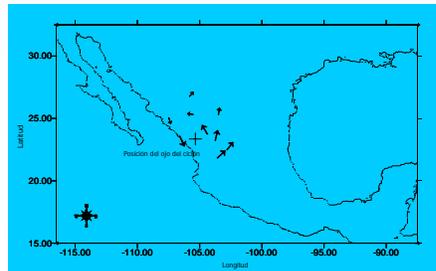
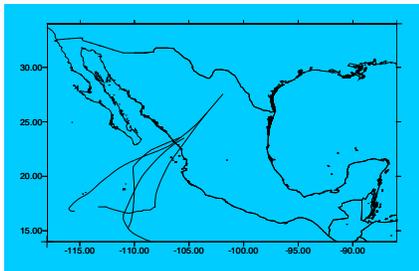
15

Efectos de fenómenos extraordinarios



➤ Huracanes

Trayectoria Huracán => Velocidad en el sitio => Estudio probabilista



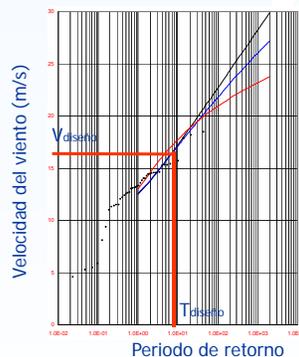
16

Estudio del sitio



Estudio probabilista

- Fenómenos estacionales
- +
- Fenómenos extraordinarios



Resultados :

➤ Velocidades de diseño

- E.L. Servicio: Fatiga, Confort de usuarios, etc.
- E.L. Último: Resistencia, Estabilidad aeroelástica

➤ Modelo de viento (turbulencia)

17

Modelo de Viento



Velocidad media



Roughness: $z_0^* = 0.005$ mm; average speed at 10 m: $\bar{U}_{10} = 32.3$ m/sec

Intensidad de turbulencia
(Variabilidad de la velocidad)



Turbulence intensities: $I_u = 0.11$; $I_v = 0.11$; $I_w = 0.07$

Escalas de turbulencia

(dimensión media de los torbellinos)



Longitudinal scales: $L_y^u = 185$ m; $L_y^v = 60$ m; $L_y^w = 30$ m



Transverse scales: $L_x^u = 75$ m; $L_x^v = 90$ m; $L_x^w = 30$ m



Vertical scales: $L_z^u = 40$ m; $L_z^v = 30$ m; $L_z^w = 20$ m

Escalas de coherencia

(correlación espacial de la velocidad)



Lateral coherence: $C_x^u = 11$; $C_x^v = 4,5$; $C_x^w = 12$



Vertical coherence: $C_z^u = 11$; $C_z^v = 4,5$; $C_z^w = 12$

✓ Estudios en túnel de viento

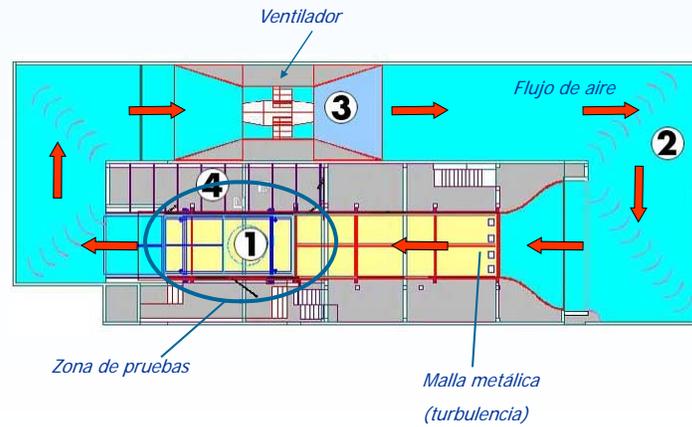
Estudio en túnel de viento

- Simulaciones numéricas (CFD)
 - ☞ Buenos resultados en aeronáutica (secciones aerodinámicas)
 - ☞ Resultados malos para elementos de puente (secciones no aerodinámicas)
 - ☞ Necesidad de estudios experimentales
- Túnel de viento
 - ☞ Ensayo sobre modelos a escala (maquetas)
 - ☞ Diferentes tipos de "maquetas":
 - Puente completo
 - Claro principal (taut-strip)
 - Sección del tablero
- ☞ Problema: mayor escala = menor precisión



Escala de la maqueta

Esquema de un túnel de viento



21

Estudio en túnel de viento



➤ Condiciones de equivalencia: *maqueta - estructura*

☞ Equivalencia de **No. de Reynolds**

Relación entre fuerzas de inercia y viscosas

☞ Equivalencia de **No. de Strouhal**

Relación entre escala geométrica y de velocidades

☞ Equivalencia de **No. de Froude**

Relación de la fuerza gravitatoria

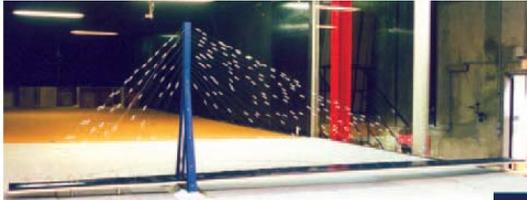
☞ Equivalencia de **Masa**

☞ Equivalencia de **Amortiguamiento**

Estudio en túnel de viento



➤ Maqueta de puente completo



Objetivo:

- ☞ Verificar comportamiento global
- ☞ Estudiar efectos de la topografía



☞ Gran escala es necesaria = falta de precisión

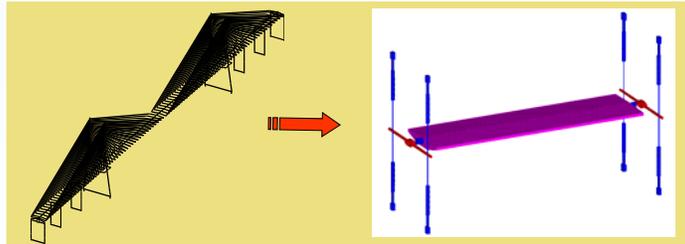
23

Estudio en túnel de viento



➤ Maqueta de una sección del tablero

☞ Montaje flexible ⇒ Características dinámicas (cálculo por elemento finito)



Objetivo:

- ☞ Medición de coeficientes de arrastre $F(U,C)$
- ☞ Evaluación de efectos aeroelásticos :
 - ⇒ Modificación de la sección en caso de ser necesario
 - ⇒ Medición de coeficientes inestacionarios

24

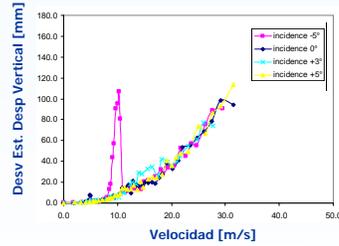
Estudio en túnel de viento



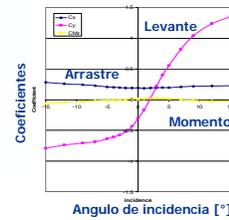
➤ Maqueta de una sección del tablero



Verificación de la estabilidad



Determinación de coeficientes de arrastre

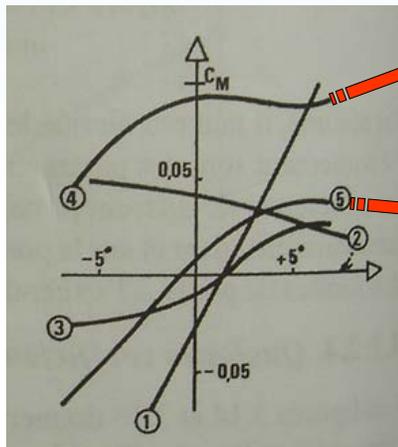


25

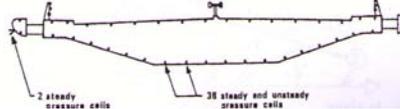
Estudio en túnel de viento



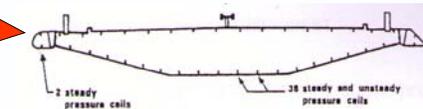
➤ Ejemplo : Optimización de las sección Puente de Normandía (Francia)



Sección Original



Sección Modificada



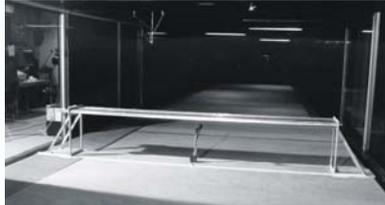
Estudio en túnel de viento



➤ Maqueta "taut-strip" (*hilo tendido*)

☞ Montaje sobre cuerdas tensadas = Características dinámicas

Periodos de vibración + formas de los modos de vibrar (claro central)



Objetivo:

- ☞ Verificación del comportamiento "global"
- ☞ Evaluación de efectos aeroelásticos
 - ⇒ Modelo intermedio entre el "seccional" y "completo"
 - ⇒ Mejor precisión que el modelo de puente completo

27

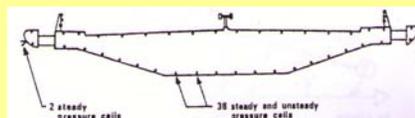
Estudio en túnel de viento



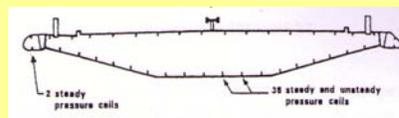
➤ Resumen :

- ☞ Validar la forma de la sección
- ☞ Evitar inestabilidades aeroelásticas
- ☞ Cambiar la forma de la sección en caso de ser necesario:

Ejemplo : Sección del tablero del puente de Normandía



Original



Modificada

- ☞ Maqueta seccional buen compromiso entre:

Representatividad + Precisión(escala) + Costo

Coefficientes de arrastre => diseño de la estructura

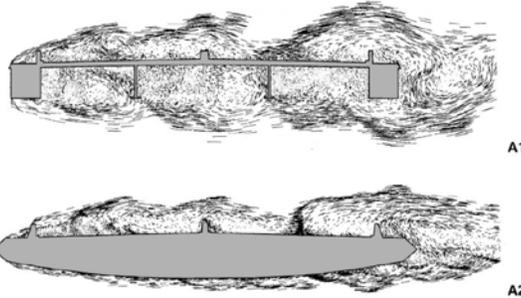
Coefficientes inestacionarios => casos especiales

28

Simulación numérica



- CFD = Resolución ecuaciones Navier-Stokes
 - ☞ Secciones con aristas = Dificultad de cálculo
 - ☞ Método *Discrete Vortex Shedding*
Buenos resultados cuantitativos



- ☞ Útil para definir ensayos en túnel de viento



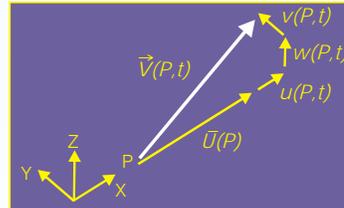
- ✓ Cálculo numérico de la respuesta y diseño

Modelado del viento



➤ Hipótesis:

$$\vec{V} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{U}(P) \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{u}(P,t) \\ \mathbf{v}(P,t) \\ \mathbf{w}(P,t) \end{array} \right\}$$



Caracterización de la turbulencia :

- Intensidades de turbulencia $I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}}, I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{U}}, I_w = \frac{\sigma_w}{\bar{U}}$
- Escalas de turbulencia L_x^u, L_x^v, L_x^w
- Función de coherencia $\gamma(P_1, P_2, n)$
- Densidades interespectrales de potencia $S_u(n), S_w(n), S_{uw}(n)$

31

Modelado del viento



➤ Cálculos en frecuencia

- ☞ Se requieren densidades espectrales de potencia
- ☞ Varias formulaciones existentes (Von Karman, Kaimal, etc.)
- ☞ Formulaciones función de: Velocidad, Intensidad y escala de turbulencia

➤ Cálculos paso a paso (temporales)

- ☞ Se requieren registros de velocidades de viento (v,t)
- ☞ Estos registros se pueden generar « artificialmente » a partir de un espectro fuente

Método de Shinozuka :

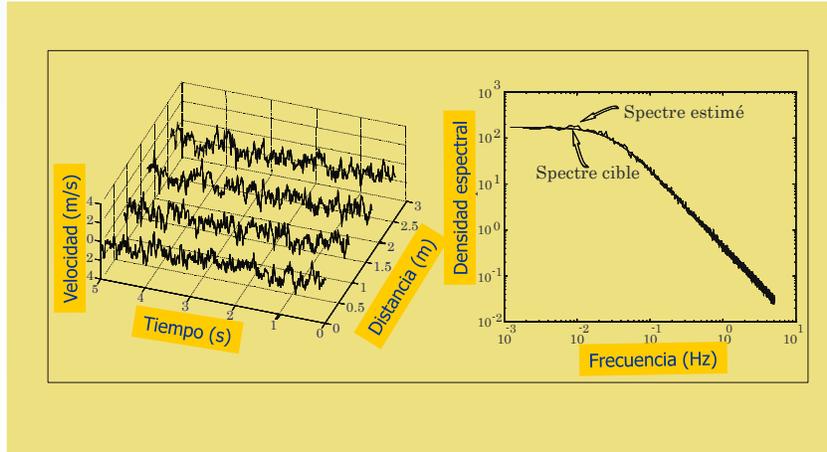
$$u_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{k=1}^N \left\{ |H_{jm}(\omega_k)| \sqrt{2\Delta\omega} \cdot e^{i[\theta_{jm}(\omega_k) + \phi_{mk}]} \right\} e^{\frac{i2\pi kt}{M}}$$

32

Modelado del viento



➤ Ejemplo de señales sintéticas :



33

Fuerzas inducidas por el viento



The diagram shows a rectangular plate of width B in the y -direction. Wind velocity \vec{U} is shown as a horizontal vector. A vertical vector \vec{u} represents a fluctuation. On the plate, a normal force F_N acts upwards, a tangential force F_T acts to the right, and a moment M is shown as a curved arrow.

➤ **Expresión lineal de las fuerzas**

$$\begin{Bmatrix} F_N(\vec{V}, t) \\ F_T(\vec{V}, t) \\ M(\vec{V}, t) \end{Bmatrix} = \underbrace{\{F(\vec{V}, t)\}}_{\text{Estáticas}} = \underbrace{\{F^s(\bar{U})\}}_{\text{Estáticas}} + \underbrace{\{F^A(\bar{U}, \vec{d}, t)\}}_{\text{Inestacionarias (aeorelásticas)}} + \underbrace{\{F^T(\bar{U}, \vec{V}', t)\}}_{\text{Turbulencia}}$$

34

Fuerzas inducidas por el viento

➤ Fuerzas estáticas

$$\{f^S(\bar{U}, P)\} = P\{C\}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho B \bar{U}^2, \quad {}^t\{f^S(\bar{U}, P)\} = \{F_T^S(\bar{U}, P, t), F_N^S(\bar{U}, P, t), M^S(\bar{U}, P, t)\}; \quad {}^t\{C\} = \{C_T, C_N, BC_M\}$$

➤ Fuerzas aeroelásticas

$$\{f^A(\omega, P)\} = [a(\omega)]\{\dot{d}(\omega, P)\} + [b(\omega)]\{d(\omega, P)\}$$

$$[a(\omega)] = P \begin{bmatrix} P_1^*(K) & P_5^*(K) & BP_2^*(K) \\ H_5^*(K) & H_1^*(K) & BH_2^*(K) \\ BA_5^*(K) & BA_1^*(K) & B^2A_2^*(K) \end{bmatrix}; \quad [b(\omega)] = P \begin{bmatrix} P_4^*(K) & P_6^*(K) & BP_3^*(K) \\ H_6^*(K) & H_4^*(K) & BH_3^*(K) \\ BA_6^*(K) & BA_4^*(K) & B^2A_3^*(K) \end{bmatrix}$$

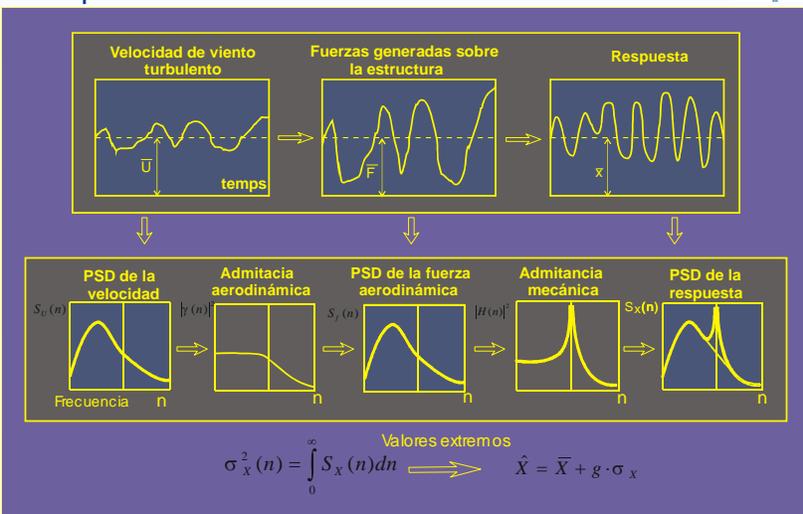
➤ Fuerzas debidas a la turbulencias

$$\{f^T(t, P)\} = P\{C\} \frac{2u(t)}{\bar{U}} + P \left\{ \frac{dC}{d\alpha} \right\} \frac{w(t)}{\bar{U}}$$

$${}^t\{f^T(t, P)\} = \{F_T^T(t, P), F_N^T(t, P), M^T(t, P)\}; \quad {}^t\left\{ \frac{dC}{d\alpha} \right\} = \left\{ \frac{dC_T}{d\alpha}, \frac{dC_N}{d\alpha}, B \frac{dC_M}{d\alpha} \right\}$$

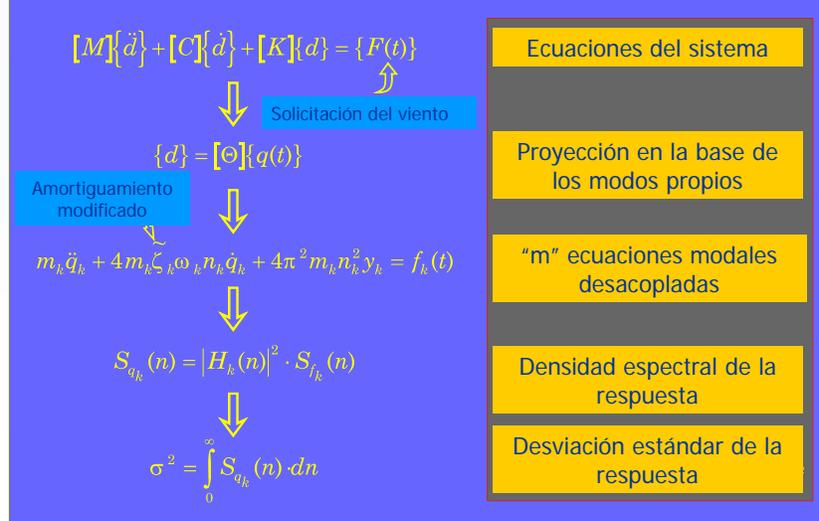
Cálculo de la respuesta a la turbulencia

➤ Esquema de cálculo



Cálculo de la respuesta a la turbulencia

➤ Método clásico (cuasi-estacionario)

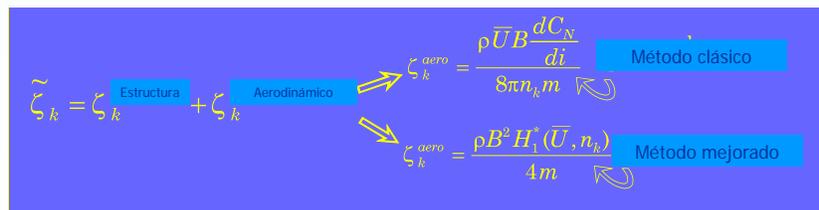


37

Cálculo de la respuesta a la turbulencia

➤ Amortiguamiento modificado

- ☞ El amortiguamiento se modifica por un término de "amortiguamiento aerodinámico"
- ☞ El amortiguamiento aerodinámico depende de la derivada del coeficiente de "levante" del tablero



38

Cálculo de la respuesta a la turbulencia



➤ Cálculo paso a paso (temporal)

$$[M]\{\ddot{d}(t)\} + [C]\{\dot{d}(t)\} + \{P(t)\} = \overbrace{\{F^A(\bar{U}, \bar{d}, \dot{d}, t)\}}^{\text{Aeroelásticas}} + \overbrace{\{F^T(\bar{U}, \bar{V}, t)\}}^{\text{Turbulencia}}$$

Fuerzas desarrolladas por la estructura

Sistema non-lineal integración numérica (Newmark)

$$\left[[M] \frac{4}{\Delta t^2} + [C] \frac{2}{\Delta t} + [K^{lg}] \right] \{\Delta d\}^{(k)} = \{\Delta R\}^{(k-1)} \Rightarrow \{d(t + \Delta t)\}^{(k)}$$

Donde :

$$\{\Delta R\}^{(k-1)} = \underbrace{\{F^A(t + \Delta t)\}^{(k-1)}}_{\text{Fuerzas aeroelásticas}} + \underbrace{[D]\{V^s(t + \Delta t)\} - \{P(t + \Delta t)\}^{(k-1)}}_{\text{Viento simulado}} + \dots$$

39

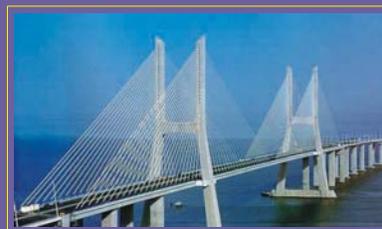
Ejemplo de aplicación



➤ Puente Vasco de Gama (Portugal)

Estudio de la respuesta aerodinámica

- Píente atirantado
- Pilas en concreto reforzado
- Tablero en concreto presforzado
- Longitud = 830 m
- Claro central = 420 m
- Viento de diseño 160 km/hr

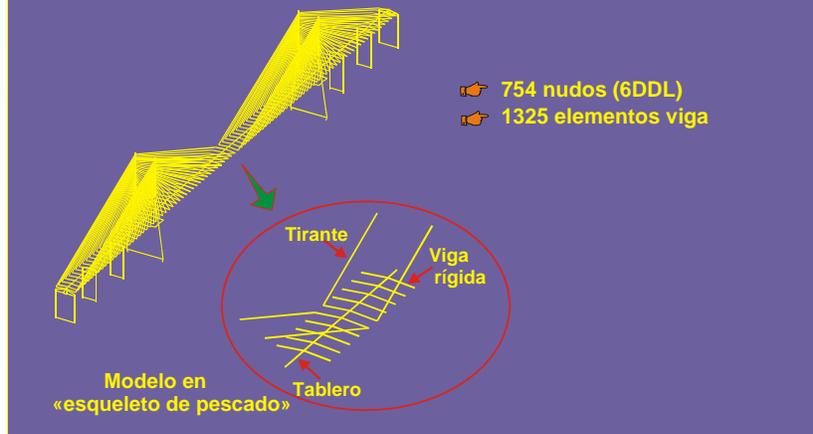


40

Ejemplo de aplicación



> Puente Vasco de Gama Modelo por elemento finito

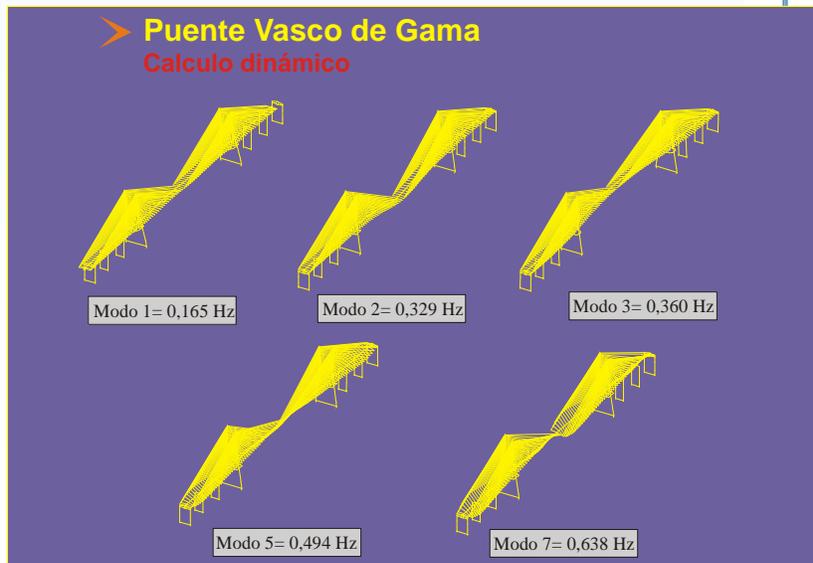


41

Ejemplo de aplicación

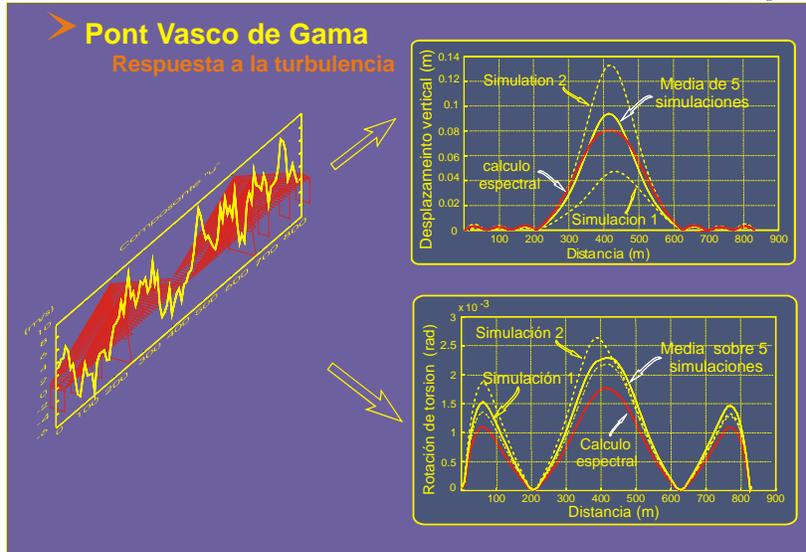


> Puente Vasco de Gama Calculo dinámico



42

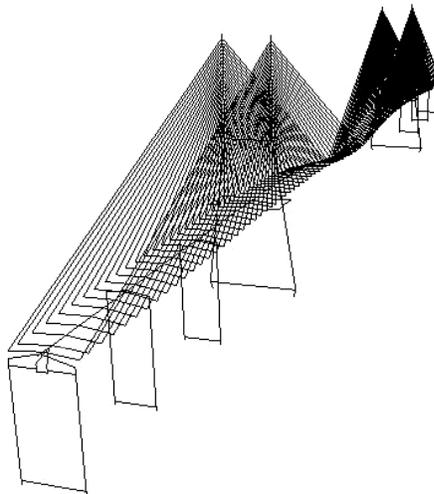
Ejemplo de aplicación



Puente Vasco de Gama



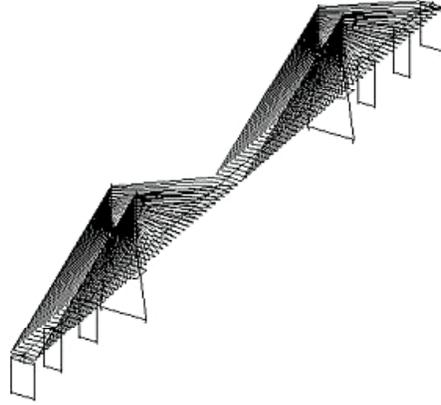
➤ Respuesta del puente al viento de diseño (animación)



44

Puente Vasco de Gama

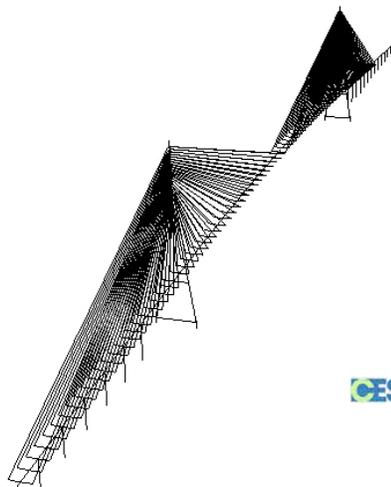
➤ Respuesta del puente al la velocidad de inestabilidad (animación)



45

Puente de Normandia

➤ Respuesta del puente al la velocidad de diseño (animación)



ESAR

46

✓ Vibración de tirantes

47

Vibración de tirantes

- Excitación periódica = posibilidad de vibración
- Este fenómeno no pone en riesgo la estabilidad de la estructura....sin embargo:
 - ☞ Inquietud para los usuarios
 - ☞ Posibilidad de daño por fatiga en los cables
- **Necesidad de controlar la magnitud de las vibraciones !!!**

Fenómenos que generan vibración de tirantes



- Generación de torbellinos de Von Karman (Vortex Shedding)
- Acción del viento turbulento (buffeting)
- Galopeo (galloping)
- Fenómeno lluvia + viento
- Excitación paramétrica

Generación de torbellinos de Von Karman



- Desprendimientos de torbellinos de manera alternada en los extremos de la sección
- Posibilidad de fenómeno de resonancia si la frecuencia de la generación de los torbellinos coincide con la del tirante...
- La velocidad de viento que puede excitar los primeros modos de vibración de los tirantes ($N < 2$ Hz) es muy baja,

☞ Energía limitada = poca excitación

➤ **Conclusión :**

☞ **Riesgo limitado – Instalación de amortiguadores**

Acción del viento turbulento

- Vibraciones proporcionales a la velocidad del viento
 - ☞ Riesgo de fatiga limitado
- Oscilaciones extremas ante vientos extremos
- Oscilaciones limitadas por:

☞ Amortiguamiento aerodinámico

☞ Nivel de tensión de los tirantes



$$\delta_{a\text{ Trans}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot U \cdot D \cdot C_D}{2 \cdot \mu \cdot \omega_k}$$

$$\delta_{a\text{ Long}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot U \cdot D \cdot C_D}{\mu \cdot \omega_k}$$

➤ **Conclusión :**

☞ **Riesgo limitado – Instalación de amortiguadores**

Galopeo

- Fenómeno de inestabilidad que se produce en en estructuras no aerodinámicas
- Puede producirse a bajas velocidades de viento
- Originado por un “amortiguamiento aerodinámico” negativo

☞ Para secciones circulares no existe “amortiguamiento aerodinámico” negativo

☞ Imposibilidad de galopeo de tirantes circulares

➤ Estudios experimentales japoneses

$$V_c = 35 \cdot D \cdot N_k \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \xi}{\rho \cdot D^2}}$$

☞ Formulación extremadamente conservadora

☞ En contradicción con obras existentes

➤ **Conclusión :**

☞ **En general riesgo limitado para tirantes**

Fenómeno lluvia + viento



- La presencia de una película de agua modifica la forma de la sección del tirante
- Este fenómeno se produce para velocidades del viento bajas (entre 8 y 15 m/s)

Tirante sin protección (video)



Tirante con dispositivo de atenuación (video)

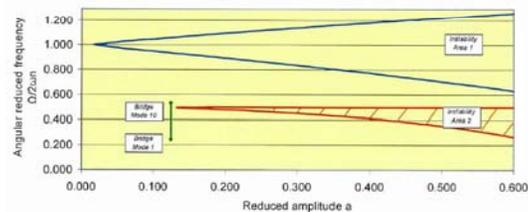


Excitación paramétrica



- Vibración provocada por movimiento de los anclajes
- Movimientos originados por : Viento o tráfico
- Componente de desplazamiento en la dirección del cable particularmente nociva
- Puede producirse a bajas velocidades de viento
- Riesgo si los períodos de vibración de los tirantes coinciden con los primeros modos de vibración de la estructura (o con $0.5 T$)

☞ Diagrama es estabilidad



Vibración de tirantes

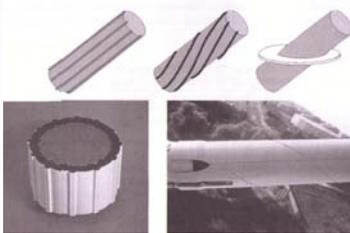


- Dispositivos para reducir vibraciones

Cables transversales



Fundas modificadas



Amortiguadores



55



Gracias por su atención