

Análise Dinâmica no TQS: Parte 3 - Vento

1. Introdução

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações, no vento natural existem rajadas, as quais são caracterizadas por flutuações do módulo e da orientação da velocidade instantânea do ar em torno da velocidade média. Tais flutuações da velocidade podem induzir oscilações importantes na direção da velocidade média em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas. Essas oscilações são designadas como resposta flutuante da estrutura à carga de vento.

Nesta terceira parte do conjunto de textos sobre os recursos de análise dinâmica presentes no sistema TQS[®] serão abordadas as ferramentas de análise dos efeitos dinâmicos devidos ao carregamento de vento. Conforme exposto na Parte 1 (http://tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/55-dinamica/294-analise-dinamica-no-cadtqs-parte-1--introducao), atualmente o sistema conta com duas ferramentas para análise da resposta flutuante:

1. Vento Dinâmico (ABNT NBR 6123:1988): verificação dos limites de acelerações do edifício para conforto perante a ação do vento, seguindo a metodologia de cálculo da Seção 9 "Efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica" da ABNT NBR 6123:1988;

2. Vento Sintético: avaliação dos efeitos dinâmicos do vento no edifício com base no Método do Vento Sintético criado pelo Prof. Dr. Mário Franco e adaptado pelo Eng. Dr. Sérgio Pinheiro Medeiros. Esta análise é feita apenas no modelo de pórtico espacial.

Como estas análises dependem dos modos de vibração da estrutura, é importante verificá-los e validá-los antes de validar os resultados da análise dos efeitos dinâmicos do vento.

São apresentados aqui os dados de entrada para cada uma das análises e a visualização dos resultados.

2. Vento Dinâmico (ABNT NBR 6123:1988)

Desde a versão 14, o sistema TQS[®] possui o cálculo de acelerações induzidas por vento segundo o processo presente na Seção 9 – Efeitos Dinâmicos Devidos à Turbulência Atmosférica da norma ABNT NBR 6123:1988, o que permite a verificação do conforto humano em edificações perante rajadas de vento.

Esse recurso é executado durante o Processamento Global do edifício e é habilitado quando se ativa a análise dinâmica no pórtico, através de Dados do edifício >> Modelo >> Análise dinâmica. (Fig.1)

Dados do edificio: Projeto TQS_DDIAMICA - 6011			13	
	Gerais Modelo Pavimentos Mater	iais Cobrimentos Cargas Cittérios	Gerenciamento	
	Modelo estrutural do edificio: I C Modo manual		2	
	II C Estorços verticais por vigas o	ontinuas ou greihas, sem vento	?	
	III C Esforços verticais por vigas o	u greiha, vento por pórtico espacial	7	
Sarte escuenciico	IV (* Modelo de vigas e planes, lles	 IV F Modelo de viger e plaser, fesibilizado contorne critérior. V C Modelo comparto de Pórico/Enduso/Vigeo (versão 10 e anteriores) 		
See Lot 198	V C Modele conjunto de Pórtico/D			
	VI 🦳 Modelo de vigas, pilares e lajo	ss. Rexibilizado conforme critérios.	?	
	- Modeler independenter			
	A estrutura se comporta como la	um corpo único, sem juntas ou torres se	sparadas	
	C Commentamento de comos sem	andre net amaros essintar sebar3	o de vento	
		a area bor askatos os barrar, ose ata		
	Vigas de transição / firantes	Processo P-Della	Anilize districa	
	Interação Solo-Estruturas	Pié-moldados	Efeito incremental	
	D edifício será modelado por un	co espacial mais os modelos dos pavin	entos (vigas continuas ou	
	grePust). O pórtico setá correctio ape de distrarma ticido des las muidans	nas por barras que sinulare as vigas e ente incornosado. Os eleitos osundos o	plarez da estrutura, com o efeito	
	Calculo do portico espacial com analise	dinámica as lajes, some	nte os efeitos gerados pelas ações	
		as de lajes sob	re as vigas serão transferidas	
Transa Mar	Eletuar o calculo do portico com analise	dinamica entre entro, as cargo	ambos os modelos (pórtico as das lajes serão transferidas para	
	Nos pórticos calculados com análise dinânie pode venificar o comportamento global da es	ca, o engenheiro para vigas de itrutura guanto acs i viga pilar, a s	transição e que suportam tirantes eparação de modelos especificos	
tualizar Dwg Salvar Dwg 🕮 🔍 🚳	a R modec de vibreção	inte: de não-la	nearidade física, são controlados	
Duplicar Benomen	Un exemplo interessante acontece en esta	ituras esbeitas, onde		
	pugerir a necessidade de auvento da rigide	z global da estrutura.		
onto			Ok Cancelar	
		T front 1		
	04	Cancelar		

Figura 1: Ativação da análise dinâmica do pórtico espacial

Os dados necessários para calibrar essa análise ao edifício estão presentes na aba Cargas da edição de Dados do edifício. Na seção Vento, são definidos os dados de velocidade básica, fatores S1, S2 e S3 e os coeficientes de arrasto para cadasentido de incidência do vento. (Fig.2)

					NOT THE OWNER OF THE OWNER	20	Âr	vgulo C.A.	Def Cot	Cot N
					VU - Veocidade bacica	30	1	90	1.1 Não	0
	Carle escu	enolico			S1 - Fator do terreno	1,00	3	0 1	.33 N5o	0
erian (98)		<u> </u>		***	52 - Categoria de suporidade	IV	4	180 1	.33 NŠo	0
					S2 - Classe da edilicação	8				
			1		S3 - Falor estatístico	1.00	Concil		1	
				a.ut	Correcto constante a constante e	da formar	juota in	icial para apica	çao de venio	
H 99		_			Calcilla de Hello Fall partas	de tornes.	Indelit	Apa	200	Calcular DA:
	90 A	ngulo de	Tabela	a de excentrició	lades e força	e impostas				
				-ut	Les Tros	icidência de ento	Excen	tricidades do ca	so seleciona	do
					180-14-20		Санер	ar tabelac de tú	nel de vento	
				and the	ave 4	wancado .	IT For	ças impostas no	sistema glob	lei
H 100			1		270 _		□ Inv	erter o sinal das	forças impos	tan
tele III	a interior			- 19	Ensure a continuir name o the de-	, de conto contos		a anna cilian an an	france and series	in conde encode
10.00 MI	Secon				no item "Excentricidades".			e especialque ve	ecres especies	
	II Prove									
		s locita	est est	100						
COMPANY IN THE REAL OF A	arvai Divig 🔰 🕷	D 1211		100						

Figura 2: Dados de entrada para carregamento de vento

Na seção Adicionais, deve-se acessar a subseção Vibrações para definir o número de modos de vibração a serem utilizados na análise, os fatores de conversão de força em massa e a taxa de amortecimento. (Fig.3)

				the first first starting the	A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR OFTA CONTRACTOR O	and the second s
				Empuno Temperatura Retração Desaprum	o Hiperestático Vib	rações Incêndio Sismo Outra
	Conte exquenc	tica		Gueber de laire e métérer de uner e mèrer	-	
-	No. of Concession, Name			Préterrar com planar untra a laine	10	
]			1.4	Poncos con pases, rigas e iges	Int	
			- may	Casos que definem a massa de estrutura		
[1		Pondesado	
[740		1	Peso próprio	1	
[1	Carga: permanente:	1	
[1	Sobrecargae	1	
][4			
10				Análise delanista de vento	1.000	
[4 19-94		1 Jone	
• ••• [1	Taxa de anortecimento para análize dinâmica o	de vento, válido para to	dos os modos de vibração
			1			
			1 1	2		
	LDOBA	· · · · · ·	All a stand			
1.0.0		l milio	I mail and			

Figura 3: Dados de entrada de modos de vibração, massa da estrutura e taxa de amortecimento Conforme destacado na Fig.3, o valor de taxa de amortecimento definida aqui é válido para todos os modos de vibração nesse tipo de análise dinâmica de vento. Clicando-se no ponto de interrogação ao lado do campo da taxa de amortecimento, encontra-se uma tabela de tipos de perturbação e de estrutura e suas respectivas taxas de amortecimento. (Fig.4)

Taxa de amortecime
0.020
0.013
0.005
0.007
0.013
0.010
0.004
0.006
0.015
0.025
) 0.020
0.010
0.010
0.008
0.040
0.020
0.020
- Lawrence

Figura 4: Tipos de perturbação e estruturas e respectivas taxas de amortecimento

Após o Processamento Global, os resultados de acelerações nas direções globais X e Y são apresentados em uma tabela para cada sentido do vento no Resumo Estrutural, na seção Comportamento em Serviço – ELS, em Conforto perante a ação do vento. (Fig.5)

ar Para	imetros de	Referencia					
-	1						
	the second se						
_							
1 Vis	b sohepikus	e relatorios HTML - RESEST.HTM					
RE	SEST.HTM						
1	Comp	ortamento em Se	vico - ELS				
1							
	Desloca	mentos horizontais					
	Alture +	otal do edificio - N (m) 40.0				
	Altura e	entre pisos - Hi (m)	3.0				
	D	eslocamento Va	Lor maximo (cm)	Caso		eferência (cm)	Situação
	Topo do	edificio (cm)	(8/ 4028) .99		9	(8/ 1700) 2.35	10.06
		fann famil	ARGE AREAL AN		-	1111 (0.50) 0.5	00
	Entre p	1303 (cm)	(Hi/ 2751) .11		9	(Hi/ 850) .35	OR
	Entre p	1903 (cm)	(Hi/ 2751) .11	espac	9	(Hi/ 850) .35	OK
	Entre p Clique d	isos (cm) Aqui para abrir visua.	(Hi/ 2751) .11	еврас:	9 ial	(Hi/ 850) .35	OK
	Entre p Clique d Clique d	isos (cm) 1990 para abrir visua. 1990 para maiores dete	(Hi/ 2751) .11	espac:	9 ial	(Hi/ 850) .35	OK
	Entre p Clique (Clique (isos (cm) aqui para abrir visua aqui para maiores dete	(Hi/ 2751) .11	espac:	9 ial	(Hi/ 850) .35	OK
ľ	Entre p Clique (Clique (Conforto	isos (cm) nqui para abrir visua nqui para maiores dete o perante a ação do ven	(Hi/ 2751) .11 lizador de pórtico e alhes em relatório to	espac:	9 ial	(Hi/ 850) .35	OK
	Entre p Clique d Clique d Conforte Case	isos (cm) aqui para abrir visua. aqui para maiores dete o perante a ação do ven Aceleração X (m/s2)	(Hi/ 2751) .11 lizador de pórtico e alhes em relatório to Aceleração Y (m/s	espac: 2)	9 ial Perc	(Hi/ 850) .35	OK
	Entre p Clique o Clique o Conforto Case 7	isos (cm) aqui para abrir visua. aqui para maiores dete o perante a ação do ven Aceleração X (m/s2) .001	(Hi/ 2751) .11 lizador de pórtico e alhes em relatório to Aceleração ¥ (m/s	2) 084 P	9 ial Perc	(Hi/ 850) .35 epção humana ivel	OK
	Entre p Clique (Clique (Conforto Case 7 8	isos (cm) aqui para abrir visua aqui para maiores dete o perante a ação do ven Aceleração X (m/s2) .001	(Hi/ 2751) .11 Lizador de pórtico e alhes em relatório to Aceleração Y (m/s	2) 084 P 084 P	9 ial Percept Percept	(Hi/ 850) .35 epção humana ivel	OK
	Entre p Clique (Clique (Conforte Case 7 8 9	isos (cm) aqui para abrir visua. aqui para maiores dete o perante a ação do ven Aceleração X (m/s2) .001 .001 .154	(Hi/ 2751) .11 Lizador de pórtico e alhes em relatório to Aceleração X (m/s	espac: 2) 084 P 084 P	9 ial Percept ercept incomo	(Hi/ 850) .35 epção humana ivel ivel	OK

Figura 5: Visualização dos resultados de conforto perante ação dinâmica do vento no Resumo Estrutural De acordo com a aceleração calculada para cada sentido de vento aplicado no edifício, é feita uma classificação referente a níveis de percepção humana: imperceptível, perceptível, incômoda, muito incômoda e intolerável. As acelerações limites entre esses níveis são, respectivamente: 0,5% g, 1,5% g, 5% g e 15% g, onde g é a aceleração da gravidade. Na Fig.6 é apresentado o diagrama de percepção humana a vibrações originadas pelo vento encontrado em Bachmann et al.(1995).



Figura 6: Percepção humana a vibrações originadas pelo vento (BACHMANN et al, 1995)

3. Vento Sintético

A partir da versão 17 do TQS[®] (Pacote Pleno), é possível realizar a avaliação dos efeitos dinâmicos do vento tendo como base o Método do Vento Sintético criado por Franco (1993). Este método pressupõe a divisão do carregamento de vento na direção do fluxo em uma parcela flutuante e uma média, esta aplicada estaticamente à estrutura. A parcela flutuante, por sua vez, é dividida em uma série de 11 componentes harmônicos de fases aleatórias, com um deles de frequência ressonante com a estrutura.

Esse recurso está acoplado ao visualizador de análise dinâmica de pórtico espacial. Uma vez dentro desse visualizador, deve-se acessar "Time-history >> Fazer análise no tempo" (Fig. 7).

Arquivo Exibir Resultados	Time-history	<u> </u>
8 R Q Q Q 2 Q	Fazer análise no tempo 🥓	
Piso Inicial: 00 💌 Piso Final	Analise Modal	Animer Velocidade:

Figura 7: Acesso à análise pelo Método do Vento Sintético dentro do visualizador de análise dinâmica Os dados de entrada para geração dos harmônicos pelo Método do Vento Sintético são definidos na aba "Vento" da janela "Time-history (Análise de respostas no tempo)", conforme indicado na Fig. 8.

Time-history	Análise de respo	ostas no	tempo}			
Informações	Amortecimento	Vento	Carregamentos	Excitações	Combinações	Resultados

Figura 8: Aba "Vento" para entrada de dados para o Método do Vento Sintético

Então se definem:

Velocidade básica do vento em m/s;

Duração da rajada em s: se definido 0 (zero) será adotado o valor de 600s (10 minutos);

Ponderador da rajada γ_{π} ;

Correlação das velocidades na lateral: linear ou exponencial;

Resultado característico em função: deslocamento ou esforços.

Informações Amortecimento Vento	Carregamentos Excitações	Combinações Resultad	los
(1) Velocidade básica (m/s): 38,0	(2) Duração das rajadas (s): 0,0	(3) Ponderador da ra	sjada $\gamma_n:$ 1.00
Correlação na lateral: Linear	Resultado caracteri	sticoem função: Desloc	amento 💌

Figura 9: Dados de vento

Definir centro da rajada: deve-se selecionar um nó da estrutura como centro da rajada de vento;

Seleção do caso de vento;

Nó ou barra para determinação do vento característico;

Grau de liberdade: 0 – Direção do vento, 1 – Direção X, 2 – Direção Y.



Figura 10: Dados de rajada de vento

Para facilitar a seleção do nó do centro da rajada, pode-se: isolar o pavimento no qual se deseja lançar o centro de rajada através do comando "Pisos", ativar a numeração dos nós e, então, selecionar o nó através do comando "Definir centro de rajada" (Fig. 11).



Figura 11: Definição do centro de rajada isolando o piso

É possível lançar mais de uma rajada, clicando-se no botão "Adicionar" para criação de uma nova rajada. Em seguida, devem-se definir os dados da nova rajada relativos aos passos (6) a (9). Para cada rajada serão computados 11 harmônicos, os quais serão todos combinados apenas para a mesma rajada. Ou seja, não haverá combinação automática de harmônicos da rajada 1 com harmônicos da rajada 2.

Após a definição dos dados de entrada para o Método do Vento Sintético, clica-se no botão "Calcular" (Fig. 12).



Figura 12: Comando para cálculo dos harmônicos pelo Método do Vento Sintético

Assim, serão calculados os 11 harmônicos e os carregamentos atuantes em cada um dos harmônicos. Na aba "Carregamentos" são visualizadas as cargas lançadas para cada um dos harmônicos calculados (Fig. 13). Os períodos e as fases dos harmônicos são visualizados na aba "Excitações" (Fig. 14). A combinação dos harmônicos é visualizada na aba "Combinações" (Fig. 15). Os comandos apresentados nessas abas foram previamente explicados na Parte 2(http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/55-dinamica/296-analise-dinamica-no-cadtqs--parte-2--time-history).



Figura 13: Visualização dos carregamentos dos harmônicos



Figura 14: Visualização dos períodos e fases dos harmônicos

ajad	a 1; Verto 1	Adicio	1ar
		Remo	н
	Excitação	Multiplicador	Ŀ
1	01 - Rajada 1; Vento 1; Harmónico 1; T=0,321s; To=0,318s; H=1,00	1,000	0
2	02 - Rejada 1; Vento 1; Hamônico 2; T=0,565s; To=0,470s; M=1,00	1,000	
3	03 - Rajada 1; Vento 1; Harmónico 3; T=0,993s; To=0,434s; M=1,00	1,000	0
4	04 - Rajada 1; Vento 1; Harmónico 4; T=1,746s; To=0,745s; M=1,00	1,000	9
5	05 - Rajada 1; Vento 1; Harmônico 5; T=3,071s; To=1,794s; M=1,00	1,000	1
6	06 - Rajada 1; Vento 1; Harmônico 6; T=5,400s; To=2,909s; M=1,00	1,000	1
7	07 - Rajada 1; Vento 1; Harmônico 7; T=9,495s; To=9,258s; M=1,00	1,000	1
8	08 - Rajada 1; Yento 1; Harmônico 8; T=16,697s; To=14,821s; M=1,00	1,000	٥.
9	09 - Rajada 1; Vento 1; Harmónico 9; T=29,361s; To=12,130s; M=1,00	1,000	10

Figura 15: Visualização da combinação dos harmônicos

Antes de se partir para a análise dos efeitos dos carregamentos gerados pelo Método do Vento Sintético na aba "Resultados", deve-se verificar se as taxas de amortecimentos modais estão adequadas na aba "Amortecimento".

Parte-se em seguida para a aba "Resultados, onde é feita a análise das acelereções, velocidades e deslocamentos no domínio do tempo, devidos aos carregamentos gerados pelo Método do Vento Sintético (Fig. 14). Devem ser definidos: nó de interesse, combinação ou excitação e intervalo de tempo para análise. Então, clica-se em "Calcular".

É apresentado um diagrama junto ao nó, conforme apresentado na Fig. 14. Pode-se ainda trocar o tipo de diagrama (deslocamento, velocidade e aceleração) e a direção (X, Y e Z) sem necessidade de executar o cálculo novamente. Os comandos dessa aba também foram abordados na Parte 2.



Figura 16: Visualização dos resultados

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 6123:1988 – Forças Devido ao Vento em Edificações, ABNT, Rio de Janeiro, 1988.

BACHMANN, H. et al. Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines. Basel: Birkhauser, 1995, 234p.

BRASIL, R. M. L. R. F., SILVA, M. A., Introdução à Dinâmica das Estruturas, Blucher, São Paulo, 2013, 268p.

FRANCO, M., Direct Along-Wind Dynamic Analysis of Tall Structures, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PEF/9303, São Paulo, 1993.

FRANCO, M., MEDEIROS, S. R. P., O Método do "Vento Sintético" – Novas Considerações, TQSNews, V. 33, p. 38-46, São Paulo, 2011.